

Mobil-autarkes Monitoringsystem auf Basis von IoT und Open Data am Beispiel Hochwasser

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
Genehmigte Dissertation von Tim-Jonathan Huyeng aus Essen
Tag der Einreichung: 19.04.2023, Tag der Prüfung: 16.06.2023

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Bau- und
Umweltingenieurwissen-
schaften

Institut für Numerische
Methoden und Informatik im
Bauwesen

Mobil-autarkes Monitoringsystem auf Basis von IoT und Open Data am Beispiel Hochwasser

Genehmigte Dissertation von Tim-Jonathan Huyeng

Tag der Einreichung: 19.04.2023

Tag der Prüfung: 16.06.2023

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-244553

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/24455>

Jahr der Veröffentlichung auf TUprints: 2023

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist entstanden während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen (IIB) der Technischen Universität Darmstadt. Für die Möglichkeit, an diesem Institut zu arbeiten und zu promovieren, bin ich sehr dankbar.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel, der mir nicht nur die Möglichkeit zur Promotion gegeben hat, sondern meine Arbeit auch fachlich und konzeptionell begleitet hat. Seine Unterstützung und die Freiheit, meine Konzepte zu entwickeln, haben mir geholfen, diese Arbeit erfolgreich abzuschließen. Auch für die Übernahme des Erstreferats bin ich sehr dankbar.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann für die Übernahme des Korreferates danken. Seine motivierenden und bestärkenden Worte sowie sein fachlicher Input vor und während der Bearbeitungszeit haben die Verwirklichung dieser Arbeit ermöglicht.

Ebenso möchte ich mich bei Timo Bittner für die freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Seine hilfreichen Ratschläge und der fachliche Austausch haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Des Weiteren möchte ich mich bei Christian-Dominik Thiele, Patrick Scheich und Jascha Brötzmann für die Unterstützung bei der Korrektur dieser Arbeit und die gemeinsame Zeit am IIB bedanken. Der Austausch mit den Kollegen hat mir immer wieder neue Impulse gegeben und die Arbeit bereichert. Ich bedanke mich auch bei allen anderen Kollegen des IIB für die schöne Zeit.

Danken möchte ich auch meiner Familie und meinen Freunden, die mich in den letzten Jahren unterstützt und motiviert haben. Ganz besonders möchte ich mich bei Theresa für ihre Geduld und enormen Rückhalt während der Erstellung dieser Arbeit und darüber hinaus bedanken. Ohne ihre Hilfe wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Meinen Eltern und meiner Schwester danke ich für alles.

Tim-Jonathan Huyeng

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung	3
1.3. Aufbau und Methodologie der Arbeit	5
2. Katastrophenschutz am Beispiel Hochwasser	9
2.1. Grundlegende Begriffe	10
2.2. Regelungen und Akteure bei Hochwasserkatastrophen	12
2.2.1. Behördliche Ebenen im Katastrophenfall	13
2.2.2. Operative Organisation im Hochwassereinsatz	16
2.2.3. Einblick in Stabssoftware und Softwaresysteme	20
2.2.4. Aspekte des Hochwasserrisikomanagements	25
2.3. Datenerhebung und Informationsportale für den Hochwasserschutz	29
2.3.1. Hydrometrie - Wasserstandsmessung	30
2.3.2. Daten- und Informationsportale	32
2.3.3. Warnung der Bevölkerung	36
2.4. Hochwasserkatastrophe in Südwestdeutschland im Juli 2021	38
2.4.1. Ausgangslage	39
2.4.2. Analyse der MoWaS-Warnungen	39
2.4.3. Betrachtung der Umstände im Ahr-Einzugsgebiet	42
2.4.4. Zusammenfassung der Hochwassersituation im Ahrtal	51
3. Technische Grundlagen für ein mobil-autarkes Monitoringsystem auf IoT-Basis	55
3.1. Grundlegende Begriffe	55
3.2. Internet of Things (IoT)	56
3.2.1. Grundlagen zu Mikrocontrollern	56
3.2.2. IoT-Sensorik im Hochwasserschutz	58
3.3. Funkübertragungstechnologien	61
3.3.1. Mobilfunk	62
3.3.2. Low Power Wide Area Networks (LPWAN)	63
3.3.3. Technologievergleich	67
3.4. Anwendungsbeispiele	69
3.4.1. Einsatz von LPWAN und IoT-Sensoren im Katastrophenschutz	69
3.4.2. Monitoringsystem des THW (Mobiler Hochwasserpegel)	70
4. Grundlagen zu Open Data	73
4.1. Grundlegende Begriffe	73

4.2.	Aktueller Stand in Deutschland	74
4.2.1.	Paradigmenwechsel in der öffentlichen Verwaltung	74
4.2.2.	Initiativen zur Förderung von Open Data	75
4.3.	Erstellung und Verwendung von Dokumentationen öffentlicher Schnittstellen	79
4.3.1.	Spezifikationen von Schnittstellen mittels OpenAPI	79
4.3.2.	Vorgehensweise zur Dokumentation und Bereitstellung	80
4.3.3.	Open Data im Hochwasserschutz	84
4.3.4.	Potenziale und Herausforderungen von Open Data	85
4.4.	Standardisierung für Sensordatenschnittstellen	86
4.4.1.	SensorThings API (STA)	86
4.4.2.	Anwendung mit STA-Unterstützung	90
4.4.3.	Potenziale und Herausforderungen	91
5.	MOTARK: Konzept für ein mobil-autarkes Monitoringsystem	93
5.1.	Hintergrund und Motivation	93
5.2.	Komponenten und Teilbereiche	96
5.3.	Übertragung: Funktechnologie für ein mobil-autarkes System	97
5.3.1.	Detaillierte Betrachtung von LoRaWAN	100
5.3.2.	Monitoring mit autarker Funkübertragung	107
5.4.	Hardware: Datenaufnahme und mobile Basisstation	110
5.4.1.	IoT-Sensorik für den Hochwassereinsatz	110
5.4.2.	LoRaWAN-Gateway als mobile Basisstation	114
5.5.	Verarbeitung: Speicherung, Schnittstellen und Visualisierung	114
5.6.	Zusammenfassung der Softwarearchitektur	118
6.	EZSTA: Mapping-Konzept zur SensorThings API	119
6.1.	Hintergrund und Motivation	119
6.2.	Aufbau des EZSTA-Services	121
6.2.1.	Struktur der STA-konformen Schnittstelle	122
6.2.2.	Struktur des Mapping-Inputs	125
6.3.	Tools zur Verbreitung und Nutzung von EZSTA	127
6.3.1.	EZSTA-Web: Unterstützung bei der Erstellung eines Mapping Inputs	127
6.3.2.	EZSTA-List und EZSTA-Search: Öffentliche Mapping-Sammlung	128
6.4.	Zusammenfassung des EZSTA-Konzeptes	130
7.	Implementierung von MOTARK und EZSTA zur Unterstützung von Einsatzkräften durch mobil-autarkes Monitoring und Open Data	131
7.1.	Auswahl der Softwarekomponenten	131
7.2.	Auswahl der Hardware für das MOTARK-Einsatz-Set	141
7.2.1.	Vorstellung der mobilen Basisstation	142
7.2.2.	Basic-Sensor-Kit für den Hochwassereinsatz	143
7.2.3.	Programmierung des Mikrocontrollers	147
7.2.4.	Kostenzusammenstellung	151
7.3.	Implementierung des EZSTA-Systems	152
7.3.1.	Technische Umsetzung des Services	152
7.3.2.	Umsetzung der EZSTA-Tools	154
7.3.3.	Einbindung von EZSTA in MOTARK	158

8. Evaluation und Anwendungsbeispiel	161
8.1. Praktische Versuche des MOTARK-Systems	161
8.1.1. Untersuchungen des Wasserstandssensors	161
8.1.2. Untersuchungen der Datenübertragung	168
8.1.3. Zusammenfassung der Versuche	173
8.2. Anwendungsbeispiel: Ahrtal	175
8.2.1. Beispielhafter Einsatz eines MOTARK-Einsatz-Sets	175
8.2.2. Auswertung des Einsatzes im Kreis Ahrweiler	176
8.2.3. Verwendung von EZSTA	177
9. Zusammenfassung und Ausblick	181
Abkürzungsverzeichnis	187
Gesetzestextverzeichnis	188
Abbildungsverzeichnis	191
Tabellenverzeichnis	195
Literaturverzeichnis	197
A. Anhang	211
A.1. Warnkriterien des Deutschen Wetterdiensts	211
A.2. Warnmeldungen zum Hochwasser Juli 2021	212
A.3. LoRaWAN-Nachrichtenstruktur	213
A.4. MOTARK-Basic-Sensor-Set	214
A.5. EZSTA-Web	216
A.6. Praktische Versuche der Sensorik	217
A.7. Zusätzliche Karten der Feldversuche	221

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich zum einen mit der Entwicklung eines innovativen, robusten und mobil-autarken Monitoringsystems zur Unterstützung der Lagebeurteilung während einer Katastrophe. Zum anderen wird ein Konzept zur Standardisierung bestehender öffentlicher Datenschnittstellen zur Anreicherung von Lageinformationen im Katastrophenfall entwickelt. Dabei werden Konzepte und Komponenten aus den Bereichen Internet of Things (IoT, dt. Internet der Dinge), Funktechnologien und Open Data genutzt. Ziel des entwickelten Monitoringsystems ist es, den Einsatzkräften und der betroffenen Bevölkerung durch die unabhängige Erfassung von Zustandsänderungen, wie z. B. dem Anstieg eines Wasserspiegels, die räumlichen und dynamischen Auswirkungen und Entwicklungen einer Lage aufzuzeigen. Darüber hinaus sollen durch die Vereinheitlichung öffentlicher Daten auch diese zur Beurteilung der Situation herangezogen werden.

1.1. Motivation und Problemstellung

Unwetterereignisse wie Hochwasser sind aufgrund des Klimawandels in Zukunft auch in Deutschland häufiger zu erwarten [14], [82], [83], [114]. Die damit verbundenen Aufgaben der Sicherheitsbehörden reichen von der Vorsorge über die Überwachung bis hin zur aktiven Hilfeleistung im Hochwasserfall. Dabei sind die Einsatzkräfte in der sehr komplexen und dynamischen Situation auf die Vorhersagen und Modelle der zuständigen Behörden angewiesen. Diese Vorhersagen basieren u. a. auf Monitoringdaten und Wettervorhersagen. Für kleine Gebiete ist die Vorhersagequalität aufgrund der geringen Dichte z. B. von Pegeldata geringer. Gerade bei kleinen und mittleren Gewässern sind jedoch lokale Wasserstände für die Beurteilung der Situation vor Ort sehr wichtig. Hier können auch lokale Veränderungen durch Staueffekte oder Hochwasserwellen zu besonderen Lagen führen. Das Hochwasser im Juli 2021 in Deutschland hat insbesondere im Ahrtal erschreckend gezeigt, wie unterschiedlich und mit welcher Wucht ein Hochwasser auftreten kann. Für die Verantwortlichen in den Einsatzzentralen bilden neben den Vorhersagen die Berichte der Einsatzkräfte sowie Monitoringdaten die Grundlage für Entscheidungen. Gerade in extremen Hochwasserereignissen sind spezifische, datenbasierte Informationen notwendig, um in unübersichtlichen und belastenden Situationen die richtigen Entscheidungen treffen zu können. Die Umsetzung in leicht verständliche Datendarstellungen der erfassten Situation durch Monitoringsysteme stellt dabei eine Herausforderung dar. Am Beispiel des Ahrhochwassers, bei dem hauptsächlich die Daten des Pegels Altenahr zur Situationsanalyse herangezogen wurden, wird deutlich, dass es nicht ausreicht, ein Lagebild auf Basis weniger Informationen zu erstellen. Die Analyse der Warnungen und Daten zu diesem Katastrophenfall zeigt zudem, dass der Ausfall der Pegelstation erst Stunden später von den Verantwortlichen im Krisenstab erkannt wurde.



Abbildung 1.1: Hochwasserlage in einem Ort (links) sowie Einsatz des THW im Rahmen des Hochwassers in Deutschland im Juli 2021 (rechts). (Quellen: links: von einer künstlichen Intelligenz generiertes Bild, rechts: THW)

Es wird deutlich, dass sowohl für die Einsatzkräfte vor Ort als auch für die Verantwortlichen in den Einsatzzentralen ein Monitoringsystem benötigt wird, das die Situation vor Ort aufzeigt und datengebunden z. B. die Veränderung des Wasserstandes über die Zeit anzeigt. Dabei ist es wichtig, dass das Monitoringsystem einfach zu bedienen ist und die Daten in Echtzeit zur Verfügung stellt. Außerdem muss das Monitoringsystem mobil und autark sein, um an verschiedenen Einsatzorten und unabhängig von anderer Infrastruktur eingesetzt werden zu können. Diese Unabhängigkeit ist ein zentrales Element, da die Zerstörung oder der Ausfall der Strom- und Datenversorgung während eines Hochwassers häufig zu einer Einschränkung der sonst üblichen Kommunikationswege führt. Die Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich des Internet of Things (dt. Internet der Dinge) (IoT) und der Funkübertragungstechnologien für das Monitoring sind hier als mögliche Lösungsansätze zu nennen. Sogenannte Low Power Wide Area Networks (LPWAN) ermöglichen die Übertragung kleiner Datenpakete über große Entfernungen bei geringem Stromverbrauch.

Neben dem Mangel an lokalen Monitoringsystemen, um die Lage vor Ort zu beurteilen, sind auch die Möglichkeiten, bereits vorhandene Daten und Datenschnittstellen im Sinne der Einsatzkräfte zu nutzen und zu analysieren, wenig verbreitet. So ist es möglich, dass lokale Monitoringsysteme, die z. B. im Rahmen von Community-Projekten bereits vorhanden sind, aber von anderen Akteuren, wie beispielsweise den Einsatzkräften, nicht genutzt werden. Dies kann zum einen daran liegen, dass diese schlichtweg nicht bekannt sind, zum anderen aber auch daran, dass eine Anbindung an die Systeme der Sicherheitsbehörden aufgrund unterschiedlicher Formate und Anwendungen nicht ohne weiteres möglich ist. Insbesondere bei kleineren Behörden oder Freiwilligen Feuerwehren, die einen großen Teil der Sicherheitsaufgaben im ländlichen Raum übernehmen, sind in der Regel keine Ressourcen vorhanden, um die Daten in die Arbeit der Sicherheitsbehörden zu integrieren. Es fehlt daher eine einfache und flexible Lösung, um öffentliche Daten mit möglichst vielen Anwendungen verknüpfen zu können. Insbesondere Geoinformationssysteme (GIS) sowie webbasierte Anwendungen sind

hier zu nennen. Hier kann z. B. eine Standardisierung helfen. So wäre es denkbar, Pegel­daten von Behörden oder auch von Community-Projekten in ein System der Einsatzkräfte zu integrieren. Dies ist insbesondere aufgrund der steigenden Anzahl von Monitoringsystemen auch im Kontext von Smart Citys für die zukünftige Datennutzung notwendig. Darüber hinaus ist es wichtig, die Bevölkerung durch leicht verständliche Informationen und Daten für Gefahren zu sensibilisieren. Um die vorhandenen Datenschnittstellen für eine Vielzahl von Anwendungen und damit für viele Nutzerkreise nutzbar zu machen, ist neben der Dokumentation der Schnittstellen auch eine Standardisierung der Datenschnittstellen notwendig.

1.2. Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist zum einen die Entwicklung eines Systems, mit dem Sicherheitskräfte in der Lage sind, verschiedene Einsatzsituationen einfach, robust und mobil-autark zu überwachen. Dabei sind insbesondere die weitreichenden Entwicklungen im Bereich des IoT und der Funkübertragungstechnologien zu berücksichtigen. Dabei gilt es, Daten möglichst energieeffizient und mit möglichst großer Reichweite zu übermitteln. Die notwendige Sensorik wird auf Basis kostengünstiger IoT-Komponenten entwickelt, um einen flächendeckenden Einsatz zu ermöglichen. Im Gegensatz zu bereits existierenden Systemen werden zusätzliche Parameter wie z. B. die Erkennung von Personengruppen genutzt. Darüber hinaus werden die Sensorkits mit Global Positioning System (GPS) ausgestattet, was eine einfache Lokalisierung im Einsatzgebiet ermöglicht. Die Ausstattung der Einsatzkräfte mit Trackern ist ebenfalls möglich. Insbesondere diese beiden Aspekte unterscheiden die Sensorkits von den üblichen stationären Messstationen und können im Einsatzfall einen zusätzlichen Informationsgewinn sowie eine einfachere Installation aufgrund der direkt verfügbaren Lokalisierung ermöglichen.

Überdies wird ein Konzept entwickelt, um bereits öffentlich verfügbare Daten zu vereinheitlichen und für weitere Anwendungen nutzbar zu machen. Auch hier liegt der Fokus auf dem Hochwasserfall und den dort für die Einsatzkräfte zur Lagebeurteilung hilfreichen Daten. Bereits vorhandene Standardisierungen und deren Nutzung werden bei der Konzeptentwicklung berücksichtigt. Für das neue Konzept wird darüber hinaus untersucht, wie es durch geeignete Werkzeuge weiter vereinfacht und insbesondere auch für fachfremde Personen nutzbar gemacht werden kann. Dies können z. B. Einsatzkräfte ohne spezielle IT-Kenntnisse im Bereich der Datenintegration sein. Übergreifend werden die Entwicklungen im Bereich Open Data und Open-Source-Software berücksichtigt. Dazu gehören auch die rechtlichen Rahmenbedingungen sowie bereits vorhandene Lösungen und Initiativen.

Mobil-autarkes Monitoringsystem

Open Data

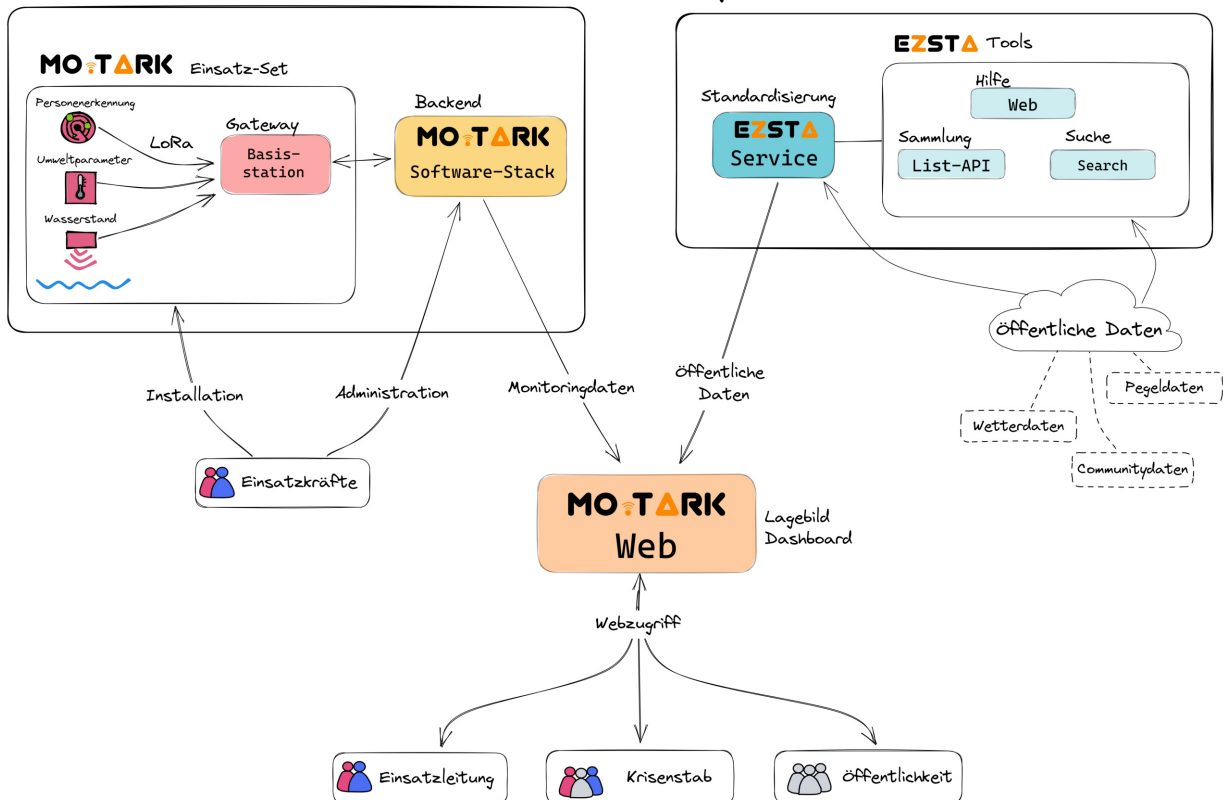


Abbildung 1.2: Zusammenfassung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Komponenten und ihrer Zusammenhänge. (Eigene Darstellung)

Wie in der Abbildung 1.2 ersichtlich, fließen die Daten und Schnittstellen aus beiden Bereichen in einem Modul zusammen. Diese Anwendung (MOTARK-Web) ermöglicht dabei den Zugriff auf die Daten aus dem mobil-autarken Monitoringsystem sowie über das entwickelte Konzept zur Vereinheitlichung der öffentlichen Schnittstellen auf die Daten aus anderen Quellen. Übergeordnetes Ziel der gesamten Arbeit ist die Anreicherung des Lagebildes als entscheidungsunterstützende Komponente für die Einsatzkräfte, aber auch für die Bevölkerung. Durch die zusätzlich erhobenen Daten bzw. durch die Möglichkeit der Nutzung öffentlicher Daten wird die Informationsdichte erhöht und es können zielgerichtete und faktenbasierte Entscheidungen getroffen werden, wobei das hier entwickelte System dann zum Einsatz kommt, wenn die üblichen Warnsysteme bereits erste Hinweise auf eine Gefahrenlage liefern. In den unübersichtlichen und chaotischen Situationen, die während eines Katastropheneinsatzes auftreten können, ist eine einfache Bedienbarkeit und Verständlichkeit des Systems von großer Bedeutung. Um wie beschrieben unabhängig von der sonstigen Infrastruktur einsatzfähig zu sein, wird das System von den Sensorkits bis zu den Einsatzkräften vollständig autark betrieben. Dies bedeutet, dass zum einen die Stromversorgung mittels Batteriesystem für alle Hardwarekomponenten sowie die Übertragungen autark sichergestellt werden. Die Weiterleitung der Daten von den Einsatzkräften zu anderen Systemen kann dann über die üblichen Kommunikationswege der Einsatzkräfte erfolgen.

1.3. Aufbau und Methodologie der Arbeit

Die in der Arbeit verwendete Vorgehensweise für die erarbeiteten Grundlagen sowie die entwickelten Konzepte orientiert sich an der *Design Science Research Methodology* (DSRM). Die DSRM ist ein Forschungsansatz, der darauf abzielt, durch die Kombination von Design und wissenschaftlichen Methoden innovative Lösungen für praktische Probleme zu schaffen. DSRM ist besonders relevant in Kontexten, in denen bestehende Lösungen unzureichend oder nicht vorhanden sind und in denen ein Bedarf an neuen, effektiveren Ansätzen zur Lösung komplexer Probleme besteht. Es umfasst einen iterativen Prozess des Entwurfs, der Entwicklung und der Bewertung, bei dem das Ziel darin besteht, neue Artefakte zu schaffen, die Probleme der realen Welt lösen. [41], [165]

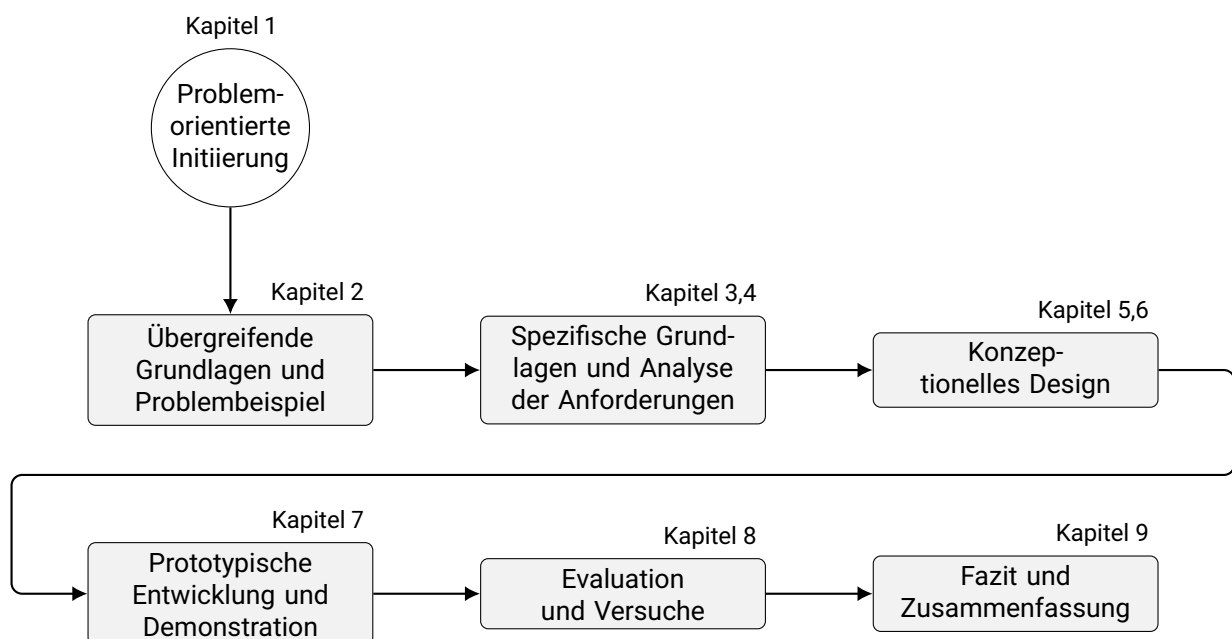


Abbildung 1.3: Sechsstufiger DSRM-Prozess mit Verweisen auf die Kapitel dieser Arbeit. (Eigene Darstellung)

Abbildung 1.3 zeigt den im Rahmen dieser Arbeit angewandten DSRM-Prozess. Ausgangspunkt ist die Problembeschreibung und Motivation, beschrieben in diesem Kapitel. Daraus ergeben sich zwei Problemstellungen, die in den nächsten Schritten bearbeitet werden. Zum einen das Fehlen eines mobil-autarken, kostengünstigen und flexiblen Monitoringsystems im Sinne einer schnellen Einsatzgruppe zur Erfassung und Darstellung von Daten im Hochwasserfall. Zum anderen die fehlende Standardisierung und Nutzung bereits vorhandener Daten und Datenschnittstellen. Diese werden ebenfalls zur Anreicherung des Lagebilds für Einsatzkräfte im Rahmen von Hochwasserereignissen genutzt. Für die jeweiligen Problemstellungen wird zunächst eine Analyse der bestehenden Systeme und Grundlagen erarbeitet. Als erster Schritt des DSRM-Prozesses werden für beide Problemfelder übergreifend die Grundlagen des Katastrophenschutzes am Beispiel von Hochwasserereignissen einschließlich der Akteure, der Aufgaben der Sicherheitsbehörden und bereits vorhandener Softwaresysteme und Datenportale untersucht. Abschließend wird eine Analyse der Lage, Warnungen und Vorhersage während

des Julihochwassers 2021 in Südwestdeutschland durchgeführt, um die Problemstellung zu untermauern. Der Fokus liegt dabei auf dem besonders betroffenen Einzugsgebiet der Ahr.

Der zweite Schritt des DSRM-Prozesses, die spezifischen Grundlagen für die jeweilige Problemstellung, werden in Kapitel 3 und 4 vorgestellt. Begonnen wird in Kapitel 3 mit den technischen Grundlagen für ein mobil-autarkes Monitoringsystem. Hier werden unter anderem verschiedene Funktechnologien als zentrales Element der zu wählenden IoT-Technologie analysiert. Neben diesen Technologien wird ein Überblick über mögliche Sensorik für den Hochwasserfall, wie beispielsweise die Messung des Wasserstandes gegeben. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung des mobilen Pegeltrupps des Technischen Hilfswerks (THW). Dieser wird als Beispiel für ein mobiles Monitoringsystem im Katastrophenschutz betrachtet. Die spezifischen Grundlagen für den Bereich der Vereinheitlichung und Nutzung von öffentlichen Daten werden in Kapitel 4 vorgestellt. Anhand der aktuellen Situation in Deutschland sowie der gesetzlichen Rahmenbedingungen und Förderinitiativen für Open Data werden die Potenziale und Herausforderungen von Open Data herausgearbeitet. Dabei wird auch anhand von Beispielen untersucht, welche öffentlichen Schnittstellen im Bereich des Hochwasserschutzes vorhanden sind. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung des SensorThings-API-Standards, der ein einheitliches und standardisiertes Schnittstellenformat für Sensordaten darstellt. Dabei werden sowohl der Standard selbst als auch die Potenziale und Herausforderungen bei der Nutzung des Standards dargestellt.

Im dritten Schritt des DSRM-Prozesses werden anhand der Grundlagen und Analysen Konzepte und Lösungen erarbeitet. In Kapitel 5 wird ein mobil-autarkes Monitoringkonzept (MOTARK) für Hochwasserereignisse entwickelt. Dabei wird für die drei Teilbereiche Übertragung, Hardware und Verarbeitung detailliert dargestellt, welche Technologien verfügbar sind und welche im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt wurden. In diesem Kapitel werden auch Vorschläge zur Datenauswertung und anschließenden Visualisierung gemacht. Das Lösungskonzept für die zweite Problemstellung wird in Kapitel 6 vorgestellt. Das Konzept mit dem Namen EZSTA (EZ=*Easy*, STA=*SensorThings API*) wird auf der Grundlage der zuvor beschriebenen Herausforderungen und Potenziale von Open Data entwickelt. Dabei werden sowohl die Architektur des Systems als auch die Funktionsweise der einzelnen Komponenten beschrieben. Darüber hinaus werden konzeptionelle Vorschläge zur Erweiterung des Systems aufgezeigt.

Die prototypische Entwicklung und demonstrative Umsetzung der aufgezeigten Konzepte wird als vierter Schritt des DSRM-Prozesses in Kapitel 7 vorgestellt. Zunächst wird die technische Umsetzung des MOTARK-Konzepts anhand der ausgewählten Softwarekomponenten beschrieben. Anschließend erfolgt eine detaillierte Darstellung der Hardwarekomponenten einschließlich der prototypisch entwickelten Basisstation sowie des Basic-Sensor-Kits, das als Basismodul für die Sensorik dient. Nachfolgend werden die für das EZSTA-Konzept entwickelten Prototypen vorgestellt. Als Hauptelement ist hier die Implementierung des EZSTA-Service zu nennen, der die Aufgabe der Schnittstellenvereinheitlichung mit Hilfe einer benutzerdefinierten Mapping-Datei übernimmt. Darüber hinaus wird in diesem Kapitel abschließend die Implementierung der Support-Tools für EZSTA vorgestellt.

Der fünfte Schritt des in dieser Arbeit angewandten DSRM-Prozesses ist die Evaluierung der entwickelten Konzepte und Lösungen. Dabei werden sowohl die technische Umsetzung als auch die Handhabung der entwickelten Lösungen untersucht. Zunächst werden die technischen Komponenten, wie das Basic-Sensor-Kit und der eingesetzte Sensor zur Wasserstandsmessung, anhand von Versuchen auf ihre Einsatzfähigkeit getestet. Darüber hinaus wird die Detektion von Personengruppen durch das Basic-Sensor-Kit anhand eines Langzeitversuchs sowie in weiteren Versuchen auf ihre Einsatztauglichkeit getestet. Anschließend werden das Gesamtsystem und die Abdeckung der Einsatzgebiete durch praktische Versuche demonstriert. Darüber hinaus wird in diesem Schritt ein Anwendungsbeispiel für die beiden entwickelten Konzepte durchgeführt. Hierzu wird das System im Einzugsgebiet der Ahr eingesetzt. Zum einen wird die Abdeckung des Monitoringsystems überprüft, zum anderen wird die Anbindung von öffentlichen Daten mittels EZSTA demonstriert. Die Ergebnisse der Evaluierung werden in Kapitel 8 zusammengefasst und diskutiert. Bei der Bearbeitung dieser Arbeit wurden die Schritte einerseits nacheinander durchgeführt, andererseits wurden interaktiv durch Rückkopplung der einzelnen Bereiche mit den vorangegangenen Schritten Anpassungen und Erweiterungen vorgenommen.

Der letzte Schritt umfasst in Kapitel 9 ein abschließendes Fazit sowie die Zusammenfassung der Arbeit. Hier werden anhand der durchgeführten praktischen Versuche weitere Anwendungsmöglichkeiten sowie Potenziale der entwickelten Konzepte und Lösungen aufgezeigt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Arbeit in Bezug auf die Zielsetzung der Arbeit diskutiert.

2. Katastrophenschutz am Beispiel Hochwasser

Das Umweltphänomen Hochwasser tritt aufgrund verschiedener Ursachen und in unterschiedlicher Intensität auf. Nach DIN 4049 wird Hochwasser als Zustand eines oberirdischen Gewässers bezeichnet, bei dem der Wasserstand oder der Abfluss einen bestimmten Schwellenwert erreicht oder überschritten hat [55, S. 25]. Wie bereits in der Einleitung beschrieben, gehen aktuelle Forschungen und Studien davon aus, dass extreme Wetterereignisse in Zukunft auch aufgrund des Klimawandels zunehmen werden [14], [82], [114, S. 20]. Die Wahrscheinlichkeit, dass extreme Niederschlagsereignisse mit großflächigen Überschwemmungen auftreten, ist nach Angaben der Forscher der *World Weather Attribution Initiative* um den Faktor 1,2 - 9 gestiegen [125, S. 2]. Diese Entwicklung und die großen Zerstörungen vergangener Hochwasserereignisse, wie z. B. an der Elbe 2002 oder in Südwestdeutschland 2021, haben dazu geführt, dass sich die Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) intensiv mit Maßnahmen zur Vorsorge und zum Schutz vor solchen Ereignissen beschäftigen. Neben nationalen Initiativen gibt es auch internationale Institutionen, die zum Schutz der Bevölkerung und von Sachwerten vor Hochwasserereignissen beitragen. Auf europäischer Ebene ist dies z. B. das *European Flood Awareness System (EFAS)*, welches durch Meldungen vor große Hochwasserereignisse insbesondere in den großen transnationalen Flusseinzugsgebieten warnt [46]. Dazu bietet die Einrichtung verschiedene Produkte zur Vorhersage oder Live-Überwachung europäischer Gebiete an. Neben EFAS hat die EU-Kommission auch das *Global Flood Awareness System (GloFAS)* ins Leben gerufen [47]. Ähnlich wie das EFAS bietet das GloFAS verschiedene Produkte zur Wetter- und Hochwasservorhersage an, jedoch ist dieses System weltweit ausgerichtet. Auf nationaler Ebene gibt es ebenfalls eine Reihe von Behörden und Organisationen, die im Bereich des Hochwasserschutzes tätig sind und im Folgenden vorgestellt werden. Dabei werden verschiedene Bereiche wie technische Vorsorge, Pegel- und Wetterbeobachtung oder akute Hilfeleistung abgedeckt. Die eingesetzten Mittel richten sich nach der aktuellen bzw. prognostizierten Lage und sind in der Regel dem Katastrophenschutz zugeordnet.

In diesem Kapitel werden zunächst grundlegende Begriffe zum Thema Hochwasser und Katastrophenschutz definiert und beschrieben. Anschließend werden anhand der Hochwasserkatastrophen im Juli 2021 in Südwestdeutschland Lehren und Schlussfolgerungen aus der Arbeit der zuständigen Behörden und Organisationen sowie Monitoringsystemen dargestellt.

2.1. Grundlegende Begriffe

Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS)

Akteure, die „spezifische Aufgaben zur Bewahrung und / oder Wiedererlangung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung wahrnehmen“ [35]. Dabei kann es sich um staatliche oder nichtstaatliche Akteure handeln.

Allgemeine Gefahrenabwehr

Eine umfassende Zusammenstellung von Maßnahmen, die von den Behörden getroffen werden müssen, um die öffentliche Sicherheit oder Ordnung vor einer bestimmten aktuellen Bedrohung zu schützen. Die allgemeine oder alltägliche Gefahrenabwehr bezieht sich auf Vorkehrungen zum Schutz der Bevölkerung vor Gefahren, die mit den operativ zur Verfügung stehenden Mitteln bewältigt werden können, z. B. im Zusammenhang mit der Strafverfolgung, dem Brandschutz und dem Rettungswesen. Dabei geht es sowohl um die Verhinderung der Beeinträchtigung eines Schutzgutes als auch um die Minderung bereits eingetretener Schäden. [35]

Gefahrenabwehr (Katastrophenschutz)

Umfasst alle staatlichen Maßnahmen in Bereich des Katastrophen- und Zivilschutzes in Ergänzung zur allgemeinen Gefahrenabwehr auf Grundlage der Katastrophenschutzgesetze der Länder und des Zivilschutzgesetzes [35].

Hochwasserarten

Als Hochwasser wird grundsätzlich eine Überschwemmung von Land, welches üblicherweise nicht mit Wasser bedeckt ist, bezeichnet, die durch eine Erhöhung des Wasserstandes in einem Gewässer oder einem Gewässersystem verursacht wird [64, Artikel 2]. Wie bereits beschrieben, kann das Phänomen Hochwasser eine Vielzahl von Ursachen haben. Abhängig von der Ursache werden Hochwasser in drei Haupttypen eingeteilt, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Sturmfluten sind nach *DIN 4049* Folge eines durch starke Winde verursachten Anstiegs des Wasserspiegels an der Meeresküste und in den Flussmündungen im Küstenbereich [55, S. 36]. Darüber hinaus können sie auch in großen Seen auftreten. Ursache für den Anstieg des Wasserspiegels sind meist orkanartige Stürme. Sturmfluten haben ein großes Schadenspotenzial, welches in Deutschland in den letzten Jahrzehnten durch verbesserte Küstenschutzmaßnahmen sowie Vorhersage- und Warnmöglichkeiten deutlich abgenommen hat. Hurrikane in Kombination mit Sturmfluten sind insbesondere in Amerika oder Asien nach wie vor ein großes Problem mit erheblichen Schadensausmaßen [162, S. 598]. Der bekannteste Schutz vor Sturmfluten sind Deiche. In Deutschland warnt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie vor Sturmfluten. Aktuelle Informationen zu möglichen Sturmfluten und Vorhersagen der Wasserstände an den Küsten veröffentlicht die Behörde auf einer Homepage [36].

Sturzfluten können durch Starkniederschläge verursacht werden. Dabei treten Sturzfluten oft sehr plötzlich in kleinen Einzugsgebieten auf, in denen sich sehr schnell ein hoher Abfluss aufbaut. Meist sind Sturzfluten nur von kurzer Dauer, können aber in der Folge zu Flussüberschwemmungen führen. Durch die hohe Intensität der Niederschlagsereignisse wird die Infiltrationsrate des Bodens schnell überschritten, so dass das Wasser oberflächlich abfließt. Die Wassermengen sammeln sich in den Vorflutern, in denen die Wasserstände und Abflüsse sehr schnell ansteigen. Vor allem kleinere Bäche können so zu reißenden Flüssen anschwellen. Tritt eine Sturzflut in ebenem Gelände auf, kann es zu großflächigen Überschwemmungen kommen, da das Wasser aufgrund der großen Wassermenge und des geringen Gefälles nicht schnell genug abfließen kann. Überlastete Kanalnetze können dazu führen, dass sich das Wasser in natürlichen oder auch unnatürlichen Senken wie Kellern oder Tiefgaragen sammelt und dort erhebliche Schäden anrichtet. Aufgrund der schlechten Vorhersagbarkeit von Sturzfluten beträgt die Vorwarnzeit meist nur wenige Minuten. Mobile Maßnahmen wie Sandsackbarrieren sind daher bei Sturzfluten nicht einsetzbar. Vorbeugender Hochwasserschutz kann jedoch die Auswirkungen von Sturzfluten deutlich reduzieren [162, S. 599-600].

Flussüberschwemmungen treten, sofern sie nicht mit Sturzfluten in Kombination auftreten, in der Regel nicht plötzlich auf, sondern entwickeln sich als Folge von Schneeschmelze oder Regenereignissen, die flussaufwärts auftreten. Daher können Flusshochwasser üblicherweise mit einer Vorwarnzeit von einigen Stunden bis zu einigen Tagen vorhergesagt werden. Die Überschwemmungen dauern normalerweise einige Tage bis mehrere Wochen, abhängig vom Einzugsgebiet des Gewässers und der Beschaffenheit der umliegenden Überschwemmungsgebiete. In flachen Gebieten führt dieses Hochwasser meist zu großflächigen Überschwemmungen, in steilen Gebieten, insbesondere in Tälern, treten dann hohe Wasserstände und schnelle Fließgeschwindigkeiten auf. Hier kann es auch zu einem hohen Sedimenttransport kommen, welcher insbesondere die Schäden an der Infrastruktur deutlich erhöhen kann [162, S. 599]. Die Ursachen, gefährdeten Bereiche und Schäden der vorgestellten Hochwasserarten sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Hochwasserarten, Auszüge aus [162, S. 597].

Art	Ursache	gefährdeter Bereich	Schäden
Sturmflut	hoher Wasserstand durch Windstau; hohe Wellen	relativ schmaler Küstenstreifen	sehr hoch, sehr geringe Frequenz (Küstenschutz ist gut)
Sturzflut	lokaler Starkregen (Gewitter)	praktisch jeder beliebige Ort, auch fernab von Gewässern	hohe Frequenz (nicht am selben Ort), Einzelereignis, meist relativ geringe Schäden, Erosionsschäden
Flussüberschwemmung	andauernder, ausgiebiger, großräumiger Niederschlag; evtl. Schneeschmelze	immer wieder dieselben Bereiche in Flussnähe	geringe Frequenz, hohes Schadenpotenzial

Die beschriebenen Hochwasserarten erlauben nur eine grobe Einteilung von Hochwasserereignissen, häufig treten mehrere Arten gleichzeitig oder nacheinander auf [14, S. 36]. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf **Flussüberschwemmungen**. Da diese im Gegensatz zu Sturzfluten eine längere Vorlaufzeit haben, ist der Aufbau des nachfolgend beschriebenen Monitoringsystems möglich und sinnvoll. Sturmfluten sind in Deutschland aufgrund der guten Küstenschutzmaßnahmen bereits sehr selten, aber auch hier können die beschriebenen Technologien und das Gesamtkonzept eingesetzt werden. Eine häufige Ursache für die beschriebenen Hochwasserphänomene ist Niederschlag. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) unterscheidet zwischen Starkregen und Dauerregen und gibt für beide unterschiedliche Unwetterwarnungen heraus.

Starkregen und Dauerregen

Treten große Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit auf, spricht man von Starkregen. Starkregen kann überall auftreten und zu schnell ansteigenden Wasserständen und / oder Überschwemmungen führen [14]. Boden-erosion und Starkregen treten oft gleichzeitig auf. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) warnt in drei Stufen vor Starkregen, jeweils wenn bestimmte Schwellenwerte überschritten werden (siehe auch Tabelle A.1). Als Dauerregen oder Dauerniederschlag wird ein anhaltendes Niederschlagsereignis bezeichnet, das in der Regel eine geringe und konstante Niederschlagsintensität aufweist. Aufgrund der hohen Wassermassen, die zu einer Erschöpfung der Aufnahmefähigkeit des Bodens führen können, warnt der DWD ebenfalls in drei Stufen vor Dauerregen (siehe auch Tabelle A.2). Die Schwellenwerte sind in Litern (Regenwasser) pro Quadratmeter und Stunde angegeben und variieren je nach Dauer und Zeitraum des Regens. Der Bereich der Warnstufen reicht von 2 bis 4, wobei 4 die höchste Warnstufe ist und extreme Ereignisse anzeigt. Werden die Schwellenwerte erreicht oder überschritten, warnt der DWD die betroffenen Regionen und Gebiete. Beispielsweise wird die Warnstufe 4 bei 40 l/m² in einer Stunde (Starkregen) oder bei 70 l/m² in 12 Stunden (Dauerregen) ausgelöst. Zur Warnung wird auch das Modulare Warnsystem (MoWaS, siehe Kapitel 2.3.3) eingesetzt.

2.2. Regelungen und Akteure bei Hochwasserkatastrophen

„Katastrophe im Sinne dieses Gesetzes ist ein Ereignis, das Leben, Gesundheit oder die lebensnotwendige Versorgung der Bevölkerung, Tiere, erhebliche Sachwerte oder die natürlichen Lebensgrundlagen in so ungewöhnlichem Maße gefährdet oder beeinträchtigt, dass zur Beseitigung die einheitliche Lenkung aller Katastrophenschutzmaßnahmen sowie der Einsatz von Einheiten und Einrichtungen des Katastrophenschutzes erforderlich sind.“ - § 24 Hessisches Brand- und Katastrophenschutzgesetz (HBKG)

Die rechtlichen Grundlagen für den Katastrophenfall Hochwasser bzw. für die Gefahrenabwehr bei Hochwasser sind in verschiedenen Bundes- und Landesgesetzen geregelt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Überblick über die Zuständigkeiten sowie die rechtlichen Grundlagen am Beispiel der hessischen Gesetzgebung gegeben. Grundsätzlich ist die Gefahrenabwehr im Katastrophenfall Aufgabe der Länder, insbesondere das operative Krisenmanagement. Der Bund kann jedoch im Bedarfsfall mit Ressourcen unterstützen. Der rechtliche Rahmen für diese Hilfeleistung ist im *Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (ZSKG)* § 12 geregelt. So können die

Länder im Bedarfsfall über Mittel verfügen, die eigentlich für den Zivilschutz vorgesehen sind, oder Koordinierungsinstrumente des Bundes bei länderübergreifenden Katastrophen einsetzen. Diese Konkretisierungen wurden 2009 durch eine Änderung des ZSKG zur Optimierung der Zusammenarbeit von Bund und Ländern festgelegt. Die übergeordnete Einrichtung des Bundes ist das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK). In Hessen ist das *Hessische Brand- und Katastrophenschutzgesetz (HBKG)* als zentrales Gefahrenabwehrgesetz zu nennen. In den anderen Bundesländern gelten ähnliche Gesetze, die allgemein als Feuerwehrgesetze verstanden werden und sich je nach örtlichen Gegebenheiten wie Gewässern oder anderen Gefahrenpotentialen unterscheiden.

2.2.1. Behördliche Ebenen im Katastrophenfall

Die Katastrophenabwehr ist wie beschrieben in den Bundesländern durch eigene Katastrophenschutzgesetze geregelt, dennoch gibt es viele Gemeinsamkeiten bei den zuständigen Behörden und Zuständigkeiten [220, S. 9]. Die *untere* Katastrophenschutzbehörde stellt anhand der in § 24 HBKG definierten Kriterien im Einzelfall den Eintritt und das Ende des Katastrophenfalles fest und hat den Umfang des betroffenen Gebietes durch Warnungen bekannt zu machen (siehe auch Abschnitt Warnungen 2.3.3). Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, können Kräfte des Katastrophenschutzes nach § 19 Abs. 1 HBKG dennoch im Rahmen der Amtshilfe eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere bei Gefahr im Verzug, da sich der Einsatz der Kräfte nach der Schadenslage und nicht nach rechtlichen Vorgaben richtet [92, S. 10]. Es kommt also nicht unbedingt darauf an, wann genau der Katastrophenfall festgestellt wird, sondern darauf, dass die Maßnahmen zur Gefahrenabwehr so schnell wie möglich eingeleitet werden. Im Falle eines Hochwassers oder einer Hochwasserwarnung wird die Hochwasserabwehr in der Regel durch die alltägliche und allgemeine Gefahrenabwehr (z. B. Maßnahmen der Feuerwehr) durchgeführt. Reichen diese Maßnahmen nicht aus, kann die *untere* Katastrophenschutzbehörde den Katastrophenfall feststellen und entsprechende Mittel einsetzen.

Tabelle 2.2: Katastrophenschutzbehörden nach § 25 HBKG.

Katastrophenschutzbehörde	Zuständigkeit
Oberste	das für Katastrophenschutz zuständige Ministerium
Obere	das Regierungspräsidium
Untere	Landräte/-innen in den Landkreisen und Oberbürgermeister/-in in den kreisfreien Städten

Die Tabelle 2.2 zeigt die zuständigen Organisationen bzw. Personen der Katastrophenschutzbehörden. In Hessen bilden die Oberbürgermeister/-in der kreisfreien Städte und die 26 Landräte/-innen der Landkreise die *untere* Katastrophenschutzbehörde. Sie sind vor allem für den überörtlichen Katastrophenschutz, die Allgemeine Hilfe und den Brandschutz zuständig. Als *obere* Katastrophenschutzbehörde fungieren die drei Regierungspräsidien des Landes Hessen. *Oberste* Katastrophenschutzbehörde ist das Hessische Ministerium des Innern und für Sport (HMdIS). Für den aktiven Katastrophenschutz ist grundsätzlich immer die jeweilige

untere Katastrophenschutzbehörde zuständig. Nach § 35 HBKG kann das zuständige Regierungspräsidium unter bestimmten Voraussetzungen die Zuständigkeit auf einen anderen Landkreis oder eine kreisfreie Stadt übertragen, wenn die Katastrophenabwehr von dort aus effektiver ist. Insbesondere bei überregionalen Ereignissen können auch die obere und die oberste Katastrophenschutzbehörde die Leitung übernehmen.

Führungsorganisation im Katastrophenfall

Die Zuständigkeit der Führungsorganisation ist in § 43 (Abs. 4-7) HBKG und in der *Feuerwehr-Dienstvorschrift 100 (FwDV 100)* [86] festgelegt. Der Katastrophenschutzstab (KatS-Stab) ist im Bereich der unteren Katastrophenschutzbehörde angesiedelt und unterstützt die Abwehr von Katastrophen sowie die Führung und Leitung der im Einsatz befindlichen Einheiten und Einrichtungen.

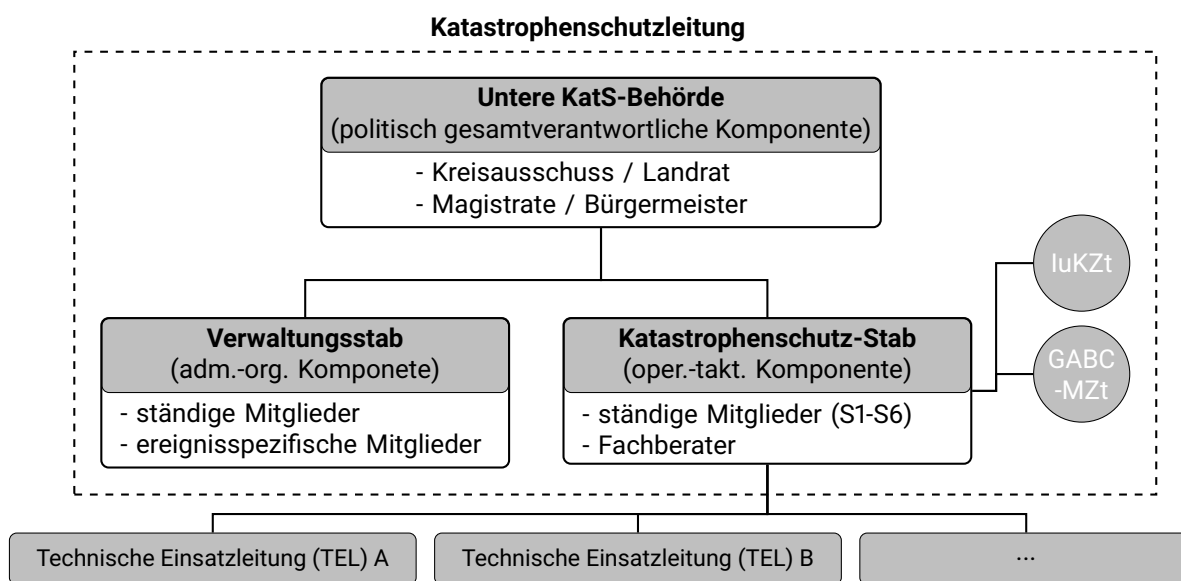


Abbildung 2.1: Führungsorganisation im Katastrophenfall, schematische Darstellung. (Eigene Darstellung nach [93])

Katastrophenschutzleitung (KatSL)

Die KatSL (entspricht der unteren KatS-Behörde) ist die übergeordnete Einheit, die die politische Gesamtverantwortung trägt. In der Regel wird diese Funktion vom Kreisausschuss / Landrat oder vom Magistrat / Oberbürgermeister wahrgenommen. Nach § 29 Abs. 1 HBKG ist für die unteren KatS-Behörden die Einrichtung einer KatSL mit einem Verwaltungsstab, einem KatS-Stab, einer Informations- und Kommunikationszentrale (IuKZt) sowie einer Gefahrstoff-ABC-Messzentrale (GABC-MZt) vorgeschrieben.

Verwaltungsstab (Vw-Stab)

Ein Verwaltungsstab ist eine administrativ-organisatorische Komponente, die aufgrund eines besonderen Ereignisses für einen begrenzten Zeitraum nach einem festgelegten Plan gebildet wird. Er eignet sich zur

Aufgabenerfüllung, wenn aufgrund eines besonderen Ereignisses ein überdurchschnittlicher Koordinations- und Entscheidungsbedarf besteht, insbesondere bei Großschadensereignissen. Der Verwaltungsstab wird im Auftrag des politisch Gesamtverantwortlichen eingesetzt und koordiniert alle administrativen Maßnahmen im Zusammenhang mit dem Ereignis. Der Verwaltungsstab trifft keine operativ-taktischen Entscheidungen, welche der Einsatzleitung oder dem unmittelbar dem Landrat oder Oberbürgermeister unterstellten Führungsstab vorbehalten sind. Die Bildung eines Verwaltungsstabes setzt nicht voraus, dass bereits Einsatzkräfte im Einsatz sind oder eingesetzt werden. [92], [93]

Katastrophenschutzstab (KatS-Stab)

Der Katastrophenschutzstab (KatS-Stab) ist eine Organisationsstruktur, die im Falle einer Katastrophe oder eines schweren Unfalls eingerichtet wird, um ein koordiniertes und zielgerichtetes Krisenmanagement zu ermöglichen. Er setzt sich aus Vertretern vieler an der Katastrophenhilfe beteiligter Behörden und Organisationen wie Feuerwehr, Polizei, Rettungsdienst und verschiedenen Fachberatern zusammen. Der KatS-Stab hat die Aufgabe, die Lage zu beurteilen, Pläne zur Bewältigung der Krise zu erarbeiten und deren Umsetzung zu überwachen. Er dient somit als operativ-taktisches Führungsgremium im Katastrophenfall und trägt dazu bei, die Auswirkungen der Katastrophe auf die betroffene Bevölkerung und Infrastruktur zu mindern [91]. In der Regel besteht der KatS-Stab bei Großschadensereignissen aus einem Führungsstab und Sachgebieten. Nach der Feuerwehrdienstvorschrift 100 (FwDV 100) setzt sich der Führungsstab aus der Leitung und folgenden Komponenten zusammen [86, S. 14]:

- S1 Personal / Innerer Dienst
- S2 Lage
- S3 Einsatz
- S4 Versorgung
- S5 Presse- und Medienarbeit [optional]
- S6 Informations- und Kommunikationswesen [optional]

Sachgebiet S5 und S6 sind dabei optional und können bei Bedarf eingerichtet werden. Für die jeweiligen Sachgebiete arbeiten jeweils Fachberaterinnen / Fachberater und Verbindungspersonen zu [91].

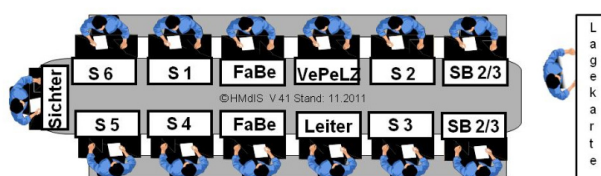


Abbildung 2.2: Festgelegte Sitzordnung nach der Stabsdienstordnung für den obersten Fü-Stab / KatS-Stab (Hessen). (Quelle: [91, S. 15])

Informations- und Kommunikationszentrale (IuKZt)

Die Informations- und Kommunikationszentrale (IuKZt) ist eine Organisationseinheit, die im Katastrophenfall oder bei Großschadensereignissen eingerichtet wird, um eine koordinierte und zielgerichtete Kommunikation und Informationsbeschaffung zu gewährleisten. Die IuKZt hat die Aufgabe, Informationen über die Lage und Maßnahmen im Katastrophenfall zu sammeln, aufzubereiten und bereitzustellen. Sie dient als zentrale Kommunikationsstelle zwischen allen an einer Katastrophe Beteiligten, wie z. B. dem Katastrophenschutzstab und den Einsatzbehörden. Damit trägt die IuKZt dazu bei, die Kommunikation im Katastrophenfall zu koordinieren und sicherzustellen, damit alle Beteiligten über die aktuelle Lage und die getroffenen Maßnahmen informiert sind. Die *Zentrale Leitstelle* der unteren Katastrophenschutzbehörden nimmt die Aufgaben der IuKZt wahr [91, S. 10].

Gefahrstoff-ABC-Messzentrale (GABC-MZt)

Die Gefahrstoff-ABC-Messzentrale (GABC-MZt) ist eine Organisationseinheit, die im Falle einer Katastrophe oder eines Großschadensereignisses die Überwachung und Messung von gefährlichen Stoffen sicherstellt. Zur Minimierung der Auswirkungen von Gefahrstoffen auf die Bevölkerung und die Umwelt ist die GABC-MZt für die Überwachung der Luftqualität und die Messung von Gefahrstoffen im betroffenen Gebiet zuständig. Um schnell auf Veränderungen der Gefahrstoffsituation reagieren und entsprechende Maßnahmen einleiten zu können, stimmt sich die GABC-MZt eng mit dem Katastrophenschutzstab und anderen betroffenen Behörden und Organisationen ab. Die GABC-MZt sollen möglichst nahe an den zentralen Leitstellen stationiert werden [91, S. 10].

2.2.2. Operative Organisation im Hochwassereinsatz

Im Folgenden wird auf die Aufgaben des Katastrophenschutzstabes, d. h. auf die operativ-taktische Komponente eingegangen. Der Einsatz der Kräfte im Katastrophenfall unterscheidet sich per se nicht von einem Einsatz im Rahmen der täglichen Gefahrenabwehr. Änderungen betreffen vor allem die Führungs- und Kommunikationsstruktur (KatS-Stab & Verwaltungsstab) durch eine politisch gesamtverantwortliche Instanz (Katastrophenschutzleitung) sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen. Die operativen Maßnahmen werden vom KatS-Stab angeordnet bzw. verwaltet. Zudem sind die Anzahl der Einsatzkräfte sowie die Einsatzdauer im Katastrophenfall höher als im Regelfall [92, S.10]. Die Amtshilfe zwischen den Behörden des Bundes und der Länder ist nach § 35 (1) *Grundgesetz (GG)* grundsätzlich vorgesehen. Nachfolgend werden die wichtigsten Organisationseinheiten im Hochwassereinsatz am Beispiel des Landes Hessen sowie länderübergreifend dargestellt.

Feuerwehr

Die Feuerwehr ist die zentrale Organisation des Katastrophenschutzes. Sie ist in Deutschland in den sogenannten Feuerwehrgesetzen der Länder gesetzlich verankert. In Hessen regelt das *HBKG* die grundsätzlichen

Rahmenbedingungen für die Aufstellung der Feuerwehren, ihre Einsatzbefugnisse, ihre Aufgaben, die Ausbildung sowie die Mitwirkung der Freiwilligen Feuerwehren. Die Feuerwehr ist zuständig für die Rettung von Menschen und Tieren, die sich in Gefahr befinden, z. B. wenn sie durch Hochwasser in ihren Häusern eingeschlossen sind. Sie koordiniert auch die Evakuierung von Gebäuden, die von Hochwasser bedroht sind, und kann Maßnahmen ergreifen, um Schäden an Gebäuden und anderen Einrichtungen zu verhindern oder zu minimieren, zum Beispiel durch das Errichten von Sandsackbarrieren oder das Absperren von Gebäuden. Darüber hinaus unterstützt sie die Bevölkerung durch die Verteilung von Lebensmitteln und Getränken oder durch die Bereitstellung von Unterkünften für Menschen, die ihre Häuser verlassen mussten. Bei Hochwasser wird die Feuerwehr in der Regel durch andere Einsatzkräfte wie der Polizei, dem Technisches Hilfswerk und dem Rettungsdienst unterstützt.

Sondereinsatzmittel Starkregen / Hochwasserschutz in Hessen

In Hessen werden gemäß *Leitfaden zur Vorsorge und Bewältigung von Hochwasser- und Starkregenereignissen* [93] neben den Einsatzmitteln der Feuerwehren auch Sondereinsatzmittel vorgehalten. Diese können von der jeweiligen Einsatzleitung auch ohne expliziten Katastrophenfall im Rahmen der Amtshilfe (§ 19 (1) *HBKG*) über den Brandschutzaufsichtsdienst des Landes Hessen angefordert werden. Zu diesen besonderen Einsatzmitteln gehören u.a. 26 Gerätewagen *Logistik 1 Hochwasser (GW-L1 HW)*, Abrollbehälter (z. B. bestückt mit Pumpen und Wasserrückhaltesystemen) und Feuerwehrranhänger, die vom Land an die unteren KatS-Behörden verteilt werden [93, S. 24]. Die Abbildung 2.3 zeigt beispielhafte Gerätewagen, welche mit verschiedenen Rollcontainern für den Hochwassereinsatz ausgestattet sind.



Abbildung 2.3: Gerätewagen Feuerwehr Kreis Ahrweiler. (Quelle: Eigene Aufnahme)

Wasserrettung

Für die Wasserrettung im Katastrophenschutz sind für das Bundesland Hessen in acht Landkreisen sowie in den kreisfreien Städten Frankfurt und Wiesbaden neben den Regelvorhaltungen der öffentlichen Feuerwehren (§ 2 Abs. 2 und § 23 *HBKG*) zehn Wasserrettungsgruppen eingerichtet. Darüber hinaus bietet die Deutsche Lebens-Rettungs-Gesellschaft (DLRG) neun weitere erweiterte Wasserrettungsgruppen an [92, S. 43]. Die

DLRG ist eine Organisation, die sich der Rettung und dem Schutz von Menschen in Gewässern widmet. Im Hochwasserfall hilft sie bei der Evakuierung betroffener Gebiete und bei der Rettung gefährdeter Personen. Aufgabe der Wasserrettung ist neben der Rettung von Menschen aus lebensbedrohlichen Lagen auch die Hilfe für Menschen und Tiere, die von den Gefahren des Wassers betroffen sind. Die Hilfeleistung umfasst neben den Rettungsmaßnahmen auch die Verpflegung sowie die Unterstützung anderer Einsatzkräfte [92, S. 43].

Technisches Hilfswerk (THW)

Nach dem *THW-Gesetz (THWG)* besteht die Hauptaufgabe des THW darin, auf Anforderung der für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden der Länder und Kommunen technische Hilfe im Zivilschutz, Katastrophenschutz, bei öffentlichen Notständen und Großschadensereignissen zu leisten. Darüber hinaus leistet das THW im Auftrag der Bundesregierung technische Hilfe im Ausland. Rechtlich ist die Organisation nach § 1 (1) (THWG) „eine nicht rechtsfähige Bundesanstalt mit eigenem Verwaltungsunterbau im Geschäftsbereich des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat“. Das THW wird fast ausschließlich ehrenamtlich geführt und ist in Ortsverbänden organisiert. Der Technische Zug (TZ) ist das Grundelement eines Ortsverbandes und kann auch als Grundeinheit für weitere Fachgruppen dienen [87], [226]. Die Fachgruppen sind dabei spezialisierte Einheiten für unterschiedliche Einsatzzwecke, wobei die Auswahl der Fachgruppe auch von den örtlichen Gegebenheiten abhängt. Die Mitwirkung des THW bei Einsätzen im Land Hessen ist in § 27 (2) des *HBKG* geregelt. Das THW wird entweder vom Bund oder von der für die Gefahrenabwehr zuständigen Stelle angefordert. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Fachberater des THW anzufordern, die die anfordernde Stelle beraten und bei Bedarf weitere THW-Einheiten nachalarmieren können.

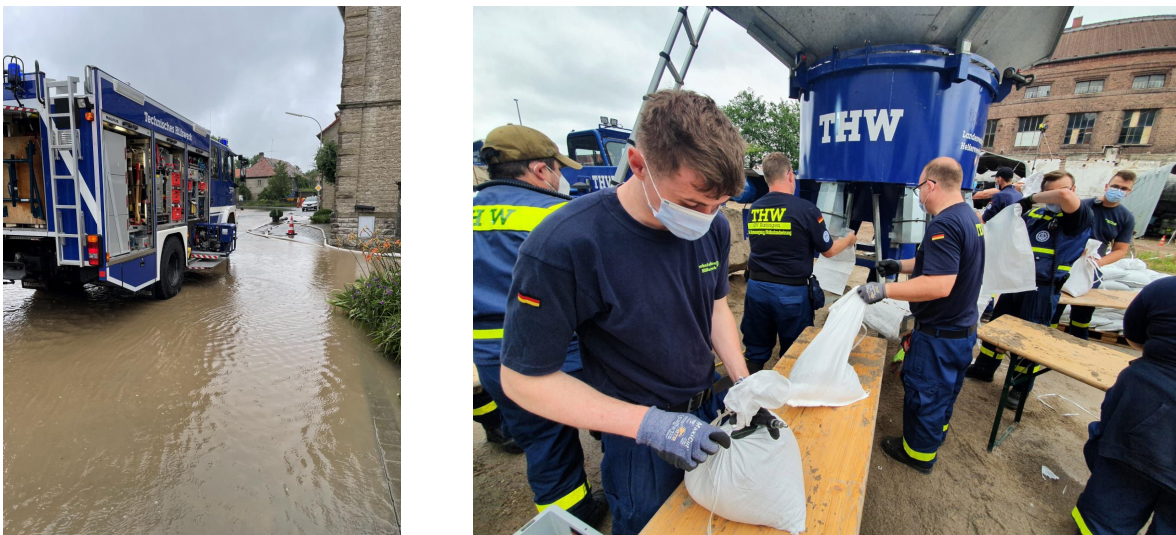


Abbildung 2.4: THW Einsatz während der Unwetterkatastrophe in Südwestdeutschland (Tief Bernd).
(Quelle: THW)

Im Hochwasserfall übernimmt das THW neben der technischen Unterstützung anderer Einsatzkräfte auch die aktive Rettung und Bergung von Menschen und Tieren. Zum Schutz vor Wasserschäden werden auch Hochwasserschutzsysteme wie Sandsackbarrieren sowie kontrolliertes Abpumpen durch THW-Einsatzkräfte

durchgeführt. Im Rahmen der verheerenden Hochwasserkatastrophe in Südwestdeutschland 2021 war das THW auch mit Aufräumarbeiten sowie dem Aufbau von Infrastruktur wie Brücken, Stromversorgung, Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung betraut [208]. Speziell für Hochwasserereignisse gibt es spezialisierte Einheiten wie den Trupp Mobiler Hochwasserpegel (Tr MHP), der im Kapitel 3.4.2 näher beschrieben wird.

Bundeswehr

Bei der Bundeswehr handelt es sich um die Streitkräfte der Bundesrepublik Deutschland. Neben den militärischen Aufgaben kann die Bundeswehr nach § 35 (2) GG auch im Inland bei Naturkatastrophen oder besonders schweren Unglücksfällen von einem Bundesland angefordert und eingesetzt werden. Die Bundeswehr kann zum Beispiel bei Evakuierungen, der Unterbringung von Betroffenen sowie bei logistischen Tätigkeiten helfen. Gemäß § 43 (7) HBKG sind die Streitkräfte für die Dauer des Einsatzes der Katastrophenschutzbehörde unterstellt. Im Bereich der Amtshilfe Hochwasser werden unter anderem Spezialfahrzeuge der Bundeswehr wie Bergepanzer oder mobile Brücken eingesetzt. Zu den logistischen Aufgaben der Bundeswehr gehört neben der Bereitstellung von Fahrzeugen und Personal auch die Bereitstellung von Betriebsstoffen und mobilen Betriebsstofflagern zur Versorgung anderer Einsatzkräfte [40].

Polizei

Die Arbeit der Landespolizei ist in den Polizeigesetzen der Länder geregelt. In Hessen ist dies das *Hessisches Gesetz über die öffentliche Sicherheit und Ordnung (HSOG)*. Im Katastrophenfall übernimmt die Polizei vor allem Sicherungsmaßnahmen, die nach § 21 HBKG mit der Gesamteinsatzleitung abzustimmen sind. Ebenso wie die Streitkräfte unterstehen die eingesetzten Kräfte gemäß § 43 (7) HBKG der Gesamteinsatzleitung (Leitende Katastrophenschutzbehörde) [92, S. 13].

Sonstige: Deutsche Lebens-Rettungs-Gesellschaft (DLRG), Sanitäts- und Rettungsdienste, Freiwillige

Im Falle einer Hochwasserkatastrophe sind neben den genannten Organisationen eine Vielzahl weiterer Organisationen und freiwilliger Helfer im Einsatz, um die betroffene Bevölkerung zu unterstützen und zu schützen. Beispiele hierfür sind die DLRG, Sanitäts- und Rettungsdienste, wie z. B. das Deutsche Rote Kreuz (DRK), sowie freiwillige Helfer, meist aus der betroffenen oder benachbarten Bevölkerung. Die Aufgaben der DLRG liegen, wie beschrieben, hauptsächlich im Bereich der Wasserrettung. Die Sanitäts- und Rettungsdienste sind im Wesentlichen für den Transport und die medizinische Versorgung von Verletzten zuständig. Darüber hinaus werden Freiwillige im Katastrophenfall bei der Verteilung von Hilfsgütern und der Betreuung von Evakuierten eingesetzt. Auch die umfangreichen Aufräum- und Instandsetzungsarbeiten werden häufig von Freiwilligen unterstützt. Diese Organisationen und Freiwilligen tragen somit dazu bei, die Auswirkungen der Hochwasserkatastrophe auf die betroffene Bevölkerung zu minimieren.

2.2.3. Einblick in Stabssoftware und Softwaresysteme

Im Folgenden wird der aktuelle Stand von Softwaresystemen sowie der Datennutzung im Bereich des Katastrophenschutzes dargestellt. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erläutert, ist der Katastrophenschutz Aufgabe der Bundesländer bzw. der unteren Katastrophenschutzbehörden, weshalb die eingesetzten Werkzeuge und Maßnahmen sehr heterogen sind.

Softwarelösungen im Katastrophenschutz

Im Zuge der allgemeinen Digitalisierung sind auch die im Katastrophenschutz eingesetzten Systeme digitaler geworden. Aufgrund der rechtlichen Gegebenheiten der Prozesse, der Dokumentation sowie der durchgeführten Maßnahmen bleiben jedoch einige Systeme nicht automatisiert bzw. digitalisiert. Zudem kann im Rahmen der Digitalisierung von Prozessen auch eine IT-Abhängigkeit und damit eine Verwundbarkeit entstehen. Daher ist es wichtig, für bestimmte Prozesse analoge Notfallsysteme vorzuhalten [174]. IT-Abhängigkeit besteht nicht nur durch die Hardwareabhängigkeit während eines Einsatzes, d. h. durch den Ausfall von Systemen, sondern auch durch den Einsatz von proprietärer und nicht mehr weiterentwickelter Software. Bei proprietärer Software besteht die Möglichkeit, dass der Anbieter die Nutzung der Software einschränkt oder ein System ganz einstellt. Durch Rahmenverträge zwischen Behörden und Anbietern kann diese Abhängigkeit reduziert und ein Support durch den Anbieter über mehrere Jahre sichergestellt werden. Die im Rahmen des Katastrophenschutzes eingesetzten Softwaresysteme sind vor allem im Bereich der Stabsarbeit (Stabssoftware), d. h. der Dokumentation von Abläufen sowie der Kommunikation zu finden. Die Einsatzgebiete der Softwarelösungen gliedern sich dabei nach Rönnefeldt in folgende Bereiche [178]:

- Kommunikation und Meldungsmanagement
- Informationsmanagement
- Visualisierung
- Ressourcenmanagement
- Planung und Prognose
- Dokumentation

Eine Stabssoftware deckt nicht unbedingt alle Bereiche ab. Die Übersicht nach Lamers zeigt z. B., dass nur ca. 50 % der aufgeführten Softwareprodukte über eine Visualisierung verfügen [128]. Insbesondere bei Großschadensereignissen ist die Visualisierung der Lage ein zentrales Element. Ist diese in der Software nicht vorgesehen, ist davon auszugehen, dass Lagebilder mit Hilfe analoger Karten im Führungsstab erstellt werden. Zur Verbesserung der Lagebilder sowie der Kommunikation zwischen den Akteuren im Katastrophenschutz wurden bereits zahlreiche Lösungen, auch im Rahmen von Forschungsprojekten, entwickelt. Einige dieser Lösungen werden im Folgenden auszugsweise vorgestellt. Bei den ausgewählten Lösungen wird untersucht, in welcher Form die Darstellung von Lagebildern und Informationen erfolgen kann.

Inter-Organizational Situation Assessment Client (ISAC)

Das Inter-Organizational Situation Assessment Client (ISAC) - System ist eine webbasierte Anwendung zur Unterstützung von Einsatzkräften, die im Rahmen von Forschungsaktivitäten entwickelt wurde. Die Grundlagen des Systems wurden im Rahmen der Dissertation von C. Reuter entwickelt [172]. Das System besteht nicht nur aus ISAC, sondern nutzt zusätzlich das Inter-Organizational Information Repository (IOIR). In dieser

Komponente werden die Daten bzw. Informationen über die Daten für die Client-Anwendungen bereitgestellt und verwaltet. Die Daten selbst werden vom jeweiligen Anbieter gehostet und in die Webanwendung geladen [134]. Das Projekt entstand aus einer detaillierten Analyse der Prozesse sowie der Anforderungen der Akteure im Bereich des Katastrophenschutzes [135]. Eine zentrale Erkenntnis aus dieser Analyse ist, dass die Akteure bei der Bearbeitung grundsätzlich von individuellen und unterschiedlichen Szenarien ausgehen müssen. So werden die meisten Aktivitäten und Maßnahmen auch als Improvisation beschrieben. Zudem werden fehlende Schnittstellen zwischen den verschiedenen Behörden bemängelt. Das ISAC-System soll diese Probleme durch eine flexible und anpassbare Webanwendung in Kombination mit IOIR lösen. Über das IOIR können Daten aus verschiedenen Quellen in das System integriert werden, solange diese geographischen Standards folgen [175]. So wird beispielsweise der Web Map Service (WMS) Standard unterstützt, der von der Open Geospatial Consortium (OGC), einer internationalen Vereinigung zur Entwicklung öffentlich zugänglicher Schnittstellenstandards, entwickelt wurde. Nach Reuter soll auch die Integration von Pegeldaten möglich sein [174]. Zentrales Element von ISAC ist eine Lagekarte sowie ein Auswahlménü zur Selektion von Karteninhalten [134]. Auf der Karte können verschiedene Informationsquellen zu Infrastrukturstörungen sowie zur Wetter- und Hochwasserlage eingeblendet werden (siehe Abbildung 2.5). Darüber hinaus ist es möglich, mit einfachen Geometriewerkzeugen Inhalte in die Karte einzuzeichnen. ISAC mit IOIR wurde durch verschiedene Nutzertests weiterentwickelt und evaluiert [134].

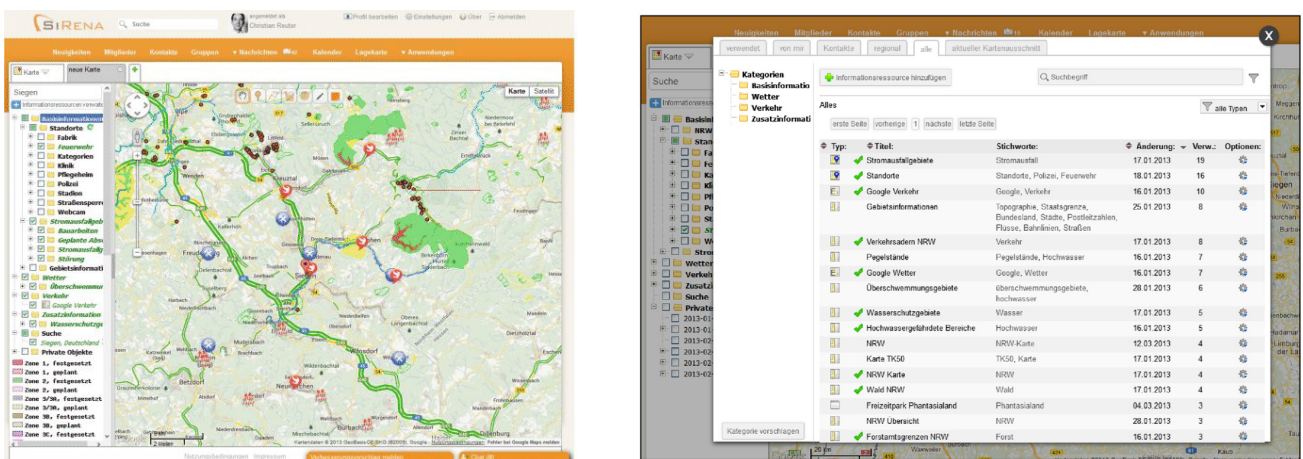


Abbildung 2.5: Screenshot des Inter-Organizational Situation Assessment Client (links) sowie des Inter-Organizational Information Repository (rechts) während eines fiktiven Einsatzszenarios. (Quelle: [134], [175])

CENARIO ilias

CENARIO ilias (Integriertes Lern-, Informations- und Arbeitskooperationssystem) ist eine von der Firma *Lohse + Schilling GmbH* entwickelte Software, welche die Bereiche koordinierte Stabsarbeit, geordneter Kommunikationsfluss, Aufgabenzuweisung und Controlling abdeckt. Ilias ist dabei Teil des Krisenmanagement-Portfolios, zu dem auch Tools wie CENARIO situation (Visualisierung komplexer Lagen) und CENARIO hyperguard (Schnittstelle zu externen Geräten) gehören [42]. Ein spezielles Werkzeug für Hochwasserlagen existiert nicht, da der Schwerpunkt auf der allgemeinen Lagebeurteilung und der Koordination der Einsatzkräfte liegt. Aus den Jahresberichten 2009 - 2015 des Katastrophenschutzstabes des Landes Hessen geht hervor, dass Ilias dort eingesetzt wurde [90], [186]. Das System verfügt über keine eigene Lagevisualisierung.

MOBIKAT

MobiKat wird sowohl in der täglichen Gefahrenabwehr als auch bei der Vorbereitung und Bewältigung von Großschadensereignissen eingesetzt. Für die eingesetzten Kräfte soll das System eine Entscheidungsgrundlage für die effektive Planung und Durchführung von Maßnahmen liefern. Wesentliche Funktionen sind dabei die Darstellung der Infrastruktur bzw. der Einsatzlage, Ressourcenauswahl und Einsatzplanung, Routenplanung unter Berücksichtigung von Fahrzeug- und Straßeneigenschaften sowie die Planung von Schwerpunktobjekten des Katastrophenschutzes [74]. Neben dem Einsatz im Katastrophenfall kann das System auch für andere Aufgaben genutzt werden z. B. einer *Hilfsfristanalyse*, bei der die Zeitspanne zwischen dem ersten Anruf und dem Eintreffen der Einsatzkräfte am Einsatzort ermittelt wird. MobiKat kam unter anderem bei den Hochwasserkatastrophen 2006, 2010 und 2013 sowie bei verschiedenen Groß- und Sportveranstaltungen zum Einsatz. Darüber hinaus nutzen nach Angaben des Anbieters derzeit mindestens sieben Katastrophenschutzbehörden das System [74].

Als besonderes Einsatzmittel verfügt MobiKat über ein mobiles Kamerasystem, das bei Hochwasser eingesetzt werden kann. Dieses System kann über eine autarke Stromversorgung und eine drahtlose Datenübertragung die Lage mittels Kameras überwachen. Über die Art der Kommunikation und die Einsatzbedingungen liegen keine näheren Informationen vor.

FLIWAS3

Das Flutinformations- und Warnsystem (FLIWAS3) wurde speziell für den Einsatz im Hochwassermanagement entwickelt. Das System ist neben der *Elektronischen Lagedarstellung (ELD)* und der *Elektronischen Lagedarstellung für den Bevölkerungsschutz (ELD-BS)* Teil der Informations- und Kommunikationssysteme für den Katastrophenschutz in Baden-Württemberg [221]. Vorläufer des heutigen FLIWAS3 wurden bereits in den Niederlanden, bei den Stadtentwässerungsbetrieben (StEB) Köln und bei Städten und Gemeinden in Baden-Württemberg eingesetzt. Das Projekt FLIWAS wurde 2003 im Rahmen des EU-Projektes NOAH von

der STOWA (Stiftung für angewandte Wasserforschung aus den Niederlanden), dem Regierungspräsidium Karlsruhe und den Stadtentwässerungsbetrieben Köln ins Leben gerufen. Ab 2013 wurde die Software für Baden-Württemberg im Rahmen des Projektes FLIWAS3 fachlich und technisch komplett modernisiert [69].

Das System wird derzeit vor allem in Baden-Württemberg eingesetzt. Hier wird das System bereits von einem Großteil der Kommunen und Zweckverbände genutzt. Quoika und Wald beschreiben den Einsatz von FLIWAS3 beispielhaft für den kommunalen Hochwasserschutz in der Gemeinde Rheinmünster [171]. Das zentrale Element bildet dabei eine webbasierte Anwendung, mit der auf die für eine Hochwassersituation relevanten Daten zugegriffen wird. Die Übersichtsseite ist als Dashboard aufgebaut und zeigt unter anderem die Pegelstände sowie die meteorologische Situation (Niederschlagsradar etc.) an. Auch die Warnkarten des DWDs werden angezeigt. Möchte eine Kommune FLIWAS3 nutzen, wird laut Homepage gemeinsam mit der Kommune geprüft, welche spezifischen Daten für die lokale Situation notwendig sind. So ist es auch möglich, spezielle Pegeldata und zusätzliche kommunale Datenportale anzubinden.

Eigenentwicklungen von Behörden

In Hessen wurde über viele Jahre die Software Cenario Ilias eingesetzt. Für das Krisenmanagement (KatS-Stäbe, Verwaltungsstab) entwickelte das Land jedoch eine eigene Anwendung, welche derzeit im Einsatz ist [147]. Informationen zur dieser Software sind nicht öffentlich verfügbar. Ein langfristiger Einsatz der Eigenentwicklung in Hessen ist unwahrscheinlich, da laut einer Antwort auf eine Kleine Anfrage im Hessischen Landtag Hessen auf der Suche nach einer einheitlichen Softwarelösung für alle Katastrophenschutzbehörden ist [147]. Dies ist erst seit Anfang 2022 mit der Vorlage der Bereitschaft der unteren Katastrophenschutzbehörden möglich. Welche Softwarelösungen derzeit in den unteren Katastrophenschutzbehörden eingesetzt werden, ist dem *Hessischen Ministerium des Innern und für Sport* nicht bekannt¹.

Übersicht über die ausgewählten Systeme

Um einen Überblick über die ausgewählten Systeme zu geben, fasst die folgende Tabelle die Systeme zusammen, die im Rahmen des Katastrophenschutzes eingesetzt werden können. Die Tabelle zeigt die Systeme, die verantwortlichen Firmen, die Möglichkeit der externen Datenanbindung und ob die Systeme auf den Hochwasserschutz spezialisiert sind.

¹E-Mailaustausch mit dem Referat Recht, Zivile Verteidigung, Verteidigungswesen, Abteilung Brand- und Katastrophenschutz, Krisenmanagement (HMdIS) vom 01.12.2022.

Tabelle 2.3: Übersicht über die ausgewählten Softwaresysteme.

Name	Anbieter	Visualisierung der Lage	Anbindung von externen Datenquellen	Spezialisiert für den Hochwassereinsatz
ISAC	Forschungsvorhaben (Reuter et. al.)	✓	✓	✓ ^a
Cenario Ilias	Lohse + Schilling GmbH	✓ ^b	✓ ^b	✗
MOBIKAT	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI	✓	✓ ^c	✓
FLIWAS3	Komm.ONE für das Ministerium für Umwelt, Klima & Energiewirtschaft (BW)	✓	✓ ^c	✓

^aKein extra Modul.

^bZusätzliche Softwaresysteme notwendig.

^cAnbindungen können vom Anbieter umgesetzt werden.

Neben den hier ausgewählten und kurz vorgestellten Systemen gibt es weitere Stabssoftwaresysteme, die von Lamers zusammengefasst wurden [128]. Abschließend kann aufgrund der Vielzahl der Systeme sowie der heterogenen Softwarelandschaft bei den betroffenen Stellen keine umfassende Bewertung vorgenommen werden. Die Visualisierung der Lage mittels Karten und GIS-Systemen ist insbesondere bei Hochwassersituationen ein wichtiger Bestandteil. Entwicklungen wie FLIWAS3 oder der Forschungsansatz ISAC, die flexible sowie webbasierte Anwendungen darstellen und an die Anforderungen der Nutzer angepasst werden können, zeigen hier besonders großes Potenzial. Auch die Anbindung externer Daten, welche insbesondere im konzeptionell entwickelten System ISAC dargestellt wird, zeigt, wie Anbindungen die Arbeit der Sicherheitskräfte effektiv verbessern können.

2.2.4. Aspekte des Hochwasserrisikomanagements

Im vorherigen Kapitel wurden die verschiedenen rechtlichen Regelungen und Akteure im Hochwassermanagement dargestellt. Es wurde gezeigt, wie diese Regelungen und Akteure dazu beitragen, die Sicherheit der Bevölkerung und den Schutz von Sachwerten im Hochwasserfall zu gewährleisten. In diesem Kapitel wird untersucht, wie dies durch die Anwendung der Methoden und Instrumente des Hochwasserrisikomanagements (HWRM) unterstützt werden kann. Es werden die einzelnen Schritte des HWRM-Prozesses vorgestellt und erläutert, wie diese dazu beitragen können, Hochwasserrisiken zu identifizieren, zu bewerten und zu minimieren. Das HWRM ist ein integriertes und ganzheitliches Verfahren, welches die verschiedenen Aspekte des Hochwasserschutzes berücksichtigt. Die Anforderungen und die Struktur des HWRM werden dabei durch verschiedene nationale und internationale (EU) Richtlinien und Empfehlungen vorgegeben [22, S. 10]. So enthalten Art. 7 und Anhang A der *Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL)* [64] detaillierte Vorgaben für einen HWRM-Plan und dessen Umsetzung. In § 75(3) *WHG* wird explizit auf diese Anforderungen verwiesen. Darüber hinaus hat die *Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)* auf der Grundlage dieser Vorgaben Empfehlungen für die Aufstellung, Überprüfung und Aktualisierung von Hochwasserrisikomanagementplänen (HWRM-Plan) erarbeitet [22]. Die vier Phasen des HWRM-Kreislaufs sind Vermeidung, Schutz, Vorsorge sowie Wiederherstellung (siehe Abbildung 2.6) [21], [22].



Abbildung 2.6: Hochwasserrisikomanagement-Kreislauf mit den einzelnen Teilbereichen. (Eigene Darstellung nach [22])

Diese orientieren sich am Kreislauf des Katastrophenmanagements, der allgemein für die Abwehr von Katastrophen gilt [52]. Unter Katastrophenmanagement wird dabei die Gesamtheit aller Maßnahmen und Handlungen verstanden, die der Abwehr von Katastrophen und der Bewältigung ihrer Folgen dienen [220, S. 6]. Maßnahmen des operativen und technischen Hochwasserschutzes sind an verschiedenen Stellen in die Phasen des HWRM-Kreislaufs eingebunden. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept ist vor allem im Bereich der Informations- und Verhaltensvorsorge verankert. Mit den Informationen aus dem Monitoringsystem kann auch Einfluss auf die Gefahrenabwehr bzw. den Katastrophenschutz genommen werden.

Vorsorge

Die Phase der Vorsorge umfasst verschiedene Maßnahmen, die teilweise nicht direkt vor Hochwasser schützen, sondern durch Informationen und Hilfestellungen auf ein bevorstehendes Hochwasser vorbereiten. Dazu gehören die Vorbereitung von Maßnahmen für den Notfall sowie die Hochwasserwarnung und -vorhersage [22, S. 23], [21]. Die Warnungen sind im Kapitel 2.3.3 ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden die im Rahmen des HWRM (Informationsvorsorge) zu erstellenden Pläne kurz vorgestellt.

Hochwasserrisikomanagementpläne

Gemäß § 75 (6) *WHG* sind die im Rahmen des Risikomanagements erstellten Pläne alle sechs Jahre unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren. In Hessen gibt es im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements ein eigenes Portal den *HWRM-Viewer*, das Daten rund um das Thema bereitstellt [89]. Hier können unter anderem Schutzeinrichtungen, Maßnahmen, Überschwemmungsgebiete sowie Gefahrenkarten eingesehen werden.

Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten

Ein Teil der Umsetzung der *HWRM-RL* ist die Erstellung von Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten. Die Inhalte werden auf Basis der folgenden Szenarien erarbeitet [64, Art.6 *HWRM-RL*]:

- HW mit niedriger Wahrscheinlichkeit bzw. Extremereignisse,
- HW mit mittlerer Wahrscheinlichkeit (Wiederkehrintervall ≥ 100 Jahre)
- HW mit hoher Wahrscheinlichkeit.

Für Hessen können die Hochwassergefahrenkarten im Rahmen des HWRM für die Einzugsgebiete der bedeutenden Gewässer über den *HWRM-Viewer* eingesehen werden. Die Risikogebiete wurden gemäß § 73 (1) *WHG* von den Regierungspräsidien ermittelt. Darüber hinaus können über den Viewer auch die gesetzlichen Überschwemmungsgebiete (*HQ₁₀₀*) nach dem *Hessisches Wassergesetz (HWG)* sowie zusätzlich *Risikogebiete außerhalb von Überschwemmungsgebieten* eingesehen werden. Dabei ist zu beachten, dass das Geoportal Hessen die offizielle Plattform für die Darstellung der gesetzlich vorgeschriebenen Gebiete ist.

Schutz

Der Teilbereich Schutz des HWRM umfasst neben dem technischen Hochwasserschutz auch den natürlichen Hochwasserschutz (z. B. Überschwemmungsgebiete) und die Bewirtschaftung von Oberflächengewässern. Beispielfhaft werden hier einige Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes vorgestellt [22, S. 22].

Baulicher Hochwasserschutz

Der bauliche Hochwasserschutz umfasst Maßnahmen, die in der Regel dauerhaft bestehen und zum Schutz eines Gebietes durch Rückhaltung oder Lenkung des Wassers beitragen. Die hier vorgestellten Systeme sind teilweise auch dem vorbeugenden Hochwasserschutz zuzuordnen.

Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken

Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken sind Bauwerke, die der Speicherung und Regulierung von Wasser in Flüssen und Bächen dienen. Talsperren dienen neben der Wasserstandsregulierung auch der Stromerzeugung und der Sicherstellung der Wasserversorgung. Hochwasserrückhaltebecken hingegen werden in Gebieten gebaut, die häufig von Hochwasser betroffen sind und dienen in erster Linie dem Hochwasserschutz. Sie fangen das Wasser auf und halten es so lange zurück, bis es langsam abfließen kann. Auf diese Weise können sie dazu beitragen, die Auswirkungen von Hochwasser flussabwärts zu verringern. Beide Bauwerke können zur Sicherheit von Menschen und Gütern beitragen und spielen eine wichtige Rolle bei der Bewältigung von Hochwasserereignissen. [202]

Deiche und Dämme

Deiche sind im Wesentlichen alle von Menschenhand geschaffenen Barrieren an Gewässern, die Hochwasser verhindern sollen. Dämme sind Bauwerke, die einseitig ständig mit Wasser in Berührung stehen. Die DIN 19712 (*Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern*) regelt die Anforderungen an Deiche und andere Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern. Für Deiche sind u.a. die Höhen sowie die Baustoffe vorgeschrieben [54]. Bei extremen Belastungen können Deiche und Dämme aufgrund ihrer Beschaffenheit überströmt oder zerstört werden. Zur Sicherung oder Verbesserung von Deichen werden daher zusätzlich die nachfolgend beschriebenen mobilen Schutzsysteme eingesetzt. Insbesondere zur Erhöhung bzw. Stabilisierung des Bauwerks bei extremen Hochwasserereignissen werden diese Systeme z. B. Sandsackbarrieren eingesetzt [84, S. 64], [207], [210].

Hochwasserschutzsysteme

Hochwasserschutzsysteme werden häufig zum Schutz von Gebäuden oder Gebieten eingesetzt. Dabei wird nach Koppe und Brinkmann zwischen ortsfesten und nicht ortsfesten Systemen unterschieden [123]. Die hier beschriebenen Maßnahmen werden ebenfalls der Phase der Vorsorge bzw. der Gefahrenabwehr zugeordnet.

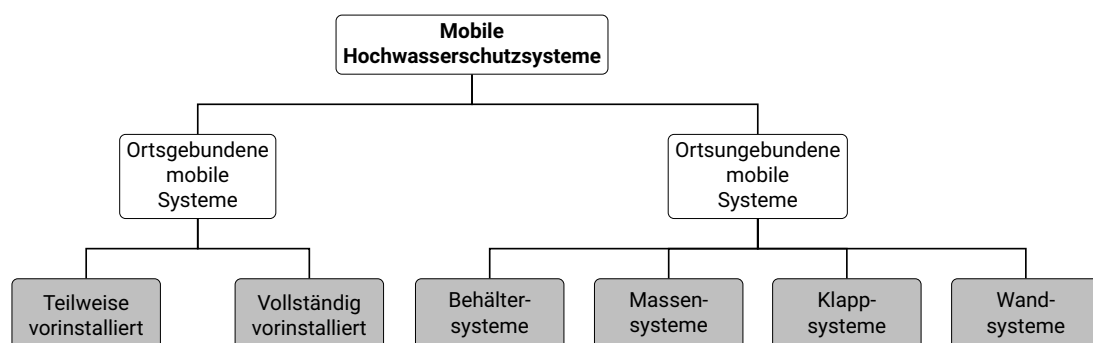


Abbildung 2.7: Überblick über mobile Hochwasserschutzsysteme. (Eigene Darstellung nach [123])

Wie Abbildung 2.7 zeigt, gibt es für beide Kategorien eine Reihe unterschiedlicher Systeme, die je nach Einsatzsituation eingesetzt werden können. Im Folgenden werden zwei Beispiele für mobile Hochwasserschutzsysteme vorgestellt.

Sandsackbarrieren

Sandsackbarrieren bzw. Sandsäcke sind neben neuen mobilen Hochwasserschutzbarrieren nach wie vor eine weit verbreitete, kostengünstige und flexible Hochwasserschutzmaßnahme [166, S. 307]. Dabei können Sandsäcke für verschiedene Zwecke eingesetzt werden. Zum einen können Sandsäcke als reine Barriere wirken und Wasser zurückhalten. Dazu werden einzelne Sandsäcke in mehreren Lagen überlappend entsprechend den örtlichen Erfordernissen ausgelegt [162, S. 466]. Andererseits können Sandsäcke auch zur Verstärkung anderer Systeme, wie z. B. der Deichverteidigung (Auflager, Quellkade, etc.) [207] eingesetzt werden. Dies liegt vor allem an der Flexibilität hinsichtlich des Aufbaus und der Verfügbarkeit von Sand bzw. Sandsäcken. Sandsackbarrieren erfordern im Vergleich zu anderen Schutzsystemen, wie z. B. Schlauchsystemen [166, S. 204], einen hohen Personalaufwand und müssen sorgfältig aufgebaut werden, da sonst der Einsatzzweck nicht erfüllt werden kann.

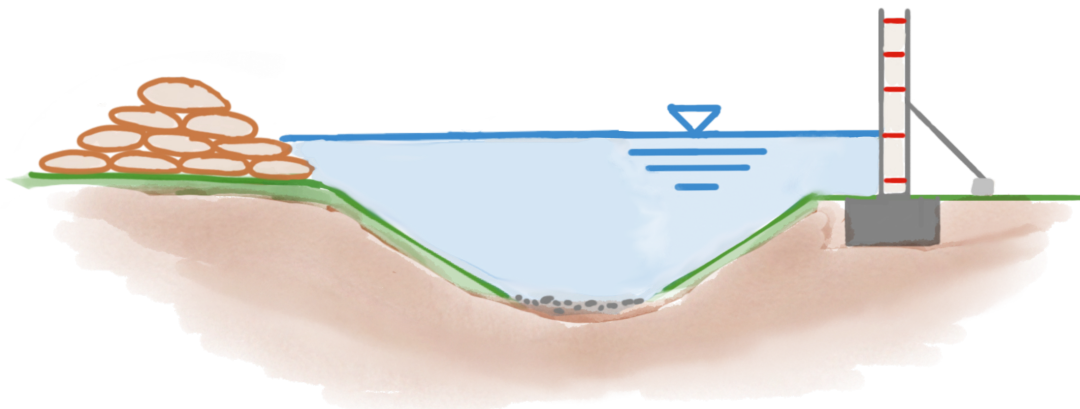


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung einer Sandsackbarriere (links), sowie eines Dammbalkensystems (rechts). (Eigene Darstellung)

Das THW setzt Sandsäcke häufig im Rahmen von Hochwasserschutzmaßnahmen ein und hat daher Handlungsanweisungen zur Handhabung und zum Aufbau von Sandsäcken erarbeitet [207], [210]. Darüber hinaus werden freiwillige Helferinnen und Helfer durch Schulungen im Umgang mit Sandsäcken sowie den anderen Hochwasserschutzmaßnahmen geschult.

Mobile Hochwasserschutzwände

Mobile Hochwasserschutzwände sind Bauwerke für den temporären Einsatz im Hochwasserfall, welche leicht transportiert und aufgestellt werden können. Sie werden in der Regel aus Beton oder Stahl hergestellt und können verschiedene Größen und Formen haben. Mobile Hochwasserschutzwände können aus einzelnen Elementen zusammengesetzt sein, die miteinander verbunden werden, oder aus falt- oder rollbaren Elementen bestehen, die bei Bedarf ausgefahren werden. Mobile Hochwasserschutzwände haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zu Sandsackbarrieren schnell aufgebaut werden können [166, S. 307], flexibel einsetzbar sind und nicht dauerhaft an einem bestimmten Ort installiert werden müssen. Darüber hinaus sind sie im Gegensatz zu Sandsackbarrieren in den meisten Fällen wiederverwendbar. Sie eignen sich besonders für Gebiete, in denen

das Hochwasserrisiko schwankt oder in denen der Bau von permanenten Hochwasserschutzwänden nicht möglich oder unwirtschaftlich ist. Mobile Hochwasserschutzwände können auch dazu beitragen, Schäden und Verluste durch Hochwasser zu minimieren und die Bevölkerung zu schützen [162, S. 462]. Die technischen Anforderungen an den Einbau sind höher jedoch als bei Sandsäcken, zudem sind die Systeme aufgrund der Untergrundverhältnisse nicht überall einsetzbar [123], [166]. Die DIN 191712 beschreibt, dass Hochwasserschutzanlagen nicht als völlig dichte Bauwerke angesehen werden können [54, S. 15]. Insbesondere bei den beschriebenen Anlagen, die auf natürliche Baustoffe wie Boden oder Sand zurückgreifen, ist durch die dauerhafte Beanspruchung im Hochwasserfall mit einer Durchfeuchtung des Schutzbauwerkes zu rechnen. Dies kann auch zum Versagen der Schutzeinrichtung führen.

Vermeidung

Die Phase der Vermeidung umfasst insbesondere Maßnahmen, die auch dem vorbeugenden Hochwasserschutz zugeordnet werden. Hier sind insbesondere das Flächenmanagement und die Abflussverbesserung zu nennen. Dabei ist zu beachten, dass Maßnahmen zur Vermeidung von Hochwasserereignissen nicht nur im Bereich des Hochwasserschutzes, sondern auch im Bereich der Hochwasserrückhaltung und des Hochwasserabflussmanagements eingesetzt werden. Die damit verbundenen Maßnahmen überschneiden sich teilweise mit den Maßnahmen aus der Schutzphase, z. B. Schaffung oder Wiederherstellung von Überschwemmungsgebieten etc. Im Rahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes können auch rechtliche Einschränkungen durch Bauleitplanung oder Bebauungspläne erfolgen. [22], [28]

Wiederherstellung und Nachsorge

Diese Phase beginnt unmittelbar nach einem Hochwasserereignis und hängt stark von den Zerstörungen und Auswirkungen des jeweiligen Hochwassers ab. Zum einen werden in dieser Phase die notwendigen Sofortmaßnahmen zur Wiederherstellung der Infrastruktur durchgeführt. Dazu gehören auch temporäre Maßnahmen wie Behelfsbrücken, Notstromversorgung oder Wasserversorgung. Zum anderen wird die durch das Hochwasser zerstörte Umwelt wiederhergestellt. Dazu gehören beispielsweise Maßnahmen zur Renaturierung des Flussbettes sowie die Beseitigung von Treibgut, Müll und Schadstoffen aus den Gebieten. Diese Phase ist insbesondere hinsichtlich des Wiederaufbaus eng mit der Phase der Vorsorge verbunden, da hier Maßnahmen zur Vermeidung von Hochwasserereignissen umgesetzt werden können. Dies betrifft z. B. die Entsiegelung bzw. Nicht-Versiegelung von Flächen. [21], [22]

2.3. Datenerhebung und Informationsportale für den Hochwasserschutz

Im Rahmen des Hochwasserschutzes spielt neben den Schutzeinrichtungen die Datenerhebung eine entscheidende Rolle. So können durch die Erfassung und Überwachung der Wasserstände in Flüssen, Seen und Meeren potenzielle Hochwassergefahren frühzeitig erkannt und durch entsprechende Maßnahmen die Sicherheit von Menschen und Sachwerten gewährleistet werden. Neben den Wasserständen fließen weitere Parameter in die Bewertung und Vorhersage der Hochwassersituation ein. Dies sind z. B. der Niederschlag

sowie die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens aufgrund der Bodenfeuchte. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf die Entwicklung eines flexiblen und einfachen Sensorsystems gelegt. Als Beispiel wird die Pegelmessung ausgewählt und im Folgenden vorgestellt. Anschließend werden Informationsportale beschrieben, die sowohl nationale als auch regionale Hochwasserlagen und Warnungen für die Bevölkerung bereitstellen. Diese Informationen sind von entscheidender Bedeutung, um die Bevölkerung im Hochwasserfall rechtzeitig und umfassend zu informieren und schnell reagieren zu können.

2.3.1. Hydrometrie - Wasserstandsmessung

Wasserstandsmessungen dienen der Erfassung und Überwachung von Wasserständen in Flüssen, Seen und Meeren. Wasserstände sind wichtig für die Abschätzung und Erkennung von Hochwassergefahren [154], [201]. Darüber hinaus werden sie zur Überwachung der Wasserressourcen und zur Sicherstellung einer ausreichenden Wasserversorgung für Bevölkerung und Wirtschaft eingesetzt [20], [154]. Der Wasserstand h ist der vertikale Abstand eines Wasserspiegelpunktes über oder unter einem Bezugshorizont, z. B. einem nach DIN 4049 definierten Pegelnullpunkt (PNP) [55]. Der Pegelnullpunkt (PNP) gibt die Höhe des Nullpunktes an und bezieht sich in der Regel auf das jeweilige amtlich festgelegte Höhensystem [154, S. 25]. Die Angabe des Wasserstandes ist in der Regel in Metern oder Zentimetern.

In diesem Kapitel werden Technologien und Methoden zur Durchführung von Pegelmessungen, insbesondere für Binnengewässer, beschrieben. Pegeldata werden häufig als wichtige Informationen zur Beurteilung von Extremwetterlagen verwendet, indem sie zur Berechnung von Vorhersagen und zur aktuellen Lagebeurteilung herangezogen werden. In Deutschland werden Pegelanlagen sowohl vom Bund als auch von den Ländern, Kommunen und kommunalen Betrieben verwaltet. Zur Messung bzw. Bestimmung des Pegels stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die im Folgenden vorgestellt werden, wie z. B. manuelle Pegelmessgeräte, optische Pegelmessgeräte, Radarsensoren und hydromechanische Pegelmessgeräte. Es ist zu beachten, dass die Wahl der Methode an die spezifischen Anforderungen und Bedingungen des jeweiligen Gewässers angepasst werden muss. Eine gründliche Analyse der Umweltbedingungen, der geographischen Lage und des zu erwartenden Wasserstandes ist erforderlich, um die geeignete Methode und Technologie auszuwählen [20]. Die Geräte sowie die jeweiligen Anforderungen an die Systeme sind ebenfalls in der DIN 4373 beschrieben [57].

Der Lattenpegel ist eine weit verbreitete, nicht-digitale und kostengünstige Lösung zur Bestimmung des aktuellen Wasserstandes [57]. Aufgrund der fehlenden digitalen Aufzeichnung eignet sich das Verfahren jedoch nicht unmittelbar zur kontinuierlichen, autonomen und automatischen Überwachung von Fließgewässern. Mittels auf den Lattenpegel fokussierter Kamertechnik und dem Einsatz von Bilderkennungstechniken ist eine digitale Aufzeichnung möglich, wobei gute Sichtverhältnisse erforderlich sind [57]. Die Vorteile des Systems liegen in der Einfachheit und der Unabhängigkeit von der Stromversorgung [20]. Der Lattenpegel wird häufig zusätzlich zu einer anderen Messmethoden eingesetzt und gilt als Standardausrüstung einer Pegelstation [192]. Auf einer Skala an der Latte wird der Wasserstand direkt abgelesen.



Abbildung 2.9: Fotoaufnahme eines Lattenpegels. Aufgenommen im Fischbachtal (Odenwald). (Eigene Aufnahme)

Der Schwimmerpegel misst den Wasserstand mit Hilfe eines Schwimmers, der sich in einem separaten Pegelschacht oder Pegelrohr befindet. Das System ist zuverlässig und kann wie auch der Lattenpegel ohne Stromversorgung betrieben werden [57]. Mit einer angeschlossenen Auswerteeinheit ist auch eine kontinuierliche Überwachung und Datenaufzeichnung möglich. Das System wird häufig an Wasserstraßen eingesetzt, da der Schwimmerschacht kurzfristige Wasserspiegelschwankungen, z. B. durch Schiffsverkehr, dämpft [57], [192]. Zu beachten ist, dass diese Methode in der Regel ein separates Bauwerk für den Pegelschacht oder das Pegelrohr für die Messung erfordert. Im Vergleich zu den anderen Messmethoden ist diese Methode aufgrund der mechanischen Teile auch wartungsintensiver [20], [57].

Der Drucksondenpegel ist ein Verfahren zur Messung des Wasserstandes mit Hilfe von Drucksonden. Diese werden in das Gewässer eingebracht und messen den hydrostatischen Druck beispielsweise mittels einer Messmembran [192]. Die Messung erfolgt kontinuierlich und die Daten können automatisch aufgezeichnet werden. Der aufgezeichnete Druck kann dann in die Höhe der Wassersäule umgerechnet werden. Dieses Verfahren kann auch bei Gewässer mit einem hohen Schwebstoffanteil eingesetzt werden [57]. Allerdings kann insbesondere die Installation für Kurzzeitmessungen aufwendig sein. Zudem ist das System anfällig für Verkalkung oder Verockerung [20]. Das System wird z. B. vom Mobilien Pegeltrupp des THW eingesetzt (siehe Kapitel 3.4.2).

Der Ultraschallpegel ist ein einfaches und berührungsloses Verfahren zur Messung des Wasserstandes [154]. Bei diesem Verfahren wird die Laufzeit eines von einem Sensor ausgesandten und von der Wasseroberfläche reflektierten Schallsignals gemessen. Diese sogenannte Laufzeit (Δt) kann in Abhängigkeit von der Ausbreitungsgeschwindigkeit (c), die von der Lufttemperatur, dem Luftdruck sowie der Luftfeuchtigkeit abhängt, in eine Entfernung (D) umgerechnet werden [154].

$$D = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (2.1)$$

mit:

D Abstand zwischen Sensor und Wasseroberfläche [m]

c Schallgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

Δt Laufzeit [s]

Die Entfernung kann dann über ein bekanntes Bezugsniveau in den Wasserstand (h) umgerechnet werden. Dazu muss der Sensor an einer möglichst störungsfreien Struktur über dem Wasser befestigt werden. Für die in der Hydrometrie geforderte Genauigkeit reichen einfache Ultraschallsensoren nicht aus. Hier müssen nach dem *Pegelhandbuch* Systeme mit einem Referenzsensor eingesetzt werden [20]. Die automatische Datenerfassung und -speicherung ist aufgrund der meist bereits digitalen Auswertung einfach möglich. Außerdem hat das System keinen direkten Kontakt zum Wasser, was zu einer längeren Lebensdauer und einem einfacheren und geringeren Wartungsaufwand führt [57]. Zudem kann das Messsignal durch Störfaktoren wie zum Beispiel Treibgut, Schaum oder sogenannte Rückstreuverluste beeinträchtigt werden [57], [154]. Eine exakte Messung der Temperatur ist ebenfalls erforderlich, sofern kein Referenzfühler verwendet wird, da bereits eine Änderung der Lufttemperatur um 1 Kelvin die Schallgeschwindigkeit um 0,18 % ändert [154, S. 68].

Weitere Pegelarten

Neben den beschriebenen Pegelarten gibt es noch weitere, wie z. B. den Radarpegel oder den Einperlpegel. Die Funktionsweise des Radarpegels ist ähnlich der des Ultraschallpegels, jedoch unter Verwendung elektromagnetischer Wellen. Der Einperlpegel erfasst den hydrostatischen Druck der Wassersäule über eine Öffnung (Einperlöffnung) im Gewässer [192]. Diese beide Pegelarten sowie die Vor- und Nachteile aller Pegelmessverfahren sind detailliert im *Pegelhandbuch* beschrieben [20]. Die zur Erfassung notwendigen Geräte sind in der DIN 4373 hinsichtlich der notwendigen Genauigkeit sowie der Stärken und Schwächen aufgeführt [57]. Aus den bisherigen Informationen zu Pegelmessverfahren wird bereits deutlich, dass aufwendige Messverfahren, die z. B. eigene Bauwerke oder zusätzliche Messinstrumente erfordern, für den mobilen Einsatz im Rahmen von Hochwasserkatastrophen nicht geeignet sind.

2.3.2. Daten- und Informationsportale

In diesem Kapitel werden verschiedene Daten- und Informationsportale vorgestellt, die zur Beurteilung einer Hochwassersituation genutzt werden können bzw. der Bevölkerung zur Verfügung stehen. Beginnend mit EFAS, einem europaweiten Portal, wird anschließend auf nationale und abschließend auf lokale Portale eingegangen. Die hier aufgeführte Liste ist eine Auswahl von ausgewählten Produkten und gibt einen Überblick über die heterogenen Informationsquellen. Darüber hinaus wird bei den einzelnen Portalen geprüft, inwieweit ein automatisierter Datenzugriff z. B. über eine Application Programming Interface (API) möglich ist und wenn ja, ob hierfür eine Dokumentation vorliegt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für ausgewählte Portale die API-Spezifikation im OpenAPI-Format erstellt (siehe Tabelle 4.3). Durch die Dokumentation der Schnittstellen

wird die Nutzung und Anbindung der Portale erleichtert. So kann beispielsweise automatisch Quellcode in verschiedenen Programmiersprachen generiert werden, um die Schnittstelle mittels einer Bibliothek zu nutzen (siehe auch Kapitel 4). Die Spezifikationen dienen ebenfalls als Grundlage für das Konzept zur Standardisierung von Sensordatenschnittstellen (siehe Kapitel 6). Darüber hinaus sind die Spezifikationen veröffentlicht und können so auch von anderen Anwendern genutzt werden. Die maschinenlesbare Spezifikation wird daher als Ausgangspunkt für weitere Anwendungen und Systeme betrachtet, die es ermöglichen, die Daten zu integrieren und damit auch anderen Endnutzern zugänglich zu machen.

European Flood Awareness System (EFAS)

Die Europäische Union (EU) hat ein Überwachungs- und Warnsystem für Hochwasser in Europa entwickelt, das European Flood Awareness System (EFAS). Um Vorhersagen über mögliche Überschwemmungen zu treffen, nutzt EFAS Daten aus verschiedenen Quellen, darunter Wettersatelliten und Niederschlagsradars. EFAS ist in der Lage, Vorhersagen für große Gebiete in Europa zu erstellen und kann daher vor allem zur Früherkennung von Hochwassersituationen und zur frühzeitigen Planung von Einsatzkräften eingesetzt werden. Im Rahmen der Hochwassersituation im Juli 2021 gab EFAS auch Hinweise auf eine Hochwassersituation anhand sogenannter *Flash Flood Indikatoren*. Da die auf Bodenfeuchtesimulationen und Wettervorhersagen basierenden Indikatoren jedoch nur zweimal täglich aktualisiert werden und zudem für ein Einzugsgebiet kleiner 2.000 km² und ohne Pegeldata erstellt werden, sind sie nur eine von vielen Zusatzinformationen für die zuständigen Behörden [16, S. 48]. Der Datenzugriff auf Live-Daten ist derzeit nur den EFAS-Partnern gestattet und ist vor allem für die nationalen Warneinrichtungen der Länder als Grundlage für Hochwasserwarnungen relevant. Ein einfacher kartenbasierter Zugriff ist nur für die Anomalie der Bodenfeuchtigkeit möglich [46].

Länderübergreifendes Hochwasserportal (LHP)

Die zentrale Einheit in Deutschland im Bereich der Hochwasserwarnung bzw. des Hochwassermonitorings ist das Länderübergreifende Hochwasserportal (LHP) [12]. In diesem Portal werden die Daten der Länder sowie weiterer Behörden zusammengeführt und der Zustand der einzelnen Pegel anhand einer Karte dargestellt. Ein wichtiger Bestandteil des Portals sind die jeweiligen Hochwasserberichte der Länder, die im Hochwasserfall detaillierte Informationen zur Lage und zur Vorhersage liefern sollen. Darüber hinaus stellt das Portal die für die Hochwasserlage wichtigen Wetterdaten aus den Daten des DWDs (Deutscher Wetterdienst) dar. Das Portal bietet offiziell keine API oder Beschreibung einer API an. Im Rahmen der Forschungsarbeit im Bereich Open Data hat der Autor diese API dokumentiert, um die Daten bzw. die Schnittstelle auch für andere Anwender einfach nutzbar zu machen (siehe Kapitel 4). Über die Schnittstelle sind z. B. die Hochwasserberichte der einzelnen Bundesländer sowie Pegelinformationen abrufbar.

Pegelonline - Portal der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Dieses Online-Portal veröffentlicht Daten aus dem Projekt *Gewässerkundliches Informationssystem* der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), das neben umfangreichen Pegelmessungen auch

weitere Wasserparameter wie Temperatur, Leitfähigkeit beinhaltet. Betreut wird das Portal vom (WSV) und betrieben vom Informationszentrum Bund (ITZBund). Die Daten werden aktuell und kostenfrei zur Verfügung gestellt [79]. Neben der Visualisierung der Daten im Portal selbst liegt der Fokus insbesondere auf der Bereitstellung von Daten Dritter. Hierzu werden verschiedene Schnittstellen zur Integration der Daten angeboten. Eine umfangreiche und flexible Schnittstelle stellt dabei die REST-API dar, die durch eine HTML-Dokumentation auch menschenlesbar beschrieben ist. Neben der API gibt es auch WMS- und WFS-Dienste zur Darstellung der tagesaktuellen Pegelwerte in Kartenanwendungen. Die bereits umfangreiche textuelle Dokumentation der REST-API wurde durch die Erstellung einer OpenAPI-Spezifikation im Rahmen des BundDEV-Projekts durch den Autor maschinenlesbar gemacht (siehe Kapitel 4). Die API ermöglicht umfangreiche Abfragen zu den Pegeln einschließlich der Wasserstände sowie zu den Fließgeschwindigkeiten und anderen Gewässerparametern, soweit diese erfasst werden. Darüber hinaus können Zeitreihen als Daten oder Infografiken abgefragt werden.

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Informationen über die aktuelle Wetterlage sowie Wettervorhersagen werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Der DWD ist nach dem *Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (DWDG)* eine Anstalt des öffentlichen Rechts im Geschäftsbereich des *Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Neben Wetterinformationen gibt der DWD Warnungen vor verschiedenen Gefahrenlagen heraus und leitet diese an die zuständigen Stellen weiter. Die Daten des DWDs können neben der Webseite auch über eine API abgerufen werden. Eine inoffizielle Dokumentation der API wurde im Rahmen des Projekts BundDEV (siehe Kapitel 4) erstellt und kann öffentlich eingesehen und genutzt werden [27].

Länderspezifische Hochwasser Portale: Messdatenportal und Hochwasserportal des HLNUG

Neben dem bereits beschriebenen länderübergreifenden Hochwasserportal, das selbst keine Daten erhebt, sondern Daten aus anderen Quellen zusammenfasst, gibt es länderspezifische Portale der einzelnen Bundesländer. Ein Beispiel für das Bundesland Hessen ist das *Hochwasserportal Hessen* [88]. In diesem Portal werden die für die Beurteilung der Hochwasserlage notwendigen Informationen gebündelt dargestellt. Kernelement ist eine Kartendarstellung, die die Hochwassersituation an den Pegeln durch farbliche Markierungen wiedergibt. Zusätzlich können Informationen über den Niederschlag in Hessen der letzten 6, 12 und 24 Stunden angezeigt werden. Die Daten der insgesamt 178 Pegel (Zugriff am 10.02.2023) stammen aus verschiedenen Quellen und werden von Regierungspräsidien, Wasserversorgern oder der WSV (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes) betrieben. Für die einzelnen Pegelstationen besteht die Möglichkeit, die Messdaten als CSV²- oder Excel-Datei zur Auswertung herunterzuladen. Eine Nutzung der Daten mittels API wird vom Anbieter nicht beschrieben. Durch die Analyse der Netzwerkabfrage des Portals konnte jedoch eine API identifiziert werden, mit der die aktuellen Pegelstände abgefragt werden können. Diese Schnittstelle wurde im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe einer OpenAPI-Spezifikation beschrieben und veröffentlicht [108] (siehe auch Kapitel 4). Neben dem Hochwasserportal stellt das Land Hessen weitere Umweltdaten in einem Messdatenportal zur Verfügung. Für eine Lageeinschätzung können z. B. Grundwasserstände sowie Luftparameter aus diesem

²Dateiformat Comma-Separated Values (CSV): Textdatei mit einfacher Struktur.

Portal bezogen werden. Auch hier gibt es keine offizielle API-Spezifikation. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Dokumentation erstellt und veröffentlicht [106]. Andere Bundesländer bieten ebenfalls länderspezifische Portale an, die sich in der Regel in der Struktur der Daten und Datenschnittstellen unterscheiden. In Rheinland-Pfalz werden Pegeldata z. B. über die Geodaten-Wasser-RLP-API zur Verfügung gestellt. Auch für diese Schnittstelle ist keine offizielle Dokumentation verfügbar, daher wurde für die spätere Nutzung eine Spezifikation erstellt und veröffentlicht [105].

THW: Webseite des Mobilen Pegeltrupps

Das Technische Hilfswerk stellt mit dem Mobilen Pegeltrupp eine Einheit zur mobilen Pegelmessung zur Verfügung. Die Kräfte sind bundesweit im Rahmen der Hilfeleistung einsetzbar und können durch die eingesetzte Pegelmessung zur Klärung der Lage oder als Ersatz für ausgefallene Pegelstationen dienen. Ein Trupp besteht dabei aus mehreren Einsatzkoffern, die mittels Drucksonden Wasserstände messen können. Die Datenübertragung erfolgt über GPRS und ermöglicht die Visualisierung der Daten über ein Webinterface [206]. Zusätzlich sind Warnungen oder Informationen per SMS möglich. Das System wurde beispielsweise auch während des Hochwassers im Juli 2021 im Ahrtal zur Überwachung der Wasserstände während des kontrollierten Abpumpens eingesetzt [208]. Die Webseite des Pegels zeigt Datenauszüge der mobilen Messungen. Die dafür verwendete API ist nicht dokumentiert und wurde vom Autor erstellt (siehe Kapitel 4) [102]. Eine detaillierte Beschreibung des Pegeltrupps als Beispiel für mobiles Monitoring findet sich im Kapitel 3.4.2.

Lokale- und Community-Projekte

Neben den hier bereits aufgeführten offiziellen Datenportalen, die Daten zur Einschätzung einer Hochwassersituation liefern können, gibt es auch Projekte von Privatpersonen und Gruppen, die Daten zur Verfügung stellen. Die Angebote sind dabei lokal sehr unterschiedlich und hängen meist von den Aktivitäten einzelner Personen oder Gruppen ab. Als Beispiel ist hier das Hochwasser-Monitoring-Projekt in Ulm genannt. Mittels Ultraschallsensoren und LoRaWAN-Funkübertragung wird an zwei Brücken in Ulm der Wasserstand bzw. eine mögliche Überflutung von Radwegen gemessen. Das Projekt wird von Mitgliedern des Ulmer Verschörschaus e.V. betrieben und die Daten sind auf der Webseite des Projekts abrufbar [217]. Neben dieser Art von Projekten sind auch lokale kommunale Projekte zu nennen. In Darmstadt wurde beispielsweise im Rahmen der Digitalstadt Darmstadt eine Datenplattform in Form einer Website eingerichtet [224]. Auf dieser sind unter anderem Umweltparameter wie die Wassertemperatur des Naturbadesees *Woog* abrufbar. Abflussdaten oder Pegelstände werden derzeit noch nicht erfasst. Auch wenn die Datenplattform den Anspruch hat, offene Daten für die Bevölkerung bereitzustellen, ist keine API-Beschreibung vorhanden. Eine API-Spezifikation wurde vom Autor dieser Arbeit durch Analyse der Webseite sowie der versendeten Abfragen erstellt und veröffentlicht [97]. Die Vorgehensweise wird in Kapitel 4.3.2 näher erläutert.

Warnungen

Warnmeldungen können auch als Informationsquelle für die Lagebeurteilung dienen. Zum Beispiel, wenn Warnungen von benachbarten oder im Hochwasserfall flussaufwärts gelegenen Stellen berücksichtigt werden.

Ein Beispiel für eine Warn-App ist die App NINA. Sie wird vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) betrieben. Neben Warnmeldungen bietet die App auch Informationen zu Katastrophen und zum Katastrophenschutz. Die Warnmeldungen werden über die Warn-App versendet, können aber auch über ein Online-Portal abgerufen werden [31]. Das Portal bündelt alle amtlichen Warnungen und Hinweise der zuständigen Stellen und stellt sie übersichtlich dar. Für die zugehörige API existiert keine offizielle Dokumentation, jedoch wurde im Rahmen des Projekts BundDEV eine OpenAPI-Spezifikation erstellt (siehe Kapitel 4). Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Warnsysteme und Portale näher vorgestellt.

2.3.3. Warnung der Bevölkerung

Die Warnung vor Katastrophen wie Hochwasser fällt in den Bereich der Katastrophenabwehr. Als Bundesgesetz gilt hier das *Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (ZSKG)*, das für die Warnung der Bevölkerung auf die jeweils zuständigen Behörden der Länder verweist (§ 6 Warnung der Bevölkerung, *ZSKG*). Dabei kann der Bund ergänzend tätig werden, wenn die zuständige Behörde nicht über die erforderlichen Mittel zur Warnung verfügt. Für Hessen ist die Zuständigkeit für Warnungen im *HBKG* (§ 3 (1) Nr. 5 und § 34a) näher spezifiziert. Örtlich sind diese Warnungen von der zuständigen Führungsstelle so schnell wie möglich selbständig zu veranlassen, wobei die aktuell verfügbaren Kräfte und Mittel im dringend erforderlichen Umfang einzusetzen sind. Neben der Sirenenwarnung zur Information der Bevölkerung werden zudem Warnmittel wie Apps und Medienhinweise eingesetzt. Zur Aktivierung der Medienhinweise ist in Hessen eine *Amtliche Gefahrendurchsage* erforderlich. Ein hierfür erforderliches Durchsageersuchen kann in Hessen nur von der Landesmeldestelle der hessischen Polizei an die öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten gerichtet werden. Die öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten haben sich verpflichtet, die Warndurchsagen in ihrem Programm zu verbreiten [92, S. 26-28]. Für eine landesweite Verbreitung einer *Amtlichen Gefahrendurchsage* kann das Lagezentrum der Hessischen Landesregierung über das *Modulare Warnsystem (MoWaS)* des BBKs alle Rundfunk- und Fernsehanstalten (öffentlich-rechtliche und größere private) direkt erreichen. Amtliche Gefahrendurchsagen sind amtliche Mitteilungen, die von den zuständigen Behörden wie dem DWD herausgegeben werden, um die Bevölkerung über eine akute oder drohende Gefahr zu informieren und entsprechende Schutzmaßnahmen anzuordnen [30]. Amtliche Gefahrendurchsagen können für verschiedene Gefahrenarten herausgegeben werden, z. B. für Hochwasser, Unwetter, Großbrände, technische Unfälle oder terroristische Bedrohungen. Sie enthalten in der Regel Informationen über die Art der Gefahr, das betroffene Gebiet und die empfohlenen Schutzmaßnahmen. Sie dienen dazu, die Bevölkerung auf eine mögliche Gefahr aufmerksam zu machen und sie dazu zu bewegen, die empfohlenen Schutzmaßnahmen zu befolgen, um sich und andere zu schützen. An MoWaS sind unter anderem auch Warn-Apps wie NINA oder BIWAPP angeschlossen.

Das Modulare Warnsystem (MoWaS)

„Das Modulare Warnsystem (MoWaS) ist ein hochverfügbares, gehärtetes System zur Warnung der Bevölkerung in Deutschland.“ - Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe [32]

Das MoWaS ist ein deutschlandweites System zur Auslösung von Warnmitteln und Warnmultiplikatoren in Not- und Katastrophenfällen. Es wurde 2001 als *Satellitengestütztes Warnsystem (SatWaS)* eingeführt

und wird seit 2011 als MoWaS betrieben. Das System nutzt 108 Sende- und Empfangsstationen sowie 250 vorlagenerstellende Sende- und Empfangsstationen und ist in der Lage, Warnungen über alle verfügbaren Kanäle zu verbreiten [32]. In den letzten Jahren wurde MoWaS zunehmend genutzt und bei Ereignissen wie Bränden, Einschränkungen der Versorgung und Infrastruktur, öffentlicher Sicherheit und Wetterkatastrophen eingesetzt. Es ist auch für die Information zu CBRN-Gefahren³ ausgelegt [32]. Technisch ist das System in drei Ebenen unterteilt: Im Bereich der Auslösung sind die Lagezentren des Bundes und der Länder als sogenanntes Vollsystem eingegliedert. Zusätzlich können über ein webbasiertes Eingabeportal Warnmeldungen von anderen Stellen an das System übermittelt werden. Die zweite Ebene ist der Übertragungsweg, der die Komponenten von der Auslösung einer Warnung bis zum Endnutzer, z. B. über Warnmultiplikatoren, umfasst. Als Warnmultiplikatoren werden Behörden, Telemedienanbieter sowie Organisationen bezeichnet, die die Warnmeldung an die Bevölkerung weiterleiten. Auf der letzten Ebene befinden sich die Endgeräte (bzw. Endanwendungen), welche die eigentlichen Warnmittel darstellen. Dazu gehören Warntexte in den Medien sowie Warnungen über mobile Anwendungen oder das Internet. Die Warnung bzw. Benachrichtigung zwischen den Stationen des BBKs und den Behörden erfolgt über Satelliten und redundante Kabelverbindungen.

Tabelle 2.4: Warnstufen, Bezeichnungen und Bedeutungen der Warnungen von MoWaS. (Quelle: [30])

Warnstufe	Priorität	Bezeichnung	Bedeutung: Im ausgewählten Warnbereich besteht eine ...
1	höchste	Amtliche Gefahrendurchsage	<i>kurzfristige zu erwartende oder bereits eingetretene Gefahr für Leib und Leben, für Sachschäden und der Infrastruktur. Der normale Lebensablauf wird unmöglich.</i>
2	mittlere	Amtliche Gefahrenmitteilung	<i>zu erwartende oder bereits eingetretene Gefahr, welche die Unversehrtheit der Bevölkerung bedroht und/oder zu erheblichen Schäden, auch bei der Infrastruktur führen kann. Der normale Lebensablauf ist wesentlich beeinträchtigt.</i>
3	niedrige	Gefahreninformation	<i>zu erwartende oder bereits eingetretene Beeinträchtigung. Eine über Beeinträchtigungen hinausgehende konkrete Gefahr besteht (voraussichtlich) nicht.</i>

Die Warnung über Sirenen muss derzeit von den Kommunen selbst ausgelöst werden. Es ist jedoch geplant, diese Funktion in Zukunft in MoWaS zu integrieren und gegebenenfalls auch den Digitalfunk der BOS zu nutzen [121]. Das System wurde beispielsweise im Rahmen der Hochwasserlage in Deutschland zwischen dem 12. und 19. Juli 2021 eingesetzt und gab insgesamt 288 Warnungen, Aktualisierungen und Entwarnungen heraus. Diese wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD), den Landesbehörden, den betroffenen Landkreisen und Kommunen veranlasst. Zur Aufarbeitung der Warnung sowie des Ablaufs während der Hochwasserlage wurden alle Warnmeldungen und Protokolle vom BBK als Download zur Verfügung gestellt [29]. Eine Auswertung dieser Warnmeldungen zur Einordnung der Situation findet sich in Kapitel 2.4.2.

³Chemische, biologische, radioaktive und nukleare Gefahren.

Warn-Apps

Verschiedene Warnmittel sind direkt an MoWaS angebunden. Dazu gehören z. B. die Warn-Apps: NINA, BIWAPP, KATWARN sowie regionale Warn-Apps (z. B. hessenWARN). Die Apps stellen unterschiedliche Funktionalitäten zur Verfügung. Meist werden Warnungen oder Meldungen für die jeweilige Region auf Basis eines angegebenen oder durch Mobilfunkdaten ermittelten Standortes angezeigt. Es ist aber auch möglich, sich die Warnungen aller Regionen z. B. über eine Karte anzeigen zu lassen. Darüber hinaus enthält die Warn-App NINA auch allgemeine Informationen und Hinweise zum Umgang mit Gefahrensituationen. Zusätzlich wird über die Medien (Radio, Fernsehen) sowie über eine Internetseite über die Ereignisse berichtet [31], [32].

Warnung in sozialen Medien

Neben den bundesweiten Warnungen veröffentlichen Kommunen und Länder Informationen zu besonderen Lagen auch über soziale Medien und eigene Websites. Hierfür gibt es in der Regel keine zentrale Plattform oder Schnittstelle, die abgefragt werden kann.

Cell Broadcast

Nach dem verheerenden Hochwasser im Ahrtal im Juli 2021 ist der sogenannte Cell Broadcast auch in Deutschland umgesetzt worden. Das BBK hat das System, das unabhängig von der Installation einer App Warnungen an alle unterstützten Mobilfunkgeräte sendet, die sich in einem bestimmten Mobilfunknetzgebiet befinden, am 23. Februar 2023 in Betrieb genommen [34]. Im Dezember 2022 wurde diese Funktionalität im Rahmen des zweiten nationalen Warntages getestet.

2.4. Hochwasserkatastrophe in Südwestdeutschland im Juli 2021

Neben den bereits erarbeiteten Grundlagen wird nun anhand der verheerenden Hochwasserkatastrophe in Südwestdeutschland im Juli 2021 die Vorgehensweise der Einsatzkräfte sowie die Nutzung von Monitoringdaten während der Katastrophe analysiert. Die Hochwasserkatastrophe wird in ihren Grundzügen dargestellt, der Fokus liegt auf der Analyse der Pegelmessungen, der Warnung sowie der genutzten Infrastruktur zur Überwachung der Hochwassersituation, um daraus Rückschlüsse und Anforderungen für das zu entwickelnde Monitoringsystem ableiten zu können. Eine rechtliche Betrachtung der Situation sowie der Verantwortlichkeiten wird nicht durchgeführt. Zunächst werden die allgemeine Wetterlage sowie die deutschlandweiten MoWaS-Warnungen eingeordnet. Anschließend wird die Situation im Ahrtal (Rheinland-Pfalz), einer besonders betroffenen Region mit hohen Schäden während des Hochwassers, anhand der regionalen Hochwasserfrüh- und KATWARN-Warnungen, Berichte sowie Pegelmessungen vor Ort näher betrachtet.



Abbildung 2.10: Zerstörte Brücke im Ahrtal (links) sowie Ersatzbrücke des THW (rechts) in der Nähe von Rech (Ahrtal, Rheinland-Pfalz). (Eigene Aufnahmen im März 2023)

2.4.1. Ausgangslage

Bereits vor der eigentlichen Hochwassersituation und vor dem Eintreffen des Tiefs *Bernd* war die Region von wiederkehrenden Starkniederschlägen betroffen. Aufgrund des tiefen Luftdrucks über Mitteleuropa in Verbindung mit einem Höhentief war die Troposphäre nach Junghänel et al. instabil geschichtet [118]. Das Tief *Bernd* führte warme und sehr feuchte Luftmassen aus dem Mittelmeerraum nach Deutschland, gleichzeitig zog Kaltluft aus Frankreich nach Deutschland und die Vermischung dieser Luftmassen führte zu Kondensationsprozessen und extremen Niederschlägen [14, S. 15]. Zusätzlich kam es in den westlichen Mittelgebirgen durch Hebung (orographisch und dynamisch) und leichte Staueffekte zu einem langsamen Vorankommen des Tiefs. Neben diesen enormen Niederschlagsereignissen ist auch die Bodenfeuchte bzw. das Rückhaltevermögen des Bodens eine Ursache für das hohe Hochwasserpotenzial [118]. Durch die anhaltenden Niederschläge vor Eintreffen des Tiefdruckgebietes *Bernd* waren die Böden größtenteils nicht mehr in der Lage Wasser aufzunehmen. Dies galt insbesondere für die Gebiete in Rheinland-Pfalz und Südwestfalen. Eine nachträgliche detaillierte Analyse der Wetterlage erfolgte durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) [118].

2.4.2. Analyse der MoWaS-Warnungen

Die Protokolle der Warnmeldungen der Landes- und Kommunalbehörden sowie des DWDs zur Hochwassersituation im Juli 2021 über MoWaS wurden nachträglich zum Download bereitgestellt [29]. Die Daten liegen als einzelne Dokumente im Portable Document Format (PDF) vor (jeweils ein Dokument pro Warnung bzw. Entwarnung).

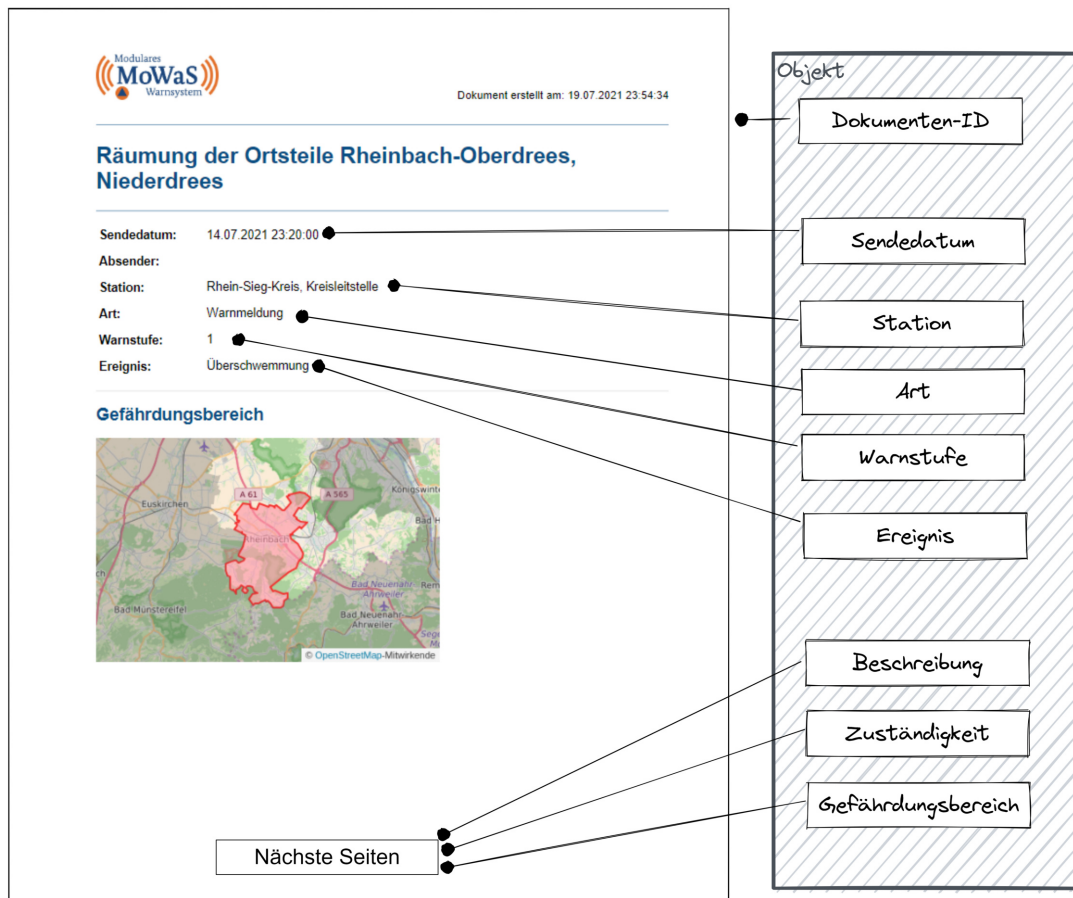


Abbildung 2.11: Darstellung der Textanalyse einer MoWaS-Warnung im PDF-Format zu einem verarbeitbaren Objekt. (Eigene Darstellung)

Eine automatische Auswertung der gesamten 288 Dokumente erfordert daher eine Konvertierung der PDF-Textinhalte in maschinenlesbare Inhalte. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Skript implementiert, das mittels Textanalyse die relevanten Inhalte aus dem PDF ausliest und zur Auswertung in einem Objekt speichert. Als relevante Inhalte wurden unter anderem *Art der Warnung*, *Zeitpunkt* sowie *Gefahrenbereich* definiert (siehe auch Abbildung 2.11). Die Auswertung orientiert sich an dem von BBK für die Übermittlung verwendeten Common Alerting Protocol (CAP)-Format [33]. Per Skript kann anschließend die Auswertung und Darstellung erfolgen. Für diese Auswertung wurden die Programmiersprache Python und verschiedene Bibliotheken zum Einlesen der PDFs und zur Darstellung der Ergebnisse verwendet. Die Auswertung wurde in einem eigenen Repository auf GitHub veröffentlicht [107]. Bei der Analyse der Warnungen wird deutlich, dass während der Lage eine Vielzahl unterschiedlicher Warnungen gemeldet wurden. Neben Hochwasserwarnungen (44) sind auch systemkritische Warnungen im Bereich Strom-, Telefon-, IT-Ausfall oder Notruf erkennbar. Die folgende Abbildung zeigt die jeweiligen Warnkategorien und Warnstufen in der zeitlichen Abfolge vom 14. bis 16. Juli 2021, wobei die Kategorien nach Anzahl (von wenig bis viel) sortiert sind. Warnstufe 1 bedeutet höchste Priorität, Warnstufe 2 mittlere Priorität und Warnstufe 3 niedrige Priorität (siehe auch Tabelle 2.4).

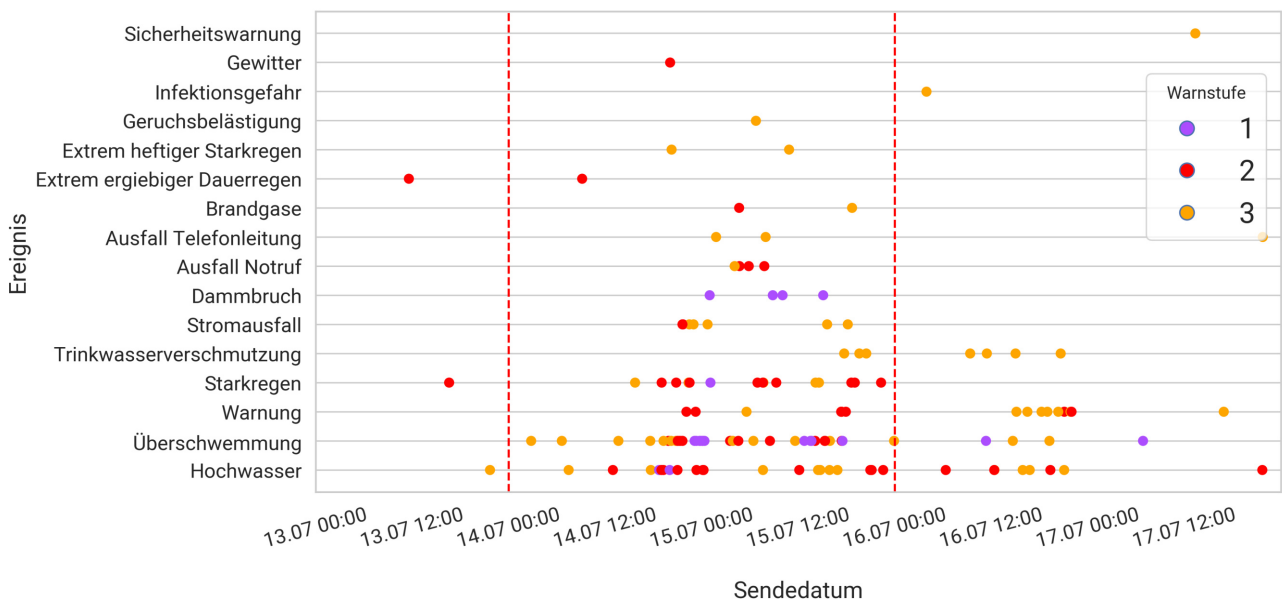


Abbildung 2.12: Zeitliche Übersicht über Warnungen des MoWaS während der Unwetterkatastrophe im Juli 2021. Rot gestrichelt ist der Bereich zwischen dem 14. und 16. Juli 2021. (Eigene Darstellung basierend auf den Warnungen des MoWaS [29])

Dass es sich um ein Wetterereignis mit weitreichenden Folgen für die Bevölkerung handelt, zeigt sich bereits an der Anzahl der Warnmeldungen. Im Jahr 2022 wurden 1.587 Meldungen über MoWaS [71] ausgegeben. Für das Jahr 2021 liegen keine Daten vor, bei Annahme einer ähnlichen Anzahl würden die Meldungen rund um das Unwetter im Juli 2021 einen Anteil von knapp 18% ausmachen. Darüber hinaus zeigt die Vielfalt der Ereigniskategorien, dass es bei dem Unwetter zu Zerstörungen in einem großen Bereich der Infrastruktur gekommen ist. Für die Informationsübermittlung sind hier insbesondere der Ausfall des Stromnetzes, des Notrufsystems sowie der Ausfall von Telefonleitungen zu nennen. Dabei ist zu beachten, dass die MoWaS-Meldungen nicht die Gesamtheit aller Warnmeldungen in Deutschland widerspiegeln, da beispielsweise in Rheinland-Pfalz überwiegend das KATWARN-System genutzt wird. Laut Berkler et al. war die Anbindung von KATWARN an das Warnsystem NINA im Juli 2021 noch nicht abgeschlossen [16, S. 42]. Eine Analyse der KATWARN-Meldungen speziell für das Einzugsgebiet der Ahr erfolgt im Kapitel 2.4.3.

Ausfall von Infrastruktur (Strom, Mobilfunk, Kommunikationseinrichtungen)

Das durch Starkregenereignisse ausgelöste Hochwasser im Juli 2021 führte zu erheblichen Schäden an der Infrastruktur. Wie den Warnmeldungen von MoWaS zu entnehmen ist, kam es sowohl zu Stromausfällen als auch zu Ausfällen der Notfallinfrastruktur. Rund 64.400 Haushalte waren zwischenzeitlich von der Stromversorgung abgeschnitten, da Betriebsmittel des Stromnetzes, insbesondere Netzstationen sowie Leitungen, zerstört wurden. Seit Mitte August 2021 ist die Stromversorgung zwar provisorisch, aber nahezu vollständig wiederhergestellt [152]. Auch Mobilfunk- und Internetverbindungen waren für einige Tage nicht vollständig verfügbar [16, S. 23]. Im Bereich der Kommunikationseinrichtungen waren Ausfälle hauptsächlich auf

Stromausfälle zurückzuführen. Während des Hochwassers fielen ca. 560 Mobilfunkstationen aus⁴. Am 19. Juli 2021 waren nur noch 106 Stationen offline⁵. 21.000 Festnetzanschlüsse von Vodafone und über 85.000 Festnetzanschlüsse der Deutschen Telekom wurden am 20. Juli 2021 als offline gemeldet. Bereits 11 Tage später konnte diese Zahl mehr als halbiert werden [152]. Berichte von Einsatzkräften vor Ort wiesen zudem auf den Ausfall des Digitalfunks (Kommunikation der Sicherheitsbehörden) hin. Häufig musste auf Zettel und Stift als Kommunikationsmittel und zur Übermittlung der Lageeinschätzung zurückgegriffen werden [16, S. 18, S. 25, S. 30]. Nach Auskunft des Ministeriums des Innern und für Sport wurden durch das Hochwasser Übertragungsleitungen beschädigt, die zeitnah vollständig repariert werden konnten [148].

2.4.3. Betrachtung der Umstände im Ahr-Einzugsgebiet

Die Hochwassersituation führte bundesweit zu Personen- und Sachschäden, wobei insbesondere im Einzugsgebiet der Ahr die meisten Todesopfer (134) und die größten Schäden zu beklagen waren. Mindestens 17.000 Menschen verloren dabei ihr Eigentum [16, S. 23]. Die Ahr mündet in den Rhein und verläuft durch die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz (siehe Abbildung 2.13).

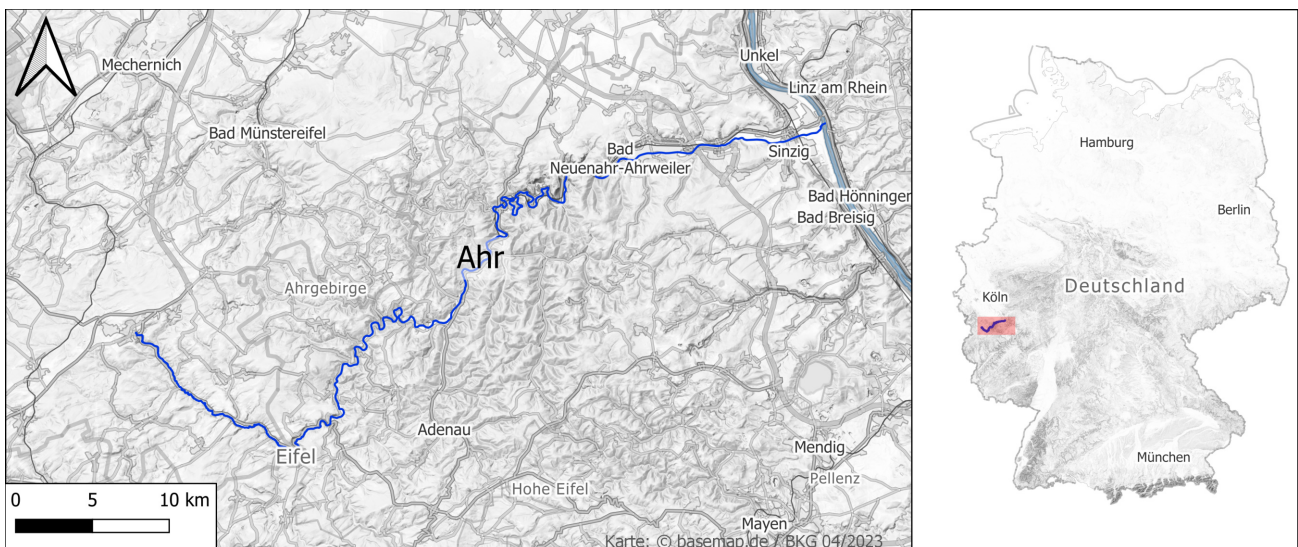


Abbildung 2.13: Karte des Verlaufs der Ahr. (Eigene Darstellung)

Die Topographie des Ahrtales mit engen Tälern führte zu schnell ansteigenden Wasserständen. Nach Gutachten des *Landesamtes für Umwelt Rheinland-Pfalz* und Auswertungen des Hochwassers an der Ahr sind zudem Verklausungen eine Ursache für lokal besonders hohe Wasserstände. Die durch die Verklausung bedingten Aufstauungen führten zu Wasserstandsanstiegen von mehr als 2 m [119, S. 18][16, S. 23]. Verklausung ist die Verstopfung von Gewässern, insbesondere von Flüssen, durch Müll, Schlamm, Bäume oder andere Hindernisse. Dies kann dazu führen, dass das Wasser nicht mehr ungehindert abfließen kann und sich in bestimmten Bereichen aufstaut, was wiederum die Hochwassergefahr erhöhen kann [202, S. 598]. Das

⁴Deutsche Telekom: 300, Vodafone: ca. 250, O2: 7 [152, S.15].

⁵Deutsche Telekom: 48, Vodafone: 54, O2: 4 [152, S.15].

Ahrtal war bereits in der Vergangenheit von Hochwasserereignissen betroffen, das Hochwasser im Juli 2021 übertraf jedoch die bisherigen Hochwasserereignisse deutlich. Grundsätzlich liegen für die Region im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements Hochwassergefahrenkarten vor, die die möglichen Überflutungsflächen im Hochwasserfall abschätzen [151]. Aufgrund der besonderen meteorologischen Situation sowie lokaler Veränderungen (z. B. Verkläuerungen) ist die Situation durch Karten und Modellberechnungen nur schwer oder unzureichend abschätzbar. Eine Berücksichtigung dieser Effekte ist vorab in Form von Worst-Case-Szenarien möglich, die hydraulisch berechnet werden und die Hochwassergefahrenkarten ergänzen können [16, S. 40].

Nach Auswertung der vom BBK zur Verfügung gestellten Warnungen sowie der Medienberichte wurde festgestellt, dass keine Warnung explizit für das Ahrtal bzw. den Landkreis Ahrweiler über MoWaS ausgegeben wurde [65], [116], [120]. Laut Eyermann, Kirschstein sowie der Antwort der Stadt Koblenz auf eine Kleine Anfrage zur Rolle der Integrierten Leitstelle Koblenz ist dies auf eine fehlende „unterzeichnete schriftliche Aufforderung in Form eines Vordrucks“ des Einsatzleiters vor Ort zurückzuführen, die an die Integrierte Leitstelle hätte gesandt werden müssen [65], [120], [150]. Über das in der Region eingesetzte Warnsystem KATWARN wurde jedoch auch durch Landkreis Ahrweiler vor dem Hochwasser gewarnt. Inwieweit die Warnungen zu spät oder unzureichend ausgegeben wurden und ob hier ein Fehlverhalten der Verantwortlichen vorliegt, wird u.a. in einem Untersuchungsausschuss des Landtages Rheinland-Pfalz untersucht [131] und ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Im Folgenden werden zunächst die Pegelstationen im Ahrtal und anschließend die Warnmeldungen von KATWARN analysiert. Auf der Grundlage dieser Analysen wird ein Fazit zur Hochwassersituation und mögliche Lehren aus den vorliegenden Informationen gezogen.

Pegelstationen Einzugsgebiet der Ahr

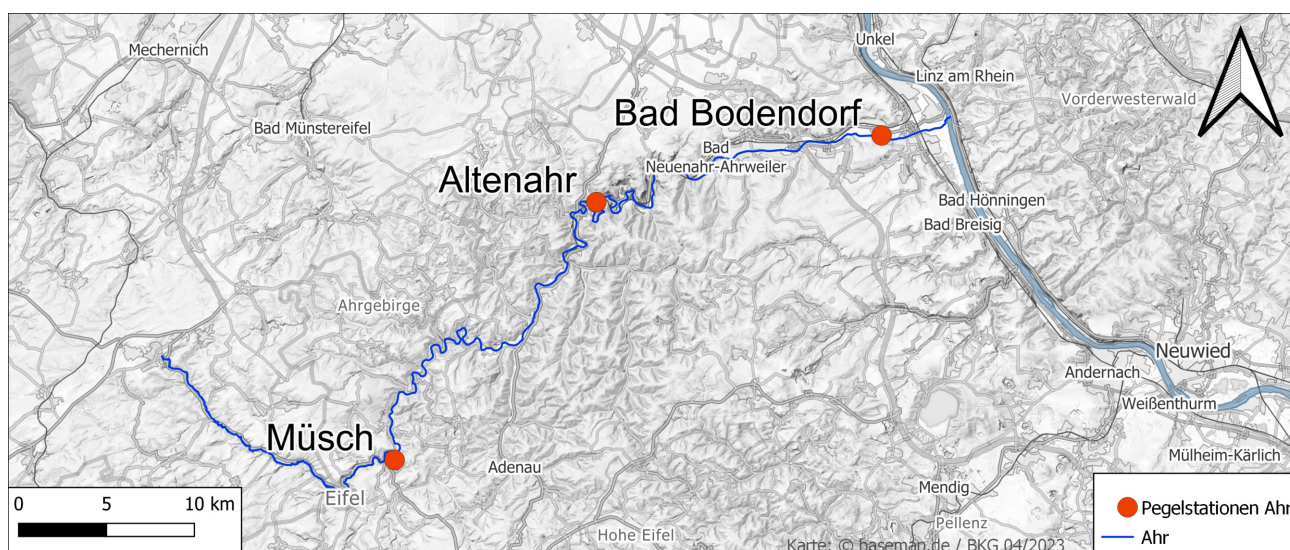


Abbildung 2.14: Lage der Pegelstationen an der Ahr. (Eigene Darstellung)

Während des Hochwassers wurden vor allem an kleineren Gewässern viele Pegelstationen zerstört oder die Messungen wurden unzuverlässig bzw. durch Strom- und Mobilfunkausfälle unterbrochen [228, S. 7], [16, S. 26]. Dies führte auch dazu, dass die Höchststände nicht anhand von Pegelmessungen ermittelt werden konnten, sondern anhand von Hochwassermarken rekonstruiert wurden.

An der Ahr sind drei Pegel zur Wasserstandsmessung installiert (siehe Abbildung 2.14). Die Pegel verfügen jeweils über einen Hauptmessgeber und einen redundanten Messgeber zur Erfassung des Wasserstandes. Nachfolgend wird beispielhaft der Pegel Altenahr, welcher hauptsächlich für die Modell- und Vorhersagenberechnungen verwendet wird [133], vorgestellt. Der Pegel Altenahr wurde 1991 eingerichtet und verfügt über zwei unabhängige Messverfahren zur Wasserstandsmessung (siehe Tabelle 2.5) [130]. Die zehn höchsten Wasserstände vor dem Hochwasser 2021 liegen zwischen 371 cm (2016) und 293 cm (1993). Wie in Abbildung 2.15 dargestellt, liegt der rekonstruierte Höchststand mit 1.000 cm [16, S. 28] am 15.7.2021 um ca. 2:00 Uhr deutlich über den bisherigen Werten und verdeutlicht damit die besondere Schwere des Hochwassers.

Tabelle 2.5: Daten der Pegelstationen Altenahr. (Quelle: [130])

System	Messverfahren	Datenfernübertragung	Energieversorgung
A	kapazitive Druckmessung	Festnetzanschluss, analog	Festnetzstrom
B	Einperlprinzip	Mobilfunk (GSM)	Solarstrom

Alle Pegel fielen während des Hochwassers aus. Müsch und Altenahr wurden dabei sogar vollständig zerstört [16, S. 22]. Die folgende Tabelle zeigt die jeweiligen rekonstruierten Höchststände während des Juli-Hochwassers 2021 sowie den Zeitpunkt der letzten Datenübermittlung.

Tabelle 2.6: Pegelstationen im Ahrtal, Höchststand während des Hochwassers im Juli 2021 sowie der Zeitpunkt des letzten übertragenen Messwertes (Uhrzeit in MESZ). Nach Daten aus [16], [70]

Pegel	Höchststand Juli 2021 (Rekonstruktion)	letzter Messwert
Müsch	625 ± 20 cm (14.07 22:00)	14.07.21 19:15
Altenahr	1000 ± 20 cm (15.07 2:00)	14.07.21 20:45
Bad Bodendorf	480 ± 10 cm (15.07 4:30)	15.07.12 3:45

Zu beachten ist, dass am Pegel Müsch sowie am Pegel Bad Bodendorf der Hauptmessgeber bereits vor der letzten Messwertübertragung störungsbedingt ausgefallen ist. Die in der folgenden Abbildung dargestellten Messwerte stammen daher von den Redundanzgebern der Pegel.

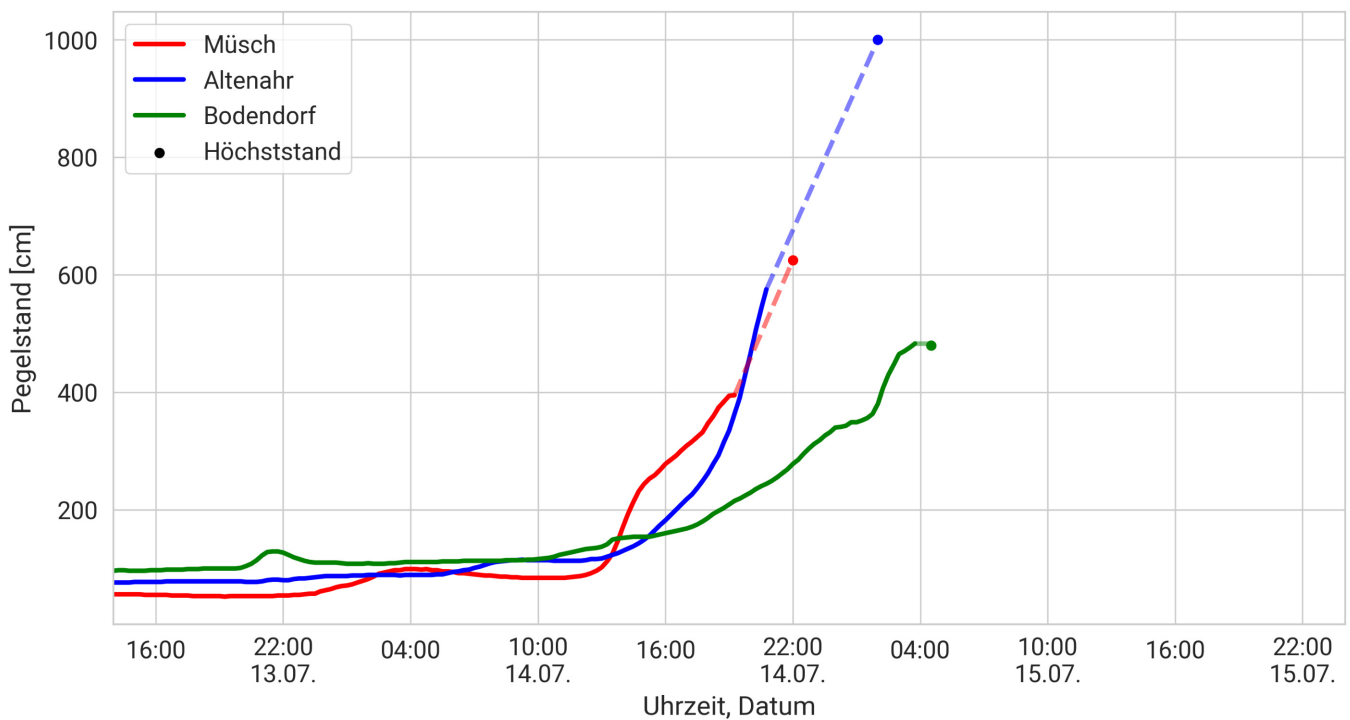


Abbildung 2.15: Pegelwerte der Pegel entlang der Ahr. Darstellung der Pegeldaten sowie der rekonstruierten Höchststände. (Eigene Darstellung nach Daten aus: [16], [70])

Die aufgezeichneten Messwerte verdeutlichen die extremen Wasseranstiege in kurzer Zeit sowie die Überschreitung der bisherigen Höchststände. Darüber hinaus ist aus den Daten ersichtlich, wie zunächst die Pegel am Oberlauf ansteigen. Der extrem hohe rekonstruierte Höchststand am Pegel Altenahr zeigt auch, dass es hier lokal zu einer besonderen Überflutung gekommen ist. Wie bereits beschrieben, sind zum Beispiel Verklauung sowie Rückstau als Ursache zu nennen [16, S. 68].

Pegelvorschau

Die Wasserstandsvorhersagen werden für die Lagebeurteilung und für die Ausgabe von automatischen Warnungen z. B. im Rahmen der Hochwasserfrühwarnung benötigt (siehe auch nächster Abschnitt zur Auswertung der Frühwarnung). Am 14. Juli wurden zehn Wasserstandsvorhersagen für den Pegel Altenahr veröffentlicht [16, S. 35]. Die Werte liegen zwischen 225 und 707 cm (siehe Abbildung 2.16). Die Vorhersagen werden in Rheinland-Pfalz von der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) in der Regel alle drei Stunden mit dem hydrologischen Wasserhaushaltsmodell *Large Area Runoff Simulation Model* (LARSIM) berechnet [132]. Das Modell bildet die Gebietseigenschaften einschließlich der aktuellen Bodenfeuchte ab. Im Hochwasserfall führt die HVZ zusätzliche Berechnungen durch, die z. B. auch verschiedene Niederschlagsdaten berücksichtigen. Nach Berkler et al. ist die Unsicherheit im Verlauf des 14. Juli 2021 vor allem auf die Unsicherheit der Wettervorhersage zurückzuführen [16, S. 37]. So ergab sich für die Vorhersage des Pegels Altenahr eine Bandbreite von 350 cm, die auf unterschiedlich vorhergesagte Niederschlagsdaten zurückzuführen ist. Außerdem war die Niederschlagsvorhersage für den Nachmittag des 14. Juli geringer als die zuvor prognostizierte Summe.

Dies führte auch zu einer Absenkung der Pegelvorhersage (siehe Abbildung 2.16). Anschließend wurde die Vorhersage wieder angepasst und auf einen Maximalwert von 707 cm angehoben. Der tatsächliche maximale Wasserstand lag jedoch auch über diesen Schätzungen und wurde später auf einen Wert von 1000 cm rekonstruiert.

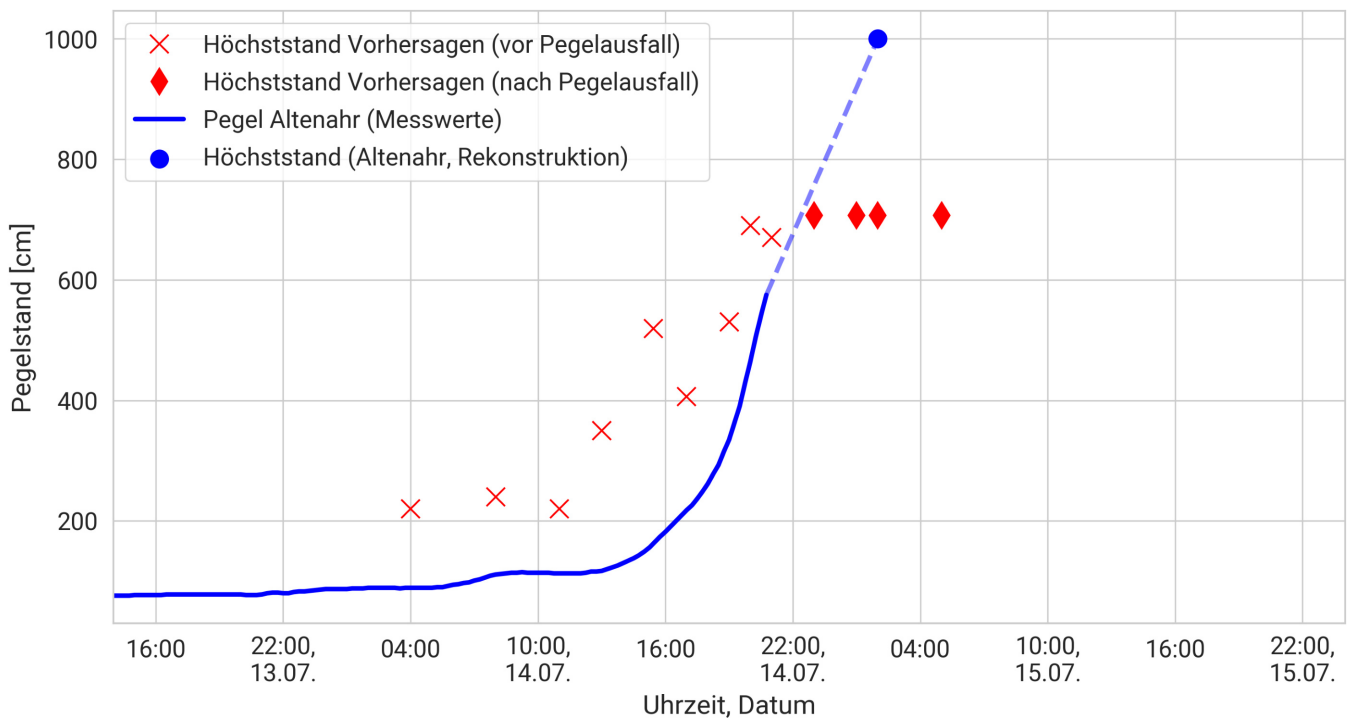


Abbildung 2.16: Vorhergesagte Höchststände für den Pegel Altenahr (Vorhersagezeitpunkt), sowie Messung des Pegel Altenahr (Höchstand rekonstruiert). (Eigene Darstellung nach Daten aus: [16, S. 36], [70])

Die vorangegangene Abbildung zeigt die in den Vorhersagen angenommenen Höchststände zum Vorhersagezeitpunkt. Der Vorhersagezeitpunkt ist der Zeitpunkt, zu dem die Vorhersage berechnet wurde. Es ist zu beachten, dass die berechneten Höchststände zu diesem Zeitpunkt nicht den aktuellen Messwert darstellen, sondern nur den berechneten Höchststand in der Zukunft. Deutlich zu erkennen ist die Absenkung am Nachmittag des 14. Juli 2021 und dass die Vorhersage nach dem Ausfall des Pegels deutlich unter dem tatsächlichen Wert liegt. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass für die Berechnung keine Wasserstände zur Verfügung standen.

Neuaufbau der Pegelstationen

Wie beschrieben wurden die Pegel Altenahr und Müsch zerstört und nach dem Hochwasser wieder aufgebaut. Der Pegel Müsch konnte aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht am gleichen Ort wieder aufgebaut werden [16, S. 26]. Er wurde daher in der Nähe einer Brücke der Bundesstraße 258 errichtet (Bezeichnung Müsch 2). Die Abbildung 2.17 zeigt den Pegel Altenahr und Müsch 2 nach der Hochwasserkatastrophe.



Abbildung 2.17: Fotoaufnahmen des Pegels Altenahr (links) und des Pegels Müsch (rechts) (seit dem Wiederaufbau als Müsch 2 bezeichnet) nach dem Hochwasser. (Quelle: Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz)

Analyse der Warnungen für das Ahr-Einzugsgebiet

Die Auswertung der Pegeldata zeigen bereits, dass es sich bei der Hochwasserlage um eine in diesem Maße noch nicht dagewesene Situation handelte. Der Warnung und Information der Bevölkerung kommt in solchen Situationen eine besondere Bedeutung zu. In diesem Abschnitt werden die durch KATWARN für das Einzugsgebiet der Ahr ausgegebenen Meldungen betrachtet. Wie beschrieben wird dieses System hauptsächlich in der Region eingesetzt, eine Anbindung an die Warn-App NINA ist im Juli 2021 noch nicht im Einsatz gewesen [16]. Für den Landkreis Ahrweiler, welcher im Ahr-Einzugsgebiet liegt, wurden zusätzlich Warnungen vom DWD über MoWaS verbreitet. Von den Behörden selber in Rheinland-Pfalz wurden allerdings keine MoWaS Warnungen ausgelöst. Da die Warnungen von KATWARN grundsätzlich nicht für die Öffentlichkeit archiviert werden, muss zur Analyse der Warnungen auf andere Veröffentlichungen zurückgegriffen werden. Zum einen wurden Daten aufgrund einer Bürgeranfrage über das Portal Frag den Staat vom Landesamt für Umwelt (LfU) (Rheinland-Pfalz) zur Verfügung gestellt [70]. Zum anderen wurden im Rahmen der Beantwortung einer Großen Anfrage einer Fraktion des Landtages Rheinland-Pfalz an das Ministerium des Innern und für Sport (Rheinland-Pfalz) auch Warnmeldungen veröffentlicht [149]. Die Veröffentlichung des LfU enthält die veröffentlichten Vorhersagen für den Pegel Altenahr sowie die über KATWARN verbreiteten Hochwasserfrühwarnungen für verschiedene Gebiete, z. B. das Einzugsgebiet der Ahr. Im Folgenden wird dieser Datensatz als Datensatz A bezeichnet. Die im Rahmen der Großen Anfrage veröffentlichten Daten enthalten wesentlich detailliertere Informationen, z. B. auch einzelne KATWARN-Meldungen, welche im JavaScript Object Notation (JSON)-Format abgedruckt in einer PDF-Datei vorliegen. Diese Daten werden im Folgenden als Datensatz B bezeichnet. Beide Datensätze werden analysiert, zur zeitlichen Einordnung der Herausgabe der Meldungen sind Messwerte der Pegelstation Altenahr sowie der Höchststand des Pegels ebenfalls in der Grafik dargestellt.

Hochwasserfrühwarnungen: Datensatz A

Der Datensatz A enthält neben den regionalen Hochwassermeldeplänen aus dem Jahr 2018 auch die über KATWARN versandten Hochwasserfrühwarnungen sowie die Pegeldata u.a. für die Pegel Altenahr, Müsch sowie Bad Bodendorf. Die Pegeldata sowie die Hochwasserfrühwarnungen vom 14.07.2021 bis 16.07.2021 liegen jeweils als Excel-Tabelle vor. Bei den Hochwasserfrühwarnungen sind außer dem Veröffentlichungsdatum, dem Vorhersagezeitpunkt und der Warnstufe (orange, rot und violett) keine weiteren Informationen enthalten. Nach Berkler et al. werden diese Frühwarnungen über KATWARN an die Bevölkerung sowie an die Behörden versendet [16].

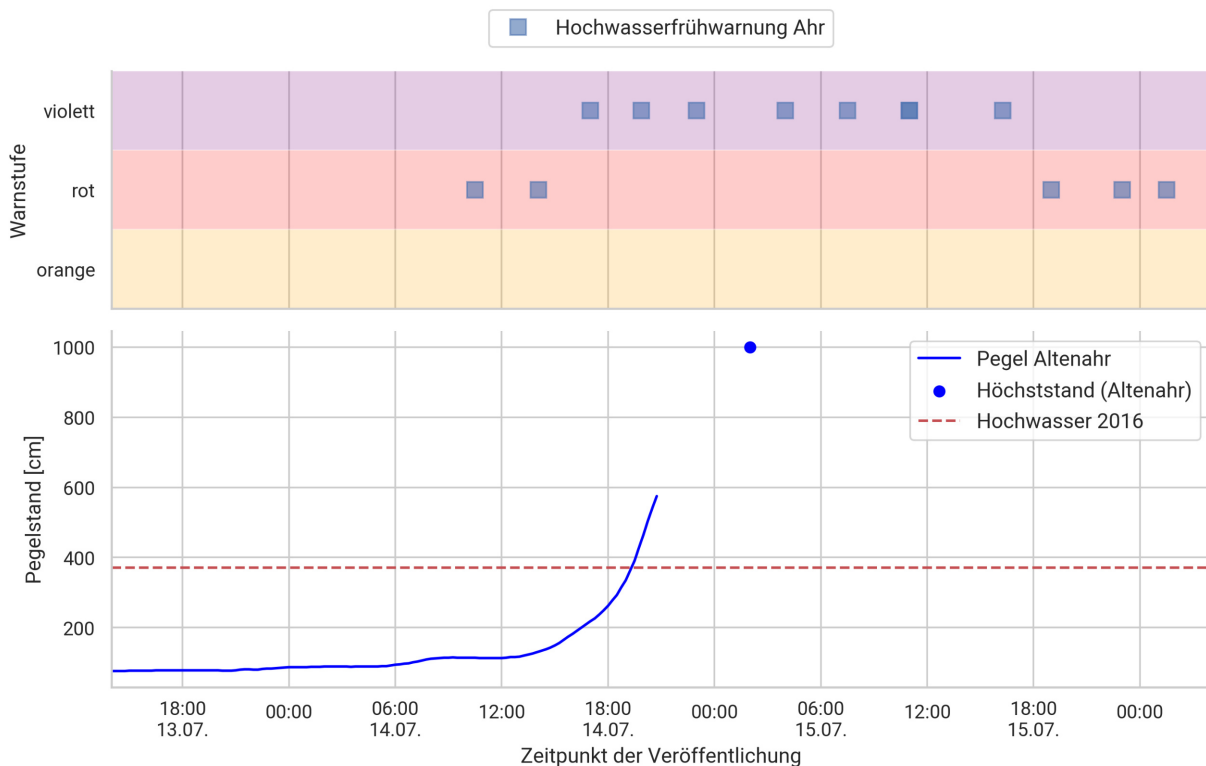


Abbildung 2.18: Zeitlicher Verlauf der veranlassten Hochwasserfrühwarnungen (Veröffentlichungszeitpunkt) für das Ahr-Einzugsgebiet (oben, Datensatz A). Zusätzliche Darstellung der Pegel an der Ahr (unten). (Eigene Darstellung nach Daten aus: [70])

In der Grafik sind die Frühwarnungen für das Einzugsgebiet der Ahr nach Warnstufe und Veröffentlichungszeitpunkt dargestellt (Abbildung 2.18 oben). Zusätzlich zu den Warnungen ist in der unteren Grafik der Verlauf der Pegelmessung am Pegel Altenahr dargestellt. Somit kann ein zeitlicher Zusammenhang zwischen den Warnungen und den Pegelstand hergestellt werden. Die Hochwasserfrühwarnungen für die anderen Gebiete in Rheinland-Pfalz, die ebenfalls Bestandteil des Datensatzes A sind, finden sich im Anhang (Abbildung A.2). Bei den in Abbildung 2.18 dargestellten Warnstufen handelt es sich um die Warnstufen des Frühwarnsystems für Hochwasser in Rheinland-Pfalz. Gemäß Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz gelten folgende Einteilungen für die Warnstufen [129]:

Tabelle 2.7: Warnstufen des Frühwarnsystems für Hochwasser in Rheinland-Pfalz. Basierend auf [129]

Warnstufe	Hochwassergefährdung
Violett	Sehr hohe Hochwassergefährdung: ≥ 50 -jährliches Hochwasser
Rot	Hohe Hochwassergefährdung: ≥ 20 -jährliches Hochwasser
Orange	Mittlere Hochwassergefährdung: ≥ 10 -jährliches Hochwasser
Gelb	Mäßige Hochwassergefährdung: ≥ 2 -jährliches Hochwasser
Grün	Geringe Hochwassergefährdung: < 2 -jährliches Hochwasser

Die erste violette (höchste) Warnstufe für das Gebiet wurde um 17:00 Uhr am 14. Juli 2021 ausgegeben, knapp neun Stunden vor dem später rekonstruierten Höchststand in Altenahr. Zu diesem Zeitpunkt betrug der Pegel in Altenahr bereits ca. 260 cm. Da es sich jedoch nur um eine Warnung im Sinne einer Frühwarnung handelt, werden nur die Standardwarnmeldungen über KATWARN ausgegeben. Für die Stufe Violett wird folgende Warnung ausgegeben:

„ACHTUNG: An der Ahr und ihren Zuflüssen ist die Hochwassergefahr sehr groß. Innerhalb der nächsten 24 Stunden ist mit Sturzfluten und Überflutungen zu rechnen. Erdrutsche sind möglich. Es sind Verkehrsbehinderungen zu erwarten.“ - [16, S. 43]

KATWARN-Meldungen: Datensatz B

Der zweite Datensatz B umfasst eine deutlich größere Datenbasis, einschließlich der JSON-Objekte, die weitere Daten der KATWARN-Meldungen enthalten. Die Informationen sind jedoch nur als PDF verfügbar. Auch hier wurde der Fokus auf die Warnungen für den Bereich des Ahr-Einzugsgebietes bzw. des Landkreises Ahrweiler gelegt. Da die Daten nur in Form einer PDF-Datei mit vielen Seitenumbrüchen und irrelevanten Zusatzinformationen veröffentlicht wurden, mussten die Daten zunächst durch Textanalyse und Aufbereitung aus der PDF-Datei extrahiert werden. Dies wurde mit Hilfe eines Python-Skripts umgesetzt, anschließend konnten die Daten analysiert und graphisch aufbereitet werden. Die Auswertung des Datensatzes B zeigt, dass erst um 23:09 Uhr vom Landkreis eine Evakuierungswarnung für einen Bereich von 50 Metern rechts und links der Ahr ausgelöst wurde:

„Aufgrund der starken Regenereignisse sollen die Bewohnerinnen und Bewohner der Städte Bad Neuenahr-Ahrweiler, Sinzig und Bad Bodendorf, die 50 m rechts und 50 m links von der Ahr wohnen, ihre Wohnungen verlassen.“ - KATWARN Meldung vom 14.07.2021 um 23:09 Uhr, ausgegeben vom Landkreis Ahrweiler [149]

Daher ist anzunehmen, dass die Frühwarnungen nur teilweise in Maßnahmen und Entscheidungen des Krisenstabes einfließen. Die erste Frühwarnung mit der höchsten Warnstufe wurde bereits sechs Stunden vorher veröffentlicht. Nachfolgend sind aus dem Datensatz B die KATWARN-Meldungen für den Landkreis Ahrweiler dargestellt. Dabei wird zwischen dem jeweiligen Herausgeber einer Meldung unterschieden. Wie auch schon beim Datensatz A wird zur zeitlichen Einordnung ebenfalls der Pegelstand Altenahr dargestellt.

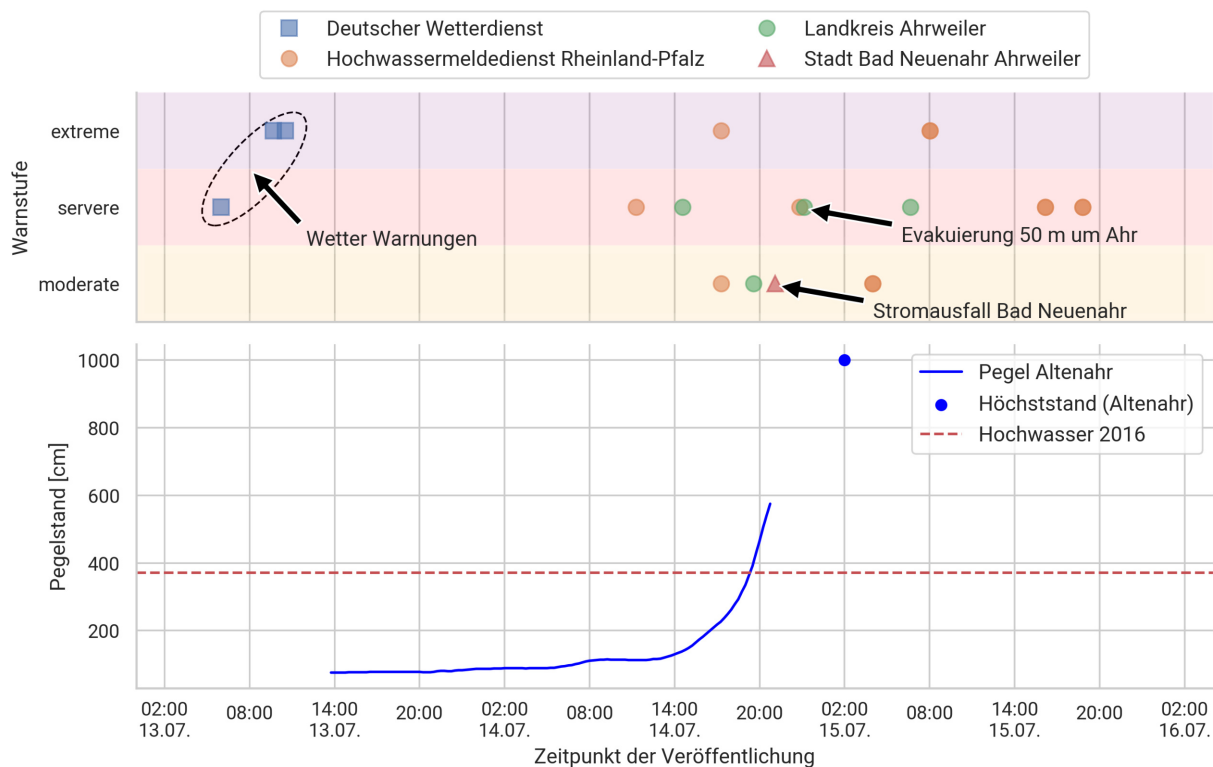


Abbildung 2.19: Zeitlicher Verlauf der veranlassten KATWARN-Meldungen (Datensatz B) für den Landkreis Ahrweiler. Zusätzliche Darstellung des Pegel Altenahr. (Eigene Darstellung basierend auf Daten aus [149], Pegeldata: LfU (RLP))

Es ist zu beachten, dass die hier veröffentlichten Meldungen nach dem Schweregrad (engl. severity) unterschieden werden. Die hier aufgeführten Meldungen reichen von *moderate* über *servere* bis *extreme*. Es ist davon auszugehen, dass diese drei Stufen mit den Stufen des MoWaS vergleichbar sind (siehe Tabelle 2.4). Die farbliche Darstellung in Abbildung 2.19 dient hier zur Verdeutlichung der Stufen. Es ist zu erkennen, dass bereits am 13.07.2021 Warnungen der Kategorie *extreme* vom DWD ausgegeben wurden. Weiterhin ist erkennbar, dass vom Landkreis Ahrweiler nur Warnungen der Kategorie *servere* ausgegeben wurden. Außerdem ist zu entnehmen, dass die Evakuierungsmeldung nach dem Ausfall des Pegels sowie nach den Warnungen des Hochwassermeldedienstes mit der Stufe *servere* ausgegeben wurde.

Der Kreis Ahrweiler warnt die Bevölkerung zusätzlich zu den bereits vorgestellten offiziellen Warnmitteln auch über den Kurznachrichtendienst Twitter vor der Hochwasserlage (siehe Abbildung 2.20). Zu diesem Zeitpunkt war die in der Nachricht erwähnte Pegelstation (Altenahr) bereits außer Betrieb, dennoch wurde hier ein zudem veralteter Pegelstand veröffentlicht. Aus den im Rahmen von Anfragen im Landtag veröffentlichten Daten geht nicht hervor, dass der Landkreis die Bevölkerung z. B. durch Lautsprecherdurchsagen oder auf andere Weise gewarnt hat [149].



Abbildung 2.20: Warnmeldung des Kreises Ahrweiler auf Twitter. (Quelle: [126])

Diese Tatsache macht deutlich, dass bereits eine Lagebeurteilung seitens des Kreises nicht vollständig möglich war bzw. keine ausreichenden Informationen über den tatsächlichen Wasserstand vorlagen. Darauf deutet auch ein Zitat des Fachbereichsleiters Erich Seul hin, der laut Rhein-Zeitung gesagt haben soll: „Irgendwann gegen 22 Uhr war klar, der Pegel ändert sich nicht mehr, da ist irgendwas“ [176]. Wann genau festgestellt wurde, dass der Pegel keine Messwerte liefert und ob die Vorhersage des LfU (RLP) zu einem früheren Zeitpunkt zu einer Evakuierungsmeldung hätte führen müssen, wird, wie bereits erwähnt, u.a. im Untersuchungsausschuss diskutiert und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.4.4. Zusammenfassung der Hochwassersituation im Ahrtal

Die Lagebeurteilung sowie die Einschätzung der zu erwartenden Situation ist ein zentrales Element zur Steuerung und Führung von Einsatzkräften und Material. Aus der Auswertung von Warnmeldungen und Augenzeugenberichten [67, S. 18] geht hervor, dass hierfür umfangreiche Informationsquellen benötigt werden, insbesondere bei hochdynamischen und komplexen Situationen wie bei diesem Hochwasser mit bisher nicht gekannten Wasserständen. Die Handlungs- und Informationsbereiche während einer Hochwassersituation lassen sich in drei Ebenen unterteilen. Wetterwarnungen und Wetterinformationen vor dem Ereignis bilden die erste Ebene. Die Auswertung zeigt, dass der DWD bereits einige Tage vor dem Hochwasser vor extremen Wetterbedingungen gewarnt hat. Diese Informationen und Warnungen wurden über die üblichen Systeme an die Bevölkerung und die Einsatzkräfte weitergegeben. Bell et al. stellen fest, dass diese Warnungen von der Bevölkerung nur unzureichend wahrgenommen wurden, auch aufgrund der Warnungen der Vortage, an denen keine Extremwetterlage eingetreten war [14, S. 14, S. 32].

Die zweite Ebene umfasst Pegeldata und -vorhersagen sowie Experteneinschätzungen und Modellberechnungen der zuständigen Behörden. In diese Vorhersagen fließen auch Informationen der Wetterdienste ein. Um zuverlässige Vorhersagen treffen zu können, benötigen die Vorhersagemodelle eine Vielzahl von

Eingangsdaten, die aktuell und aus unterschiedlichen Bereichen zur Verfügung stehen müssen [133, S. 13]. Die Analyse der Vorhersagen zeigt, dass die Unsicherheiten der Wettervorhersagen einen großen Einfluss auf die Berechnung der Vorhersagewerte haben können. Zudem können die Berechnungen aufgrund der Komplexität der Situation sehr zeitaufwändig sein. Darüber hinaus werden für die Modellrechnungen auch Vor-Ort-Daten z. B. von Pegeln und Wetterstationen benötigt. Fallen diese, wie im Einzugsgebiet der Ahr, während des Hochwassers aus, ist die Berechnung von Wasserstandsvorhersagen nur eingeschränkt möglich. Auch sind die Modelle in der Regel nicht in der Lage, lokale Besonderheiten wie z. B. Verklausungen oder Erosionsbewegungen abzubilden [133, S. 16-18].

Die dritte Ebene umfasst die Einsatzkräfte vor Ort sowie die Personen in den Einsatzzentralen. Auf dieser Ebene werden Einsatz- und Priorisierungsentscheidungen auf Basis der oben genannten Daten der beiden anderen Ebenen sowie weiterer Informationen getroffen. Aufgrund der extremen und teilweise chaotischen Situation während einer Katastrophe ist es besonders wichtig, dass die Daten für diese Ebene ausreichend verständlich und interpretierbar sind. Die Abhängigkeit von externen Datenquellen, wie z. B. Pegeldaten, wird auch anhand der Situation im Ahrtal deutlich. Wie beschrieben, wurde der Ausfall der Pegelstation Altenahr vom Krisenstab erst einige Zeit nach dem Ausfall erkannt. Auch die Einsatzkräfte vor Ort beurteilten die Situation bis zum Ausfall der Station anhand dieser Daten. So berichtete ein Mitglied der Freiwilligen Feuerwehr Dernau, einem Ortsteil oberhalb von Bad Neuenahr, in einem Fernsehinterview, dass die Einsatzkräfte die Pegeldaten des Pegels Altenahr über das Internet verfolgten. Nach dem Ausfall des Pegels und der Internetverbindung hatten die Einsatzkräfte vor Ort keine Informationen mehr über die Situation flussaufwärts. Darüber hinaus hatten die Einsatzkräfte auch keine Informationen über die Befahrbarkeit der Brücken und Straßen in der näheren Umgebung [9]. Dies macht deutlich, wie abhängig die Kräfte vor Ort und auch im Krisenstab von den üblicherweise verfügbaren Daten sind. In der Retrospektive wurde nach Bell et al. der Evakuierungsauftrag unter Berücksichtigung der Pegeldaten durch den Krisenstab zu spät ausgesprochen [14, S. 14].

Dies verdeutlicht, dass auch für die Warnungen und Informationen der ersten beiden Ebenen Informationen über die konkrete Situation vor Ort durch zusätzliche Sensorsysteme, welche weitere unabhängige Daten von der Situation direkt vor Ort liefern können, notwendig sind, um einerseits das Lagebild ausreichend zu vervollständigen und andererseits unabhängig von den üblichen Systemen zu sein. Dabei müssen während des Ereignisses detaillierte Informationen über spezifische lokale Situationen verbreitet werden, z. B. über unpassierbare Straßen, sichere Sammelplätze (inklusive Anfahrt), drohende akute Gefahren, etc. [14, S. 33]. Nach Berkler et al. ist der Ausfall der Infrastruktur die Ursache für Störungen und den vollständigen Ausfall der Datenfernübertragung der Pegeldaten [16, S. 26]. Während des Hochwassers wurden neben den Hauptmessgebern auch die redundanten Messgeber und deren Übertragungstechnik eingesetzt. Auch diese Systeme können nur so lange Daten übertragen, bis ihre Infrastruktur ausfällt oder der Pegel komplett zerstört wird. Für alternative Überwachungssysteme ist daher ein automatischer und autarker Betrieb zwingend erforderlich. Darüber hinaus war die Messtechnik für die Pegelmessung nicht für solche Extremereignisse ausgelegt. Daher konnte auch bei störungsfreier Datenübertragung eine Zerstörung oder Überflutung der Pegelstationen nicht

ausgeschlossen werden. Die eingesetzten Kräfte berichten vom Ausfall des Mobilfunks sowie des Digitalfunks und dass die Kommunikation anfangs fast ausschließlich über den direkten Kontakt mit den Meldern, die mit Motorrädern im Einsatz waren, möglich war [67, S. 18].

Die hier beschriebenen Probleme zeigen, dass bei derartigen Extremwetterereignissen weitere datenbasierte Informationsquellen einerseits zur Lagebeurteilung und andererseits zur Information der Bevölkerung notwendig sind. Dabei ist es wichtig, dass ein System möglichst flächendeckend und völlig autark arbeiten kann. Darüber hinaus sollte die Informationsvermittlung möglichst einfach und verständlich durch die Darstellung von Karten und Grafiken erfolgen, um auch in Stresssituationen die Lageerfassung zu erleichtern. Neben der Überwachung der Pegelstände von Fließgewässern zeigt das Hochwasser im Ahrtal, dass das System auch für die Überwachung von Straßen und Wegen ausgelegt sein sollte. Die Überwachung von Flächen, die normalerweise nicht überflutet werden, ermöglicht eine bessere Planung von Zufahrtswegen und das Erkennen von lokalen Besonderheiten wie z.B. Stauwirkungen und Verklausungen. In die weitere Konzeption des mobil-autarken Monitoringsystems fließen die Erfahrungen aus der Hochwasserkatastrophe ein. Die Einsatzfähigkeit des in dieser Arbeit entwickelten und prototypisch implementierten Systems wird unter anderem im Kapitel 8.2 untersucht. Hierzu wurde der Standort Bad-Neuenahr im Ahr-Einzugsgebiet ausgewählt und eine Untersuchung der Abdeckung sowie der generellen Nutzbarkeit durchgeführt.

3. Technische Grundlagen für ein mobil-autarkes Monitoringsystem auf IoT-Basis

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines mobil-autarken Monitoringsystems zur Unterstützung der Lagebeurteilung durch die Einsatzkräfte. Dazu werden im Folgenden Kapitel zunächst die Grundlagen für ein mobil-autarkes System beschrieben. Zu Beginn werden grundlegende Begriffe im Kontext dieser Arbeit erläutert und anschließend auf verschiedene Technologien im Bereich der drahtlosen Kommunikation eingegangen. Basierend auf den Ergebnissen dieses Kapitels wird anschließend das Konzept entwickelt und prototypisch umgesetzt.

3.1. Grundlegende Begriffe

In diesem Abschnitt werden grundlegende Begriffe kurz definiert und dargestellt, wie sie im Rahmen dieser Arbeit verstanden und aufgefasst werden. Einzelne Begriffe werden anschließend aufgrund ihrer Relevanz für das Konzept ausführlicher dargestellt.

Internet of Things (IoT, dt. Internet der Dinge)

Für den Begriff Internet of Things gibt es keine einheitliche Definition [137, Kap. 1.2]. Im Rahmen dieser Arbeit wird IoT wie folgt definiert: Das Internet der Dinge beschreibt ein Netzwerk aus verschiedenen Sensoren und Aktoren, welche mit oder über andere Geräte miteinander kommunizieren können [96]. Dazu gehören auch Komponenten, die für die Kommunikation notwendig sind.

IoT-Device

Unter einem IoT-Device versteht man ein Gerät oder einen Mikrocontroller, der in der Lage ist, mit anderen Geräten oder Netzwerken zu kommunizieren. Dabei können Sensoren mit dem Device verbunden sein. Eine Auswertung oder Einordnung der sensorisch ermittelten Parameter kann, muss aber nicht direkt auf dem Gerät erfolgen.

Low-Power-Wide-Area-Network (LPWAN)

LPWAN ist ein Sammelbegriff für verschiedene Technologien, die im Vergleich zur herkömmlichen Funkübertragung wenig Energie verbrauchen und dennoch eine große Reichweite bzw. Abdeckung ermöglichen. Zu

diesen Technologien gehören u. a: LoRa bzw. Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), Sigfox, Narrowband IoT etc. (siehe auch Kapitel 3.3.2).

Basisstation

Eine Basisstation ist ein Gerät, das die Kommunikation zwischen den IoT-Geräten und dem Netzwerk ermöglicht. Die Basisstation kann dabei auch ein IoT-Gerät sein.

Uplink

Als Uplink wird eine Nachricht vom IoT-Gerät zur Basisstation bezeichnet. Die Nachricht wird von der Basisstation empfangen und verarbeitet.

Downlink

Als Downlink wird eine Nachricht von der Basisstation zum IoT-Device bezeichnet. Die Nachricht wird vom IoT-Device empfangen und verarbeitet.

3.2. Internet of Things (IoT)

Für ein mobil-autarkes Überwachungssystem ist der Einsatz von kleinen, batteriebetriebenen Mikrocontrollern sinnvoll. Im Bereich der Mikrocontroller gibt es verschiedene Typen für unterschiedliche Aufgaben und Funkübertragungssysteme. Im Rahmen dieser Arbeit werden sogenannte Consumer-Produkte eingesetzt, die mit Open-Source-Software programmiert und angepasst werden können. Ein bekanntes Beispiel in diesem Bereich sind die Produkte von Arduino [6]. Die Produkte der Firma Arduino können durch Open-Source-Programmierung einfach an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

3.2.1. Grundlagen zu Mikrocontrollern

Dieses Kapitel befasst sich mit den grundlegenden Konzepten und Technologien von Mikrocontrollern und deren Anwendungen. Mikrocontroller stellen eine zentrale Technologie dar, da sie die Steuerung und Überwachung von Sensoren und Aktoren in einem IoT-System ermöglichen.

Mikrocontroller

Bei Mikrocontrollern handelt es sich um Rechnersysteme, die alle Komponenten, die für ihren Betrieb notwendig sind, auf einem einzigen Chip enthalten. Bereits in den 1970er Jahren wurde erkannt, dass es Anwendungen gibt, die den Bedarf an einem kompakten und kostengünstigen Rechnersystem haben: Verschiedene Halbleiterhersteller brachten Mikrocontroller auf den Markt [78]. Mikrocontroller werden mit einem Programmiercode beschrieben und können über sogenannte GPIO⁶ Pins Aktoren oder Sensoren ansteuern. Mikrocontroller

⁶General Purpose Input Output: Softwarebasierte Ein-/Ausgabe, üblicherweise über Stiftkontakte.

sind heute ein Massenprodukt und werden nach Gehrke und Winzker in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen: Jährliche Wachstumsraten zwischen 10 % und 20 % werden für die nächsten zehn Jahre prognostiziert [78]. Die Abbildung 3.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Mikrocontrollers. Für den autarken Einsatz bieten sich insbesondere Controller an, die bei voller Funktionalität einen geringen Stromverbrauch aufweisen. In diesem Bereich sind beispielsweise Boards mit den Chipsätzen ESP8266 sowie ESP32 zu finden. Diese können nach einer Aktion, z. B. dem Auslesen eines Sensors, einfach in einen sogenannten Schlafmodus versetzt werden. Nach Ablauf der eingestellten Zeit wacht der Controller wieder auf und wiederholt den Messvorgang. Dies führt in Kombination mit einer stromsparenden Funkübertragungstechnologie zu einer langen Batteriebensdauer [146, S. 4]. Zudem verfügen die Chips wie der ESP32 über integrierte Wi-Fi bzw. Wi-Fi und BLE Module. Eine Analyse des ESP32 wurde von Maier et al. durchgeführt [144].

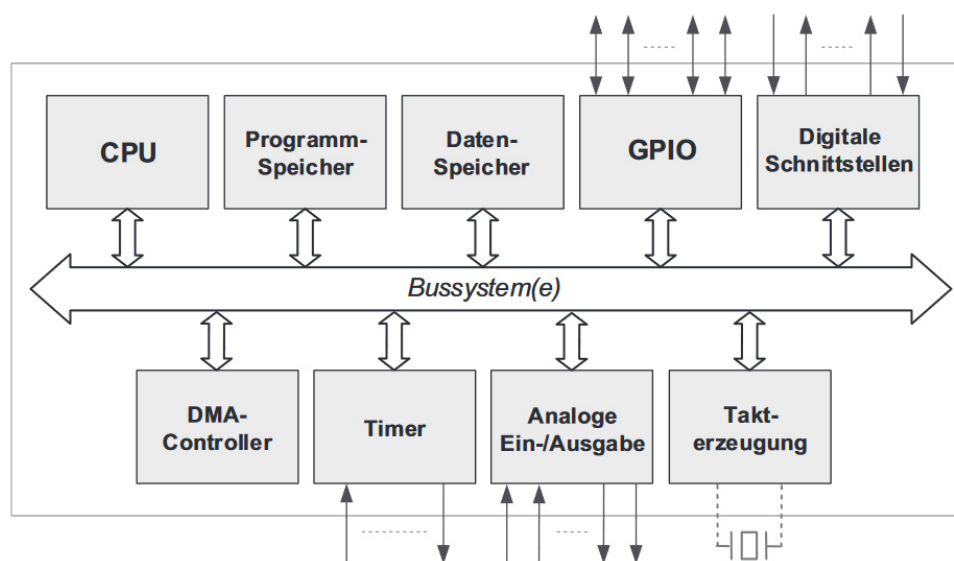


Abbildung 3.1: Vereinfachte Darstellung der Architektur eines Mikrocontrollers. (Quelle: [78])

Module und Sensorik

An die Mikrocontroller können verschiedene Sensoren sowie weitere Module angeschlossen werden. Die Module können u. a. die Möglichkeiten zur Funkübertragung bereitstellen oder eine Ortung mittels GPS-Technologie ermöglichen. Im Bereich der Sensorik kann praktisch jedes analoge oder digitale Messsystem angeschlossen werden. Das Protokoll des Sensormoduls muss jedoch implementiert sein. Zudem muss die für die Sensorik benötigte Versorgungsspannung vorliegen, üblicherweise verfügen IoT-Mikrocontroller über 3,3 V und 5 V. Ist eine andere Spannung zum Betrieb notwendig, können Modul zur Umwandlung der Spannung verwendet werden. Für eine Reihe von Sensormodulen existieren bereits Bibliotheken und Beispiele für den Anschluss und das Auslesen der Sensoren. Der Quellcode für einen Mikrocontroller wird üblicherweise mit Hilfe von Entwicklungsumgebungen wie der Arduino IDE [6] oder PlatformIO [170] entwickelt. In der Regel wird der Quellcode hier implementiert, anschließend kompiliert und kann dann auf einen Controller übertragen

werden. Dieser führt den Quellcode aus. Einfache Programme bestehen aus verschiedenen Funktionen, einer definierten Startfunktion (Setup), die beim Start aufgerufen wird und in der grundlegende Inhalte initialisiert werden, sowie einer Loop-Funktion, die sich, sofern nicht andere Funktionen wie z. B. Sleep-Intervalle gesetzt sind, während der Laufzeit ständig wiederholt. Ein einfaches Programm zur Messung mit einem Sensor würde beispielsweise in der Setup-Funktion den Sensor sowie die Pins, an denen der Sensor angeschlossen ist, festlegen und in der Loop-Funktion den Sensorwert abfragen und gegebenenfalls per Funk übertragen oder über eine serielle Schnittstelle ausgeben. Neben den eigenen Funktionen können wie beschrieben auch Funktionalitäten über Bibliotheken eingebunden und genutzt werden. Darüber hinaus sind bei der Programmierung Unterschiede aufgrund unterschiedlicher Mikrocontroller-Architekturen zu beachten.

3.2.2. IoT-Sensorik im Hochwasserschutz

Im folgenden Kapitel werden als Grundlage für das Konzept bereits mögliche Sensorik und Messmethoden vorgestellt, die für den Einsatz im Hochwasserschutz geeignet sein können.

Pegelmessung mittels Abstandsmessung

Für die im Rahmen dieser Arbeit vorgesehenen Pegelmessungen müssen die Genauigkeiten nicht den für die Hydrometrie vorgeschriebenen Genauigkeiten entsprechen. Die Messungen sollen eine Orientierung über den aktuellen Wasserstand geben und auf akute Veränderungen hinweisen. Für den Hochwassereinsatz sind Genauigkeiten im Dezimeter-Bereich ausreichend [133, S. 30]. Daher kann auch auf kostengünstige und einfache Lösungen zurückgegriffen werden. Im Kapitel 2.3.1 wurden die üblichen Messverfahren zur stationären Pegelmessung vorgestellt. Der Lattenpegel kann nur aufwendig, z. B. durch Kameraauswertung, digitalisiert werden und erfordert zudem eine sichere Fixierung im Wasser. Er wird daher für den mobilen Einsatz nicht weiter betrachtet. Auch der Schwimmerpegel wird aufgrund seiner Komplexität und der Notwendigkeit eines separaten Bauwerks nicht als sinnvoll erachtet. Der Drucksondenpegel stellt eine Möglichkeit mit hoher Genauigkeit dar, jedoch ist die Installation insbesondere in stark strömenden Gewässern, die auch mit Treibgut belastet sind, aufwendig und mit einer erhöhten Gefahr der Zerstörung verbunden. Die Messung mittels Ultraschallsensors ist dagegen eine flexible und abgesehen von der Befestigung unabhängige Methode zur Pegelmessung. Zudem kann die Messungen mit kostengünstiger und einfacher Sensorik realisiert werden. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf die Ultraschallmessung gelegt.

Der Ultraschallsensor ist ein Sensor, der durch Messung des Zeitintervalls eines reflektierten Schallsignals eine Entfernung zwischen dem Sensor und einem Objekt angeben kann. Dazu werden, wie in Formel 2.1 beschrieben, die Schallgeschwindigkeit und die Laufzeit verwendet. Dabei ist zu beachten, dass die Schallgeschwindigkeit von der Luftzusammensetzung, der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit abhängt. Bei 20° Celsius beträgt sie etwa 341,2 m/s. Nach Hickling und Marin, Sabatini kann die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur mit folgender Formel berechnet werden [94], [179]:

$$c = 331,31 \frac{m}{s} \cdot \sqrt{1 + \frac{T}{273,15^{\circ}C}} \quad (3.1)$$

mit:

c Schallgeschwindigkeit in [$\frac{m}{s}$]
 T Temperatur in [$^{\circ}$ Celsius]

Dabei wird die Zusammensetzung der Luft sowie die Luftfeuchtigkeit vernachlässigt. Zur Berechnung der temperaturkorrigierten Entfernung aus einer gemessenen Laufzeit der Schallgeschwindigkeit kann die Formel 3.1 in Formel 2.1 eingesetzt werden.

$$d = \frac{\Delta t \cdot c}{2} \cdot \sqrt{\frac{T}{273,15^{\circ}C} + 1} \quad (3.2)$$

mit:

d Entfernung zum Sensor in [m]
 Δt Laufzeit des Schallsignals in [s]
 c Schallgeschwindigkeit in [$\frac{m}{s}$]
 T Temperatur in [$^{\circ}$ Celsius]

Für genaue Distanzmessungen mit preiswerten Ultraschallsensoren, die keine automatische Kalibrierung z. B. durch Referenzmessungen durchführen, ist die Messung der Temperatur und die Korrektur durch Formel 3.2 notwendig. Dabei sollte die Temperatur möglichst ungestört und in der Nähe des Sensors gemessen werden. Dazu können an den Mikrocontroller angeschlossene IoT-Sensormodule verwendet werden.

Im Bereich des IoT sind Ultraschallsensoren weit verbreitet und werden in vielen Anwendungen eingesetzt, z. B. in der Automatisierungstechnik, der Sicherheits- und Überwachungstechnik, der Entfernungsmessung und der Robotik. Ultraschallsensoren können Entfernungen messen, indem sie Schallwellen aussenden und die reflektierte Welle detektieren. Ultraschallsensoren gibt es in verschiedenen Ausführungen, die sich in der Genauigkeit und der Anzahl der Messungen pro Sekunde unterscheiden. Auch der Abstrahlwinkel eines Ultraschallsensors kann den Messbereich stark beeinflussen. Die Verwendung eines Ultraschallsensors mit einem Mikrocontroller wird üblicherweise über zwei Signalleitungen realisiert. Über eine Leitung wird das Triggersignal gesendet und über die zweite Leitung das Echosignal empfangen (siehe Abbildung 3.2). Insgesamt kann mit diesem Verfahren ohne Messung des Abstands zur Sohle kein absoluter Pegelwert ermittelt werden. Relative Änderungen können jedoch mit diesem Verfahren erfasst werden.

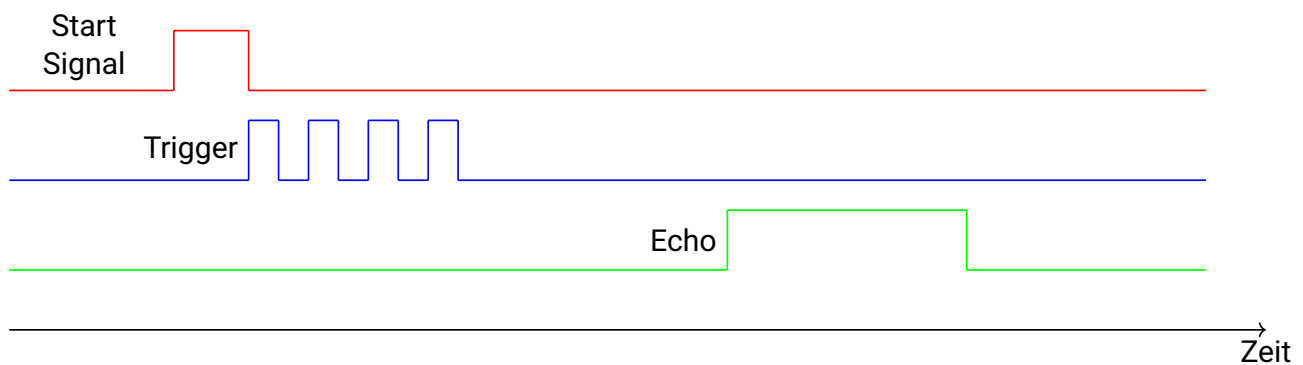


Abbildung 3.2: Schematische Funktionsdarstellung der Ansteuerung und Empfang von Signalen eines Ultraschallsensors. (Eigene Darstellung)

Ein besonders im Low-Cost-IoT-Bereich verbreitetes Modell ist der *HC-SR04*. Dieses Modul benötigt in der Regel eine Versorgungsspannung von 5 V und kann einen Bereich von 2 - 400 cm messen. Für diese Typenbeschreibungen gibt es eine Vielzahl von Anbietern auf dem Markt. Die angebotenen Module können sich z. B. im Abstrahlwinkel oder in der Versorgungsspannung unterscheiden. Üblicherweise wird ein Messwinkel von 30 °C und eine Genauigkeit von 3 mm angegeben [127]. Das Modul ist bauartbedingt nicht wasserdicht, kann aber in einem zumindest teilweise spritzwassergeschützten Gehäuse verbaut werden. Neben diesem Ultraschallsensor gibt es eine Vielzahl weiterer Ultraschallsensoren, die in ihrer Funktionalität ähnlich sind. Kushwaha und Bojewar fassen die gängigsten Modultypen sowie deren Eigenschaften in einer Übersicht zusammen [127]. Speziell im Bereich der Distanzmessung ist noch der *JS-SR04T(-2.0)* zu nennen, da es aufgrund seiner Bauweise spritzwassergeschützt ist [127]. Der Einsatz dieses Moduls wurde von Schulze et al. für eine IoT-gestützte Pegelmessung an kleinen Gewässern untersucht [184]. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass Ultraschallsensoren für die Pegelmessung geeignet sind. Neben Ultraschallsensoren wurden auch sogenannte Lidar (Time of Flight) Sensoren untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass kostengünstige Lidarmodule die geforderte Genauigkeit nicht einhalten können [184]. Die geforderte Genauigkeit für die Hochwasserwarnung wurde in dieser Untersuchung auf 10 cm festgelegt.

Personenmessungen

Zur Messung von Personenströmen bzw. Personengruppen kann ein Ansatz verwendet werden, der mobile Endgeräte mittels Wireless Fidelity (dt. Drahtlose Kommunikation) (Wi-Fi) und Bluetooth Low Energy (BLE)-Scanning detektiert. Mittels eines Wi-Fi- oder BLE-Moduls kann der jeweilige Netzbereich nach Geräten gescannt werden. Hierfür stehen Open-Source-Bibliotheken zur Verfügung, die durch Filterung der MAC-Adressen der Geräte einen Überblick über die Anzahl der mobilen Endgeräte geben können. Es ist zu beachten, dass diese Methode keinen genauen Wert über die Anzahl der Personen liefern kann, da nur Mobilfunkgeräte erfasst werden. Außerdem ist aufgrund des Scanvorgangs und der unterschiedlichen Kanäle und Netzwerkeinstellungen nicht sichergestellt, dass alle Geräte erkannt werden. Daher eignet sich diese Methode nur zur Erkennung von Personenströmen oder -gruppen. Die DB Station & Service AG hat an der Entwicklung einer Bibliothek [50] mitgewirkt und diese Methode zur Erfassung von Personengruppen in

Bahnhöfen eingesetzt. Im Rahmen einer Hochwassersituation kann mit dieser Methode beispielsweise erkannt werden, ob sich größere Personengruppen im Gefahrenbereich aufhalten. Ist dies der Fall, können gezielte Evakuierungsmaßnahmen eingeleitet werden. Diese zusätzliche Informationsquelle unterscheidet die entwickelten Sensorkits von den üblichen, auf einen Anwendungsfall spezialisierten Sensormodulen stationärer Pegelstationen.

Bodenfeuchtemessungen

Wie beschrieben, kann die Bodenfeuchte Hinweise auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens geben, die wiederum Einfluss auf die Hochwassersituation haben kann. Darüber hinaus kann auch die Erfassung der Feuchte in Schutzmaßnahmen, wie z. B. Dämmen, Hinweise auf den Zustand des Bauwerks geben. Die dafür notwendigen boden- bzw. materialgeotechnischen Betrachtungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Die Feuchteänderung kann mit einfacher IoT-Sensorik gemessen werden. Hier wird z. B. ein Sensorkopf in den Boden eingelassen, der über eine Spannungsmessung eine Abschätzung der Leitfähigkeit und damit des Wassergehaltes liefern kann. Der Sensorwert kann jedoch meist nur als relativer Wert angesehen werden, da die Leitfähigkeit auch vom umgebenden Material abhängt. Änderungen des Sensorwertes können jedoch auf eine Änderung des Wassergehaltes hinweisen. Darüber hinaus können diese Sensoren auch zur einfachen Wasserdetektion eingesetzt werden. Eine detaillierte Untersuchung von IoT-Sensormodulen für die Überwachung von Bodenfeuchte im Agrar-Bereich wurde von Placidi et al. durchgeführt [167], [168].

3.3. Funkübertragungstechnologien

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Übertragungstechnologie als Teil des IoT-Systems betrachtet. Darüber hinaus wird unter einem IoT-Sensorik die Kombination aus einer Einheit (Mikrocontroller etc.) und einem angeschlossenen Sensor (Messgerät) verstanden. Der Mikrocontroller wertet zum einen die elektrischen Signale des Sensors bereits vor Ort aus und kann ggf. durch Algorithmen eine Vorauswertung bzw. Fehlererkennung durchführen. Anschließend überträgt der Controller die Informationen mittels Fernübertragungstechnik an eine Sammelstelle zur zentralen Auswertung. Die nachfolgend vorgestellten Technologien versuchen jeweils für ihren Anwendungsfall ein Optimum für die Funkübertragung zu erreichen. Die Parameter Reichweite, Energieverbrauch und Datenrate beeinflussen sich dabei gegenseitig. Eine hohe Reichweite hat in der Regel entweder eine geringe Datenrate sowie einen hohen Energieverbrauch zur Folge. Im Vergleich zu üblichen Funkübertragungstechnologien wie Mobilfunk oder lokalen Netzwerken (Wi-Fi oder Bluetooth) liegt die Stärke von LPWAN in der hohen Reichweite allerdings mit geringer Bandbreite. Gegenüber dem Mobilfunk, der hohe Reichweiten und große Bandbreiten erreicht, kann LPWAN durch seinen geringen Energieverbrauch überzeugen (siehe Abbildung 3.3).

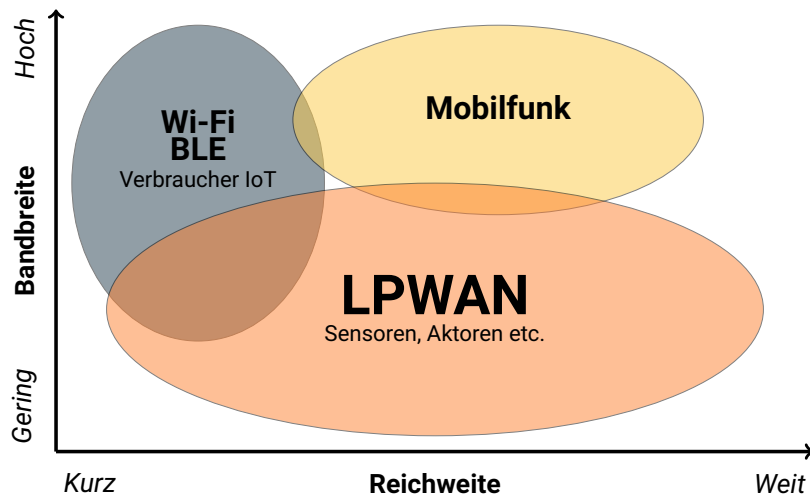


Abbildung 3.3: Überblick über den Einsatzbereich von LPWAN sowie vergleichbarer Funktechnologien. (Eigene Darstellung nach [146])

Mobilfunktechnologien wie GPRS und ähnliche existieren bereits seit einigen Jahren und werden im Bereich der Pegelmessung vor allem zur Datenübertragung sowie als Rückfallebene bei Ausfall der kabelgebundenen Übertragung eingesetzt [130]. Die im Folgenden vorgestellten Low Power Wide Area Networks (LPWAN) existieren seit ca. 2016 und decken den Bereich der Funkübertragung für IoT-Devices und Monitoringprojekte ab [136].

3.3.1. Mobilfunk

Neben den bereits vorgestellten Funkübertragungstechnologien gibt es auch bereits etablierte und weit verbreitete Systeme wie Mobilfunk (meist mit GPRS (General Packet Radio Service, 2G), 3G, LTE (Long-Term Evolution, 4G), 5G). In Deutschland gibt es verschiedene Anbieter für die flächendeckende Datenübertragung, wobei die Netzabdeckung in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Laut Wernick et al. ist die Netzabdeckung im ländlichen Raum noch nicht ausreichend [222, S. 177].

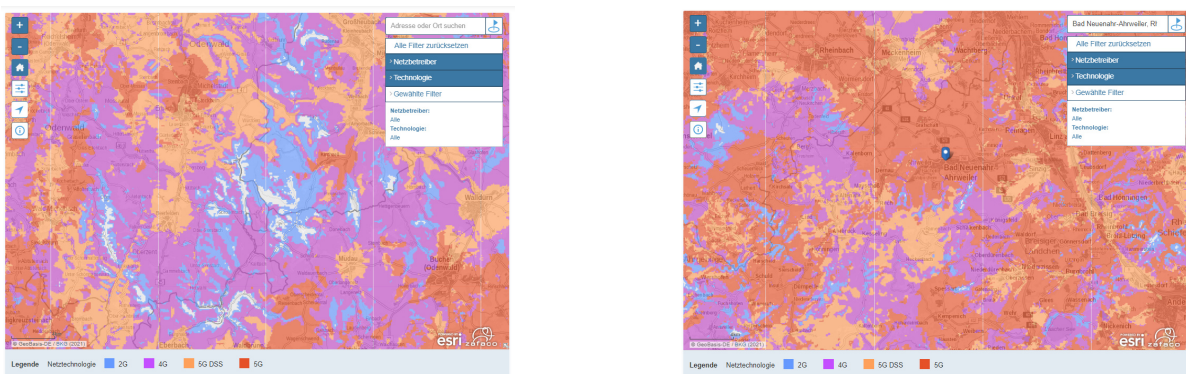


Abbildung 3.4: Mobilfunk-Monitoring: Kartendarstellung Ausschnitt Odenwald (links) Ausschnitt für Ahrweiler (rechts). (Quelle: [38])

Auch die Mobilfunk-Monitoringkarte der Bundesnetzagentur zeigt Lücken im ländlichen Raum. Exemplarisch wurde die Netzabdeckung für das Gebiet im Ahrtal sowie für ein Gebiet im Odenwald untersucht (siehe Abbildung 3.4). Es wird deutlich, dass eine flächendeckende Versorgung insbesondere in abgelegenen Gebieten in Deutschland nicht gewährleistet werden kann. Wie beschrieben, gibt es im Mobilfunkbereich verschiedene Arten von Netzen, die Daten in unterschiedlicher Qualität und Geschwindigkeit übertragen können. Je nach Standort in Deutschland sind nur ausgewählte Netze bestimmter Anbieter verfügbar. Insbesondere der 5G-Standard, der auch in lokalen Netzen verwendet werden kann, wird in den nächsten Jahren verstärkt als Netz für IoT-Bereiche eingesetzt werden. Er wird daher im Folgenden kurz vorgestellt, um das Potenzial für den Einsatz im mobilen autarken Monitoring zu prüfen.

Vorstellung von 5G

Die 5G-Technologie ist eine neue Generation von Mobilfunknetzen, die schnellere Datenübertragungsraten und geringere Latenzzeiten als frühere Generationen bietet. Dies ist besonders vorteilhaft für Anwendungen, die auf eine schnelle und zuverlässige Datenübertragung angewiesen sind. Im Vergleich zu LTE-Netze ist die Datenübertragungsrate bis zu hundertmal höher [60]. Die schnellere Übertragung großer Datenmengen ist vor allem bei rechenintensiven Überwachungsaufgaben von Vorteil. Insbesondere für sicherheitsrelevante Systeme, bei denen kurze Reaktionszeiten erforderlich sind, können die geringeren Latenzzeiten von Vorteil sein. Darüber hinaus unterstützen 5G-Netze mehr Geräte als frühere Generationen. Allerdings haben 5G-Netze auch einige Nachteile für Monitoring-Projekte, wie höhere Kosten und möglicherweise eine geringere Abdeckung (wenn noch kein oder ein unzureichendes Netz vorhanden ist). Da es derzeit nur ein kleines Ökosystem für 5G gibt, sind 5G-Module und -Geräte teurer als frühere Generationen [136]. Für den flächendeckenden Betrieb eines 5G-Netzes müssen Lizenzen erworben werden, Ausnahmen hiervon können bei stark lokaler Beschränkung durch sogenannte Campusnetze bestehen [136, S. 18]. Der Energieverbrauch der eingesetzten Geräte ist deutlich höher anzusetzen als bei LPWANs wie LoRaWAN [136, S. 17].

3.3.2. Low Power Wide Area Networks (LPWAN)

Für die Übertragung im Bereich eines mobil-autarken Monitoringsystems werden Funkübertragungstechnologien aus dem Bereich der Low Power Wide Area Networks (LPWAN) in Betracht gezogen. Bei LPWAN handelt es sich, wie der Begriff schon ausdrückt, um Netzwerke (*Network*), die für die Übertragung von Daten über große Reichweiten (*Wide Area*) bei geringem Energieverbrauch (*Low Power*) im Bereich der IoT-Sensorik entwickelt wurden. Dabei besteht ein LPWAN in der Regel aus einer oder mehreren Basisstationen, mit denen eine größere Anzahl von Sensoren oder Aktoren kommuniziert. Die Basisstation leitet die Informationen je nach Technologie zentral oder dezentral an die jeweiligen Nutzer bzw. Verarbeitungsdienste weiter (siehe auch Abbildung 3.5).

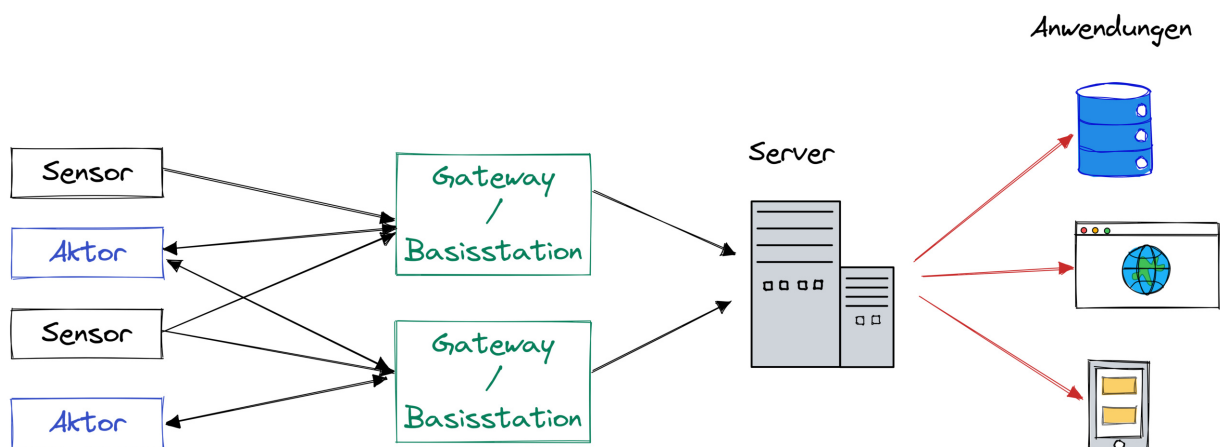


Abbildung 3.5: Grundlegende Struktur eines Low Power Wide Area Networks (LPWAN). (Eigene Darstellung)

Es gibt verschiedene Technologien, die unter den Sammelbegriff LPWAN fallen. Nachfolgend werden drei relevanten Technologien im Kontext dieser Arbeit auszugsweise vorgestellt.

Vorstellung von Sigfox

Im Bereich der kommerziellen Low-Power-Wide-Area-Networks ist Sigfox eine in Deutschland und Europa verfügbare kommerzielle Funkübertragungstechnologie, die auch als *OG-Netz* bezeichnet wird. Sigfox ist ein Unternehmen, das drahtlose Netzwerke für das Internet der Dinge (IoT) anbietet. Diese Netzwerke eignen sich besonders für die Übertragung kleiner Datenmengen von Sensoren und anderen vernetzten Geräten und sind sehr energieeffizient, was lange Batterielaufzeiten ermöglicht. Sie nutzen auch eine spezielle Funktechnologie, die es den Geräten ermöglicht, über große Entfernungen zu kommunizieren. Ein Nachteil von Sigfox ist jedoch, dass es sich um ein proprietäres System handelt, das von einem einzigen Unternehmen betrieben wird, was bedeutet, dass die Nutzer von Sigfox-Netzen von den Entscheidungen des Betreibers abhängig sind. Sigfox arbeitet im öffentlich verfügbaren, lizenzfreien Frequenzband von 868 bis 869 MHz (in Europa). Die niederfrequenten Signale dieser Funkbänder sind ideal für den Betrieb über größere Entfernungen (bis zu 50 km), da sie feste Objekte effektiv durchdringen können. Acht Kanäle mit je 25 kHz bilden den 200 kHz-Frequenzbereich von Sigfox. Jede Nachricht eines Sigfox-Gerätes enthält neben der Stationskennung ein Nutzdatenfeld, der sogenannte Payload, der maximal 12 Byte groß sein darf. Das bedeutet, dass der Benutzer bei jeder Übertragung maximal 12 Byte Mess- oder andere Daten übertragen kann. Außerdem sind maximal 140 Nachrichten pro Tag von einem Gerät möglich. Dies liegt auch an der Beschränkung durch den sogenannten Duty Cycle, der in Europa bei 1 % liegt [56], [62]. Der Duty Cycle stellt sicher, dass die lizenzfreien Netze nicht überlastet werden. Dies bedeutet, dass ein Gerät maximal 36 Sekunden pro Stunde senden darf. Eine Datenübertragung mit Sigfox dauert 6 Sekunden. Daher sind maximal 144 Übertragungen pro Tag möglich, von denen vier für interne Protokollmeldungen verwendet werden. Es verbleiben 140 Übertragungen pro Tag, also etwa alle 10 Minuten eine Übertragung von Messdaten. Die Basisstationen senden die Daten über das Internet an die Sigfox-Cloud. Von dort werden die Daten dann den Nutzern zur Verfügung gestellt. Auch wenn die Abdeckung in Deutschland, zumindest nach Angaben des Herstellers, bereits sehr gut ist, wird bei der

Betrachtung einzelner Gebiete deutlich, dass die Abdeckung in ländlichen Gebieten noch nicht ausreichend ist. So wird beispielsweise das Gebiet im Ahrtal als „Probably not covered“ (dt. Wahrscheinlich nicht abgedeckt) angezeigt. Sigfox bietet zur Erweiterung der Abdeckung eigene Basisstationen an, die nur an Strom und Internet angeschlossen werden müssen [194]. Für Deutschland ist die Heliot Group der Netzanbieter und Sigfox-Betreiber.

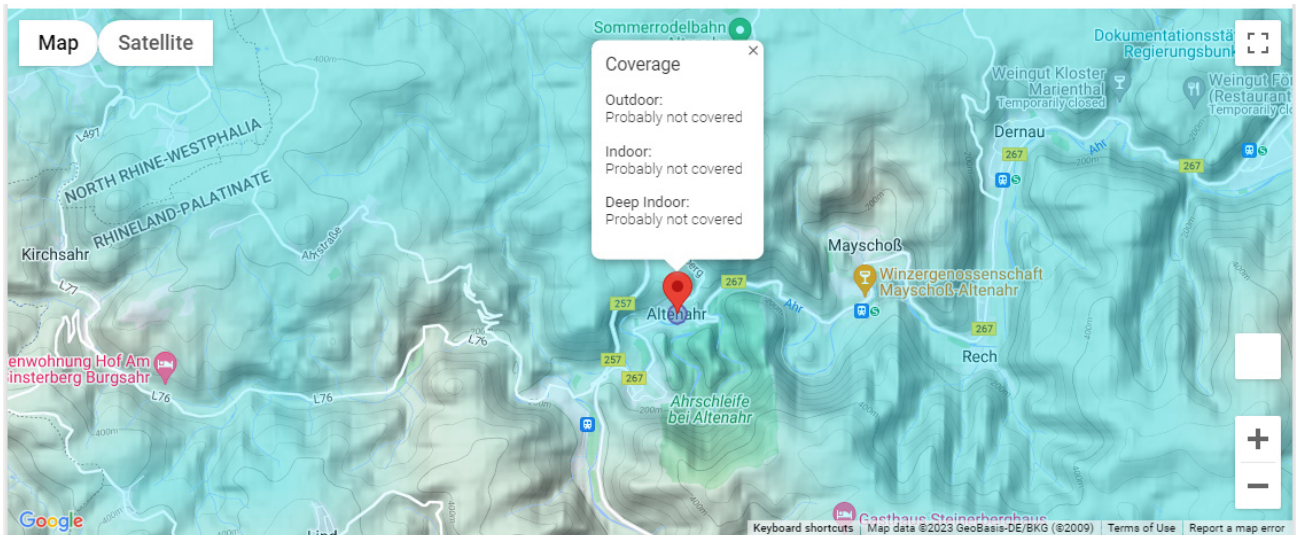


Abbildung 3.6: Screenshot der Abdeckung von Sigfox im Ahrtal (Quelle: [195], zuletzt am 29.12.2021 überprüft)

Narrowband IoT (NB-IoT)

NB-IoT (Narrowband IoT) ist ein drahtloser Kommunikationsstandard, der speziell für die Verbindung von Millionen von Geräten in IoT-Netzwerken entwickelt wurde. Er ermöglicht die Übertragung von Daten mit geringer Bandbreite und niedrigem Stromverbrauch über große Entfernungen unter Nutzung von Frequenzbändern, die eine hohe Gebäudedurchdringung aufweisen [51]. NB-IoT bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen IoT-Technologien, wie z. B. eine größere Reichweite, verbesserte Sicherheit und geringere Kosten. Durch seine Fähigkeit, mehrere Geräte gleichzeitig zu verbinden, eignet es sich besonders für Anwendungen in Bereichen wie intelligente Verbrauchsmessung, Verkehrsüberwachung, Umweltüberwachung und mehr. NB-IoT nutzt lizenzierte Netzwerke und kann nicht als privates Netzwerk aufgebaut werden. Die Datenrate kann bis zu 240 Kbps betragen. Batterielaufzeiten eines Moduls von mehr als 10 Jahren sind möglich, wenn nicht mehr als 200 Byte Daten pro Tag übertragen werden [17]. Die maximale Größe einer Nachricht kann über 1000 Byte betragen und ist damit um ein Vielfaches größer als bei anderen LPWAN-Netzwerken. Darüber hinaus gibt es keine Beschränkung für die Anzahl der Übertragungen pro Tag. Auf den lizenzierten Frequenzen muss der Duty Cycle nicht eingehalten werden.

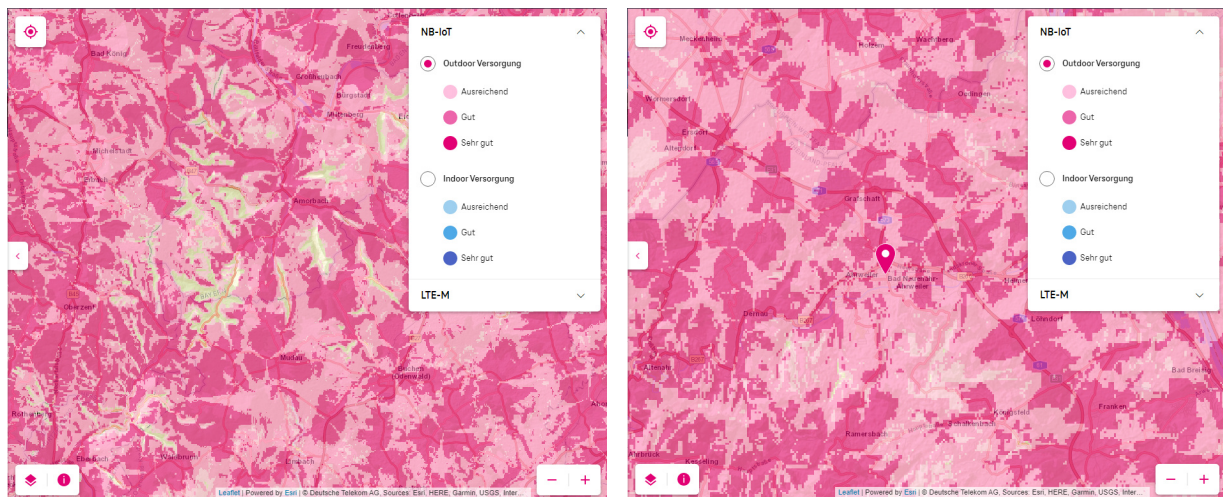


Abbildung 3.7: NB-IoT-Abdeckung: Kartendarstellung Ausschnitt Odenwald (links) Ausschnitt für Ahrweiler (rechts) (weiß: keine Abdeckung, hellrosa bis dunkelrosa: ausreichende bis sehr gute Abdeckung). (Quelle: [211])

Als Vorteile von Narrowband-IoT nennen die Deutsche Telekom und Vodafone die geringeren Kosten und die gute Indoor-Abdeckung. Auch die relativ lange Batteriebensdauer von AA-Batterien, mit denen die meisten Endgeräte ausgestattet sind, spielt eine Rolle [17]. Abbildung 3.7 zeigt die Abdeckung mit NB-IoT für die vom Hochwasser im Juli 2021 betroffene Stadt Ahrweiler (rechts) sowie für ein ländliches Gebiet im Odenwald (links). Für Ahrweiler sind praktisch keine Bereiche ohne Empfang zu erkennen, für das Gebiet im Odenwald sind insbesondere in den Höhenlagen kleinere Bereiche ohne Empfang zu identifizieren.

Vorstellung von LoRaWAN

Dieses Kapitel befasst sich mit LoRaWAN, einer Technologie, die speziell für die Übertragung kleiner Datenpakete über große Entfernungen bei geringem Energieverbrauch entwickelt wurde. Die technischen Details sind in einer Spezifikation des Netzwerkprotokolls festgelegt [139]. Diese beschreibt alle wichtigen Komponenten für die Funkübertragung von Daten über ein LoRa-Netz. Die physikalische Übertragung der Nachrichten erfolgt mit LoRa, das wiederum auf der *Chirp Spread Spectrum (CSS)*-Technologie basiert. Diese Kommunikationstechnologie ist wie Sigfox für den Betrieb in öffentlich verfügbaren, lizenzfreien Frequenzbändern ausgelegt. Sie verwendet ein spezielles Funkmodulationsverfahren, das als Chirps bezeichnet wird. Die Spezifikation wird von der LoRa Alliance festgelegt und stetig weiterentwickelt. Die Alliance ist ein Zusammenschluss mehrerer Unternehmen, die sich zum Ziel gesetzt haben, die Verbreitung von LoRa und LoRaWAN zu unterstützen. Eine offene Spezifikation ist insbesondere für die Geräteentwicklung und die herstellernerneutrale Kommunikation zwischen den Geräten ein zentrales Kriterium. Die Spezifikation wird von der LoRa-Alliance als Spezifikation veröffentlicht und ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit in der Version 1.1.0 verfügbar. Sie beschreibt den genauen Aufbau der Nachrichten, die Verschlüsselung, die Verbindungsvorgänge eines Gerätes mit einer Basisstation sowie die Funktionsweise der Netzwerkprotokolle. Da LoRaWAN in Europa den Bereich von 868 bis 869 MHz nutzt, gilt auch hier der Duty Cycle von 1 %. Im Gegensatz zu Sigfox ist die Dauer der

Nachrichtenübertragung nicht auf 6 Sekunden festgelegt, sondern hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu gehören zum einen die Größe der Nachricht (maximal 243 Bytes) [146], die je nach Anwendungsfall angepasst werden kann, sowie die Wahl des *Spreading Factor* und der *Bandwidth*. Der Kompromiss zwischen Datenrate und Reichweite wird mit Hilfe von sechs *Spreading Factor* (SF7 bis SF12) eingestellt. Je höher der *Spreading Factor*, desto mehr Reichweite ist auf Kosten einer geringeren Datenrate möglich und umgekehrt. Die Wahl des Faktors wirkt sich auch auf den Stromverbrauch und die Anzahl der Nachrichten aus, die innerhalb eines Arbeitszyklus übertragen werden können. Es ist daher nicht möglich, pauschal zu sagen, wie viele Nachrichten pro Tag möglich sind. Am Beispiel der maximalen Nachrichtengröße (12 Bytes, zusätzlich 12 Bytes Overhead⁷) von Sigfox und einem SF7 sowie einer Bandbreite von 250 kHz ergibt sich eine Übertragungszeit von 61,7 ms pro Nachricht⁸. Bei einer möglichen Gesamtübertragungszeit von 36 Sekunden pro Stunde ergeben sich knapp 583 Übertragungen pro Stunde. Das bedeutet, dass etwa alle 6 Sekunden eine Nachricht übertragen werden kann. Bei Verwendung von SF12 reduziert sich dies auf ca. 24 Nachrichten pro Stunde, wobei die Reichweite erhöht wird (siehe auch Abbildung 3.8).

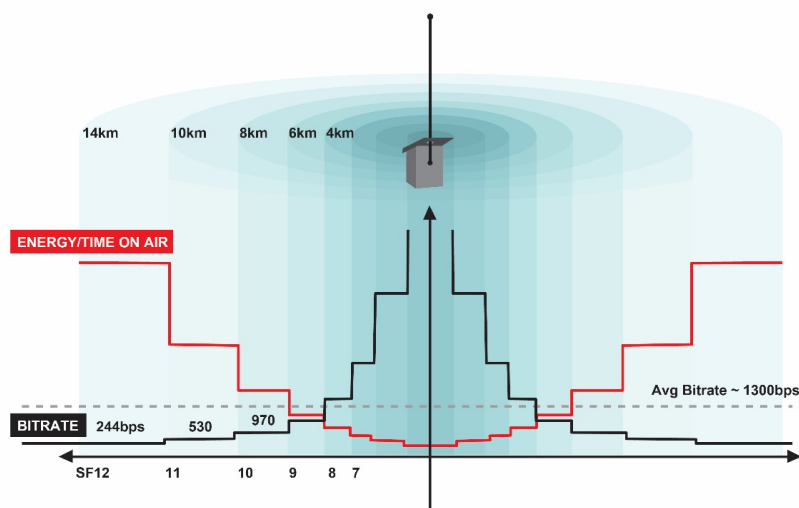


Abbildung 3.8: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Spreadingfaktor, Reichweite, Energieverbrauch und Übertragungszeit. (Quelle: [189])

3.3.3. Technologievergleich

Die vorgestellten drahtlosen Kommunikationsprotokolle haben unterschiedliche Vor- und Nachteile und sind, obwohl sie grundsätzlich für das Monitoring entwickelt wurden, für bestimmte Anwendungsfälle besser geeignet. Wird eine hohe Datenrate gefordert, schließen sich Technologien wie LoRaWAN und Sigfox aus. Dies liegt an der grundsätzlichen Funktionsweise der Protokolle sowie an den rechtlichen Beschränkungen der Übertragungsdauer und -menge auf den jeweiligen Frequenzen. Für hohe Datenraten bieten sich daher

⁷Inkludiert Parameter wie Geräte-ID etc.

⁸Berechnet mit dem LoRaWAN *Airtime calculator for LoRaWAN* <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/eu868> (Zugriff am 04.05.2022).

Technologien wie 5G an. Ein detaillierter Vergleich von Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT sowie 5G findet sich in [146] und [136] und ist in der folgenden Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Vergleich der Funkübertragungstechnologie. Zusammengefasst nach Daten aus [17], [136], [137], [146], [194]. DL : Downlink, UL : Uplink, k. A. : keine Angabe.

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT	5G
Frequenz	868 MHz (EU), un-lizenziert	433/868 MHz (EU), frei	7-900 MHz (EU), lizenziert	3,7-3,8 GHz, lizenziert
Reichweite	3-10 km urban 50 km suburban	2-5 km urban <15 km suburban	2-5 km urban <15 km suburban	0,15 -1,5 km
Verbindungen pro Basisstation	< 25.000	< 40.000	< 200.000	k. A.
Bandbreite	100 bps (DL/UL)	0,3-50 kbps	2-250 kbps (DL) 0,6-250 kbps (UL)	200-500 Mbps (DL), 100-200 Mbps (UL)
Latenz	k. A.	900-1800 ms	k. A.	< 10 ms
Gebäudedurchdringung	hoch	hoch	hoch	gering
Lizenzmodell	geschlossen	offen	geschlossen	geschlossen
Protokollstandard	Sigfox-Protokoll	LoRa	3GPP-Standard	3GPP-Standard
Batterielebenszyklus^a	> 10 Jahre	> 10 Jahre ^b	> 10 Jahre	k. A. (hoher Stromverbrauch)
Anbieter	Sigfox	LoRa-Alliance / Offen	Netzbetreiber z. B. Telekom	Netzbetreiber oder Campus-Netze
Modulkosten^c	ca. 5 €	ca. 5 €	ca. 10 €	k. A.
Ende-zu-Ende-Verschlüsselung	ja	ja	ja	k. A.
Hardwareökosystem	breit	breit	gering	gering
Einsatzszenarien	Smart City / Monitoring	Smart City / Monitoring	Monitoring	Echtzeitautomatisierung

^aabhängig von Datenrate.

^babhängig von Spreading Factor.

^cabhängig von Sensorik.

Im Rahmen des Katastrophenmanagements können LPWANs- und IoT-Technologien eine entscheidende Rolle bei der Bereitstellung von Echtzeitinformationen über den Zustand der Umwelt sowie über den Aufenthaltsort und den Zustand von Menschen und Anlagen spielen. Beispielsweise können Sensoren in Gebieten, die für Naturkatastrophen wie Erdbeben oder Überschwemmungen anfällig sind, frühzeitig vor potenziellen Gefahren warnen und eine rechtzeitige Evakuierung und Rettung ermöglichen.

3.4. Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden Anwendungsbeispiele vorgestellt, in denen IoT-Sensorik und innovative Funktechnologien wie LoRaWAN (siehe Kapitel 3.3.2) zur Unterstützung von Einsatzkräften im Bereich der Gefahrenabwehr eingesetzt werden. Darüber hinaus werden Untersuchungen zu IoT-Sensoren im Wasserbau beschrieben. Abschließend wird der Mobile Hochwasserpegel (MHP) des THW als Einsatzgruppe vorgestellt, ein mobiles Monitoringsystem zur Pegel- und Wasserstandsüberwachung.

3.4.1. Einsatz von LPWAN und IoT-Sensoren im Katastrophenschutz

Funktechnologien im Bereich LPWAN können z.B. für die Kommunikation zwischen Einsatzkräften als von den üblichen Übertragungswegen unabhängige Austauschmöglichkeit genutzt werden. So haben Höchst et al., Macaraeg et al. gezeigt, wie eine textbasierte Kommunikation über ein LoRa-Netz möglich ist [95], [143]. Diese Art der Kommunikation kann durch die Kombination mit Wi-Fi und GPS erweitert werden [218]. Da die Kommunikation für eine gute Koordination der Katastrophenhilfe unerlässlich ist, ist ein unabhängiges und autarkes Netzwerk für die Fernübertragung sehr hilfreich. Tayeh et al. schlagen eine LPWAN-basierte Alternative zum persönlichen Alarmsicherheitssystem für Feuerwehrleute vor, das ausgelöst wird, wenn der Träger über einen bestimmten Zeitraum bewegungslos bleibt, und das zur Zustandsbewertung und Lokalisierung von Feuerwehrleuten beitragen soll [204]. Ein weiterer Ansatz, die Waldbrandbekämpfung zu unterstützen, wurde von Sendra et al. vorgestellt: Die Autoren entwickelten ein kostengünstiges, auf LoRa-Technologie basierendes Netzwerk zur Überwachung des Waldbrandrisikos in ländlichen Gebieten auf der Grundlage von Informationen, die von Sensoren für Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Kohlendioxid gesammelt werden [190]. Es stützte sich jedoch auf *The Things Network (TTN)* als Backend-Infrastruktur. Um mögliche Netzwerkunterbrechungen nach einer Katastrophe zu überbrücken und eine dynamische Abdeckung nach Bedarf zu gewährleisten, schlug Pan et al. ein LoRa-Mesh-Netzwerk vor, das von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) unterstützt wird, um schnell eine drahtlose Kommunikation über große Entfernungen für Notfallmaßnahmen aufzubauen [161]. In ähnlicher Weise hat Stellin et al. ein Wi-Fi-Netzwerk von UAVs vorgeschlagen, die als Relais für den Verkehr zwischen mobilen LoRaWAN-Knoten und einer entfernten Basisstation, wie z. B. der Kommandozentrale für das Katastrophenmanagement, fungieren, und das System anschließend in Szenarien für den Einsatz im Freien evaluiert [198]. Kombinationen und Variationen der oben skizzierten Ansätze sind ebenfalls denkbar, z. B. der Einsatz von Einsatzfahrzeugen als mobile Gateways sowie von UAVs, wenn das Gelände für Bodenfahrzeuge unpassierbar ist. Der Einsatz von LoRaWAN und Sensorik zur Überwachung eines kleinen Gewässers wurde ebenfalls von Huyeng et al. untersucht [110]. Neben diesen Untersuchungen zum Einsatz von autarken Funktechnologien im Bereich des Katastrophenschutzes wurde auch die generelle Einsatzmöglichkeit von IoT-Sensorik zur Pegelmessung an Fließgewässern untersucht. Schulze et al. untersucht den Einsatzbereich von Low-Cost-Sensorik zur Pegelmessung an kleinen Fließgewässern und kommt zu dem Ergebnis, dass die Erfassung mit Ultraschallsensoren kostengünstig ist und eine ausreichende Genauigkeit liefert [184]. Der generelle Einsatz von IoT-Sensorik im Wasserbau wurde in weiterer Literatur untersucht [7], [18], [111], [153]. Von Placidi et al. wurde eine

detaillierte Untersuchung von IoT-Sensormodulen zur Überwachung der Bodenfeuchte im landwirtschaftlichen Bereich durchgeführt. Zur Übertragung der Sensorwerte wurden ebenfalls Long Range (LoRa) verwendet. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen die Problematik einer einheitlichen Bodenfeuchtemessung in unterschiedlichen Materialien mit kostengünstigen IoT-Sensoren [167], [168].

3.4.2. Monitoringsystem des THW (Mobiler Hochwasserpegel)

Das Technische Hilfswerk (THW) hat das Potenzial einer unabhängigen und mobilen Pegelüberwachung bereits vor einigen Jahren erkannt und mit dem Mobilen Pegeltrupp eine Einheit für diesen Einsatzfall geschaffen. Dabei ist das Hochwasser 2002 als initiales Ereignis zu nennen, welches die Lücken im Informationsfluss über Wasserstände und die Überwachung kleinerer Gewässer aufgezeigt hat [206]. Das Technische Hilfswerk gliedert die überwiegend ehrenamtlichen Mitarbeiter seiner jeweiligen Ortsverbände in (Teil-)Einheiten wie Züge, Fachgruppen und Trupps. Als Grundausstattung besitzt jeder Ortsverband mindestens einen Technischen Zug, bestehen aus einem Zugtrupp sowie mindestens einer Bergungsgruppe und einer Fachgruppe. Darüber hinaus können einem Ortsverband weitere, auf eine oder mehrere Aufgaben spezialisierte Einheiten zugeordnet sein. Der Trupp Mobiler Hochwasserpegel (Tr MHP) ist für die Erfassung und Dokumentation von Pegeldaten zuständig. Der erste Testpegel wurde im November 2002 installiert und kam 2005 bei einem Hochwasser zum Einsatz [206]. Die Datenerfassung kommt insbesondere dort zum Einsatz, wo keine festen Pegel installiert sind oder nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Daten dienen den Einsatzkräften zur Einschätzung und Überprüfung der Lage. Der Trupp, bestehend aus drei Helferinnen und Helfern, und ist häufig gemeinsam mit der Fachgruppe Wasserschaden/Pumpen im Einsatz, um den Fortschritt der Pumparbeiten zu überwachen [205].



Abbildung 3.9: Mobiler Pegeltrupp im Einsatz während der Hochwasserkatastrophe in Südwestdeutschland 2021. (Quelle: THW)

Zur Messung der Wasserstände werden mobile Messgeräte mit Mobilfunkübertragung (GPRS) eingesetzt. Als Sensor wird ein Drucksensor verwendet, der im Wasser versenkt und befestigt wird. Neben dem Wasserdruck können weitere physikalische und chemische Parameter wie z. B. die Temperatur eines Gewässers erfasst

werden. Zusätzlich ist der Trupp mit einem Vermessungsset ausgerüstet, um die Messstelle korrekt einmessen zu können und einen Höhenbezug für die spätere Auswertung zu haben. Die Konfiguration und Steuerung erfolgt über ein für den Außeneinsatz geeignetes Notebook und ist Teil der Gesamtausstattung [205]. Das System kann per SMS über den Status einer Station informieren [206]. Nach der Hochwasserkatastrophe in Südwestdeutschland im Juli 2021 soll laut Homepage des Mobilen Hochwasserpegel Trupps bis Mitte 2022 jeder Trupp mit zwei Koffern ausgestattet werden [215]. Auf der Homepage sind neben Informationen zur Technik auch eine Karte mit aktuell eingesetzten Pegeln zu finden (siehe auch Kapitel 4.3.3). Die hierfür verwendete API wurde im Rahmen dieser Arbeit dokumentiert [102]. Der Zugriff für externe Personenkreise wie z. B. den Krisenstab erfolgt ebenfalls über ein Webportal. In diesem Webportal soll auch das Anlegen und Verwalten der automatischen Warnmeldung möglich sein [206].

Insgesamt ist der Mobile Pegeltrupp als mobile Spezialeinheit zu verstehen, die ihre Notwendigkeit und Einsatzfähigkeit in Hochwassersituationen bereits unter Beweis gestellt hat. Die weitere Verbreitung des Systems innerhalb des THW verdeutlicht zudem den Bedarf an einem mobilen und flexiblen Pegelüberwachungssystem. Das derzeit im Einsatz befindliche System ist aufgrund seiner Abhängigkeit vom Mobilfunk und der Verwendung von Drucksensoren nicht in allen Einsatzsituationen verwendbar.

4. Grundlagen zu Open Data

Neben der Möglichkeit, Daten eigenständig und unabhängig von anderen Quellen und Infrastrukturen zu erheben, darf die Menge der bereits vorhandenen Daten und deren enormes Potenzial für die Lagebeurteilung nicht außer Acht gelassen werden. Für die Krisenbewältigung und -bewertung müssen die Einsatzkräfte ohne großen technischen Aufwand auf diese Daten zugreifen können und es muss möglich sein, diese Daten in bereits bestehende Systeme zu integrieren. Hier sind beispielsweise Anbindungen an GIS-Systeme für die Einsatzleitung hilfreich [183, S. 132], [173, S. 270]. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit neben der Entwicklung eines Monitoringsystems ein Konzept zur Nutzung von öffentlichen Daten entwickelt. Hierbei steht der Anwendungsfall Hochwasser im Fokus. Zunächst wird der aktuelle Stand von Open Data sowie eine grobe rechtliche Einordnung des Themas vorgenommen. Anschließend wird anhand von BundDEV aufgezeigt, wie Initiativen die Förderung von Open Data gestalten können und auf Datenquellen für Hochwasserereignisse eingegangen. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf Open-Data-Schnittstellen, die über Web-APIs zur Verfügung gestellt werden. Insbesondere die für den Anwendungsfall Katastrophenschutz sowie Hochwasserereignisse relevanten APIs, die nicht nur historische Daten, sondern auch aktuelle (Live-) Daten wie z. B. Wasserstandsdaten zur Verfügung stellen.

4.1. Grundlegende Begriffe

Open Data

Open Data beschreibt Daten und Informationen, die für jedermann frei zugänglich und nutzbar sind.

API

Als API (*Application Programming Interface*) wird eine Schnittstelle bezeichnet. Über diese Schnittstelle kann z. B. auf Teile eines Programms oder Daten zugegriffen werden. In dieser Arbeit wird der Begriff API synonym mit Webschnittstelle verwendet.

OpenAPI

OpenAPI ist eine Spezifikation für den Entwurf, die Erstellung und die Verwendung von APIs. Sie wird verwendet, um die Funktionalität einer API zu beschreiben, einschließlich Endpunkt-URLs, Anfrage- und Antwortformate und andere relevante Informationen.

Swagger UI

Swagger UI ist ein Tool zur Visualisierung und Interaktion mit OpenAPI-definierten APIs. Es ermöglicht Entwicklern das einfache Erkunden und Testen von API-Endpunkten und -Operationen, wodurch das Verständnis und die Verwendung einer API vereinfacht werden. Es wird in der Regel auf dem API-Server gehostet und ermöglicht Entwicklern den Zugriff auf die API-Dokumentation über eine browserbasierte Schnittstelle, die benutzerfreundlich und interaktiv ist.

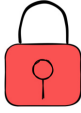

4.2. Aktueller Stand in Deutschland

In den letzten Jahren haben sich die Möglichkeiten zur Nutzung öffentlicher Daten auch durch Initiativen zur öffentlichen Dokumentation von Daten und Datenschnittstellen verbessert. Darüber hinaus stärken und vereinfachen verschiedene Gesetze die Nutzbarkeit, die Verfügbarkeit sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen öffentlicher Daten [37]. So verpflichtet das *Zweite Open-Data-Gesetz* [39] mit einer Änderung des *E-Government-Gesetz (EGovG)* die Behörden des Bundes, für die in der Behörde gespeicherten Daten eine öffentliche Netzchnittstelle mit Datenzugang einzurichten [§ 12a, (1) *EGovG*]. Neben der Änderung des *EGovG* ist die Einführung des *Gesetzes zur Nutzung von Daten des öffentlichen Sektors* (Datennutzungsgesetz - *DNG*) im *Zweite Open-Data-Gesetz* enthalten. Insbesondere das *DNG* bezieht sich nicht nur auf Behörden, sondern auch auf Unternehmen mit öffentlichen Aufträgen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Für diese konkretisiert das Gesetz die Veröffentlichung von Daten wie folgt: „[...] Daten [sind] elektronisch und in nach den anerkannten Regeln der Technik offenen, maschinenlesbaren, zugänglichen, auffindbaren und interoperablen Formaten zusammen mit den zugehörigen Metadaten bereitzustellen“ [§ 7, (2), *DNG*]. Es gilt jedoch folgende Einschränkung: Die Umsetzung muss nicht erfolgen, wenn sie für die Behörde oder zuständige Stelle mit einem *unverhältnismäßigen Aufwand* verbunden wäre [§ 7, (3), *DNG*]. Eine Spezifizierung, ab wann der Aufwand als unverhältnismäßig anzusehen ist, wird nicht vorgegeben, so dass die Beurteilung offensichtlich von der jeweiligen Institution selbst vorgenommen wird. Aufgrund dieser Einschränkung kann keine allgemeingültige Aussage darüber getroffen werden, welche Daten in welchem Umfang von den Behörden über die Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden.

4.2.1. Paradigmenwechsel in der öffentlichen Verwaltung

Untersuchungen wie z. B. von Schmietendorf zeigen das im Bereich von Open Data auch im Jahr 2020 noch einige Lücken und Probleme bei Behörden vorliegen [182]. Diese will der Bund mit Angeboten für die entsprechenden Stellen überwinden, so bietet beispielsweise das *Kompetenzzentrum Open Data* Behörden Hilfestellung bei der Bewertung von offenen Daten und bei der Aufbereitung und Veröffentlichung. Zudem will das Zentrum mit Informationsinhalten wie dem *Open Data Handbuch* Kompetenzen in den Behörden fördern und aufbauen [122]. Das Handbuch thematisiert auch den notwendigen Paradigmenwechsel in den Behörden (siehe Tabelle 4.1). Eine wichtige Erkenntnis ist, dass die Eigentumsrechte an öffentlichen Daten auch durch das beschriebene Gesetz grundsätzlich der Öffentlichkeit zuzuordnen sind.

Tabelle 4.1: Paradigmenwechsel im Umgang mit öffentlichen Verwaltungsdaten. Zusammengefasst aus Open Data Handbuch [122].

	 Altes Paradigma	 Neues Paradigma
Öffentlich vs. Geheim	Alles ist nicht öffentlich, was nicht ausdrücklich als öffentlich gekennzeichnet ist.	Daten im Sinne des § 12a sind grundlegend öffentlich.
Umfang, Art und Zeitpunkt der Veröffentlichung	Umfang und Zeitpunkt der Veröffentlichung von öffentlichen Daten werden von den einzelnen Behörden selbst bestimmt.	Proaktive Veröffentlichung im vollen Umfang und unverzüglich.
Nutzungsrechte an öffentlichen Daten	Die veröffentlichten Daten sind für die private Nutzung freigegeben. Weitere Nutzungsrechte sind vorbehalten und können im Einzelfall erteilt werden.	Veröffentlichte Daten sind von jedermann für jegliche Zwecke nutzbar.
Wem gehören die erhobenen Daten?	Die Daten wurden von der Behörde erhoben und befinden sich deshalb in deren Besitz.	Datenerhebung wird durch Steuergelder finanziert, Öffentlichkeit hat Nutzungsrecht.
Wie können Daten ausgetauscht werden?	Behörden können am besten über die in der Geschäftsordnung vorgesehenen Wege Daten austauschen.	Daten können ohne langwierigen Abstimmungsaufwand abgerufen und genutzt werden.
Das Verwendungsmonopol von Daten	Daten dienen nur dem Zweck, für den sie erhoben wurden. Die Behörde ist somit der einzige sinnvolle Nutzer dieser Daten.	Dritte haben neue Ideen für die Nutzung von Daten.

Um einen Paradigmenwechsel herbeizuführen, müssen also nicht nur der generelle Umgang mit Daten, sondern auch die Prozesse verändert werden. Da sich jedoch die alten Paradigmen in den Behörden verfestigt haben, sind weitere Initiativen notwendig, um den Paradigmenwechsel zu beschleunigen. Im Folgenden werden sowohl behördliche als auch öffentliche Initiativen und deren Vorgehen vorgestellt.

4.2.2. Initiativen zur Förderung von Open Data

Die bereits beschriebenen rechtlichen Grundlagen ermöglichen und fördern die Veröffentlichung von Daten, aber die alleinige Veröffentlichung führt nicht zwangsläufig zu einer sinnvollen Nutzung oder Auffindbarkeit der Daten. Hierfür sind verschiedene Portale notwendig, die die Daten und die zugehörigen Metadaten aufbereiten und für den Menschen lesbar z. B. als Webanwendung zur Verfügung stellen. Auf Bundes- und Landesebene gibt es verschiedene Portale wie zum Beispiel das Portal GovData [169]. Dieses Portal ist Teil der Digitalisierungsstrategie des Bundes und soll den Zugang zu Daten und Dokumenten öffentlicher Stellen ermöglichen. Verantwortlich für das Portal ist der IT-Planungsrat, das zentrale Gremium für die Digitalisierung in der Verwaltung. Ihm gehören Vertreter des Bundes, der Länder und der Kommunen an. In GovData ist

es möglich, nach Datensätzen zu suchen und sich die zugehörigen Metadaten in den jeweils verfügbaren Formaten anzeigen zu lassen. Die Daten und gegebenenfalls Datenschnittstellen werden dezentral von den jeweiligen Anbietern vorgehalten. Das Portal zeigt auch Daten von Landes- und Kommunalportalen an. Der Austausch zwischen den Plattformen erfolgt nach dem *DCAT-AP.de - Austauschstandard*. Neben den öffentlich geförderten Angeboten zur Sammlung von Schnittstellenbeschreibungen gibt es weitere Initiativen von nicht-öffentlichen Stellen. Eine Initiative ist BundDEV, die unter anderem von Lilith Wittmann gegründet wurde [26]. Die Initiative BundDEV soll laut Wittmann vor allem aufzeigen, was derzeit in den Behörden nicht umgesetzt wird und wie die Nutzung öffentlicher Daten beschleunigt werden kann [225]. Eines der ersten Beispiele war die API-Dokumentation für die Katastrophenwarnapp NINA [23]. Sowohl die Daten als auch die Schnittstelle zum Zugriff waren zwar seit einiger Zeit öffentlich verfügbar, dies war aber mangels offizieller Unterstützung und Dokumentation kaum bekannt.

Bundesstelle für Open Data (BundDEV)

Der Ansatz von BundDEV ist sehr anwenderorientiert. Als Kernelement wird der OpenAPI-Standard zur Beschreibung der verschiedenen öffentlichen APIs verwendet. Jede API wird in einem eigenen Repository auf GitHub verwaltet und kann dort von Mitwirkenden und Interessierten durch Kommentare oder konkrete Anpassungen verbessert und aktualisiert werden. Im Rahmen von Entwicklungen ist GitHub weit verbreitet und somit dem Personenkreis bekannt, der APIs in Anwendungen einsetzt. Findet ein Nutzer eine API, die noch nicht beschrieben ist, kann das von BundDEV zur Verfügung gestellte Template (dt. Vorlage) auf GitHub genutzt werden, um die API zu beschreiben (siehe auch Kapitel 4.3.2). Mit Hilfe des Templates und den bereits vorhandenen Beispielspezifikationen ist die Beteiligung weiterer Personen auch ohne Expertenwissen möglich. Die Initiative hat über 40 APIs⁹ dokumentiert und öffentlich zugänglich gemacht [26]. Auch für den Bereich Hochwasserschutz bzw. -monitoring wurden im Rahmen des Projektes einige APIs dokumentiert (siehe auch Kapitel 4.3.3).

Landes- und Kommunalportale

Neben dem bundesweiten Portal GovData bieten Kommunen und Länder Datensätze auf eigenen Plattformen an. Hier werden unterschiedliche Daten aus den Bereichen Statistik, Monitoringdaten sowie historische Daten veröffentlicht. Das Angebot ist dabei in Quantität und Qualität sehr unterschiedlich. Für die Veröffentlichung der Daten sowie der Metadaten werden unter anderem die Softwarepakete *Comprehensive Knowledge Archive Network* (CKAN) und DKAN verwendet. CKAN ist eine Standard-Open-Source-Software zur Bereitstellung und Veröffentlichung von Daten und Datensätzen. DKAN ist ein Werkzeug, das in Anlehnung an CKAN Behörden und Organisationen ein „ready-to-use“ Softwarepaket zur Verfügung stellen soll. Das System basiert auf dem Content-Management-System Drupal und wird insbesondere von Kommunen (z. B. Stadt Köln, Essen, Düsseldorf etc.) eingesetzt. Laut den Entwicklern von DKAN ist gerade durch die Verwendung von PHP und Drupal eine einfache Integration in bestehende Verwaltungssysteme möglich [44]. CKAN, das unter anderem von GovData, der US-Regierung und anderen Länderportalen als Datenplattform genutzt wird, bietet als

⁹Überprüft zuletzt am 9.2.2023.

Content-Management-System ebenfalls die Möglichkeit, Daten und deren Metadaten zu veröffentlichen. Das Projekt steht unter der Schirmherrschaft der *Open Knowledge Foundation* [45].

DCAT-AP.de - Austauschstandard

Für den Austausch von Metadaten zwischen den verschiedenen Plattformen sowie Anwendungen hat der IT-Planungsrat für offene allgemeine Verwaltungsdaten im Juni 2018 den DCAT-AP.de als Austauschstandard festgelegt. Die detaillierte Beschreibung kann der Spezifikation entnommen werden [227]. Die Abbildung 4.1 zeigt, wie der Standard zwischen den einzelnen Portalen verwendet werden soll bzw. muss. Aus dieser Abbildung wird auch deutlich, dass der Informationsfluss ausgehend von kleineren (z. B. kommunalen) Portalen über Landesportale in das GovData-Portal münden soll. Übergeordnet sollen diese Informationen dann auch im *European Data Portal* auffindbar sein [63]. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei ausschließlich um Metadaten und Links zu den Daten handelt.

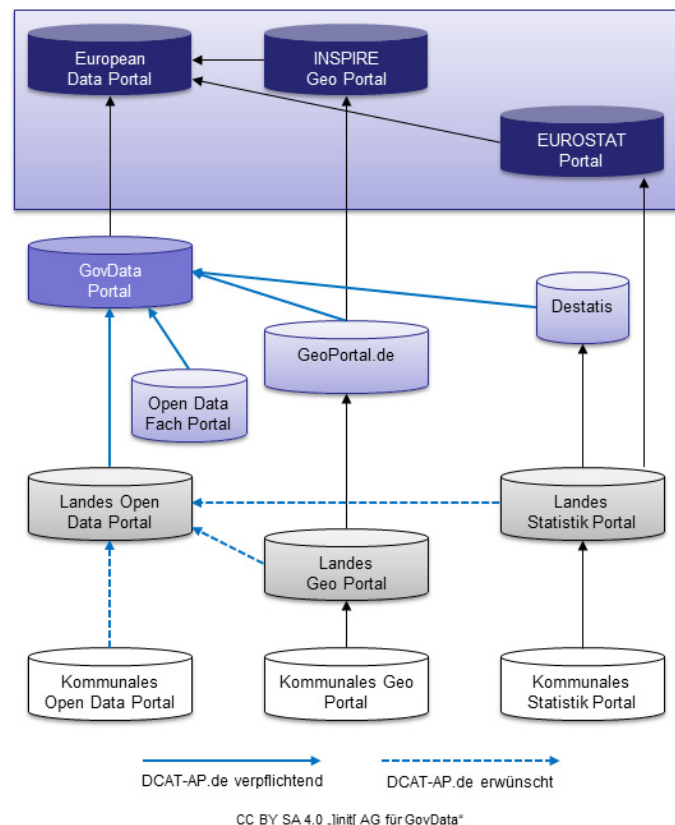


Abbildung 4.1: Standardisierungsbedarf der Metadatenföderation GovData. (Quelle: [227])

Die Plattformen bieten, wie beschrieben, für den jeweiligen Einzugs- und Anwendungsbereich die Möglichkeit, nach Daten und deren Metadaten zu suchen. Diese Suche kann neben den Webschnittstellen auch über APIs (CKAN, DKAN) erfolgen. Für den Anwendungsfall im Katastrophenschutz werden insbesondere Live-Daten benötigt, hierfür wäre eine Filtermöglichkeit zur Unterscheidung von historischen und Live-Daten in den Portalen hilfreich. Zudem werden in den Datenportalen überwiegend einzelne Datensätze beschrieben

und nur wenige APIs, die sich für die Weiterverarbeitung und Auswertung eignen. Daher ist neben den bereits bestehenden Datenportalen eine weitere Informationsquelle für Entwickler und Nutzer, insbesondere im Bereich der APIs und Live-Daten notwendig. Initiativen wie das bereits beschriebene Projekt BundDEV können hier Abhilfe schaffen. Hier liegt der Fokus auf der Veröffentlichung und Zusammenstellung von API-Spezifikationen. Das Projekt hat darüber hinaus das Potenzial, die Lücke der derzeit noch nicht dokumentierten Schnittstellen durch den Einsatz einfacher Werkzeuge zu schließen.

Cross-Origin Resource Sharing (CORS)

Im Rahmen der Erstellung der API-Spezifikationen wurde festgestellt, dass eine einfache Nutzung der APIs aufgrund der CORS-Sicherheitsrichtlinien nicht immer möglich ist [145]. Dies bedeutet, dass Daten nicht direkt aus einer Webseite (Frontend) von einer API abgerufen werden können. Die Sicherheitsrichtlinie soll dazu beitragen, dass Inhalte nur für bestimmte Hosts (Webseiten) angezeigt werden können (siehe Abbildung 4.2). Dieser Mechanismus ist sinnvoll, um sich vor externen Inhalten zu schützen, die vorgeben, von der gleichen Domain zu stammen. Im Zusammenhang mit der Bereitstellung öffentlicher Daten ist dies jedoch nur ein vorgeschobener Schutz bzw. eine Einschränkung und verhindert aktiv die einfache Nutzung der Daten in einer anderen Anwendung als der des Datenproviders. Anfragen, die aufgrund von CORS im Browser blockiert werden, können über einen Proxy-Server geleitet werden, der den erforderlichen Header (Access-Control-Allow-Origin: *) setzt und damit die Anzeige ermöglicht.

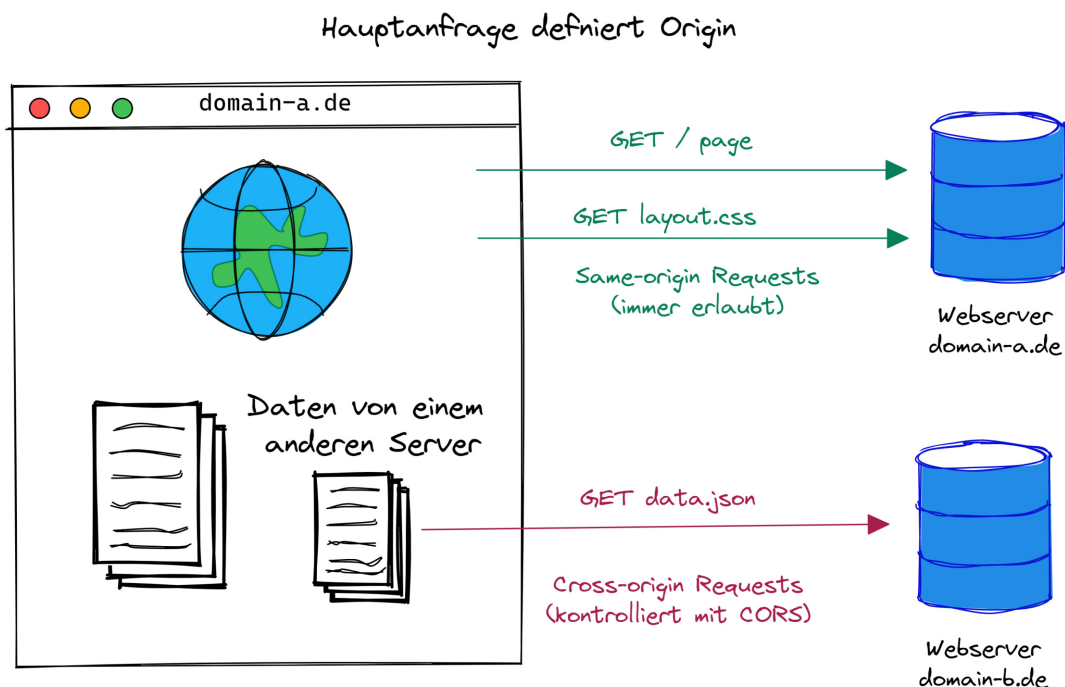


Abbildung 4.2: Beispiel des CORS Mechanismus anhand von zwei Webserver und einer Webseite. Eigene Darstellung angelehnt an [145]

Von den 42 dokumentierten APIs des BundDEV-Projekts erfordern 21 die Verwendung eines Proxy-Servers aufgrund fehlender CORS-Einstellungen aufseiten der Datenlieferanten¹⁰. BundDEV selbst stellt für diese APIs einen Proxy-Server zur Verfügung, der innerhalb der *Swagger UI* zum Testen verwendet werden kann. Die Gründe für die Verwendung dieses Mechanismus lassen sich nicht generell für die APIs feststellen, es ist aber davon auszugehen, dass die Einstellung teilweise aufgrund von Standardeinstellungen oder falschem Sicherheitsverständnis getroffen wurde. Das Beispiel der Geoportale zeigt, dass durch Hinweise von Nutzern diese Hürde unkompliziert beseitigt werden kann (siehe Kapitel 4.3.2).

4.3. Erstellung und Verwendung von Dokumentationen öffentlicher Schnittstellen

Obwohl der angestrebte Paradigmenwechsel in öffentlichen Einrichtungen die Veröffentlichung und Dokumentation von Open Data fördert, sind derzeit noch Initiativen von Freiwilligen und anderen Gruppen erforderlich, um die Nutzung öffentlicher Daten zu erleichtern. Dieser Abschnitt beschreibt, wie Dokumentationen in einem Standardformat erstellt, veröffentlicht und genutzt werden können.

4.3.1. Spezifikationen von Schnittstellen mittels OpenAPI



Abbildung 4.3: Logo von OpenAPI. (Quelle: [212])

OpenAPI ist ein offener Standard zur Beschreibung von Web(HTTP)-APIs. Der Standard ist Open Source und wird von der *OpenAPI Initiative* verwaltet. Die Initiative ist nicht kommerziell und wird von der *Linux Foundation* gepflegt [212]. Der Vorteil von OpenAPI ist zum einen, dass es mit einfachen Werkzeugen wie der *Swagger UI* gut visualisiert und für den Anwender verständlich dargestellt werden kann. Zum anderen kann die Spezifikation maschinell ausgewertet und aus den Informationen automatisch Quellcode für die jeweilige Schnittstelle generiert werden. So kann z. B. mit Hilfe eines Generators eine eigene JavaScript- oder Python-Bibliothek erstellt werden. Diese erleichtert den Zugriff auf die API und die Daten, da alle Routen sowie die Struktur der Parameter und Antworten zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus ermöglichen sogenannte Linter¹¹ die Überprüfung der OpenAPI-Spezifikation auf Fehler oder Inkonsistenzen. Auch dieser Prozess kann automatisiert werden und zu einer einheitlichen Qualität der Dokumente führen. Im Kapitel 4.3.2 wird der Einsatz dieser Funktionalitäten anhand des GitHub-Templates von BundDEV erläutert.

¹⁰Überprüft zuletzt am 9.2.2023.

¹¹Software zur Codeanalyse.

Bereitstellung von OpenAPI-Spezifikation am Beispiel der Geoportale von Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland

Wie bereits beschrieben, gibt es verschiedene Portale, die kommunal- oder länderspezifische Daten und deren Dokumentation bereitstellen. Dazu gehören auch Geoportale, die Daten und Dokumentationen zu Geodaten bereitstellen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Skripte zur automatisierten Erfassung und Veröffentlichung der OpenAPI-Spezifikation von Geoportalen entwickelt. Die Geoportale von Hessen, Rheinland-Pfalz sowie des Saarlandes nutzen für die Veröffentlichung und Bereitstellung ihrer Daten eigene Geoportale, die das gleiche Open-Source-Projekt verwenden [155]. Neben der bereits aus CKAN und DKAN bekannten Metadatenfunktionalität verfügt hier ein Teil der bereitgestellten APIs bereits über eine detaillierte OpenAPI-Spezifikation. Diese sind jedoch zum Teil nicht leicht auffindbar und werden ebenfalls nur als JSON-Datei dargestellt. Diese Darstellung ist für Anwender ohne Fachkenntnisse nur schwer verständlich und die Spezifikationen müssen daher erst in ein entsprechendes Tool kopiert werden, um die gewohnte Darstellung in Form einer Oberfläche zu erhalten.

4.3.2. Vorgehensweise zur Dokumentation und Bereitstellung

Eine der Hauptideen hinter der BundDEV-Initiative ist es, zu zeigen, wie einfach und unkompliziert es ist, Dokumentationen für verschiedene Schnittstellen zu erstellen. Um einen einheitlichen Ausgangspunkt für die Erstellung einer Spezifikation zu haben, wurde eine Vorlage als GitHub-Repository-Template entwickelt [24]. Dieses Template enthält eine Grundstruktur, die die Erstellung einer Spezifikation erleichtern soll. Neben einer Beispiel-OpenAPI-Datei enthält dieses Template auch eine Anleitung sowie verschiedene GitHub-Workflows, die unter anderem die OpenAPI auf Fehler überprüfen. Im Template sind drei GitHub-Workflows angelegt, die auf der GitHub-Plattform in sogenannten Actions bei einem Update des Quellcodes automatisch ausgeführt werden. Zum einen wird mit Hilfe des OpenAPI-Linters Spectral [200] die Struktur der OpenAPI-Datei auf Fehler oder eventuell fehlende Inhalte überprüft. Zum anderen testet der Workflow Schemathesis [181] die einzelnen Routen der API und überprüft, ob die Antworten der API auch der in der Spezifikation beschriebenen Antwort entsprechen. Als dritter optionaler Workflow steht der Deutschland-Generator-Workflow zur Verfügung. Dieser ermöglicht, wenn alle Parameter in der Datei `generator_config.yaml` ordnungsgemäß gesetzt sind, die automatische Generierung eines Python-Client-Pakets. Ist das Repository Teil des BundDEV-Projekts, kann dieser Quellcode in das umfangreiche *Deutschland*-Python-Paket aufgenommen und veröffentlicht werden [25]. In diesem Paket sind eine Reihe von APIs sowie weitere Datenabfragen zusammengefasst. Neben den Workflows ermöglicht die Verwendung des Templates in Kombination mit der kostenlosen Hosting-Funktion GitHub-Pages eine webbasierte und menschenlesbare Bereitstellung der Spezifikation. Dies wird durch die Verwendung des Swagger-UI und der im Repository verfügbaren HTML-Seite realisiert. GitHub-Pages veröffentlicht diese HTML-Seite im Internet. Die Verwendung von Swagger-UI ist im Rahmen von API-Dokumentationen weit verbreitet und ermöglicht es den Nutzern, Routen, Eingabeparameter und erwartete Antworten einfach und übersichtlich einzusehen. Darüber hinaus können Abfragen in der UI auch anhand von Beispielen ausprobiert werden, die in der Spezifikation angegeben sind.

Vorgehensweise zur Erstellung einer Spezifikation

Wenn eine API dokumentiert werden soll, gibt es verschiedene Ausgangssituationen, in welcher Form die API und Informationen über die API vorliegen. Huyeng beschreibt die drei häufigsten Ausgangslagen und zeigt auf, wie bei diesen vorgegangen werden kann [103]. Die drei Ausgangslagen sind:

Tabelle 4.2: Übersicht über die verschiedenen Ausgangslagen beim Vorfinden einer Schnittstelle. (Quelle: [103])

	Dokumentation	Spezifikation
A-1	X	X
A-2	✓	X
A-3	✓	✓

Existiert für eine Schnittstelle bereits eine OpenAPI-Spezifikation (A-3), so kann diese direkt verwendet werden. Dies ist z. B. bei dem bereits beschriebenen Geoportalen der Fall. Die Spezifikation kann z. B. in das GitHub-Template von BundDEV kopiert werden und mit Hilfe der Workflows kann diese überprüft oder ein Python-Paket zur einfachen Verwendung erstellt werden. Um das Verständnis der API zu erhöhen, kann die Spezifikation ebenfalls veröffentlicht oder in einen OpenAPI-Viewer eingebunden werden. Wenn eine Dokumentation für die Schnittstelle existiert, aber noch keine Spezifikation (A-2), können die Informationen aus der Dokumentation verwendet werden, um eine Spezifikation zu erstellen. Auf diese Weise wurde beispielsweise die Spezifikation der Pegelonline-API vom Autor erstellt. Die ausführliche und mit Beispielen versehene Dokumentation der Schnittstelle diente als Grundlage für die Erstellung der Spezifikation. Falls für die vorliegende API weder eine Spezifikation noch eine Dokumentation vorliegt (A-1), ist eine Rekonstruktion der Struktur erforderlich. Dazu können Anfragen (sog. Requests), die z. B. durch den Aufruf einer Webseite an die Schnittstelle gestellt werden, analysiert werden. Anhand dieser Requests kann die Struktur, die Übergabeparameter sowie die Antworten der API rekonstruiert werden. Auf diese Weise ist es allerdings möglich, dass nur Teile der gesamten API erfasst und dokumentiert werden, wenn Teile der Schnittstelle vom Ersteller nicht erkannt werden. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn die gleiche API für verschiedene Webseiten verwendet wird. Durch die Rekonstruktion von Webanfragen konnte der Autor beispielsweise die APIs des Länderübergreifenden Hochwasserportals sowie des Hochwasserportals Hessen dokumentieren.

Automatische Erfassung der OpenAPI-Spezifikation am Beispiel Länder-Geoportale



Abbildung 4.4: Logo der Geoportal-API-Sammlung. Kombination aus dem OpenAPI-Logo und einem Kartensymbol. (Eigene Darstellung)

Um die Spezifikationen der bereits beschriebenen Geoportale zu sammeln, wurden ein Skript entwickelt. Auf einer Übersichtsseite sind die Metadaten zu den APIs zu finden, außerdem sind die OpenAPI-Dateien verlinkt. Das implementierte Go-Skript durchsucht mittels Webscraping die Übersichtsseiten der Portale nach Informationen über die veröffentlichten APIs. Wird eine API gefunden, werden bestimmte Parameter der jeweiligen Schnittstelle teilweise auch aus der OpenAPI-Spezifikation ausgelesen und in einer Liste gespeichert. Die Liste wird anschließend automatisch auf GitHub veröffentlicht und liegt im JSON-Format maschinenlesbar vor. Die gespeicherten Parameter der jeweiligen API umfassen den Namen, die ID, die Uniform Resource Locator (URL) zur OpenAPI sowie die URL zur API-Beschreibung des jeweiligen Geoportals. Der Ablauf des Skriptes ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

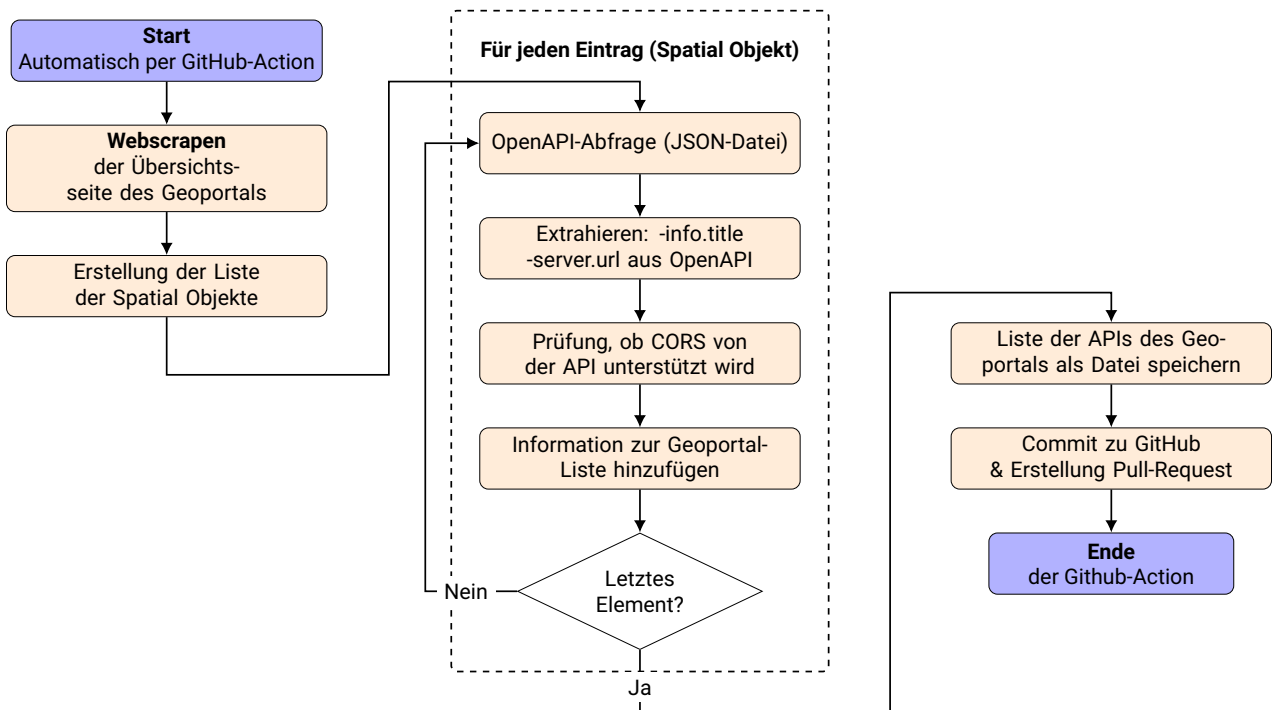


Abbildung 4.5: Ablaufdiagramm des Go-Skriptes zur automatischen Erfassung der OpenAPI-Spezifikationen. (Eigene Darstellung)

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Go-Skript läuft automatisch alle drei Tage über eine GitHub-Action und prüft, ob neue APIs veröffentlicht wurden. Ist dies der Fall, wird eine Änderung der Listen per Pull-Request durch einen Bot initiiert. Die Änderung kann nach einer Prüfung in das Repository übernommen werden. Zu Beginn des Projekts der automatischen Erfassung der Geoportal-APIs war der Zugriff auf die Beschreibungen und die APIs selbst durch die CORS-Sicherheitsrichtlinie eingeschränkt. Daher wurden die OpenAPI-Spezifikationen anfangs zusätzlich in dem GitHub-Projekt gespeichert. Hierzu wurde pro Geoportal ein Ordner angelegt und über GitHub war ein Zugriff ohne CORS-Einschränkungen möglich. Nach Hinweisen des Autors im öffentlichen Teilprojekt *Mapbender*¹² der Geoportale von Rheinland-Pfalz, Saarland und Hessen wurde jedoch der erforderliche Header korrigiert und eine zusätzliche Speicherung der OpenAPI-Dateien ist nicht mehr notwendig, da die Dateien nun direkt von den Servern der Geoportale abgerufen werden können. Die durch das Go-Skript erzeugten Übersichtslisten über alle APIs werden mit Hilfe von GitHub-Pages veröffentlicht und sind online abrufbar [99].

Visualisierung von OpenAPI-Spezifikationen



Abbildung 4.6: Logo des OpenAPI Viewers. Kombination des OpenAPI-Logos mit einem schematisch dargestellten Auge. (Eigene Darstellung)

Die Geoportale verfügen derzeit noch nicht über eine explizite Suche nach APIs, die durch eine OpenAPI-Spezifikation beschrieben werden. Zudem ist keine Darstellung über ein Webinterface der Spezifikation implementiert, es werden nur die reinen JSON-Dateien angezeigt. Da es sich bei den Spezifikationen zudem um mehrere hundert Dokumente handelt, ist auch die Erstellung eines Repositories nach den Vorgaben des BundDEV-Templates nicht sinnvoll. Um dennoch die Möglichkeit einer einfachen Benutzeroberfläche zur Darstellung der Spezifikation zu haben, wurde im Rahmen dieser Arbeiten für diesen Fall der OpenAPI-Viewer entwickelt [100]. Die Webanwendung ermöglicht auf Basis einer Liste die Suche und Darstellung von Spezifikationen im Browser. Die Anwendung wurde als Open-Source-Projekt entwickelt und basiert auf einer Frontend-Anwendung mit NuxtJS [157] und dem UI-Framework Vuetify [219].

¹²<https://github.com/mrmap-community/Mapbender2.8/> (Zugriff am 12.12.2022).

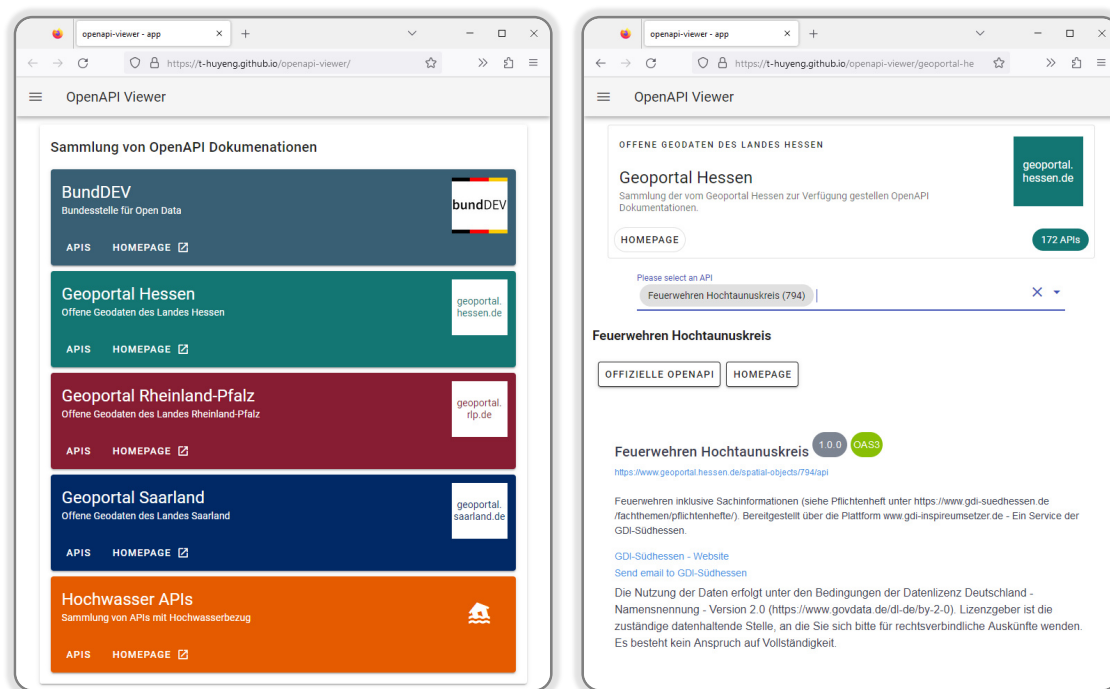


Abbildung 4.7: Screenshot des OpenAPI-Viewers, Übersichtseite (links), sowie Detailansicht einer ausgewählten API des Geoportals Hessen (rechts).

Das Hosting der Seite wurde mit GitHub-Pages realisiert und neben den bereits beschriebenen OpenAPI-Listen der drei Geoportale sind auch die API des BundDEV-Projekts sowie eine Liste von Hochwasser-APIs angebunden (siehe Abbildung 4.7). Im Gegensatz zu statischen Anwendungen, bei denen die Spezifikation manuell kopiert werden muss (z. B. Swagger Editor [196]), ist die Anwendung durch die automatisch generierten und aktuellen Listen der verschiedenen OpenAPI-Sammlungen dynamisch. Die Anwendung ist als öffentlich Webseite erreichbar [100].

4.3.3. Open Data im Hochwasserschutz

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, ist das Thema Open Data und insbesondere offene Schnittstellen in Deutschland durchaus präsent, jedoch fehlt insgesamt ein erkennbarer Paradigmenwechsel. Dennoch gibt es bereits einige geeignete Angebote, die für den Bereich des Hochwasserschutzes bzw. der Hochwasserwarnung interessant sind. Dazu gehören u.a. Pegeldata sowie Hochwasserschutzkarten bzw. Überschwemmungsgebiete. Neben diesen Daten sind aber auch weitere Informationen zu Rettungskräften oder öffentlichen Einrichtungen im Katastrophenfall hilfreich (siehe z. B. Daten des Geoportals Saarland zu *Staatliche Dienste*¹³). Speziell für den Bereich Hochwassermonitoring wurde eine Sammlung von APIs in Form einer Liste erstellt und veröffentlicht. Die Liste wird auf GitHub gehostet und wurde auch in den OpenAPI-Viewer integriert [101].

¹³<https://www.geoportal.saarland.de/spatial-objects/257/> (Zugriff am 06.01.2023).

Tabelle 4.3: Übersicht über verschiedene APIs für den Hochwasserschutz.

API-Name	CORS	Dokumentation	Spezifikation (OpenAPI) ^a
Pegelonline	✓	✓	✓
Hochwasserzentralen	✗	✗	✓
HLNUG-Messdatenportal	✗	✗	✓
WISKI-Web Hochwasserportal Hessen	✗	✗	✓
Geodaten Wasser Rheinland-Pfalz	✗	✗	✓
THW mobiler Pegel ^b	✗	✗	✓

^aIm Rahmen dieser Arbeit vom Autor erstellt.

^bEingeschränkt verfügbar.

Die API des mobilen Pegeltrupps des THW ist dabei zeitweise aufgrund von Weiterentwicklungen nicht zuverlässig erreichbar. Pegelonline stellt die Pegel­daten von ca. 660 Pegeln zur Verfügung [79, geprüft am 03.06.2022], zusätzlich werden Hochwasserkennlinien und weitere Gewässerparameter zurückgeliefert. Besonders hilfreich ist, dass auch für bestimmte Bereiche gesucht werden kann, z. B. nach einer Koordinate und einem Radius um diese. Auch die Rückgabe aller Pegel zu einem Gewässer ist möglich. Die API kann auch die historischen Daten der Pegel zur Verfügung stellen, für Anwendungen ohne eigene grafische Darstellung ist die Rückgabe eines Bildes (der Ganglinie) möglich. Die anderen hier aufgeführten APIs liefern ebenfalls überregionale Daten zurück, dabei wird erneut deutlich, dass nur eine der hier aufgeführten APIs eine CORS-Unterstützung anbietet. Neben den hier aufgeführten APIs gibt es auch Hochwasserportale der einzelnen Bundesländer, die teilweise über eine Schnittstelle verfügen. Darüber hinaus können eine Reihe von Informationen, die für die Lagebeurteilung hilfreich sind (z. B. Lage von Schulen sowie Stationen von Rettungskräften) über APIs der Geoportale abgerufen werden. Beispielhaft seien hier wieder die Geoportale von Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland genannt. Für die veröffentlichten Schnittstellen existiert eine OpenAPI-Spezifikation und es besteht keine Einschränkung durch CORS.

4.3.4. Potenziale und Herausforderungen von Open Data

Die zunehmende Verfügbarkeit von Open Data ermöglicht es Nutzern, Daten für verschiedene Zwecke und Anwendungen zu nutzen. In Deutschland regelt unter anderem das 2. *Open Data Gesetz* die Bereitstellung von Daten durch öffentliche Stellen. Dieses Gesetz bildet eine wichtige Grundlage für die Bereitstellung von Open Data. Neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen ist jedoch auch ein Paradigmenwechsel in den Behörden von der Datenhaltung hin zur Datennutzung und -veröffentlichung notwendig, um das volle Potenzial zu entfalten. Dieser Wandel kann durch die Unterstützung von Open-Source-Initiativen wie BundDEV erleichtert werden. Darüber hinaus können Standards wie die *OpenAPI-Spezifikationen* und der *DCAT-AP.de - Austauschstandard* zu einer einheitlichen Beschreibung von Metadaten und Schnittstellen führen. Damit kann insbesondere das Verständnis für den Aufbau und die Möglichkeiten einer Schnittstelle durch einen

einheitlichen Dokumentationsstandard wie OpenAPI erhöht werden. Auf Basis dieser Spezifikation wird auch die Nutzung für den Anwender vereinfacht, da es möglich ist, auf Basis der Beschreibung automatisiert Abfragen bzw. Quellcode zur Abfrage einer Schnittstelle zu generieren. Darüber hinaus ist es möglich, die Dokumentation in einer für Entwickler vertrauten und einfach zu bedienenden Weboberfläche wie Swagger bereitzustellen. Im Bereich der öffentlichen Schnittstellen mangelt es derzeit jedoch noch an Spezifikationen der Schnittstellen, da diese von den Behörden oder Anbietern nicht zur Verfügung gestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, wie z. B. mit Hilfe des BundDev-Templates Dokumentationen von Anwendern für verschiedene Schnittstellen im Kontext Hochwasser erstellt werden können. Diese Schnittstellenbeschreibungen wurden veröffentlicht und stehen anderen Nutzern im Sinne des Open-Data-Gedankens frei zur Verfügung. Langfristig sollten diese Spezifikationen direkt von den Datenanbietern, also den Behörden oder öffentlichen Einrichtungen, erstellt werden, auch um immer die aktuelle Version der Schnittstelle unterstützen zu können. In diesem Fall ist zu erwarten, dass die Daten auch von anderen Akteuren leichter genutzt werden können. Die Analyse in diesem Kapitel zeigt aber auch, dass die Steigerung der Nutzung nicht mit der Veröffentlichung der Dokumentation endet, sondern dass einfache und standardisierte Methoden zur Anbindung der Schnittstellen entwickelt werden müssen, um das volle Potenzial von Open Data ausschöpfen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Nutzung von öffentlichen Sensordaten. Daher wird im Folgenden auf die Möglichkeit der Standardisierung im Bereich der Sensor-APIs eingegangen.

4.4. Standardisierung für Sensordatenschnittstellen

Die zuvor beschriebenen Möglichkeiten im Bereich Open Data machen deutlich, dass die Bereitstellung und Veröffentlichung von Open Data bereits existiert bzw. durch einfache Tools deutlich erleichtert werden kann bzw. die Dokumentation der Schnittstellen vorangetrieben werden kann. Es wird jedoch deutlich, dass es neben dem beschriebenen Paradigmenwechsel der Datenanbieter nicht ausreicht, die Daten *nur* zur Verfügung zu stellen. Es muss auch sichergestellt werden, dass die Daten von den Nutzern ohne großen Aufwand genutzt werden können. Für diese interoperable Nutzung von Schnittstellen müssen diese möglichst einheitliche Datenformate und Endpunkte für die Abfrage bereitstellen. Hierfür existieren bereits Standards, die es sich zur Aufgabe gemacht haben, die notwendigen Informationen bereitzustellen und gleichzeitig die Flexibilität zur Integration und Anpassung an den jeweiligen Anwendungsfall zu bieten. Im Rahmen dieser Arbeit wird der SensorThings API-Standard näher betrachtet.

4.4.1. SensorThings API (STA)

Die SensorThings API (STA) Standardisierung wurde vom Open Geospatial Consortium (OGC) entwickelt und wurde erstmals 2015 veröffentlicht [159]. Das OGC ist eine Non-Profit-Organisation, die sich zum Ziel gesetzt hat, Standards für die Bereitstellung von raumbezogenen Informationen zum Zwecke der Interoperabilität zu entwickeln. Die Datenhaltung erfolgt in einer Klassenstruktur. Im Gegensatz zu einer einfachen Speicherung eines Sensorwertes, bei der per se keine Metadaten vorhanden sein müssen, werden Metadaten über die verschiedenen Klassen direkt mit einem Sensorwert verknüpft. Ein Messpunkt wird dabei als Ob-

ervation bezeichnet und hat als Parameter den Wert (`result`) sowie den Zeitstempel (`phenomenonTime`, `resultTime`). Jeder `Observation` ist ein `Datastream` zugeordnet, der eine Sammlung von Messpunkten eines bestimmten Parameters beschreibt. Welcher Parameter gemessen wird und wie er spezifiziert werden kann, wird in der Klasse `ObservedProperty` beschrieben. Der für die Messung verwendete `Sensor` wird in der Klasse `Sensor` beschrieben und ist ebenfalls mit der Klasse `Datastream` verknüpft. Die Beschreibung des `Thing` ist ebenfalls mit dem `Datastream` verknüpft und beschreibt die Eigenschaften und den Namen der Hauptkomponente. Wenn dem Messsystem ein Standort zugeordnet ist, wird dieser in der Klasse `Location` gespeichert. Die Klassenstruktur ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

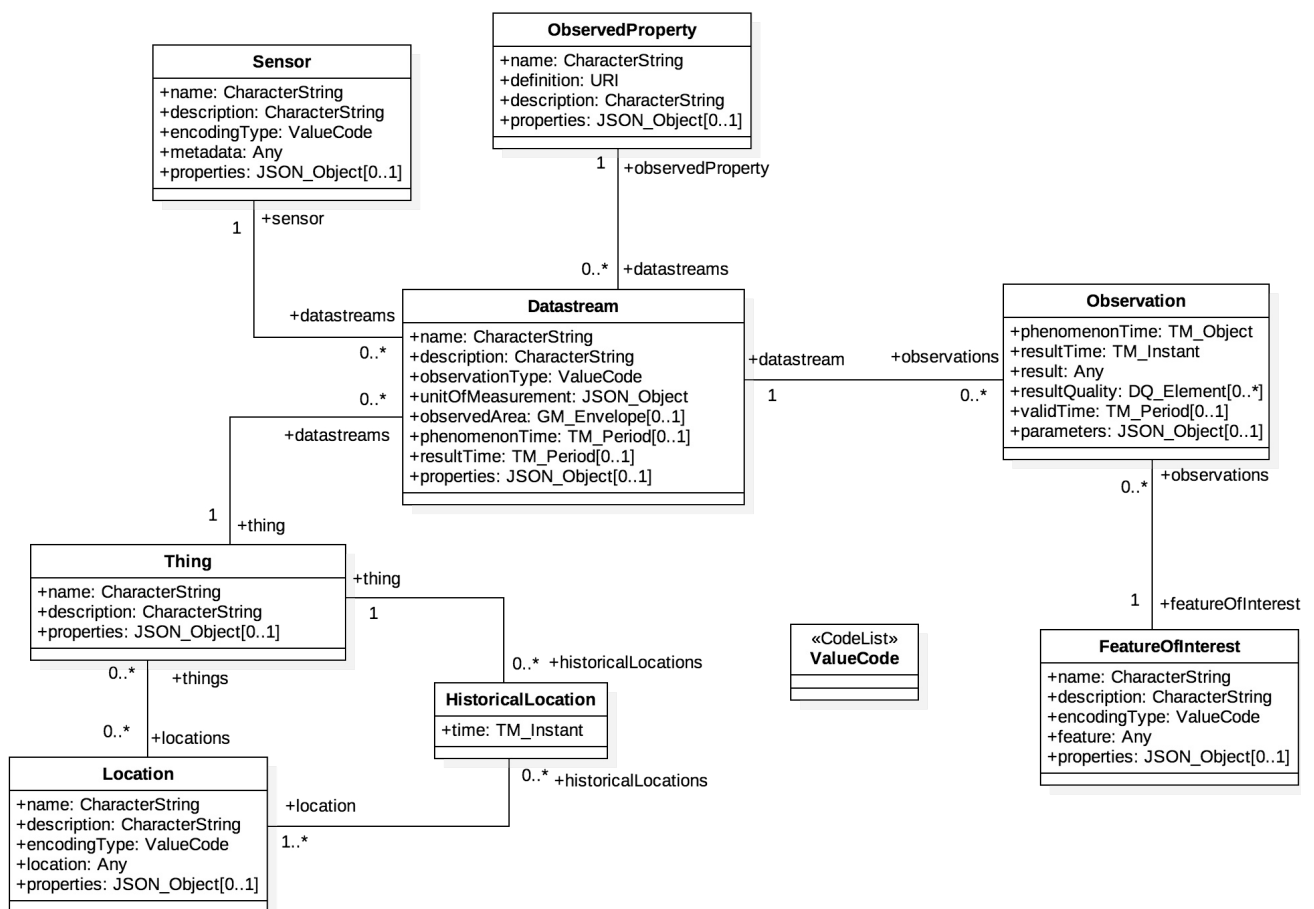


Abbildung 4.8: Klassendiagramm der OGC SensorThings API. (Quelle: [159])

Grundsätzlich stellen die SensorThings APIs für die jeweiligen Klassen eine Route zur Verfügung. Die Klassen können vollständig abgefragt werden, wobei alle Ergebnisse der jeweiligen Klasse zurückgegeben werden. Alternativ können einzelne Objekte abgefragt werden, hierfür muss die jeweilige *Entity ID* mit übergeben werden. Wie das Klassendiagramm zeigt, sind die Klassen miteinander verknüpft, die verknüpften Klassen können ebenfalls über die API abgefragt werden (`api/Klassenname(Entity ID)/VerbundeneKlasse`).

Der Einsatz dieses Standards ist jedoch noch nicht flächendeckend zu beobachten. Dies liegt zum einen an der relativ komplexen Struktur des Standards sowie an bereits bestehenden Systemen. Zum anderen spielt auch hier der Paradigmenwechsel eine Rolle: Schnittstellen werden meist für eine bestimmte Anwendung konzipiert, die breite öffentliche Nutzung ist oft nur ein Nebenprodukt. Es stellt sich daher die Frage, wie die Nutzung von Standards wie der SensorThings API gefördert und vereinfacht werden kann. Hierzu wird im Folgenden ein Konzept vorgestellt, welches die Nutzung des SensorThings-API-Standards für bereits existierende Schnittstellen ermöglichen soll. Dabei wird mit Hilfe eines Mappings die Struktur der STA nachgebildet und die Daten so aufbereitet, dass sie für STA-kompatible Programme nutzbar sind (siehe Kapitel 6).

Tabelle 4.4: Beispielhafte Abfragerouten der SensorThings API gemäß [159].

Abfrage	Beschreibung
<code>api/Entities</code>	Abfrage aller Entitäten der Klasse Entities
<code>api/Entities(Entity-ID)</code>	Abfrage einer Entität der Klasse Entities mit der Entity ID
<code>api/Entities(Entity-ID)/VerbundeneEntities</code>	Abfrage aller Entitäten der Klasse VerbundeneEntities, welche mit der Klasse Entities und Entity ID verbunden sind
<code>api/Entities(Entity-ID)?\$expand=expandEntity</code>	Abfrage einer Entität der Klasse Entities mit der Entity ID und der verbundenen Entity expandEntity

Die hier aufgeführten Routen lassen sich durch verschiedene Abfrageparameter erweitern und können somit das Ergebnis erheblich einschränken. Darüber hinaus ist es auch möglich, mehrere Entitäten abzufragen und die Rückgabe einzelner Parameter festzulegen. Insbesondere bei einer großen Anzahl von Things oder auch Observations ist es so möglich, nur die für die Anzeige relevanten Daten abzufragen, um die Abfragezeiten zu verkürzen. Wird beispielsweise ein Kartenausschnitt einer Stadt angezeigt, können durch die Angabe von Geodaten nur die Dinge (Things) abgefragt werden, die sich innerhalb des Kartenausschnitts befinden. Dies kann durch die Angabe von Geodaten in Form von Polygonen oder auch durch die Angabe von Koordinaten erreicht werden.

STA-Servers

Ein zentrales Element, um eine STA-Schnittstelle für Daten anbieten zu können, ist der STA-Server. Hierfür gibt es verschiedene Entwicklungen, von denen einige auszugsweise vorgestellt werden. Anschließend wird der FROST-Server näher betrachtet.

Tabelle 4.5: Liste von STA-Servern.

Name	Unternehmen	Aktive Entwicklung	OGC-STA-Konformität
FROST-Server	<i>Fraunhofer IOSB</i>	✓	✓
North 52	<i>North 52</i>	✓	✓ ^a
GOST	<i>Community</i>	✗	✓ ^a
SensorWeb	<i>Mozilla</i>	✗	✓ ^a

^aTeilweise OGC-Konformität.

Die Implementierung GOST sowie SensorWeb werden hauptsächlich von Freiwilligen entwickelt und bei beiden ist zudem keine aktive Entwicklung mehr zu erkennen [80], [191]. Die beiden anderen werden aktiv von einer Firma oder bzw. einer Community-Gruppe entwickelt. Zum einen der FROST-Server [73] und zum anderen der Server von North 52 [2]. Der FROST-Server wird bereits in STA-Projekten eingesetzt (z. B. im Forschungsprojekt beAWARE [13]) und ist auch der einzige der hier aufgeführten Servern, der vollständig OGC-zertifiziert ist. Er wird im Folgenden kurz vorgestellt und auch für die prototypische Implementierung verwendet.

FROST-Server



Abbildung 4.9: Logo des FROST-Server-Projekts. (Quelle: [73])

Der FROST-Server (*Fraunhofer Open Source SensorThings API Server*) wurde vom *Fraunhofer IOSB*¹⁴ entwickelt und ist die erste vollständige Open-Source-Implementierung, die von der OGC offiziell als konform zertifiziert wurde. Die Daten werden in einer PostGIS-Datenbank gespeichert [73]. PostGIS ist eine räumliche Datenbankerweiterung für das Datenbankverwaltungssystem PostgreSQL. Es fügt Unterstützung für geografische Objekte hinzu, so dass Standortabfragen in SQL ausgeführt werden können. Dies ermöglicht die Integration von Geodaten mit anderen Datentypen und damit die Erstellung von kartenbasierten Visualisierungen, räumlichen Analysen und räumlichen Indizes. PostGIS ist eine Open-Source-Software, d. h. sie ist frei verfügbar und kann von den Anwendern verändert werden. Sie ist in den Bereichen Geoinformationssysteme, Geodatenanalyse und Geodatenmanagement weit verbreitet. Es eignet sich besonders für die Verarbeitung großer Datensätze, da es für die effiziente Verarbeitung von Millionen von Datensätzen ausgelegt ist. Insgesamt ist PostGIS ein leistungsfähiges Werkzeug für die Verarbeitung und Analyse raumbezogener Daten und wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, von der Kartographie und ortsbezogenen Diensten bis hin zur Umweltanalyse und Stadtplanung [158]. Alle Klassen können über den FROST-Server mit den üblichen Abfrage- und Filter-

¹⁴Fraunhofer - Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB).

methoden abgefragt werden. Das System wurde in Java implementiert, für ein einfaches Deployment stellen die Entwickler Docker-Images zur Verfügung [73].

4.4.2. Anwendung mit STA-Unterstützung

Neben dem eigentlichen Server, der die API zur Verfügung stellt, sind insbesondere Integrationen oder Anbindungen für andere Programme hilfreich, um die Nutzung und Verbreitung der STA-Schnittstellen zu erhöhen. Dazu gehören beispielsweise:

Grafana-STA-Datasource

Die *FROST SensorThings Datasource* ist ein Open-Source-Softwareprojekt, das es Benutzern ermöglicht, auf einfache Art und Weise Sensordaten über eine SensorThings-API in Grafana anzuschließen und abzurufen [75]. Dabei bietet die FROST Datasource eine benutzerfreundliche Schnittstelle zur Konfiguration und Verwaltung von Sensorverbindungen sowie Werkzeuge zur Visualisierung und Analyse von Sensordaten direkt in Grafana. Es ist so konzipiert, dass es leicht erweiterbar ist und in einer Vielzahl von Szenarien eingesetzt werden kann, einschließlich IoT-Anwendungen, Umweltüberwachung und Smart-City-Projekte. Das Plugin kann in Grafana nachinstalliert werden und benötigt keine weiteren Komponenten. Die Anbindung an Grafana, ein vielseitig einsetzbares Open-Source-Dashboard-Tool, wird durch die STA-Datasource vereinfacht. Das Tool wurde ursprünglich von *LinkSmart* entwickelt und wird derzeit von *Fraunhofer IOSB* betreut und überarbeitet [75].

QGIS-STA-Plugin

Das *SensorThings API QGIS-Plugin* ist ein Softwaretool, das es dem Benutzer ermöglicht, auf Sensordaten einer SensorThings API zuzugreifen und diese innerhalb des Geoinformationssystems *QGIS* zu visualisieren [4]. Das *QGIS-Plugin* bietet eine komfortable Möglichkeit, auf diese Daten in der GIS-Umgebung zuzugreifen und sie zu analysieren. Mit dem Plugin wird die Suche nach verfügbaren Sensoren, die Anzeige von Sensormetadaten und die Visualisierung von Sensordaten auf einer Karte ermöglicht. Es bietet auch Werkzeuge zum Filtern und Aggregieren von Sensordaten und zum Exportieren von Daten in verschiedene Formate. Dieses Plugin kann für eine Vielzahl von Anwendungen nützlich sein, einschließlich Umweltüberwachung, Smart-City-Projekte und die Analyse von Sensordaten im Kontext von Geodaten.

Leaflet-STA-Plugin

STAM (SensorThings API Map) ist eine Leaflet-Bibliothek zur Visualisierung und Interaktion mit Sensordaten aus einer SensorThings API auf einer Karte [48]. Leaflet ist eine weit verbreitete Kartenanwendung für browserbasierte Anwendungen im Internet. Leaflet ermöglicht beispielsweise die Einbindung von Kartenmaterial oder anderen geobasierten Informationen. Darüber hinaus kann Leaflet mit anderen Bibliotheken kombiniert werden, um zusätzliche Funktionen zu ermöglichen, z. B. das Einfügen von Informationen durch Benutzereingaben (z. B. Markierung von Gefahrenzonen etc.) [3]. *STAM* als Bibliothek bietet die Möglichkeit, Daten aus einer STA in einem Leaflet darzustellen. Dazu muss lediglich die URL der STA angegeben werden. Zusätzlich

kann bei Bedarf ein Filter oder Darstellungsoptionen angegeben werden. Die Bibliothek übernimmt dann die Abfrage der Daten sowie das Einfügen in die Karte. Eine grafische Visualisierung der Observationen ist ebenfalls möglich. Zur Darstellung muss ein beliebiges Objekt auf der Karte angeklickt werden, anschließend ist auch der Download der angezeigten Daten möglich. Neben klassischen GIS-Anwendungen im Bereich des Monitorings ist der Einsatz von browserbasierten Anwendungen aufgrund der Interoperabilität und der einfachen Bedienung eine gute Ergänzung. STAM kann für eine breite Palette von Anwendungen nützlich sein, einschließlich Umweltmonitoring, Smart-City-Projekte und die Analyse von Sensordaten im Kontext von Geoinformation.

4.4.3. Potenziale und Herausforderungen

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist das Spektrum der Anwendungen, die von der STA unterstützt werden, überschaubar. Es ist zu anzunehmen, dass dies an der relativ starren Klassenstruktur liegt. Aufgrund dieser Struktur ist bei der Entwicklung einer Schnittstelle in der Entwicklungsphase ein Mehraufwand erforderlich, der für die eigentliche Anwendung ggf. nicht notwendig ist. Soll beispielsweise ein sogenanntes Smart-City-Dashboard für eine Kommune erstellt werden, so sind die Anforderungen an die Schnittstelle stark mit den Anforderungen an die webbasierte Visualisierung verknüpft. So ist es z. B. auch möglich, dass Metadaten statisch in der Anwendung hinterlegt werden und nicht in der Datenstruktur abgelegt werden müssen. Das intrinsische Interesse an einer interoperablen und konsistenten Wiederverwendung der Daten ist hier möglicherweise nicht vorhanden. Durch den in diesem Kapitel aufgezeigten Paradigmenwechsel wäre es zumindest für öffentliche Einrichtungen denkbar, dass dieser Anspruch in Zukunft besteht. Gerade durch die Verwendung eines offenen Standards wie STA können die öffentlichen Institutionen hier als Vorreiter agieren und somit die Entwicklung rund um STA vorantreiben [180]. Zudem ist davon auszugehen, dass Kompetenzen im Umgang mit STA Servern und Schnittstellen noch nicht ausreichend in den Entwicklungsteams vorhanden sind. Insbesondere die hier aufgeführten Schnittstellen befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium und wurden erst 2022 (QGIS-STA-Plugin, Grafana-STA-Datasource) bzw. 2020 (STAM) erstmals veröffentlicht. Es ist daher zu erwarten, dass sich das Ökosystem um STA erst nach und nach entwickeln wird. Eine weitere Hürde besteht darin, dass nicht davon auszugehen ist, dass bestehende APIs auf STA umgestellt werden. Wenn eine Anwendung zum jetzigen Zeitpunkt Daten aus STA und nicht aus STA-Schnittstellen darstellen soll, bleibt der Aufwand für die Entwicklung von Konvertern bestehen. Im Kapitel 6 wird daher ein Ansatz zur Vereinheitlichung von Datenquellen vorgestellt, der die Verwendung von STA-Schnittstellen fördert.

5. MOTARK: Konzept für ein mobil-autarkes Monitoringsystem



In diesem Kapitel wird das Hauptkonzept dieser Arbeit anhand der vorherigen Grundlagen und Analyse entwickelt. Zunächst wird auf die Motivation und die generelle Idee eingegangen und anschließend anhand der Anforderungen die einzelnen Bereiche des Systems beschrieben. Das Konzept wird übergreifend MOTARK bezeichnet, eine Kombination aus mobil und autark. Diese beide Attribute sind zentrale Anforderungen und Besonderheit des Systems. Die einzelnen Bereiche des Konzeptes werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben. Der Schwerpunkt liegt auf der Überwachung von Flussüberschwemmung, das System kann allerdings auch für andere Katastrophenfälle eingesetzt werden. Gegebenenfalls müssen dann die Sensormodule an den jeweiligen Einsatzzweck angepasst oder ausgetauscht werden.

5.1. Hintergrund und Motivation

Die Analyse der Arbeit des Katastrophenschutzes sowie vergangener Hochwasserkatastrophen und die dabei gewonnenen Erfahrungen der Einsatzkräfte zeigen, dass eine genaue und datengestützte Lagebeurteilung ein wichtiger Baustein für die Analyse und Steuerung von Einsatzkräften und Hilfsmaßnahmen ist [128], [173, S. 270]. Insbesondere bei extremen Schadensereignissen, die mit einem Ausfall der Strom- und Mobilfunkversorgung einhergehen können, ist auf klassische Monitoringsysteme, die zudem in ländlichen und dünn besiedelten Regionen kaum vorhanden sind, kein Verlass [184]. Die Abbildung 5.1 zeigt schematisch, wie sich die Informationslage während einer Hochwassersituation und bei Verwendung der üblichen Systeme darstellen kann. In dem fiktiv dargestellten Übersichtsdashboard wird zum einen der Ausfall der Pegelstationen (links) und somit die fehlenden Informationen über die Wasserstände sowie in einer Kartendarstellung (rechts) weitere Meldungen dargestellt. Dabei deutet die schematische Karte an, dass eine Lagebeurteilung nur bedingt möglich ist. Die Überflutungsflächen des dargestellten Flusses sind nicht bekannt, somit ist auch nicht klar, welche Gebiete durch die Einsatzkräfte befahrbar sind und in welchen Bereich besondere Gefahr für die Bevölkerung herrscht. Übliche Pegelstationen geben zudem auch keine Auskunft über Personengruppen, die sich im Umfeld befinden. Der Ausfall der hier dargestellt Pegelstation kann beispielsweise auf einen Ausfall der

Mobilfunkübertragung zurückzuführen sein. Dabei zeigt die Abbildung 5.1 auch, dass insbesondere für lokale Gegebenheiten, die den Einsatzkräften vor Ort bei der unmittelbaren Menschenrettung, Evakuierung oder akuten Warnung in der Regel nur wenige oder keine sensorgebundene Informationen zur Verfügung stehen. Im Falle des Ahrtalhochwassers standen beispielsweise nur drei Pegelstationen für das gesamte Einzugsgebiet der Ahr zur Verfügung. Lokale Veränderungen oder Besonderheiten, wie sie aufgrund bestimmter Konstellationen auch im Ahrtal auftraten und zu erheblich unterschiedlichen Situationen führen können, können durch nicht flächendeckende und lokal nicht verfügbare Messsysteme nicht erkannt werden.

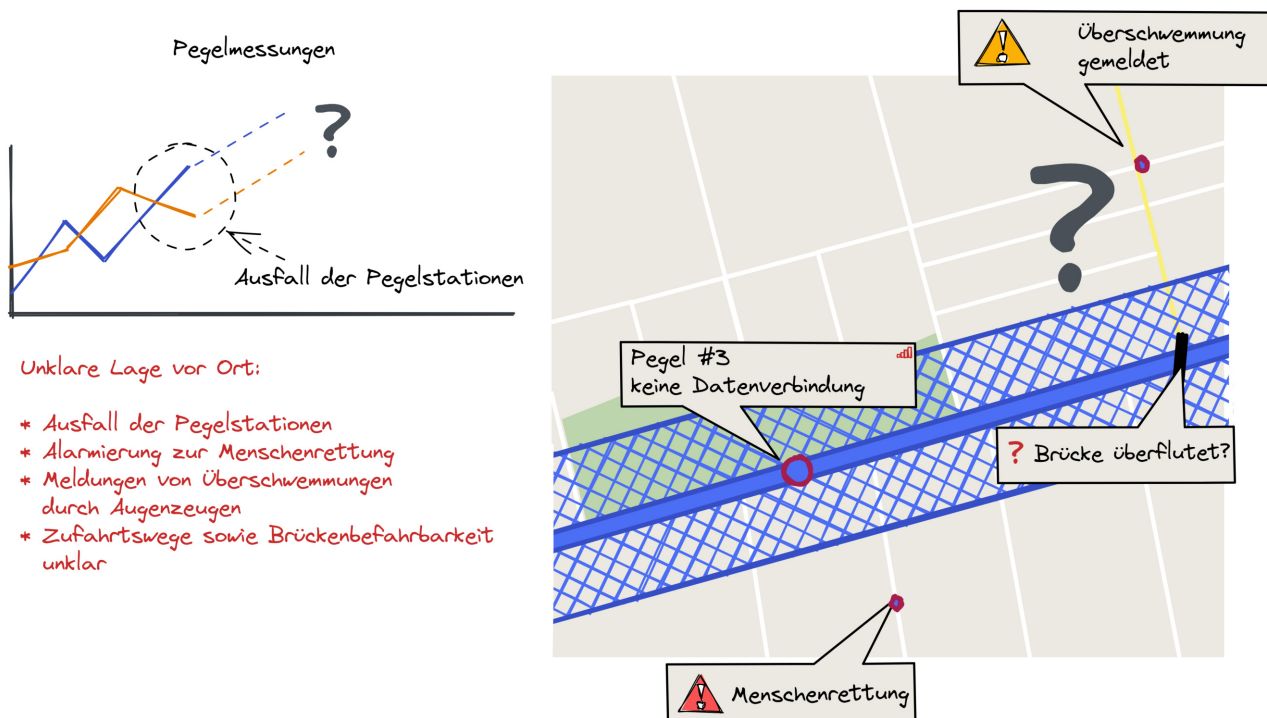


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Lage während einer Hochwassersituation und einem Ausfall einer Pegelstation in einem Gebiet. (Eigene Darstellung)

Darüber hinaus erfordert die Bewältigung von Katastrophen ein hohes Maß an Vorbereitung und Planung. Oft ist die mangelnde Vorstellungskraft der Bevölkerung und teilweise auch der Einsatzkräfte ein Hindernis, die Situation richtig einzuschätzen. Daher ist es wichtig, dass sowohl die Bevölkerung als auch die Einsatzkräfte über ausreichendes Wissen und damit über eine realistische Risikowahrnehmung verfügen, um schnell und umfassend Notfallmaßnahmen einleiten zu können [14, S. 42]. In diesem Zusammenhang sind Monitoring-systeme, auch zur Frühwarnung, eine wichtige Komponente. Ein solches System muss robust sein und über stromnetzunabhängige Redundanzen verfügen [14, S. 43], [183, S. 132]. Nur so kann eine zuverlässige Kommunikation im Katastrophenfall gewährleistet werden. Auch um die überörtlichen Einheiten effektiv und ihrem tatsächlichen operativen Wert entsprechend einsetzen zu können, ist ein aussagekräftiges Lagebild erforderlich. Gerade in stark betroffenen Gebieten muss das Lagebild ständig durch weitere aktuelle Daten verbessert werden [67, S. 18].

Im Bereich von mobilen Pegelmesssystemen gibt es beispielsweise Lösungen wie das System des THW. Der mobile Pegeltrupp des THW benötigt allerdings wie auch andere Monitoringsysteme Infrastruktur im Bereich der Datenübertragung und ist nicht für einen flächendeckenden Einsatz konzipiert. Die Analyse zeigt weiterhin, dass ein mobiles Monitoringsystem einfach zu handhaben sein muss und die Montage der Sensormodule ohne weitere Werkzeuge oder Geräte möglich sein muss. Da unter den extremen Bedingungen, unter denen das System eingesetzt werden kann, eine Zerstörung der Sensormodule nicht ausgeschlossen werden kann, sollte bei der Entwicklung möglichst auf kostengünstige Sensorik und Module zurückgegriffen werden. Die ausführliche Befragung von Schüller zeigt zudem, dass für die Nutzung der Systeme eine einfache Handhabung für die Einsatzkräfte und Beteiligten im Vordergrund steht [183, S. 133]. Dies stellt sicher, dass ein System auch ohne Schulung in Betrieb genommen werden kann. Neben der einfachen Handhabung bei der Installation muss auch die Auswertung und Bereitstellung der Daten für andere Einsatzkräfte möglichst einfach und flexibel möglich sein.

Idee

Die Grundidee des im Folgenden vorgestellten Konzeptes ist es, ein einfaches, mobil-autarkes und robustes Monitoringsystem zur Verfügung zu stellen, das in vielen Einsatzsituationen und von unterschiedlichen Einsatzkräften genutzt werden kann. Dieses System soll helfen, Informationen zu sammeln und zu verarbeiten, um in extremen Situationen besser agieren zu können. Hierfür muss der gesamte Prozess von der Datenaufnahme bis hin zur Darstellung der Daten für die zuständige Person untersucht und umgesetzt werden. Grundsätzlich soll die Entwicklung für den Einsatz während verschiedener Situationen ausgelegt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das System anhand einer Hochwassersituation zunächst konzeptionell entwickelt und anschließend demonstrativ umgesetzt.

Bei Katastrophen und Naturkatastrophen können Sensordaten wie beschrieben neben Augenzeugenberichten von großer Bedeutung sein, um die Lage einschätzen und angemessen reagieren zu können. Um einen Einsatz von Datenerfassungssysteme in extremen Situationen zu ermöglichen, müssen diese einfach zu bedienen und unabhängig von örtlichen Gegebenheiten, wie zum Beispiel Bauwerksstrukturen oder Topologie, einsetzbar sein. Dies erfordert unter anderem eine unabhängige und universelle Kommunikation zwischen der Datenaufnahme und einer zentralen Datenspeicherung. Zudem soll auch der Daten- und Informationsaustausch zwischen verschiedenen Einsatzgruppen, Einheiten und beteiligten Organisationen möglich sein. Auch die Information und Veröffentlichung der Daten an die Allgemeinheit soll im Rahmen des Konzeptes betrachtet werden. Damit können die Bürger direkt über die Situation vor Ort informiert werden. Vor allem der lokale Bezug zu den vor Ort befindlichen Messstellen kann hierdurch die Sensibilisierung der Bevölkerung für die Situation vor Ort erhöhen.

Nachfolgend wird das System mit dem Fokus auf Hochwassersituationen entwickelt. Wichtige Parameter zur Beurteilung der Lage während eines Hochwassers sind u.a. der Wasserstand und die Bodenfeuchte.

Weitere zusätzliche Messparameter sind im Kapitel 5.4 beschrieben. Für die Einsatzkräfte unter anderem das Technische Hilfswerk (THW), die im Hochwasserfall häufig unterstützend eingesetzt werden, ist es besonders wichtig, dass Monitoringsysteme einfach zu bedienen sind und ohne großen Aufwand installiert und an bestehende Systeme angebunden werden können¹⁵. Das hier entwickelte System versteht sich als spezialisierte Einsatztruppe mit den nachfolgend beschriebenen technischen Komponenten, die bei Gefahrenlagen zum Einsatz kommt. Diese Truppe kann z. B. bei der Feuerwehr oder dem THW stationiert werden.

5.2. Komponenten und Teilbereiche

Zur Umsetzung der oben beschriebenen Idee wird nachfolgend ein Konzept entwickelt. Das Konzept basiert auf verschiedenen Teilkonzepten, die jeweils einen Bereich abdecken. Dabei wird zwischen der Übertragung, der Hardware und der Verarbeitung von Daten unterschieden. Das Übertragungskonzept definiert die Übertragungstechnologie auf Basis einer Analyse möglicher Technologien und konkretisiert die notwendigen Systemkomponenten für eine erfolgreiche, stabile und robuste Übertragung. Hierzu gehört auch die Bereitstellung der Serverinfrastruktur. Das Hardwarekonzept schließt an das Übertragungskonzept an und umfasst die Sensoren sowie die technischen Netzwerksysteme, z. B. die Basisstation, für die Übertragung. Bei diesen beiden Konzepten kommt es aufgrund der starken Abhängigkeit teilweise zu Überschneidungen. Neben den beiden beschriebenen Teilkonzepten ist die Verarbeitung ein weiterer Bestandteil des Gesamtkonzeptes. Dieser Teil umfasst die Bereitstellung und Speicherung der erhobenen Daten und ist der zentrale Baustein für die Verantwortlichen und die Öffentlichkeit, da diese Gruppen auf die Daten zugreifen, um Entscheidungen zu treffen.

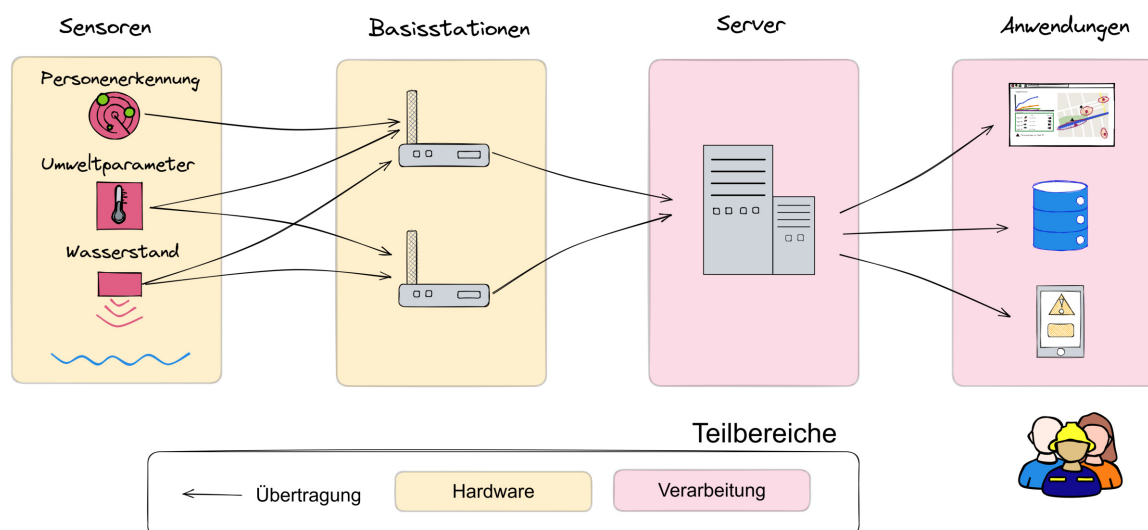


Abbildung 5.2: Vereinfachte Darstellung des Gesamtkonzeptes sowie den Teilbereichen. (Eigene Darstellung)

Die Abbildung zeigt die vereinfachte Darstellung des Gesamtkonzeptes sowie die notwendigen Komponenten. Die Kommunikation von den Sensoren bis zu den Einsatzkräften muss autark, d. h. ohne weitere Infrastruktur

¹⁵Informeller Austausch mit THW-Angehörigen.

möglich sein. Darüber hinaus muss das Gesamtsystem mobil und flexibel in unterschiedlichen Regionen und Topologien einsetzbar sein. Dies bedeutet auch, dass die Energieversorgung aller eingesetzten Komponenten über den Einsatzzeitraum ohne externe Stromversorgung auskommen muss. Ein zentrales Element, um eine mobil-autarke Datenübertragung zwischen den Sensormodulen und einer Basisstation zu gewährleisten, ist die Auswahl der geeigneten Funktechnologie. Nachfolgend wird für das Konzept eine Funktechnologie auf Basis der in den Grundlagen erarbeiteten Informationen zu bestehenden Technologien ausgewählt. Anschließend werden die weiteren Teilbereiche Hardware und Verarbeitung beschrieben.

5.3. Übertragung: Funktechnologie für ein mobil-autarkes System

Die Auswahl der Funkübertragungstechnologie und dem damit verbundenen Netzwerke hat Auswirkung auf die Auswahl der Hardware, welche für die Netzwerktechnologie ausgelegt sein muss. Sie wird daher anhand der beschriebenen Grundlagen zuerst durchgeführt. Die Anforderungen an die Funkübertragungen sind nachfolgend in der Tabelle dargestellt. Es wird geprüft, ob die Anforderung im Allgemeinen erfüllt ist (✓ oder ✗), und wenn die Anforderung erfüllt ist, wird zusätzlich durch die Farbe des Symbols angezeigt, ob diese Erfüllung vollständig, teilweise oder in Grundzügen erfüllt ist.

Tabelle 5.1: Bewertung der Funktechnologien nach den Anforderungen für das Monitoringsystem.

Anforderung	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	5G
Open-Source Komponenten	✓	✓	✗	✗
Hohe Reichweite	✓	✓	✓	✓
Batteriebetrieb Endgeräte	✓	✓	✓	✗
Batteriebetrieb Infrastruktur	✓	✗	✗	✗
Bidirektionale Kommunikation	✓	✓	✓	✓
Erweiterung der Netzabdeckung	✓	✓	✗	✓
Ökosystem	✓	✓	✓	✗
Anzahl ✓	6	3	3	1

✓ erfüllt die Anforderung vollständig, ✓ erfüllt die Anforderung teilweise, ✓ erfüllt die Anforderung in Grundzügen, ✗ erfüllt die Anforderungen nicht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird bei der Auswahl der Komponenten sowie der Technologie Wert auf Open-Source-Angebote gelegt. Dies ermöglicht einerseits einen umfassenden Einblick in die Technologie und reduziert andererseits die Abhängigkeit von einem bestimmten Anbieter. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es für Open Source Anwendungen oder Konzepte keine kommerziellen Angebote gibt. Im Falle einer Weiterentwicklung sowie eines Einsatzes des Systems bei Sicherheitsbehörden kann die Wartung sowie Pflege auch von einem Dienstleister übernommen werden. Wenn jedoch zusätzliche Inhalte für das System entwickelt

werden, sollten diese im Sinne des Paradigmenwechsels zu Open Data auch als Open Source der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. 5G und LTE verfügen über Spezifikationen, die von der *3rd Generation Partnership Project* (3GPP)-Organisation¹⁶ entwickelt und veröffentlicht wurden [1]. Dies ist auch bei Sigfox der Fall, auch hier wurde die Spezifikation veröffentlicht [193]. Die eigentliche Kommunikation ist jedoch nicht Open Source. LoRaWAN hingegen wird als Open-Source-Technologie verstanden [117], [137]. Auch für den Betrieb von LoRaWAN-Endgeräten oder LoRaWAN-Netzen ist keine Lizenz erforderlich. Die zugrunde liegende Übertragungstechnologie ist jedoch nicht Open Source, sondern unterliegt einem Patent der Firma Semtech und ist damit proprietär [187]. Ursprünglich lag das Patent bei der Firma Cycleo, die allerdings von Semtech aufgekauft wurde [163]. Teile der LoRa-Spezifikation sind allerdings veröffentlicht und es gibt eine Reihe von lizenzierten Anbietern und Herstellern von LoRa-Chips [164].

Hinsichtlich der Reichweite erfüllen alle Technologien die Anforderungen, wobei bei 5G eine geringere Durchdringung von Gebäuden oder anderen Strukturen zu erwarten ist [136, S. 15]. Je nach Bebauung bzw. Topologie ist die zu erwartende Reichweite daher geringer als bei Sigfox, NB-IoT und LoRaWAN. Bei der Bewertung des Batteriebetriebs erfüllt nur LoRaWAN die Anforderung des vollständigen Batteriebetriebs. Sigfox und NB-IoT ermöglichen zwar auch einen Batteriebetrieb der Sensormodule, jedoch ist die Netzinfrastruktur wie bei 5G auf eine Stromversorgung angewiesen. Bei 5G ist nach Ansicht von Linnemann et al. ein Batteriebetrieb auch für die Sensormodule nur eingeschränkt möglich [136, S. 17]. Die Stromversorgung der Netzwerkinfrastruktur für NB-IoT sowie Sigfox könnten prinzipiell auch mit einer Notstromversorgung, im Falle eines Ausfalles der Stromversorgung, sichergestellt werden. Dies widerspricht allerdings dem einfachen mobil-autarken Ansatz des Gesamtkonzeptes und führt zu Abhängigkeit von zusätzlichen Geräten und Strukturen. Bei allen Technologien ist eine bidirektionale Kommunikation zwischen Sensormodul und angeschlossener Serverinfrastruktur möglich.

Im Katastrophenfall muss sichergestellt sein, dass das Einsatzgebiet mit der Technologie abgedeckt werden kann. Dazu muss es möglich sein, die Versorgung flexibel anzupassen und bei Bedarf mit zusätzlichen Komponenten zu erweitern. Beim Einsatz von NB-IoT, Sigfox und 5G ist dies nur eingeschränkt möglich. Im Bereich von 5G könnten lokale und private Campusnetze Abhilfe schaffen, wobei es hier gegebenenfalls zu rechtlichen Einschränkungen kommen kann [136, S. 18], [72]. Im lizenzierten NB-IoT Netz ist ein Ausbau ohne Kooperation mit einem Telekommunikationsanbieter nicht ohne weiteres möglich. Dies gilt auch für Sigfox, hier kann die Abdeckung zwar mit Sigfox Basisstationen erweitert werden, diese benötigen jedoch einen Internetzugang sowie eine Stromversorgung und müssen bei Sigfox registriert werden [194]. Da LoRaWAN im lizenzfreien Netz agiert, unterscheidet sich eine Netzerweiterung nicht von der grundsätzlichen Bereitstellung des Netzes und kann mit weiteren Gateways umgesetzt werden [117].

¹⁶Weltweite Kooperation der Normungsgremien zur Standardisierung im Mobilfunk.

Betrachtung der Anforderungen für die einzelnen Technologien

Im Folgenden werden die einzelnen Anforderungen für die jeweiligen Technologien, soweit relevant, im Detail betrachtet. Die Vorteile von 5G liegen vor allem in der geringen Latenz, der hohen Anzahl an angebundenen Modulen pro Basisstation sowie der hohen Datenrate, mit der Daten gesendet werden können. Der in dieser Arbeit betrachtete Anwendungsfall von Monitoringdaten im Katastrophenfall erfordert jedoch weder hohe Datenraten noch eine besonders niedrige Latenz. Das Ökosystem, insbesondere im Bereich der einfachen IoT-Sensorik, ist bei 5G aufgrund des relativ jungen Alters der Technologie noch nicht so stark ausgeprägt wie bei anderen Technologien [136, S. 15]. Die Verfügbarkeit von 5G-Netzen nimmt in Deutschland zwar bereits zu, jedoch kann nicht immer davon ausgegangen werden, dass ein Netz im Einsatzgebiet vorhanden ist. Alternativ könnte hier ein privates und lokales 5G Netz aufgebaut werden. Dies ist derzeit möglich, allerdings mit rechtlichen Hürden und hohen Kosten verbunden [72]. Der Betrieb eines eigenen Netzes (Campusnetz) wäre notwendig, um die Autarkie zu gewährleisten. Insgesamt wird 5G zum jetzigen Zeitpunkt nicht als sinnvolles Funknetz für das Monitoringsystem angesehen. Sigfox erfüllt einige der Anforderungen, insbesondere in Bezug auf die Reichweite und das Ökosystem, das durch die Verwendung von IoT-Sensorik aus dem Bereich der Mikrocontroller (Arduino etc.) gut aufgestellt ist. Allerdings ist Sigfox auch stark auf das eigene Netz sowie die eigene Infrastruktur angewiesen, die wiederum auch von der allgemeinen Strom- bzw. Internetversorgung abhängig ist. Der Einsatz ist daher vor allem für stationäre Anwendungen vorgesehen. Die Festlegung auf 12 Byte pro Nachricht und maximal 140 Nachrichten pro Tag schränkt die Flexibilität zudem deutlich ein [193, S. 14-15]. Durch den Einsatz von Sigfox könnte eine zusätzliche Abhängigkeit zu einem Anbieter entstehen, weshalb Sigfox als Technologie ebenfalls nicht in Betracht gezogen wird. **NB-IoT** schneidet ähnlich wie Sigfox ab. Die Anforderungen werden zwar teilweise erfüllt, jedoch ist die Abhängigkeit von einem Anbieter sowie die geringe Flexibilität bei der Erweiterung des Netzes ein Grund, NB-IoT nicht für das Konzept in Betracht zu ziehen. **LoRaWAN** erfüllt die Anforderungen am besten, wie aus der Tabelle und den vorangegangenen Ausführungen hervorgeht. Insbesondere die Unabhängigkeit des Standards, das große Ökosystem mit Software- und Hardwareanbietern und die hohe Reichweite bei geringem Energieverbrauch sind Gründe für den Einsatz von LoRaWAN. Auch wenn die Übertragungstechnologie proprietär bzw. patentiert ist, ist eine Abhängigkeit aufgrund des bereits bestehenden, breiten Angebots und Ökosystems nicht zu befürchten. Die Beschränkung der Nachrichtengröße und der Anzahl der Nachrichten ergibt sich lediglich aus der gesetzlichen Beschränkung, dass nur 1 % der Zeit gesendet werden darf (Duty-Cycle siehe Kapitel 3.3.2). Für das Monitoringsystem stellt dies jedoch keine Einschränkung dar, da die Datenmenge und die Übertragungsdauer gering sind.

Zusammenfassend wurde LoRaWAN aufgrund der Analyse der Funkübertragungstechnologien für ein mobil-autarkes Monitoringsystem ausgewählt. Im Folgenden wird daher die Technologie im Detail vorgestellt und auf die Besonderheiten eingegangen.

5.3.1. Detaillierte Betrachtung von LoRaWAN

Auf Basis der Grundlagen zu LoRaWAN aus Kapitel 3.3.2 wird nun die Technologie im Detail betrachtet. Neben der physikalischen Übertragung wird auch auf die Verschlüsselung und den Nachrichtenaufbau eingegangen. Die hier dargestellten Inhalte beziehen sich hauptsächlich auf die Version 1.0.3 der Spezifikation, da diese in den später beschriebenen Anwendungen verwendet wird [139]. Unterschiede zur Version 1.1 sind zum Beispiel im Bereich des Aktivierungsprozesses zu finden [138]. Obwohl die gesamte Technologie häufig als LoRaWAN bezeichnet wird, unterteilt sich das System in die physikalische Übertragungsschicht (LoRa) und die Netzwerkschicht LoRaWAN.

Netzwerkarchitektur

LoRaWAN verfügt über eine einfache sogenannte *star of stars*-Netzwerkarchitektur mit drei verschiedenen Komponenten [5]. Zum einen die Endgeräte (Sensoren und Aktoren inkl. Übertragungsmodule), die Gateways sowie die Netzwerkinfrastruktur (Netzwerkserver, Applikationsserver und Join-Server). Die Bezeichnung *star of stars*-Netzwerk stammt daher, dass die Endgeräte über LoRa mit einem oder mehreren Gateways kommunizieren, sich also um die Gateways herum Sternnetze bilden. Die Gateways wiederum leiten die Informationen an einen Netzwerkserver weiter. Für die Übertragung der Daten vom Gateway zum Netzwerkserver können je nach Anwendung verschiedene Methoden gewählt werden, in der Regel erfolgt die Übertragung über das Internet. Dazu wird das Gateway z. B. direkt über Ethernet an ein Netzwerk angeschlossen oder es erfolgt eine Übertragung über Mobilfunk. Der Netzwerkserver dekodiert Teile der Nachricht, sortiert Duplikate von anderen Gateways aus und leitet die Daten an den Applikationsserver weiter. Der Applikationsserver ist für die Verarbeitung der Daten zuständig und kann diese an eine Datenbank oder eine andere Applikation weiterleiten (Anbindungen). Ein optionaler Join-Server kann die Aktivierung der Endgeräte beim erstmaligen Eintritt in das Netzwerk übernehmen, falls kein Join-Server vorhanden ist, kann der Applikationsserver diese Aufgabe übernehmen. Die Verwendung eines externen Join-Servers wird z. B. eingesetzt, um die für die Aktivierung notwendigen Schlüssel getrennt von der übrigen Infrastruktur zur Verfügung zu haben.

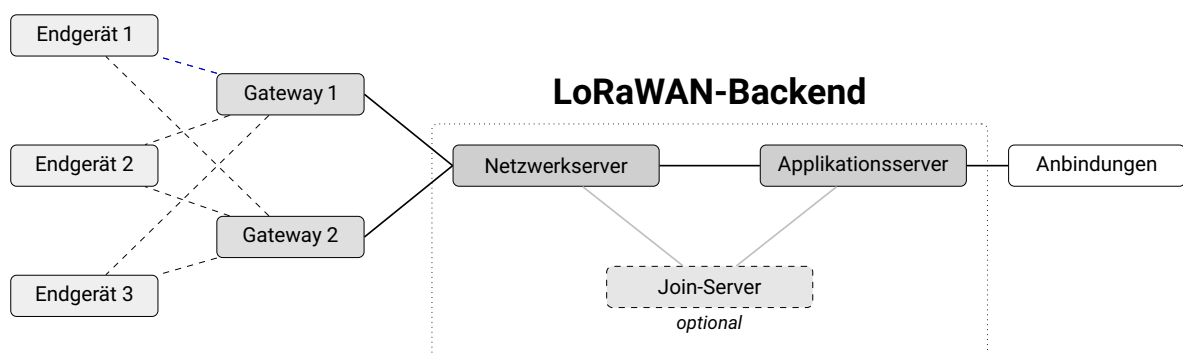


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Aufbaus eines LoRaWAN-Netzwerks. (Eigene Darstellung)

LoRa (Modulation)

Die eigentliche Übertragung bei LoRaWAN erfolgt über physikalische Schicht LoRa. Dabei wird die sogenannte *Chirp Spread Spectrum (CSS)* Technologie verwendet [163], [187]. Chirps sind schnelle Wechsel der Funkfrequenz, die von einem Sender ausgesendet werden und von einem Empfänger empfangen werden können. Durch die Verwendung von Chirps können LoRa-Geräte Daten über große Distanzen hinweg übertragen, da die Chirps vielen Hindernissen wie Wänden oder Bäumen gut durchdringen.

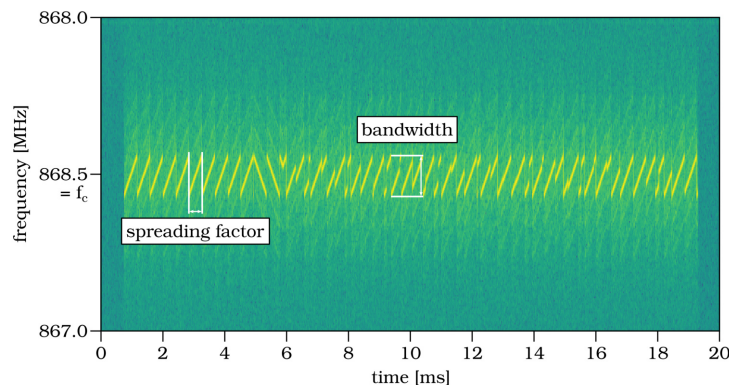


Abbildung 5.4: Spektrogramm, das die Struktur der LoRa Übertragung zeigt. (Quelle: [85])

Uplink und Downlink

Eine Kommunikation vom Gerät zum Gateway wird als *Uplink-Übertragung* und eine Kommunikation vom Gateway zum Gerät als *Downlink-Übertragung* bezeichnet. Ein Gerät hat die Möglichkeit, jederzeit eine Uplink-Übertragung zu senden. Für Downlink-Übertragungen gibt es unterschiedliche Übertragungsfenster, die sich je nach Klasse zu verschiedenen Zeiten öffnen [139, S. 12].

Klassen

Es gibt drei Klassen für LoRaWAN-Geräte. Die **Klasse A** ermöglicht eine bidirektionale Kommunikation, wobei Downlinks, d. h. Nachrichten vom Gateway zum Endgerät, innerhalb von zwei Zeitfenstern nach einer Uplink-Nachricht empfangen werden können. Geräte dieser Klasse können daher nicht ohne eine Nachricht vom Gerät selbst adressiert werden. Einstellungen für die Geräte werden daher erst übernommen, wenn die Downlink-Nachricht beim Gerät eingetroffen ist. Da das Gerät nicht ständig online sein muss, um auf eine Nachricht zu warten, ist der Energieverbrauch in dieser Klasse am geringsten. Nach den beiden Empfangszeitintervallen kann das Gerät wieder in einen Energiesparmodus (z. B. Sleep-Modus) versetzt werden und wacht nach einem bestimmten eingestellten Zeitintervall automatisch wieder auf. **Klasse B** hingegen hat neben den Empfangszeitfenstern nach dem Senden der Nachricht noch zusätzliche Zeitfenster zwischen einer Uplink-Übertragung, um eventuelle Downlinks zu empfangen. Dazu muss das Gerät mit dem Gateway zeitsynchronisiert sein. Die dritte Klasse mit dem höchsten Energieverbrauch ist die **Klasse C**. Diese hat praktisch eine kontinuierliche Kommunikation über permanent geöffnete Empfangsfenster, die nur für die Uplink-Übertragung geschlossen

werden. Dies ermöglicht eine geringe Latenz der Downlinks. Dies ist besonders hilfreich, wenn die Geräte als Aktoren, z. B. zur Steuerung von Anlagen, eingesetzt werden. [139, S. 9], [43]

Im Rahmen dieser Arbeit ist eine kontinuierliche Verbindung aufgrund der geringen Zeitintervalle zwischen einzelnen Übertragungen nicht notwendig. Daher werden die Geräte im Folgenden als Geräte der **Klasse A** implementiert.

Datenraten und Einstellungen

Bei LoRaWAN stellt die Data Rate (DR) (dt. Datenrate) den Kompromiss zwischen Übertragungsreichweite und Datenübertragungsrate dar. Höhere Data Rates ermöglichen eine schnellere Datenübertragung, führen aber zu einer geringeren Reichweite. Niedrigere Data Rates führen zu einer größeren Übertragungsreichweite, aber zu einer langsameren Datenübertragung. Die Data Rate wird durch den *Spreading Factor (SF)* (dt. Spreizfaktor) und die *Bandwidth (BW)* (dt. Bandbreite) bestimmt. Die *Bandwidth* beschreibt den Frequenzbereich des Chirp-Signals und beträgt üblicherweise 125 kHz. Der *Spreading Factor* bestimmt, wie viele Chirps für die Darstellung eines Symbols verwendet werden. Je höher der *Spreading Factor*, desto mehr Chirps werden benötigt, um ein Symbol zu übertragen [163]. Bei Erhöhung des Faktors um die nächste Stufe halbiert sich die Übertragungsrate und verdoppelt sich die Übertragungsdauer. Für das lizenzfreie Band in der EU sind folgende Data Rates definiert:

Tabelle 5.2: LoRaWAN Data Rate für Frequenz EU863-870. (Quelle: [141])

Data Rate	Konfiguration	Physikalische Bitrate (Richtwert) [<i>bit/s</i>]
0	SF12 / BW 125 kHz	250
1	SF11 / BW 125 kHz	440
2	SF10 / BW 125 kHz	980
3	SF9 / BW 125 kHz	1760
4	SF8 / BW 125 kHz	3125
5	SF7 / BW 125 kHz	5470
6	SF7 / BW 250 kHz	11000

Dabei wird die nominale physikalischen Bitrate (R_b) nach Semtech Corporation wie folgt berechnet [188]:

$$R_b = \frac{SF \cdot BW}{2^{SF}} \cdot \frac{4}{4 + CR} \quad (5.1)$$

mit:

- R_b physikalische Bitrate [$\frac{bit}{s}$]
- BW Bandwidth [Hz]
- SF Spreading Factor (7...12)
- CR Code Rate (1...4)

Beispielhaft für DR 5 (SF7, BW125kHz, CR 1) ergibt sich folgendes:

$$R_b = \frac{7 \cdot 125000}{2^7} \cdot \frac{4}{4 + 1} = 5468.75 \approx 5470 \text{ [bit/s]} \quad (5.2)$$

Dabei hängt die Übertragung neben dem *Spreading Factor (SF)* und der *Bandwidth* auch vom sogenannten *Code Rate* ab. Bei LoRaWAN ist die *Code Rate* ein Parameter, der den Umfang der Vorwärtsfehlerkorrektur (Forward Error Correction, FEC) bestimmt, die auf die vom Endgerät übertragenen Daten angewendet wird. Die Coderate wird üblicherweise als Bruch oder Verhältnis ausgedrückt und stellt das Verhältnis zwischen der Anzahl der redundanten Bits, die zu den ursprünglichen Daten hinzugefügt werden, und der Gesamtanzahl der übertragenen Bits dar. Die *Code Rate* ist ein konfigurierbarer Parameter in LoRaWAN, der auf verschiedene Werte eingestellt werden kann, abhängig von den Anforderungen der Anwendung und dem gewünschten Kompromiss zwischen Datenrate und Zuverlässigkeit. Eine höhere Code Rate bietet eine bessere Fehlerkorrektur und erhöht die Zuverlässigkeit der Übertragung, verringert aber auch die Datenrate. Umgekehrt erhöht eine niedrigere Code Rate die Datenrate, verringert aber die Zuverlässigkeit. Bei LoRaWAN wird die Code Rate häufig auf 4/5 oder 4/6 eingestellt, was bedeutet, dass von 5 bzw. 6 übertragenen Bits 4 Datenbits und 1 bzw. 2 redundante Bits sind. Die verwendete spezifische Code Rate kann zwischen dem Endgerät und dem Netzwerkserver während des Aktivierungsprozesses ausgehandelt werden.

Adaptive Data Rate (ADR)

ADR (Adaptive Data Rate) ist eine Funktion von LoRaWAN, die zur Optimierung der Netzwerkleistung und zur Verbesserung der Akkulaufzeit der Endgeräte beiträgt. Der Zweck von ADR ist die dynamische Anpassung der Data Rate eines Geräts in Abhängigkeit von der Qualität der Funkverbindung, so dass die Data Rate bei guter Verbindungsqualität reduziert und bei schlechter Verbindungsqualität erhöht werden kann [138, S. 19]. Eine Analyse von ADR und möglicher neuer Algorithmen zur Verbesserung von ADR wurde von Benkahla et al. durchgeführt.

Verschlüsselung

LoRaWAN beinhaltet zwei Ebenen der Verschlüsselung. Zum einen werden netzwerkspezifische Inhalte verschlüsselt, welche von dem Netzwerkserver dekodiert werden können. Zum anderen werden die Nachrichten (Payload) welche von einem Endgerät (Node) über ein Gateway und Netzwerkserver zum Applikationsserver gesendet werden verschlüsselt übertragen. Dies ermöglicht auch die Verwendung von fremden Gateways oder Infrastruktur zur Übermittlung von sensiblen Daten. Der Applikationsserver kann die Nachricht dann entschlüsseln. Der Austausch der Schlüssel erfolgt abhängig von der Aktivierungsart [137], [139]. Neben der Verschlüsselung wird die Integrität einer Nachricht mittels eines *Message Integrity Code (MIC)* sichergestellt. Der MIC wird über alle Felder der Nachricht berechnet und an die Nachricht angehängt. Beim Empfang einer Nachricht berechnet der Empfänger den MIC neu und vergleicht ihn mit dem empfangenen Wert. Stimmen die Werte überein, wird die Nachricht als unverändert und damit als authentisch betrachtet. Zur Berechnung wird die AES-128 CMAC Hash Funktion verwendet [139, S. 21],[197].

Aktivierung

Die Aktivierung der Endgeräte kann auf zwei Arten erfolgen. Zum einen kann der Schlüsselaustausch durch Over-The-Air Activation (OTAA) erfolgen, zum anderen ist die Activation By Personalization (ABP) möglich. Bei OTAA muss das Endgerät vor dem Datenaustausch einen sogenannten Join-Prozess durchlaufen.

Over-the-Air-Activation (OTAA) ist ein Prozess, bei dem ein Asset (Gerät) eine Verbindung zu einem LoRaWAN-Netzwerkserver herstellt, indem es einen Join Request sendet. Der Join Request enthält eine DevEUI, eine AppEUI und eine DevNonce, die mit einem AppKey verschlüsselt sind. Der AppKey ist sowohl dem Server als auch dem Endgerät bekannt. Wird das Gerät vom Server akzeptiert, werden zwei 128-Bit-Keys, AppSKey und NwkSKey, generiert, mit denen der Datentransport verschlüsselt wird. Bei jeder Aktivierung werden neue Sitzungsschlüssel generiert. Zusätzlich können Replay-Angriffe durch einen Frame-Counter verhindert werden. Dieser wird bei jeder Nachricht inkrementiert und mit dem Frame-Counter des Servers verglichen [139, S. 19]. Bei einer erfolgreichen Neuinitialisierung im Netzwerk wird der Counter auf Null zurückgesetzt. Wie beschrieben wird im Rahmen dieser Arbeit bei der Umsetzung die Spezifikation mit der Version 1.0.3 verwendet. Bei der LoRaWAN-Spezifikation mit der Version 1.1 sind für OTAA andere Schlüssel auf dem Endgerät notwendig (DevEUI, JoinEUI, NwkKey, AppKey). Der genaue Ablauf ist in der Spezifikation beschrieben [138, S. 52].

Activation by Personalization (ABP) ist eine Methode zum Aufbau einer Session in LoRaWAN -Netzwerken, bei der statische NwkSKeys und AppSKeys verwendet werden. Diese Schlüssel sind dem LoRaWAN -Server bereits bekannt und es ist kein Austausch von Join-Nachrichten (Join-Prozess) erforderlich. Zusätzlich werden die Schlüssel und die Geräteadresse (DevAddr) auf dem Endgerät gespeichert. Alle Nachrichten werden mit einer Kombination aus NwkSKey und AppSKey verschlüsselt, um die Nachrichtenintegrität zwischen dem Endgerät und dem Server sowie eine Ende-zu-Ende verschlüsselte Kommunikation der Benutzerdaten zu gewährleisten. Beide Schlüssel basieren auf einer AES-128-Bit-Verschlüsselung [139, S. 27]. Bei LoRaWAN 1.1 sind ebenfalls andere Schlüssel notwendig (DevAddr, FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey, AppSKey). Die genaue Vorgehensweise ist in der Spezifikation beschrieben [138, S. 64]. Die Aktivierung mittels OTAA ist insgesamt vorzuziehen, da weniger Schlüssel auf den Endgeräten gespeichert werden müssen und die Aktivierung dynamisch erfolgt [140].

Zusammensetzung einer Nachricht

Eine LoRaWAN-Nachricht besteht aus mehreren Teilen, die jeweils einen bestimmten Zweck im Kommunikationsprotokoll erfüllen. Am Anfang der Nachricht steht eine Präambel, die aus einer Folge von Symbolen besteht, die zur Synchronisation der Zeit des Empfängers und zur Anzeige der Signalstärke verwendet werden. Nach der Präambel folgt der Header, der Informationen über den Nachrichtentyp, das Ziel und andere relevante Parameter enthält, dieser ist nur vorhanden, wenn der *Explicit Mode* aktiviert ist. Dies ist beispielsweise bei einer Uplink-Nachricht der Fall [139, S. 12]. Auf den Header folgt ein *Cyclic Redundancy Check (CRC)* (dt. Zyklische Redundanzprüfung), bei der es sich um eine kleine Datenmenge handelt, die der Nachricht zur

Fehlererkennung hinzugefügt wird. Nachdem CRC folgt der Payload, der die eigentlichen zu übertragenden Daten enthält. Dieser Teil kann unterschiedlich lang sein und enthält alle Informationen, die gesendet werden sollen, z. B. Sensordaten oder Kontrollnachrichten. Am Ende der Nachricht steht ein weiterer CRC, der so genannte Payload-CRC. Dieser dient dazu, die Integrität der Nutzdaten sicherzustellen und Fehler zu erkennen, die während der Übertragung aufgetreten sein könnten. Insgesamt ist die Nachrichtenstruktur des LoRaWAN-Protokolls darauf ausgelegt, die Kommunikationseffizienz zu optimieren und gleichzeitig die Integrität und Genauigkeit der übertragenen Daten zu gewährleisten. [139]

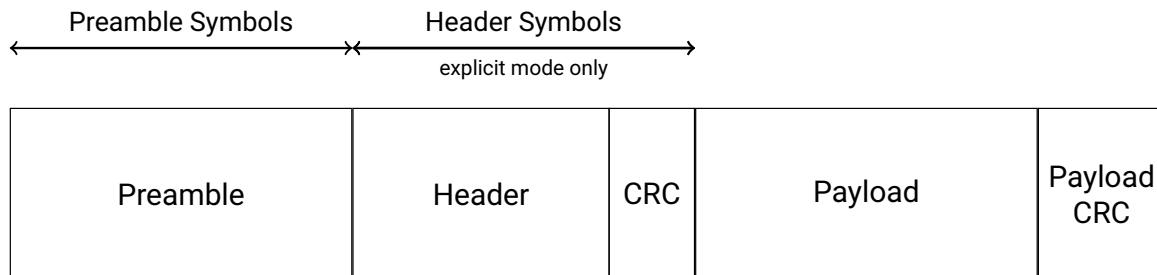


Abbildung 5.5: Vereinfachte Zusammensetzung einer LoRaWAN-Nachricht. *Payload CRC (Cyclic Redundancy Check)* ist nur bei Uplink-Nachrichten vorhanden. (Eigene Darstellung nach [139, S. 15])

Die einzelnen Teile der Nachricht setzen sich wiederum aus verschiedenen Elementen zusammen. Eine detaillierte Darstellung der Zusammensetzung findet sich im Anhang (siehe Kapitel A.3).

Payload Decoder und Encoder

Um möglichst wenige Daten übertragen zu müssen, wird beim Senden von Meldungen auf Bezeichnungen oder zusätzliche Informationen verzichtet. Um die Nachrichten trotzdem verarbeiten zu können, werden Decoder und Encoder eingesetzt. Diese können anhand der vorgegebenen Bytes und des Ports, über den die Nachricht gesendet wurde, die Nachricht von Bytes in verwertbare Informationen umwandeln. Die Decoder sind in der Regel in der Programmiersprache JavaScript geschrieben. Der folgende Quellcodeauszug zeigt eine JavaScript-Funktion, welche die Nachricht (`input`) in ein JSON-Objekt umwandelt. Hierbei wird zuerst der Port überprüft, dann werden die Bytes in zwei Fließkommazahlen mit den Namen `temperature` und `humidity` umgewandelt.

Quellcode: Auszug aus einem Decoder für ein LoRaWAN-Endgerät.

```
if (input.fPort === 12) {
  data = decode(input.bytes, [float, float], ['temperature', 'humidity']);
}
```

Neben den Decodern werden auch Encoder benötigt, die die Nachrichten, die vom Gateway zum Endgerät gesendet werden sollen, in ein Array von Bytes umwandeln.

Reichweite

Die mögliche Reichweite eines LoRaWAN-Netzwerkes bzw. eines Endgerätes zu einem Gateway ist von vielen Faktoren abhängig. Zum einen kann wie beschrieben durch die Auswahl der Data Rate eine höhere Reichweite bei geringere Datenraten umgesetzt werden. Zum anderen haben auch die Lage des Gateways sowie des Endgeräts und die dazwischen liegenden Strukturen sowie die Auswahl der Antennen einen Einfluss auf die Übertragung [10]. Jede Struktur, die das Signal durchdringen muss, bewirkt eine Dämpfung des Signals. Als Maß für die Signalstärke wird das sogenannte Link Budget oder auch Power Transmission Balance verwendet. Das *Link Budget* wird aus der *Sendeleistung* (T_x), der *Empfangsempfindlichkeit* (R_x), der *Antennenverstärkung* und dem *Free Space Path Loss* ($FSPL$) (dt. Pfadverlust) berechnet. Der FSPL gibt den Energieverlust im freien Raum zwischen Sender und Empfänger an, der das Signal schwächt. Eine gebräuchliche Formel für den FSPL ist [11]:

$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147,55 \quad (5.3)$$

mit:

$FSPL$ Free Space Path Loss [dB]
 d Distanz zwischen Sender und Empfänger [m]
 f Frequenz [MHz]

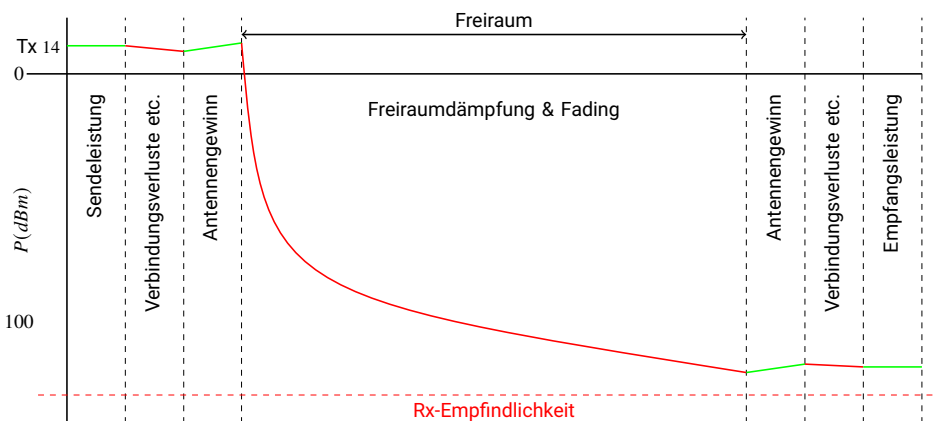


Abbildung 5.6: Beispielhafter Verlauf der Signalstärke einer LoRa-Übertragung. (Eigene Darstellung nach [11])

Zusätzlich zu den Verlusten im freien Raum können weitere Verluste durch Gebäude, Bauwerke oder andere Hindernisse auftreten. Die Verluste sind je nach Stärke und Material unterschiedlich. Aufgrund der höheren Anzahl von Hindernissen sowie anderer Störfaktoren ist die Reichweite in städtischen Gebieten in der Regel geringer. In der Literatur werden Reichweiten von 1- 5 km angegeben [10], [137], [146]. In ländlichen Gebieten sind bei günstigen topologischen Bedingungen deutlich höhere Reichweiten zu erwarten. Für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und prototypisch umgesetzte System wurden praktische Versuche in verschiedenen Szenarien durchgeführt (siehe Kapitel 8.1.2).

Öffentliche und private LoRaWAN-Netzwerke

Für LoRaWAN gibt es keinen einheitlichen Netzbetreiber für Deutschland, so dass die Netzinfrastruktur entweder selbst vorgehalten oder auf öffentliche Netze zurückgegriffen werden muss. Das bekannteste öffentliche Netz ist das The Things Network [213]. Hier stellen Personen oder Institutionen eigene Gateways zur Verfügung, so dass diese von anderen zur Datenübertragung genutzt werden können. Die Daten werden dann zentral in der Cloud dem jeweiligen Nutzer zugeordnet. Die Abdeckung ist in Deutschland sehr unterschiedlich, zudem kann eine starke Abhängigkeit von einem Gateway bzw. dessen Betreiber bestehen. Diese Abhängigkeit besteht bei der Nutzung eines eigenen Gateways und LoRaWAN-Backends nicht.

5.3.2. Monitoring mit autarker Funkübertragung

Grundsätzlich besteht der Anspruch des Konzeptes darin, mobil-autark und damit unabhängig von anderer Infrastruktur und Übertragungswegen zu funktionieren. Im Gegensatz zu üblichen Monitoringsystemen wird die Grenze der Autarkie verschoben. Ein vollständig autarker Übertragungsweg bis hin zur Öffentlichkeit ist nicht vorgesehen, der Fokus liegt auf der Informationsweitergabe an die Einsatzkräfte zur besseren Lagedarstellung.

Das Konzept sieht ein privates LoRaWAN-Netz vor. Damit kann die Einsatzbereitschaft jederzeit gewährleistet werden, ohne auf andere Infrastrukturen wie öffentliche LoRaWAN-Netze angewiesen zu sein. Dieses Netzwerk kann mit einem oder mehreren Gateways betrieben werden und stellt die Infrastruktur für die Datenübertragung vom Sensormodul bis zu den Einsatzkräfte dar. Das System wird dabei so konzipiert, dass es ohne Kenntnis der Situation vor Ort eingesetzt werden kann. Grundsätzlich sollte bei der Standortwahl der Basisstation auf eine erhöhte Position über dem Einsatzgebiet geachtet werden, um möglichst wenig Struktur zwischen Station und Sensormodul zu haben. Die Anbindung an stationäre Netzwerke, z. B. Stadt- oder Gemeindefnetze, kann die Reichweite des Systems in bestimmten Gebieten erhöhen, allerdings sind hier Probleme hinsichtlich der Autarkie im Einsatz zu beachten (z. B. Abhängigkeit von der Stromversorgung etc.).

Das LoRaWAN-Netz besteht, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, aus verschiedenen Bausteinen und Komponenten. Als zentrales und mobiles Element sind im vorliegenden Konzept die Gateways bzw. Basisstationen zu nennen. Aber auch die notwendige Serverinfrastruktur muss im Einsatz an die äußeren Bedingungen angepasst werden. Im Folgenden werden die Komponenten und deren Kommunikation während verschiedener Lagen vorgestellt. Beginnend wird die Situation mit vorhandener Mobilfunkübertragung beschrieben, gefolgt von der Situation ohne Mobilfunkübertragung. Bis zum Ausfall der Mobilfunkübertragung kann, sofern vorhanden, die Kommunikation von der Basisstation zum Server über diese Technologie erfolgen. Es ist davon auszugehen, dass zumindest in der Aufbauphase des Systems, d. h. vor dem Höhepunkt einer Hochwassersituation, eine Mobilfunkübertragung noch möglich ist. In diesem Fall werden die Daten vom Gateway zur MOTARK-Cloud (Systemarchitektur) übertragen. Diese Serverinfrastruktur ermöglicht den Zugriff auf die Monitoringdaten auch von außerhalb des Einsatzortes, z. B. in einem übergeordneten Einsatzlagezentrum oder Katastrophenschutzstab. Auch ein öffentlicher Zugriff auf die Daten ist möglich.

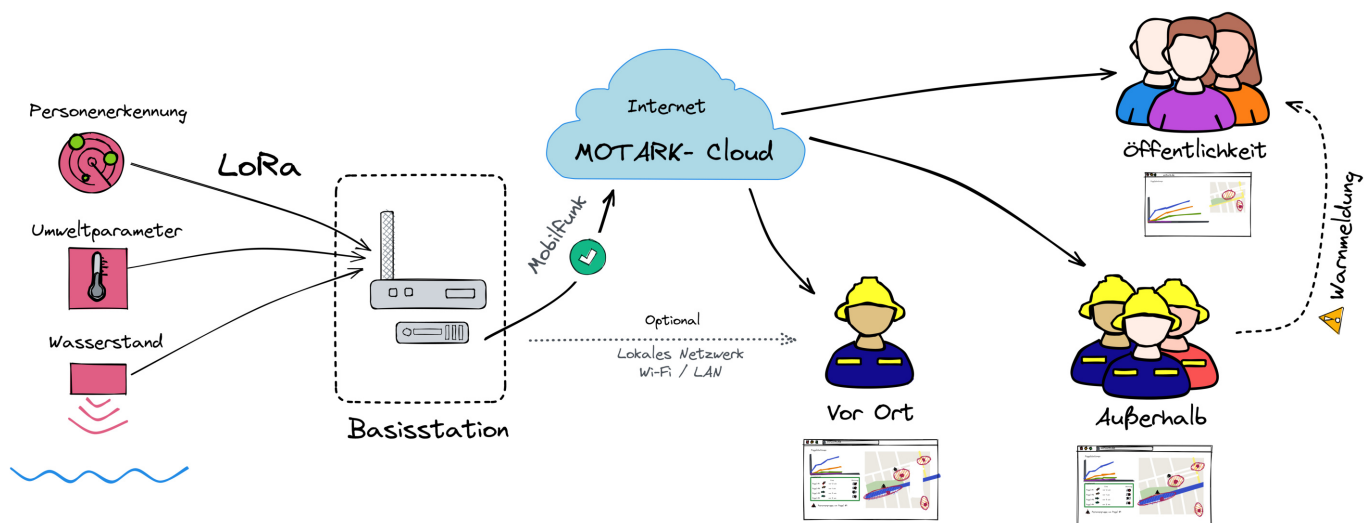


Abbildung 5.7: Schematische Übertragungswege des MOTARK-Systems im Einsatzfall und vorhandene Mobilfunkübertragung an der Basisstation. (Eigene Darstellung)

In der in Abbildung 5.7 dargestellten Situation wird nur eine Mobilfunkverbindung zur Basisstation benötigt. Die Kommunikation von den Sensormodulen (links) zur Basisstation erfolgt autark über LoRa. Die Übertragung der Informationen und Daten zu den Einsatzkräften vor Ort kann ebenfalls autark über das lokale Netzwerk erfolgen. Fällt die Mobilfunkübertragung aufgrund eines Stromausfalls oder einer anderen Störung aus, ist die Kommunikation mit der Server-MOTARK-Cloud nicht ohne weiteres möglich. Um die Daten weiterhin an die Einsatzkräfte außerhalb des Einsatzortes übermitteln zu können, gibt es zwei Alternativen. Zum einen können andere Übertragungstechnologien wie z. B. Satellitenverbindungen genutzt werden, um die Daten in die Server-MOTARK-Cloud zu übertragen. Zum anderen können die benötigten Informationen über die üblichen Kommunikationsmittel der Einsatzkräfte übermittelt werden. In diesem Fall erfolgt der Zugriff auf die Daten und die zugehörigen Webschnittstellen über ein lokales Netzwerk. Die jeweilige Einsatzkraft kann auf Basis der Daten direkt vor Ort Entscheidungen treffen und Maßnahmen einleiten oder auch weitere Einsatzkräfte außerhalb der Einsatzstelle z. B. über Digitalfunk informieren. Für den lokalen Zugriff wird eine lokale Serverinfrastruktur benötigt, die ein Abbild der Server-MOTARK-Cloud ist und über die gleiche Funktionalität verfügt. Damit ist der vollständige Zugriff auf die Daten auch ohne externen Datentransfer zu einem Cloud-Server gewährleistet. Die Serverinfrastruktur umfasst beispielsweise das LoRaWAN-Backend sowie die notwendigen Datenbanken und Anwendungen für die Einsatzkräfte (siehe auch Kapitel 5.6). Die lokale Variante kann z. B. auf einem Einplatinenrechner oder, wenn möglich, auf dem Gateway selbst installiert und betrieben werden. Ist eine Datenverbindung nach einem Ausfall wieder möglich, kann auch eine Synchronisation der Datenbestände realisiert werden. Die folgende Abbildung zeigt die Übertragungswege des Konzeptes ohne eine vorhandene Mobilfunkübertragung an der Basisstation.

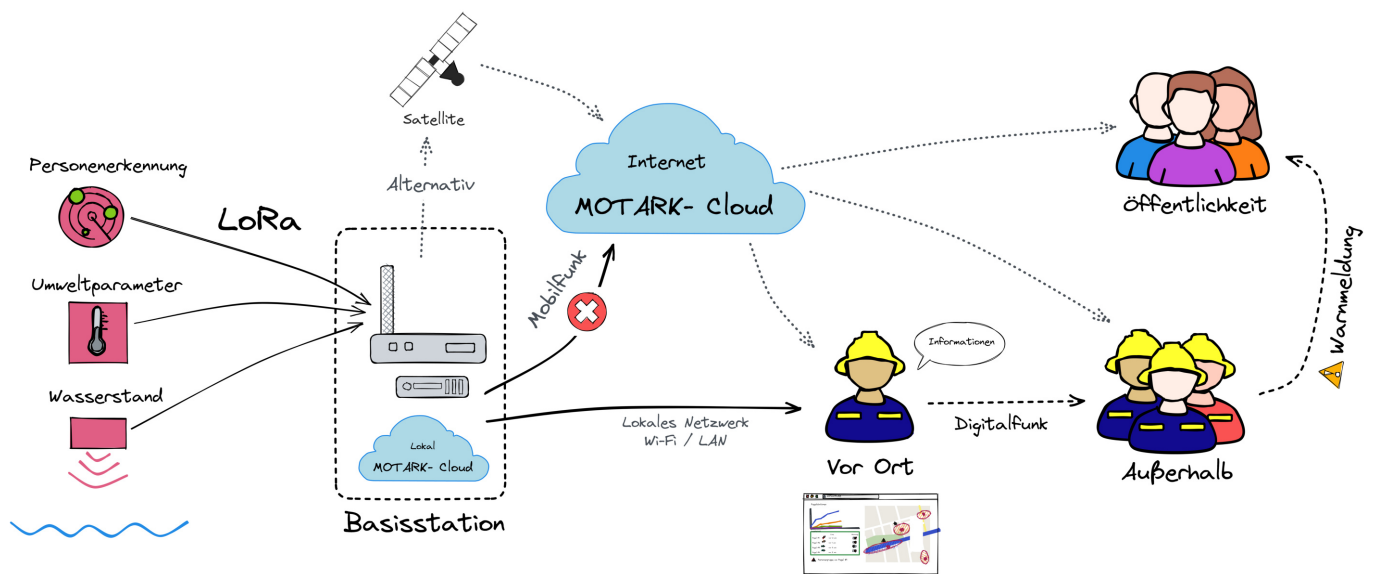


Abbildung 5.8: Schematische Übertragungswege des MOTARK-Systems im Einsatzfall ohne direkte Internetverbindung. (Eigene Darstellung)

Wie in der Abbildung dargestellt, sind die Anwendungen für die Einsatzkräfte lokal erreichbar. Unabhängig von einer Internetverbindung ist die Kommunikation der Sensorkits mit der Basisstation weiterhin über LoRaWAN autark möglich. Einsatzkräfte in der Nähe der Basisstation können dann wie gewohnt über ein Webinterface oder eine andere Anwendung auf die Daten zugreifen und die Informationen z. B. über Digitalfunk an andere Stellen weitergeben. Bei Ausfall der Internetverbindung kann ggf. wie beschrieben auch eine Satellitenverbindung genutzt werden. Es ist zu beachten, dass bei einem Ausfall der Mobilfunkverbindung in der Regel auch die Einsatzkräfte oder Bevölkerung im weiteren Einsatzgebiet keine Datenverbindung zur Verfügung haben. Es ist daher davon auszugehen, dass der lokale Zugriff sowie die Informationsweitergabe über Digitalfunk insbesondere für die Einsatzkräfte vor Ort wichtig sind. Für den lokalen Zugriff muss sich mindestens eine Einsatzkraft in der Nähe der Basisstation aufhalten, um sich mit dem lokalen Netzwerk verbinden zu können. Daher sollte der Standort der Basisstation strategisch gewählt werden, einerseits sollte ein möglichst hoher Aufstellungsort für eine optimale Abdeckung gewählt werden, andererseits muss aber auch die Nähe z. B. zur Einsatzzentrale vor Ort beachtet werden. Dabei ist zu bemerken, dass auch die Installation auf einem Fahrzeug der Einsatzkräfte möglich ist. Denkbar ist hier z. B. ein Fahrzeug der Einsatzleitung der Feuerwehr oder ein Fahrzeug des für das System zuständigen Technischen Zuges. Die möglichen Bewegungen der Fahrzeuge im Einsatzgebiet haben bei ausreichender Reichweite keinen Einfluss auf die generelle Übertragung der Sensorkits zur Basisstation. Hier ist bei der Programmierung der Sensorkits darauf zu achten, dass die Übertragungsparameter z. B. mit Hilfe der Adaptive Data Rate (siehe Kapitel 5.3.1) dynamisch angepasst werden können, um jederzeit eine optimale Übertragung zu gewährleisten.

Auswahl an LoRaWAN-Server

Für die Umsetzung der Serverinfrastruktur gibt es verschiedene Projekte. Dabei werden ausschließlich Open-Source-Anwendungen in Betracht gezogen, um Unabhängigkeit und die Möglichkeit des Selbst-Hostings zu gewährleisten. Eines dieser Projekte ist The Things Stack, entwickelt und betrieben von der Firma The Things Industries [214]. Diese Implementierung bildet die Grundlage für das Projekt *The Things Network (TTN)*, das ein offenes und gemeinschaftlich betriebenes LoRaWAN-Netzwerk zur Verfügung stellt [213]. Dabei ist es sowohl Privatpersonen als auch Gruppen möglich, Gateways zu installieren und Nachrichten von anderen Nutzern über ihr Gateway an den zentralen TTN-Server weiterzuleiten. Durch diesen Community-Ansatz gibt es bereits eine gute Abdeckung in einigen Städten in Deutschland [115]. Zu beachten sind die vom Netz vorgegebenen Beschränkungen der Datenraten, die sogenannte Fair-Use-Policy, die restriktiver ist als die Duty-Cycle-Beschränkung [213]. Auch für den Einsatz im Katastrophenfall ist ein Community-basiertes Netzwerk nur als Ergänzung denkbar. The Things Stack kann autonom auf eigenen Servern betrieben werden, wofür allerdings eine Lizenz erforderlich ist. Darüber hinaus wird das System durch eine Enterprise-Version und kommerzielle Kunden ständig weiterentwickelt. Ein weiteres Projekt ist ChirpStack, das durch eine aktive Community und die regelmäßige Aktivität des Initiators ständig verbessert und weiterentwickelt wird [160]. Für das Hosting auf dem eigenen Server und die Nutzung im privaten und kommerziellen Bereich ist keine Lizenz erforderlich. Die ausführliche Dokumentation sowie die vorhandenen Container-Images erleichtern die Installation und Nutzung des Systems. Es ist auch möglich, das gesamte System auf einem Einplatinencomputer zu betreiben, der auch direkt als Gateway fungieren kann [160].

Beide hier vorgestellten Systeme verfügen über eine Reihe von Anbindungen an externen Tools. Beispielsweise können über Integrationen Datenbanken oder andere Webserver so angebunden werden, dass die Daten eines Sensormoduls automatisch verarbeitet und versendet werden. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit besonders sinnvoll, da die Daten den Einsatzkräften bzw. der Öffentlichkeit auf verschiedenen Wegen zur Verfügung gestellt werden sollen.

5.4. Hardware: Datenaufnahme und mobile Basisstation

Dieses Teilkonzept umfasst die Hardware, die zur Messung der ausgewählten Parameter benötigt wird. Dies beinhaltet die Sensorik, den zugehörigen Mikrocontroller sowie den entsprechenden Quellcode, um den Controller anzusteuern. Neben diesen Komponenten ist auch die Hardware zur Datenübertragung Bestandteil des Teilkonzeptes.

5.4.1. IoT-Sensorik für den Hochwassereinsatz

Zunächst wurden Parameter zur Überwachung anhand der Grundlagen bzw. Analyse von vorherigen Hochwasserkatastrophen ausgewählt. Anschließend wird für jeden zu messenden Parameter ein Sensor ausgewählt, der aufgrund seiner Verfügbarkeit, seines Preises und der geforderten Genauigkeit geeignet ist. Dabei ist zu beachten, dass für den Anwendungsfall Hochwasser nicht die Genauigkeit der Hydrometrie gefordert ist,

sondern Parameter wie der Preis und einfache Integration mit bekannten IoT-Sensorkits eine größere Rolle spielen. Zudem handelt es sich bei den ausgewählten Sensoren um eine exemplarische Auswahl, die leicht an spezielle Anwendungen und Entwicklungen in der Sensortechnik angepasst werden kann.

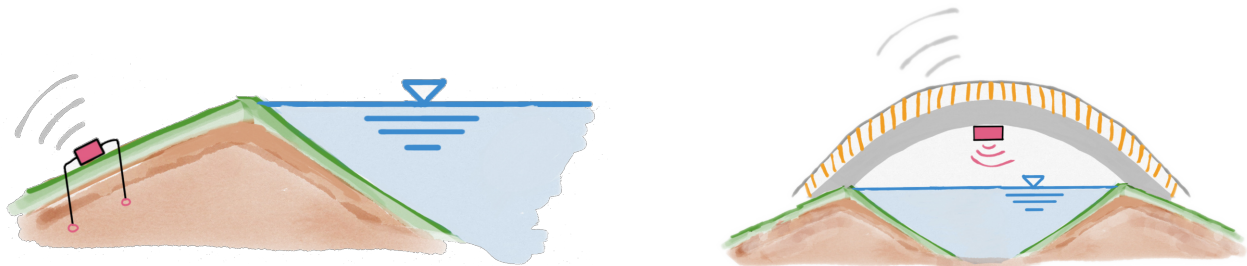


Abbildung 5.9: Schematische Darstellung der Messung der Bodenfeuchte (links) und des Wasserstands (rechts). (Eigene Darstellung)

Als wichtige Messgröße wurde der **Wasserstand** ermittelt, der den Einsatzkräften als zusätzliche Datenquelle zur Lagebeurteilung sowie zur Kontrolle von Maßnahmen dienen kann. Neben Pegelmessungen werden auch Sensoren zur Messung der **Bodenfeuchte** sowie der **Temperatur** und **Luftfeuchtigkeit** vorgeschlagen. Die Messung der Bodenfeuchte kann z. B. eingesetzt werden, um Veränderungen in einem Schutzsystem (Deiche, Dämme etc.) zu erfassen oder auch zur Früherkennung von Hangrutschungsereignissen. Neben der Erfassung dieser physikalischen Parameter werden zwei weitere Parameter vorgeschlagen, die gleichzeitig mit den physikalischen Messungen erfasst werden können. Zum einen wird die Erfassung der **Position** mittels eines GPS-Moduls empfohlen. Dies dient der automatischen Lokalisierung der Sensoren und damit der Verknüpfung von Daten und deren Standort. Damit wird auch ein einfaches und schnelles Ausbringen der Sensorkits ermöglicht. Darüber hinaus können Einsatzkräfte oder sich bewegende Sensoren erfasst werden. Zum anderen wird auch die Erfassung von **Personengruppen** mittels Scanning des BLE- und Wi-Fi-Netzes als einfache und sinnvolle Möglichkeit zur Anreicherung des Lagebildes angesehen. Durch die Erfassung von Personen können Informationen über möglicherweise nicht evakuierte Personengruppen gewonnen werden. Dies kann zur Steuerung und Priorisierung von Rettungsmaßnahmen genutzt werden. Diese beiden zusätzlichen Parameter unterscheiden das Sensorkit von herkömmlichen Pegelstationen, bei denen solche Daten in der Regel nicht erfasst werden. Im Vergleich zu einer stationären Station ist auch die Flexibilität durch die Mobilität des Kits zu nennen. Je nach Situation vor Ort und den zu überwachenden Bereichen kann der Standort einfach gewählt oder geändert werden.

Es ist zu beachten, dass die Messung absoluter Wasserstände mit der gewählten Technologie nicht ohne weiteres möglich ist, da während eines Einsatzes, bei dem bereits eine besondere Wetterlage herrscht, in der Regel keine Sohlmessung durchgeführt werden kann. Für die Lagebeurteilung durch die Einsatzkräfte ist vor allem die zeitliche Veränderung für die Lagebeurteilung hilfreich. Es wird daher empfohlen, den zum Zeitpunkt des Einbaus vorliegenden Messwert als sogenannte Nullmessung zu betrachten und die nachfolgenden

Sensorwerte auf diesen Wert zu beziehen. Damit wird die relative Änderung zum Einbaupunkt dargestellt. Der relative Anstieg oder Abfall des Wasserstandes über einen bestimmten Zeitraum gibt den Einsatzkräften und Experten einen Informationsvorteil.

Einsatzort der Sensorkit

Das Sensorkit soll so konstruiert werden, dass es an möglichst vielen verschiedenen Einsatzorten verwendet werden kann. Der in dieser Arbeit behandelte Anwendungsfall der Hochwassersituation erfordert, dass die Sensoren möglichst über der Wasseroberfläche oder dort, wo eine Überflutung mit Wasser möglich ist, installiert werden. Eine Möglichkeit ist z. B. die Installation an Brücken oder Bauwerken, die einen Fluss überspannen (siehe Abbildung 5.9). Dabei ist zu beachten, dass bei Extremereignissen die Gefahr besteht, dass die Bauwerke zerstört werden. Ist in dem zu überwachenden Gebiet keine Brücke o.ä. vorhanden, kann das Sensorkit trotzdem über dem Fluss installiert werden. Dazu können Stative oder andere natürliche Strukturen wie z. B. Bäume verwendet werden. Wie in den Grundlagen beschrieben, stellt auch die Überflutung von Straßen und Wegen in Gewässernähe eine Gefahr für die Bevölkerung und die Einsatzkräfte dar [14, S. 42]. Um diesen Bereich überwachen zu können, muss das Kit auch für die Installation an Straßenlaternen oder Gebäuden geeignet sein (siehe Abbildung 5.10). Hierfür sind Befestigungen mit Kabelbindern und Klebeband vorgesehen.

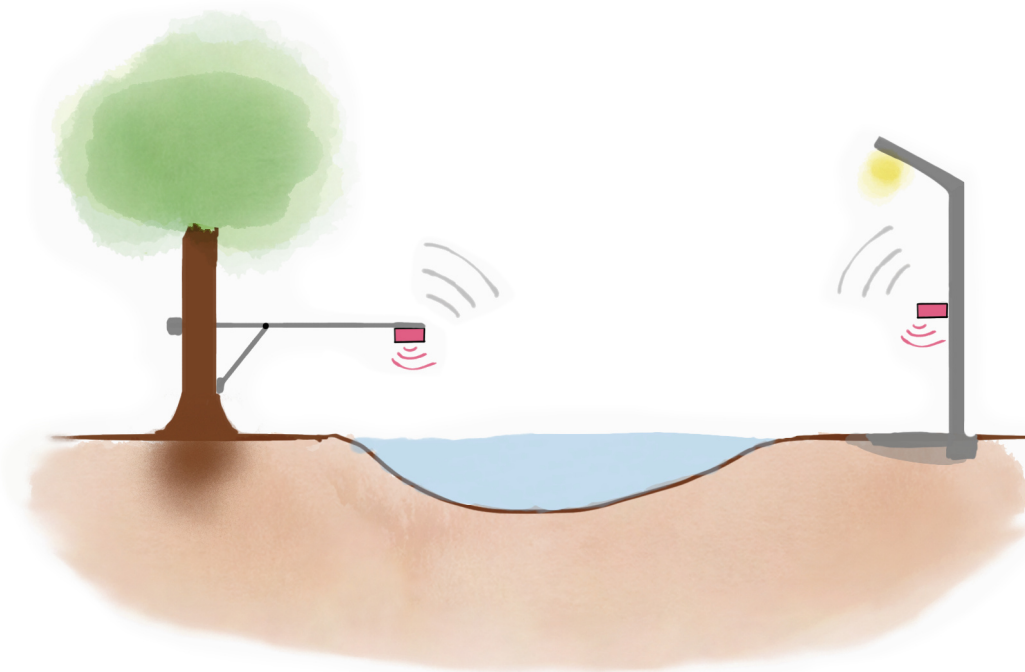


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung der Befestigung des Sensorkits an einem Baum (links) und an einer Laterne (rechts). (Eigene Darstellung)

Das Sensorkit kann auch zur Überwachung von Wasserständen in der Nähe von Hochwasserschutzsystemen verwendet werden. Bei mobilen Systemen, wie z. B. Dammbalken, kann das Kit einfach direkt an einem Element befestigt werden. Bei z. B. Sandsackbarrieren muss wiederum mit einem Stativ gearbeitet werden. Dieses kann ggf. auch in das Bauwerk integriert und somit durch die Sandsäcke beschwert werden. Die Messung der Bodenfeuchte kann direkt auf der Landseite der Barriere erfolgen. Hierfür ist kein Stativ o.ä. erforderlich. Unabhängig vom Einsatzort ist davon auszugehen, dass das Gehäuse nicht unbedingt horizontal montiert werden kann. Dies kann zum einen an der vorhandenen Struktur des Einsatzortes und zum anderen an den Umständen der Montage liegen. Es ist davon auszugehen, dass das System dann zum Einsatz kommt, wenn bereits ein gewisser Gefährdungsgrad vorliegt, der in der Regel mit entsprechenden Witterungs- und Einsatzbedingungen wie z. B. Zeitstress verbunden ist. Auch aus diesem Grund ist eine einfache und unkomplizierte Montage des Sensorkits erforderlich. Um dennoch eine möglichst genaue Messung zu gewährleisten, muss die Befestigung des Ultraschallsensors so konstruiert sein, dass dieser beweglich ist und senkrecht auf die Wasseroberfläche gerichtet werden kann.

Programmiercode der Mikrocontroller

Um Sensoren und Mikrocontroller möglichst flexibel austauschen zu können und auch für zukünftige Entwicklungen gerüstet zu sein, muss der Quellcode, der die Ansteuerung der Mikrocontroller sowie das Auslesen der Sensoren übernimmt, ebenfalls flexibel und einfach zu warten sein. Hierfür wird die Auswahl von Open-Source-Projekten bevorzugt, die an die Gegebenheiten angepasst werden können. Der Programmiercode umfasst dabei die Kommunikation mittels LoRaWAN inklusive der beschriebenen Aktivierungsmethoden sowie der Übermittlung und des Empfangs von Nachrichten sowie die Ansteuerung und das Auslesen von den verschiedenen Sensoren. Dazu müssen die sensorspezifischen Abfragen implementiert werden, wobei bereits eine Vorverarbeitung der Sensorwerte erfolgt. Insbesondere bei der Verwendung von Ultraschallsensoren ist davon auszugehen, dass die Messungen auch von Ausreißern beeinflusst wird [154]. Im Kapitel 7.2.3 wird die Implementierung des Programmiercodes beschrieben, hier wird auch die Verarbeitung der Messwerte mit statischen Methoden zur Eliminierung von Ausreißern dargestellt.

Bidirektionale Kommunikation

Um die Messintervalle sowie die Abfrage der einzelnen Sensoren an die Gegebenheiten vor Ort anpassen zu können, muss eine bidirektionale Kommunikation von der Einsatzzentrale zu den einzelnen Sensorkits möglich sein. Standardmäßig müssen die Kits so eingestellt sein, dass alle Sensordaten in regelmäßigen Abständen übertragen werden. Wird z. B. nach der Installation eines Moduls die Abfrage eines bestimmten Sensors nicht mehr benötigt, kann die Abfrage deaktiviert werden. Diese Kommunikation erfolgt über die beschriebenen Downlinks. Damit kann z. B. auch das Messintervall eingestellt oder ein bestimmter Messwert erneut abgefragt werden. Insbesondere bei sehr dynamischen Betriebszuständen kann ein kurzes Messintervall sinnvoll sein, geht aber mit einem höheren Energieverbrauch einher. Die bidirektionale Kommunikation muss einerseits bei der Entwicklung bzw. Auswahl des Quellcodes für den Mikrocontroller und andererseits bei der Auswahl des LoRaWAN-Servers berücksichtigt werden. Beide müssen Downlinks unterstützen und verarbeiten können.

Darüber hinaus ist für eine einfache Kommunikation für die Einsatzkräfte eine Möglichkeit zu entwickeln, mit der Befehle z. B. über ein Webinterface und die Betätigung von Schaltflächen ausgeführt werden können. Für diese Funktionalität sollte der ausgewählte LoRaWAN-Server eine API zum Senden der Downlinks anbieten. Diese muss über entsprechende Sicherheitsmaßnahmen gegen Fremdnutzung verfügen.

5.4.2. LoRaWAN-Gateway als mobile Basisstation

Die sogenannte Basisstation umfasst das Gateway sowie die mobile Serverinfrastruktur. Beides soll für einen einfachen und mobilen Einsatz mit Batterien oder Powerbanks betrieben werden können. Für die mobile Datenverbindung sollen zunächst Mobilfunkverbindungen genutzt werden. Im weiteren Verlauf der Entwicklung bzw. für eine spätere Weiterentwicklung des Systems ist auch die Anbindung von Satelliten-Internetverbindungen möglich. Das gesamte System soll in einem spritzwassergeschützten, stoßfesten, staubdichten und schlagfesten Gehäuse untergebracht werden. Damit die Installation auch für die Einsatzkräfte während eines Einsatzes bei schlechten Wetterbedingungen möglich ist, sollte die Installation einfach und ohne viele Handgriffe möglich sein. Dazu ist es z. B. notwendig, die LoRaWAN-Antenne mit einem Befestigungssystem am Koffer oder an anderen Gegenständen zu befestigen. Die Basisstation kann entweder im Einsatzgebiet installiert und dort belassen werden oder während des Einsatzes auf einem Einsatzfahrzeug betrieben werden. Wie in den Grundlagen zu LoRaWAN beschrieben, ist für eine optimale Reichweite des Gateways ein möglichst hoher Standort zu empfehlen. So kann die Installation auf einem hohen Gebäude oder auf einer Erhöhung wie zum Beispiel einem Berg oder Hügel für eine große Reichweite sorgen. Beim Betrieb ohne Mobilfunkverbindung ist zu beachten, dass sich die Einsatzkräfte in der Nähe der Basisstation aufhalten müssen, um die Werte auszulesen. Durch die Nutzung von Satelliteninternet kann dies jedoch überwunden werden.

5.5. Verarbeitung: Speicherung, Schnittstellen und Visualisierung

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Verarbeitung der Daten aus dem mobil-autarken Monitoringsystem. Dies umfasst die Speicherung der Daten, die Nutzung der Daten über Schnittstellen sowie die Visualisierung der Situation. Es wird auf die Konzeption der verschiedenen Komponenten eingegangen, um eine effektive und effiziente Nutzung der gewonnenen Daten zu gewährleisten. Dies ist besonders wichtig, um die Ziele des Systems, die Unterstützung der Einsatzkräfte im Hochwasserschutz, zu erreichen. Dabei spielt die Visualisierung der Daten eine wichtige Rolle.

Speicherung

Die Datenspeicherung wird im Rahmen des Konzeptes durch Datenbanken realisiert. Dabei können je nach Anwendungsfall unterschiedliche Datenbanktypen zum Einsatz kommen. Für die Monitoringdaten, die hauptsächlich aus Sensordaten bestehen, kann eine dafür vorgesehene *Time-Series-Datenbank* verwendet werden. Eine in diesem Zusammenhang weit verbreitete und häufig verwendete Datenbank ist die InfluxDB. Dieser Datenbanktyp bietet Vorteile, die insbesondere bei großen Zeitreihen zum Tragen kommen. So können Zeitreihen nach einer gewissen Zeit automatisch gekürzt bzw. vereinfacht werden. Dadurch wird die Datenmenge

der *alten* Daten deutlich reduziert. Im konkreten Fall der Kurzzeitüberwachung von Einsatzgebieten ist dies nicht zwingend erforderlich. Allerdings ist es mit dieser Funktion möglich, auch ältere Datenbestände zu speichern und als Trainingsdaten z. B. für Ansätze mit künstlicher Intelligenz vorzuhalten. Dabei sollte die Vereinfachung der Daten jedoch auf ein sinnvolles Maß beschränkt werden, da insbesondere die kurzfristigen Veränderungen für die Beurteilung einer Situation notwendig sind.

Neben der Anbindung an eine *Time-Series-Datenbank* soll auch die Anbindung über eine SensorThings API ermöglicht werden. In Kapitel 4.4.1 wird deutlich, dass eine langfristige interoperable Nutzung der Daten durch eine STA-konforme Schnittstelle gestärkt werden kann. Da die Datenbasis auf STA-Servern in der Regel eine *PostGIS*-Datenbank ist, werden die Daten auch dort gespeichert. Beide Datenbanken müssen die Daten automatisch vom LoRaWAN-Backend erhalten, dazu sollte eine Integration des Backends die Daten so aufbereiten, dass sie direkt eingefügt werden können. Gegebenenfalls muss eine Anbindung implementiert werden, wenn der gewählte LoRaWAN-Server keine entsprechende Integration zur Verfügung stellt.

Schnittstelle

Um die Daten für die Nutzer, im Falle des Hochwasserschutzes ist dies u.a. der KatS-Stab, möglichst einfach und flexibel nutzbar zu machen, sollen im Rahmen des Konzeptes verschiedene Schnittstellen angeboten werden. Zum einen sollen die Daten traditionell in einer Datenbank vorgehalten werden, die über eine datenbankspezifische Abfragesprache abgefragt werden können. Zum anderen soll mit einem STA-Server eine standardisierte API bereitgestellt werden, für deren Abfrage bereits existierende Tools (siehe auch Kapitel 4.4.2) zur Verfügung stehen. Die STA-Schnittstelle dient dabei als Hauptzugriffspunkt für andere Anwendungen und soll öffentlich abfragbar sein. Da die STA-Schnittstelle aufgrund der Standardisierung immer die gleichen Endpunkte und Abfragen unterstützt, ist eine separate Dokumentation nicht erforderlich, kann aber den Anwender bei der Nutzung unterstützen. Eine Dokumentation soll daher der Schwerpunkt auf Beispielabfragen und Beispielanbindung von Applikationen legen.

Autorisierung und Authentifikation

Alle wesentlichen Inhalte zur Konfiguration sowie die Webschnittstellen sind nur mit Zugangsdaten zugänglich. Der Zugriff auf die Daten über die STA ist nicht durch eine Authentifizierung geschützt, da die Daten offen für alle Nutzer und Anwendungen zur Verfügung stehen sollen. Werden im Rahmen von Einsätzen sensible Daten wie z. B. Bewegungsdaten von Einsatzkräften oder Informationen über Menschenmengen in einem Gebiet erhoben, sollte hierfür ein geeigneter Schutzmechanismus z. B. mittels Tokens oder API-Keys eingesetzt werden. Dieser Schutzmechanismus wird zum Beispiel bei der Abfrage der Geräteinformationen über ChirpStack verwendet. Hier ist ein Zugriff sowie die Möglichkeit der Versendung von Downlinks per API nur mit Angabe eines API-Keys möglich.

Geoinformationssystem (GIS)-Anbindung

Wie bereits erläutert, sollen die im Rahmen eines Einsatzes erhobenen Daten über verschiedene Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Diese Schnittstellen ermöglichen auch eine Anbindung über bestehende Plugins für GIS-Programme. Insbesondere GIS-Programme werden häufig in der Katastrophenschutzplanung und -vorbereitung eingesetzt [128], [173, S. 268]. Beispielsweise kann QGIS als GIS-Programm in Kombination mit dem in Kapitel 4.4.2 vorgestellten Plugin einfach an die STA-Schnittstelle angebunden werden. In QGIS können die üblichen Inhalte wie z. B. Kartenmaterial neben den Daten angezeigt werden.

Reverse Proxy

Das System bzw. die Bedienung des Systems soll insgesamt per Webanfragen erreichbar sein. Um die Anfragen an den Server zu den entsprechenden Softwarekomponenten weiterzuleiten wird der Einsatz eines Reverse Proxy vorgeschlagen. Ein *Reverse Proxy* ist ein Servertool, welches als Vermittler für Anfragen von Clients an einen Server fungiert. Er wird häufig in Netzwerken eingesetzt, um die Verbindungen zwischen Clients und Servern zu verwalten und zu optimieren. Ein *Reverse Proxy* kann auf verschiedene Weise eingesetzt werden, z. B. zur Lastverteilung, zum Schutz von Servern vor direkten Angriffen oder zur Verbesserung der Leistung und Verfügbarkeit von Servern. Er kann auch eingesetzt werden, um den Zugriff auf bestimmte Server einzuschränken und zu kontrollieren, indem Anfragen von Clients gefiltert und an die entsprechenden Server weitergeleitet werden. Zu diesem Zweck werden sogenannte *Middlewares* als Zwischenschicht eingesetzt. Insgesamt ist ein *Reverse Proxy* ein nützliches Werkzeug im Netzwerk- und Servermanagement, da er es ermöglicht, die Verbindungen zwischen Clients und Servern zu optimieren und zu schützen.

Visualisierung

Die Erfassung von Daten und Informationen für einen Einsatz ist nur mit einer entsprechenden Anzeige bzw. Visualisierung für die Einsatzkräfte eine Unterstützung. Daher ist ein zentrales Element des Konzeptes eine übersichtliche und einfache Datenabfrage bzw. Datenvisualisierung. Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, ist es hierfür wichtig, die Schnittstellen des Systems detailliert zu beschreiben, um Flexibilität im Bereich der Visualisierung und Auswertung zu gewährleisten. Zur Darstellung der Daten soll ein Dashboard-Tool verwendet werden, das als Datenbasis STA sowie verschiedene andere Datenbanken unterstützt. Das System soll Open Source sein und möglichst virtualisiert zur Verfügung gestellt werden. Eine mögliche Anwendung, die diese Anforderungen erfüllt, ist Grafana. Dieses Projekt bietet sich besonders an, da es eine große Community und ein Ökosystem um das Projekt vorhanden ist. Mit Hilfe von Plugins kann das Dashboard-Tool einfach an verschiedene Datenquellen angebunden werden. Zudem kann Grafana über gängige Browser aufgerufen werden. Da neben den Sensordaten auch die Informationen der Einsatzkräfte vor Ort für die Lagebeurteilung wichtig sind, soll es zusätzlich ein Tool bzw. eine kartenbasierte Darstellung geben, in die mittels einfacher Geometrie Informationen eingetragen werden können. Die Entwicklung dieser Webanwendung orientiert sich an den im Kapitel 2.2.3 vorgestellten Softwareanwendungen des Katastrophenschutzes. Wie bereits im vorigen Abschnitt geschrieben, kann zusätzlich noch eine Anbindung an ein GIS Programm durchgeführt werden, auch hier

können die Positionen der Sensoren, sowie die Daten angezeigt werden. Die verschiedenen Möglichkeiten der Visualisierung sind vor allem deshalb sinnvoll, da bei den Einsatzkräften sehr unterschiedliche Wissensstände und bereits genutzte Software vorhanden sind.

Es ist davon auszugehen, dass das Monitoringsystem eingesetzt wird, wenn bereits eine Hochwasserwarnung vorliegt. Daher sollte bei der Visualisierung neben der Darstellung von Übersichtskarten der Schwerpunkt auf der Darstellung konkreter Sensorwerte liegen. Darüber hinaus können Auswertungen wie z. B. zeitliche Veränderungen (1 - 12 h) des Wasserstandes oder der Bodenfeuchte für die Beurteilung der Situation nützlich sein. Wird das Pegelsensorsystem auch zur Erfassung der Überflutung von Straßen oder Wegen eingesetzt, so sollte dies in einer Karte möglichst mit der Darstellung des Überflutungsgebietes dargestellt werden. Hier kann ohne Topologieanalyse in der ersten Entwicklung auch die Darstellung eines bestimmten Radius hilfreich sein.



Abbildung 5.11: Mockup der zentralen Visualisierung von MOTARK-Web. (Eigene Darstellung)

Die Abbildung 5.11 zeigt eine mögliche Oberflächengestaltung der zentralen Webplattform des MOTARK-Systems. Auf dieser wird, wie beschrieben, mit Hilfe einer Kartenanwendung und Bereichen um die Pegel die Situation vor Ort angezeigt. Zusätzlich wird auf Basis der Analyse der letzten Messwerte angezeigt, wie sich der Wasserstand am jeweiligen Standort entwickelt hat. Die Karte kann durch eigene Zeichnungen und Elemente der Einsatzkräfte ergänzt werden. Darüber hinaus soll es möglich sein, die Position der Einsatzkräfte und weitere Open-Data-Quellen einzubinden. Zusätzlich werden den Einsatzkräften verschiedene Warnhinweise angezeigt, wenn z. B. durch das Scannen von Bluetooth Low Energy (BLE) und Wi-Fi Kanälen eine Personengruppe um eine Pegelstation erkannt wird. Diese zusätzlichen Hinweise können die Maßnahmen und die Priorisierung der Einsatzkräfte unterstützen. Die Webdarstellung ersetzt jedoch nicht die sonst üblichen Werkzeuge des Katastrophenschutzstabs, die die Informationen aus dem MOTARK-System über die beschriebenen Schnittstellen integrieren können.

5.6. Zusammenfassung der Softwarearchitektur

Die in diesem Kapitel vorgestellten Softwarekomponenten ermöglichen die vollständige Implementierung eines autonomen mobilen Überwachungssystems.

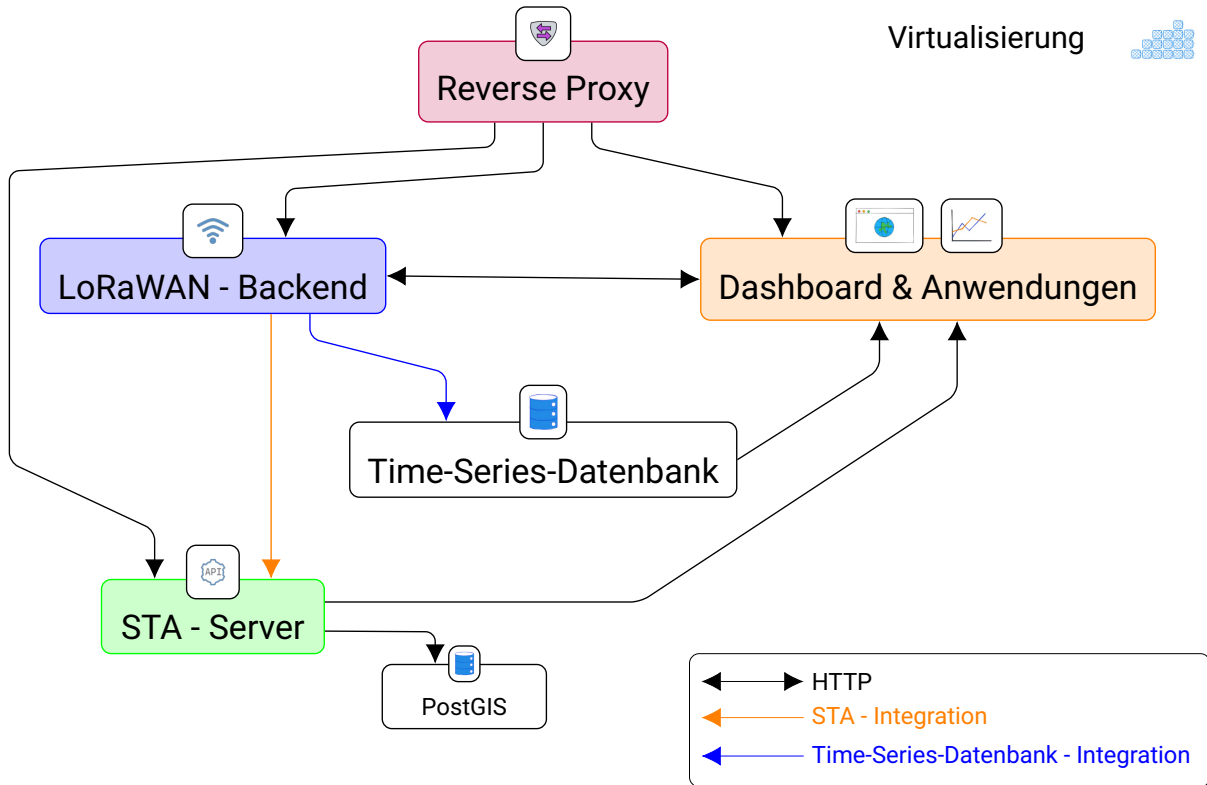


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung der Softwarekomponenten des mobil-autarken Monitoringsystems. (Eigene Darstellung)

Die Abbildung zeigt die ausgewählten Softwarekomponenten und ihre Verbindungen untereinander. Insbesondere die Kommunikationswege zwischen dem LoRaWAN-Backend und den Datenbanken bzw. dem STA-Server müssen vom Backend und den angeschlossenen Systemen unterstützt werden. Die Abfrage der Daten kann dann wie beschrieben per HTTP-Request erfolgen. Dabei kann diese interne Kommunikation ohne Verwendung des Reverse Proxy erfolgen. Anfragen von außerhalb der Serverinfrastruktur werden jedoch über diesen abgewickelt. Zu den Anwendungen gehören neben dem Dashboard weitere wie beispielsweise das Geoinformationssystem QGIS und eine zentrale Administrationsoberfläche des MOTARK-Systems. Die einzelnen Komponenten sollten möglichst als Docker-Container oder in einer anderen Form der Virtualisierung implementiert werden, da dies ein einfaches Deployment und Interoperabilität zwischen verschiedenen Betriebssystemen ermöglicht.

6. EZSTA: Mapping-Konzept zur SensorThings API



Die im Kapitel 4 erarbeiteten Grundlagen zeigen, dass es im Bereich der öffentlichen Daten eine Vielzahl von Daten gibt und dass sich die Anzahl und Verfügbarkeit dieser Daten aufgrund der technischen Möglichkeiten sowie der rechtlichen Rahmenbedingungen in den nächsten Jahren weiter erhöhen wird. Es wird aber auch deutlich, dass die einfache Nutzung insbesondere bei heterogenen Datenquellen und bei Nutzern ohne explizite Datenverarbeitungsexpertise noch vor großen Hürden steht. Diese Hürden bestehen auch im Bereich des Katastrophenschutzes und der Datenbereitstellung für Einsatzkräfte. Die vorgestellte Softwareanwendung zur Bewältigung von Katastrophen (siehe Kapitel 2.2.3) zeigt aber auch, dass durch die Anbindung von Datenquellen, wie z. B. Umweltmonitoring oder Pegelmessungen, die Lagedarstellung deutlich verbessert werden kann. Um diese Möglichkeit für möglichst viele Einsatzkräfte und Datenquellen zu ermöglichen, wird in diesem Kapitel ein Konzept entwickelt, das ein Mapping von APIs im Bereich der Sensordaten auf eine standardisierte API ermöglicht. Der Begriff Mapping (dt. wörtlich eine Karte erstellen) wird im Rahmen dieser Arbeit als Synonym für den Begriff Datenmapping verstanden. Unter Datenmapping versteht man die Abbildung gleicher Inhalte in unterschiedliche Datenmodelle. Das Konzept mit dem Namen EZSTA (EZ=*Easy*, STA=*SensorThings API*) stellt dabei ein Vorschlag dar, die es ermöglicht, bestehende APIs einfach und automatisch zu einer SensorThings API umzuformatieren. STA ist dabei wie in Kapitel 4.4.1 ein vom Open Geospatial Consortium (OGC) entwickelter Standard zur Bereitstellung von Sensordaten mittels einer Webschnittstelle. Dadurch wird die Interoperabilität bestehender APIs erhöht und die Nutzung von Sensordaten vereinfacht. Dieses Kapitel behandelt das Konzept sowie weitere Tools zur Verbreitung von EZSTA.

6.1. Hintergrund und Motivation

In den Grundlagen zu Open Data Schnittstellen konnte festgestellt werden, dass trotz inzwischen verbreiteter einheitlicher Dokumentation bzw. Spezifikation die Daten in unterschiedlichen Formaten bereitgestellt werden. Dies liegt in der Regel daran, dass die APIs für eine bestimmte Anwendung entwickelt wurden und die Entwicklung nicht auf ein standardisiertes Format ausgerichtet war. Dies erschwert die Nutzung verschiedener Schnittstellen in eigenen Anwendungen, da die Konvertierung der Daten in das anwendungsspezifische Format

in der Regel zusätzliche Funktionen erfordert. Soll dieselbe API für eine andere Anwendung verwendet werden, muss möglicherweise ein Konverter für eine andere Anwendungsumgebung neu implementiert oder ein separater Dienst für diese eine Schnittstelle entwickelt werden. Wenn z. B. Daten in einer Leaflet-Map angezeigt werden sollen, muss die API-Antwort nach den Standortparametern, Sensorwerten und anderen Metadaten analysiert werden. Die Umwandlung der Antwort in ein Leaflet-kompatibles Format könnte dann Teil der Frontend-Skripte sein. Wenn die gleiche Schnittstelle für eine GIS-Anwendung wie QGIS verwendet werden soll, muss, falls nicht bereits vorhanden, ein eigenes Plugin für diese Schnittstelle oder ein Konverter implementiert werden, um die Daten in QGIS anzeigen zu können. Dies würde größtenteils die gleichen Funktionalitäten wie der Quellcode im Frontend enthalten, aber an die spezifischen Anforderungen von QGIS bezüglich Format und Programmiersprache angepasst werden. Dieser Aufwand kann für einzelne Anwendungen bei denen nur wenige APIs benötigt werden, akzeptabel sein. Aber wenn viele verschiedene Schnittstellen verwendet werden sollen, kann es notwendig sein, eine Reihe von Convertern oder Plugins für jede dieser Schnittstellen und Programme zu entwickeln. Darüber hinaus liefern nicht standardisierte APIs nicht zwangsläufig alle Informationen, die für das Verständnis der Daten und ihres Kontextes erforderlich sind. Dies gilt insbesondere für Metainformationen wie die Einheit, die beobachteten Parameter oder den Standort des Sensors. Um die beschriebene Heterogenität der APIs und die damit verbundenen Schwierigkeiten zu überwinden, hat das Open Geospatial Consortium (OGC) den Standard SensorThings API für Schnittstellen im Sensorbereich entwickelt (siehe auch Kapitel 4.4.1).

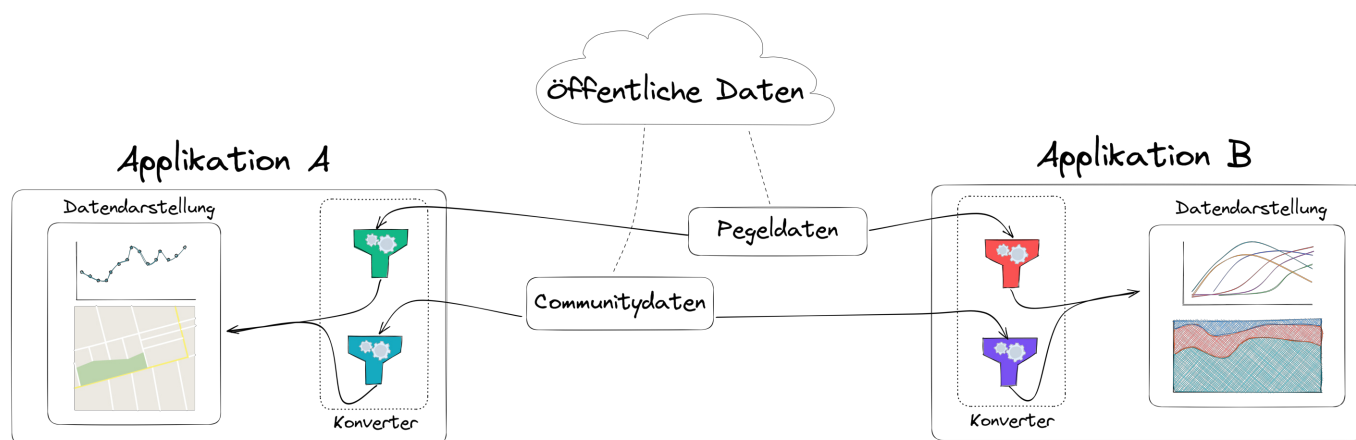


Abbildung 6.1: Aktueller Stand bei der Anbindung von verschiedenen APIs an unterschiedliche Applikationen. (Eigene Darstellung)

Die Abbildung 6.1 zeigt schematisch, wie die Verbindung von zwei APIs zu zwei Applikationen in der Regel erfolgt. Innerhalb der Applikation muss jeweils ein eigener Konverter geschrieben werden, wenn die Daten nicht in einem für die Applikation lesbaren Format vorliegen. Die Converter können entweder über sogenannte Plugins in die Applikation integriert werden oder die Vorverarbeitung der Daten muss in einen separaten Dienst ausgelagert werden, wenn Plugins nicht möglich sind. Bei Änderungen in der API-Struktur muss zudem jeder Konverter angepasst werden. Insgesamt bedeutet dies einen hohen Wartungs- und Entwicklungsaufwand. Um diesen zu reduzieren, ist die Verwendung von Standards zu bevorzugen. Beispielsweise kann hier der STA-

Standard verwendet werden, wobei nicht davon auszugehen ist, dass bestehende APIs umgeschrieben werden oder eine zusätzliche STA-Schnittstelle anbieten. Um dennoch die Vorteile einheitlicher STA-Schnittstellen auch für bestehende APIs nutzen zu können, wird im Folgenden ein Konzept vorgestellt, wie bestehende Schnittstellen mittels Mappings in eine STA umgewandelt werden können.

6.2. Aufbau des EZSTA-Services

EZSTA soll hier als Zwischenschicht zwischen der Original-API und den Anwendungen dienen und über Mappings STA-konforme Antworten zur Verfügung stellen. Die Umformatierung von API-Anfragen mittels Mappings wird bereits von verschiedenen Plattformen als Werkzeug genutzt, um Daten auf der eigenen Plattform einbinden bzw. anzeigen zu können. So bietet beispielsweise das im Bereich Smart Home eingesetzte Open-Source-Projekt Home Assistant mit der *RESTful Sensor-Integration*¹⁷ eine templatebasierte Möglichkeit, externe APIs und Sensordaten einzubinden. Im Template werden verschiedene Parameter wie die URL sowie der Pfad der benötigten Informationen in der Antwort in einer YAML-Datei definiert. Auch in Grafana können APIs, die JSON als Rückgabeformat anbieten, über das Infinity Datasource Plugin [203] abgefragt und eingebunden werden. Hier können die zur Anzeige benötigten Antwortfelder aus der API-Antwort innerhalb von Grafana in einer Benutzeroberfläche ausgewählt werden. Huyeng et al. haben in ihrem Paper bereits eine Möglichkeit aufgezeigt, Mappings mittels einfacher JSON-Dateien zu erstellen und für den Einsatz im Katastrophenfall einheitlich nutzbar zu machen [109]. Dabei wird bei diesem Konzept sowie bei Home Assistant keine Formatierung in ein einheitliches Format vorgenommen, sondern die Daten in ein für die jeweilige Anwendung lesbares Format umgewandelt. Dennoch zeigen diese Beispiele, dass es mittels einfacher Mappings möglich ist, verschiedene APIs in ein einheitliches Format zu überführen.

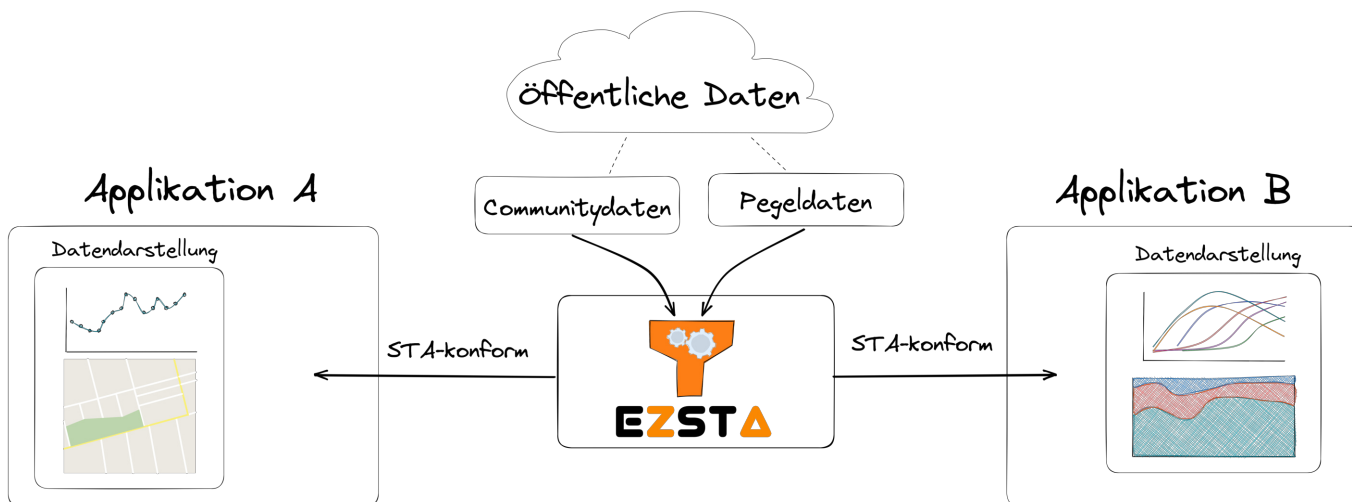


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung des EZSTA-Konzeptes. (Eigene Darstellung)

¹⁷<https://www.home-assistant.io/integrations/sensor.rest/> (Zugriff am 01.08.2022).

Ziel des EZSTA-Konzeptes ist es daher, bestehende APIs in eine STA-konforme API umzuformatieren. Dazu soll ein Service entwickelt werden, der die Daten der ursprünglichen API abfragt und je nach Bedarf der angebotenen Anwendung eine STA-konforme Antwort zur Verfügung stellt. Die Abbildung 6.2 zeigt beispielhaft, wie die Struktur im Vergleich zu Abbildung 6.1 aussehen könnte. Die Anwendungen benötigen keine eigene Konvertierung mehr, sondern können über EZSTA die jeweilige API abfragen und erhalten die Daten in einem STA-konformen Format. Dabei ist zu beachten, dass die Applikation STA unterstützen muss. Ist dies nicht der Fall, muss ggf. ein Plugin zur Unterstützung von STA eingesetzt werden. Da dieses Plugin für alle STAs nutzbar ist und auch anderen Anwendern zur Verfügung gestellt werden kann, ist der Aufwand deutlich geringer einzuschätzen, als wenn für jede API ein eigener Konverter entwickelt werden muss. Zudem ist bei der zunehmenden Verbreitung von STA davon auszugehen, dass in Zukunft von vielen Anwendungen STA unterstützt wird. Im Kapitel 4.4.2 wurden einige Programme mit STA-Unterstützung vorgestellt.

Die Herausforderung bei der Umsetzung des EZSTA-Konzepts besteht darin, die Daten der ursprünglichen API in ein STA-konformes Format zu überführen. Dazu muss zunächst ein Mapping zwischen der Original-API und den für die STA-Klassen benötigten Informationen vorgenommen werden. Anschließend kann die Umformatierung im EZSTA-Service automatisch mit Hilfe des Mapping-Inputs, welches die Zuordnung enthält, erfolgen. Ein Mapping-Input liegt im Rahmen dieses Konzeptes als JSON-Datei vor. Der Dienst soll so weit wie möglich die im Kapitel 4.4.1 vorgestellte Funktionalität einer STA unterstützen. Dies umfasst z. B. das Abfragen einzelner Klassen oder verknüpfter Klassen sowie die Verwendung von Filtern zum Beispiel zum Laden weiterer verknüpfter Klassen. Der Schwerpunkt liegt auf der Abfrage von Daten aus einer externen Quelle und deren Verwendung in anderen Programmen, daher wird nicht der volle Umfang einer STA implementiert. So werden beispielsweise die sonst üblichen CRUD-Operationen (*Create*, *Read*, *Update*, *Delete*), welche das Einfügen, Bearbeiten oder Löschen von Daten ermöglichen nicht betrachtet und umgesetzt. Diese Funktionalität bleibt im Bereich der ursprünglichen API bzw. deren Anbietern vorbehalten. Lediglich der *Read*-Teil, d.h. das Lesen, ist implementiert. Im Folgenden werden zunächst die Struktur und anschließend das Mapping-Input anhand eines Beispiels vorgestellt.

6.2.1. Struktur der STA-konformen Schnittstelle

Der EZSTA-Service ist wie eine übliche STA aufgebaut. Das heißt die Abfrage von einzelnen oder verbundenen Klasse sowie die Filterung mittels Entity-ID muss über die URL-Parameter möglich sein. Zudem sind auch Funktionalität wie das Laden weiterer verbundener Klassen mittels dem URL-Parameter `$expand` möglich. Die übergeordnete Struktur des EZSTA-Service ist in Tabelle 6.1 dargestellt. Die Routen entsprechend dabei den üblichen Routen ein STA und sind anhand der Analyse der Abfrage von STA-Anbindungen von Programmen entstanden (siehe Kapitel 4.4.2).

Tabelle 6.1: Notwendige Funktionalitäten für die Umsetzung des EZSTA-Konzeptes.

Beschreibung	Beispielroute
Die Abfrage der einzelnen Klassen muss gemäß STA-Spezifikation möglich sein.	/Things
Eine Abfrage mittels Entity-ID muss möglich sein.	/Things(1)
Verbundene Klassen müssen per Abfrage abrufbar sein.	/Things(1)/Locations
Die Antwort einer Klasse muss um die verbundenen Klassen erweiterbar sein.	/Things(1)?\$expand=Locations

Der EZSTA-Service benötigt neben der angeforderten Klasse und den weiteren Parametern, die gemäß Tabelle 6.1 möglich sind, zusätzlich die Angabe des Mapping-Inputs. Gemäß der Spezifikation sind zum Auslesen von Klassen nur *GET*-Methoden erlaubt. Dies bedeutet, dass die Übergabe des Mapping-Inputs z. B. über die Methode *POST* nicht möglich ist. Daher wird der Mapping-Input als zusätzlicher Parameter in der URL übergeben. Um weiterhin eine STA-konforme URL-Abfrage zu ermöglichen, wird der sogenannte Mapping-Parameter vor der eigentlichen Abfrage eingefügt. Für die Übergabe des Mapping-Inputs werden zwei Möglichkeiten vorgeschlagen. Zum einen kann der gesamte Mapping-Input in der URL übergeben werden. Dazu muss der Input, der üblicherweise als JSON vorliegt, so codiert werden, dass er in der URL verwendet werden kann. Zum anderen kann die ID eines Mapping-Inputs als Mapping-Parameter angegeben werden. Anhand der ID kann der EZSTA-Service den Input separat abrufen.

- Der Mapping-Input muss per URL-Parameter übergeben werden können.
 - z. B. `<codierter Mapping-Input>/Things`
- Der Mapping-Input wird extern gespeichert. Die Übergabe einer ID des Inputs ist ausreichend.
 - z. B. `<ID=1>/Things`

Die Angabe des vollständigen Mapping-Inputs in der URL ermöglicht eine von öffentlichen Listen oder Datenquellen unabhängige Verwendung. Gleichzeitig bedeutet die Übergabe und damit Verarbeitung der Mapping-Input, dass die generierten STA-konformen Antworten des EZSTA-Dienstes für Personen schwer lesbar sind. Dies liegt daran, dass die vollständige URL, die den codierten Mapping-Input enthält, in den Antworten enthalten ist, z. B. als `@iot.selflink` oder Links zu verknüpften Klassen. Für die automatische Verwendung in Anwendungen spielt dies in der Regel keine Rolle. Allerdings muss bei dieser Variante darauf geachtet werden, dass die aktuelle Version des Mapping-Inputs verwendet wird. So muss z. B. bei einer Anpassung des Inputs auch der codierte Mapping-Input in den entsprechenden URLs geändert werden. Um die Antworten lesbarer zu gestalten und gleichzeitig immer die aktuelle Version des Inputs verwenden zu können, wird eine zweite Variante zur Übergabe des Mapping-Inputs vorgeschlagen. In dieser Variante wird nur eine ID übergeben. Anhand der dem EZSTA-Service zugeordneten öffentlichen Liste von Mappings-Inputs kann der EZSTA-Service den Input abrufen und verarbeiten. Der allgemeine Ablauf einer Anfrage an den

EZSTA-Service einschließlich der Unterscheidung zwischen ID- und codierter Mapping-Input-Übergabe ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

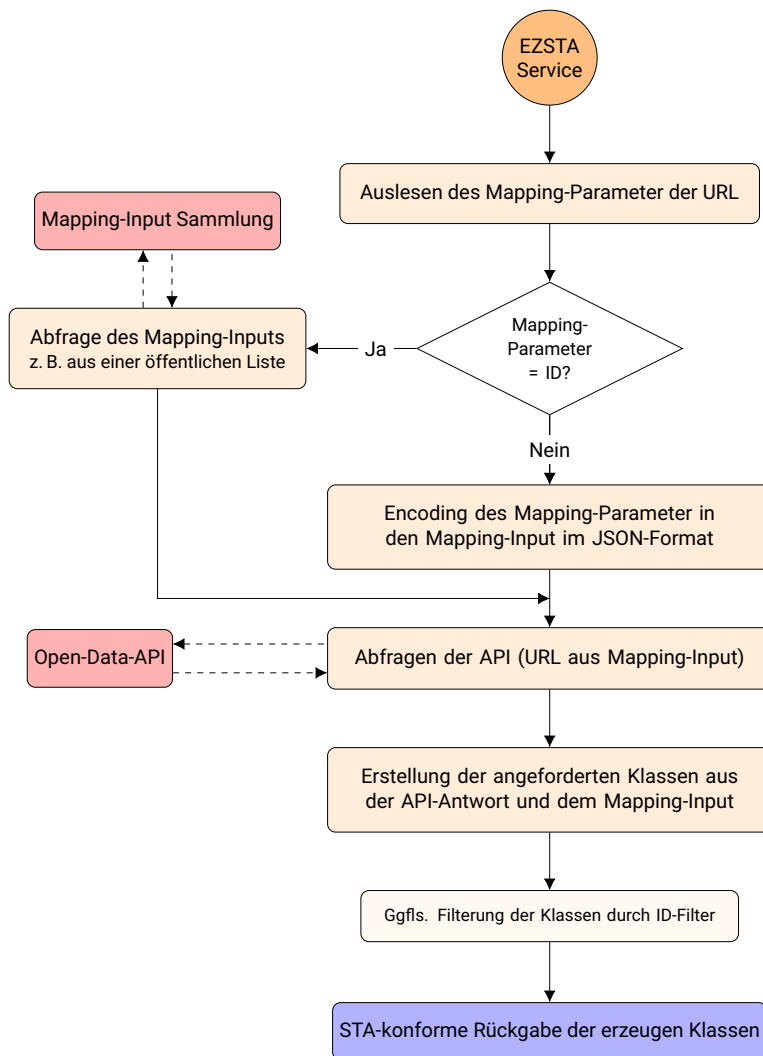


Abbildung 6.3: Allgemeiner Ablauf einer Anfrage an den EZSTA-Service. (Eigene Darstellung)

Bei der Analyse der vorhandenen Open Data APIs ist aufgefallen, dass es bei einigen Schnittstellen unterschiedliche Router für Stammdaten und Sensordaten zu finden sind. Die Stammdaten enthalten in der Regel alle notwendigen Metainformationen zu den Sensoren und deren Standorten. Die Rückgabe der reinen Sensorwerte erfolgt teilweise über andere Router, dies ist insbesondere bei der Rückgabe von Zeitreihen vergangener Messungen der Fall. Um auch die Abfrage dieser Daten zu ermöglichen, wird bei der Implementierung von EZSTA auch die zusätzliche Angabe einer URL für einzelne Klassen wie z.B. *Observations* unterstützt. Die URL kann optional im Mapping-Input definiert werden. Der Service prüft bei der Generierung der Klassen, ob eine separate URL vorhanden ist, und wenn ja, wird diese für die Abfrage der Daten verwendet. Der Mapping-Input wird nachfolgend detailliert beschrieben.

6.2.2. Struktur des Mapping-Inputs

Das Format des Mapping-Inputs orientiert sich an den Pflichtfeldern der jeweiligen STA-Klassen. Darüber hinaus sind zusätzliche Felder definiert, welche für die Abfrage der API notwendig sind. Darunter befinden sich z. B. die URL sowie optionale URL-Parameter sowie der Pfad zur eindeutigen Bezeichnung der sogenannten Universally Unique Identifier (UUID) eines Objektes. Für die einzelnen Klassen wird jeweils ein mapping-Objekt, welches die Parameter der jeweiligen STA-Klasse als Schlüssel sowie die Pfade in der API-Antwort als Wert beinhaltet, definiert. Die Pfade werden dabei als JSON-Path angegeben. JSON-Path ist eine von Stefan Gössner entwickelte Definition zur Beschreibung von Pfaden in JSON-Daten [199]. Nachfolgend wird ein Beispiel des Mapping-Inputs dargestellt:

Quellcode: Beispielhafter Mapping-Input für die Abfrage von Pegelständen. Teilweise wurden die Einträge zur besseren Darstellung vereinfacht.

```
{
  "UUID": "${'uuid'}",
  "url_options": {
    "method": "GET",
    "params": [
      {
        "key": "UUID",
        "value": "593647aa-9fea-43ec-a7d6-6476a76ae868"
      }
    ]
  },
  "url": "https://www.pegelonline.wsv.de/webservices/rest-api/<...>/{UUID}.json?
  ↪ includeTimeseries=true&includeCurrentMeasurement=true",
  "Location": {
    "mapping": {
      "location": {
        "type": "Point",
        "coordinates": [
          "${'longitude'}",
          "${'latitude'}"
        ]
      }
    }
  },
  "Thing": {
    "mapping": {
      "name": "${'longname'}",
      "properties": {
        "description": "${'agency'}",
      }
    }
  },
  ...
}
```

Neben der hier dargestellten Struktur umfasst das Mapping-Input auch die Definition weiterer Klassen. Das folgende Beispiel zeigt exemplarisch für eine Anfrage an die Pegelonline API den Aufbau und die Zusammensetzung der Mapping-Datei, der API-Antwort sowie der daraus mit EZSTA erzeugten Thing-Klasse. Zur besseren Übersicht wurde der Inhalt teilweise verkürzt dargestellt.



Abbildung 6.4: Auszugsweise Darstellung der API-Antwort (links), des Mapping-Inputs (rechts) sowie der durch EZSTA erzeugten Thing-Klasse für die Pegelonline-API für eine Pegelstation. (Eigene Darstellung)

Auf der linken Seite ist die API-Antwort auszugsweise dargestellt. Auf der rechten Seite sind die notwendigen Pfade also JSON-Path im Mapping-Input angegeben. Die Zusammenhänge sind beispielhaft farblich dargestellt, z. B. ist der Name des Thing-Objekts in der API-Antwort unter dem Pfad `longname` zu finden (orange Markierungen). EZSTA erzeugt aus der API-Antwort und dem Mapping-Input das dargestellte Thing-Objekt. Der Name wird durch den Wert der API-Antwort (`longname`) bestimmt. Ist eine benötigte Information in der API-Antwort nicht vorhanden, kann anstatt des JSON-Path auch eine Benutzereingabe erfolgen. Dies ist

kann zum Beispiel bei der Einheit der Messung der Fall sein, welche teilweise nicht in der API-Antwort mit angegeben wird aber aus zusätzlichen Dokumentationen der API ermittelt werden kann. Die Einheit (engl. Unit) kann dann zum Beispiel einfach wie folgt angegeben werden:

```
"unitOfMeasurement": {  
  "name": "Degree Celsius",  
  "symbol": "°C"  
}
```

6.3. Tools zur Verbreitung und Nutzung von EZSTA

EZSTA ist als konzeptionelle Lösung ein neuer Ansatz für die Verbreitung und Nutzung von APIs über eine STA-Schnittstelle. Um den Nutzerkreis von EZSTA zu erweitern, werden verschiedene Werkzeuge vorgeschlagen, welche die Nutzung vereinfachen sollen. Die zentralen Elemente sind dabei die Mapping-Inputs, die aufgrund ihrer Komplexität und des Aufwands bei ihrer Erstellung die größte Einstiegshürde darstellen können. Sie sind aber auch unverzichtbar und bereits erstellte Dateien können auch von anderen Nutzern verwendet werden. Ziel ist es daher, insbesondere die Erstellung und Verbreitung dieser Dateien zu fördern. Dies könnte auch die Nutzung durch Personen ohne Programmierkenntnisse ermöglichen.

6.3.1. EZSTA-Web: Unterstützung bei der Erstellung eines Mapping Inputs

Dieses Kapitel befasst sich mit der Entwicklung eines webbasierten Tools, mit dem Benutzer eine Datei für den EZSTA-Service erstellen können. Das Tool verwendet die OpenAPI-Spezifikation einer bestehenden API als Ausgangspunkt und führt den Benutzer durch eine Reihe von Fragen und Anweisungen, um die für die Erstellung des Mapping-Inputs erforderlichen Informationen zu sammeln. Das Tool erstellt die Datei dann automatisch im Hintergrund und bietet dem Benutzer die Möglichkeit, sie später anzupassen und zu verbessern. Der Vorteil dieses Werkzeugs besteht darin, dass es dem Benutzer hilft, schnell und einfach eine Mapping-Datei zu erstellen, indem es die meisten anspruchsvollen Aufgaben automatisch ausführt und dem Benutzer nur die notwendigen Schritte anzeigt. Zunächst wird entweder eine OpenAPI-Spezifikation hochgeladen oder die URL einer Spezifikation eingegeben (siehe Abbildung 6.5). Anschließend kann der Benutzer eine API-Route auswählen und entscheiden, ob das Mapping-Input anhand der in der Spezifikation definierten Informationen oder anhand einer Testabfrage erstellt werden soll. Nach der Auswahl des Benutzers wird die Abfrage anhand der bereitgestellten Informationen ausgeführt. Die folgende Abbildung zeigt als Mockup, wie die Abfrage aussehen kann. Die folgenden Fragen werden zu den einzelnen Klassen der STA gestellt und der Benutzer kann die am besten zutreffende Antwort mit Hilfe einer Dropdown-Liste auswählen. Bei einigen Fragen muss es auch möglich sein, mehrere Felder auszuwählen.

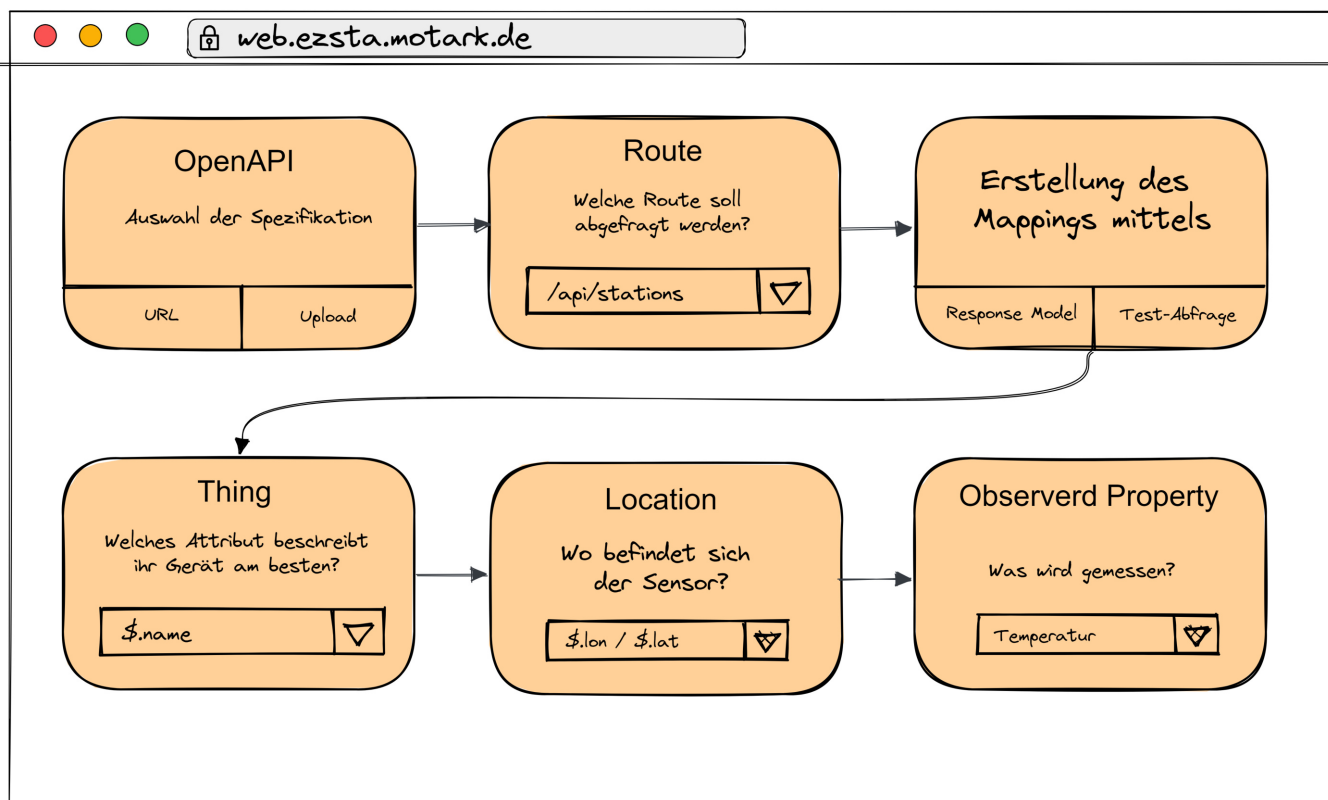


Abbildung 6.5: Mockup von EZSTA-Web. Beginnend mit einer Abfrage der OpenAPI-Spezifikation, gefolgt von einer Abfrage der erforderlichen Daten für den Mapping-Input. (Eigene Darstellung)

Neben den hier beispielhaft aufgeführten Fragen sind weitere Abfragen zu den anderen Klassen notwendig. Nach der Abfrage soll dem Benutzer der Mapping-Input angezeigt werden und es soll möglich sein, diesen mit weiteren Informationen anzureichern. Außerdem soll angezeigt werden, an welcher Stelle Informationen fehlen. Anschließend kann der Mapping-Input gespeichert oder heruntergeladen werden.

6.3.2. EZSTA-List und EZSTA-Search: Öffentliche Mapping-Sammlung

Wie bereits im Kapitel zu Open Data beschrieben, ist eine verständliche und zugängliche Dokumentation ein Schlüssel zur Verbreitung der Nutzung öffentlicher Daten. Daher ist es sinnvoll, eine Sammlung von Mapping-Inputs zu erstellen und öffentlich zugänglich zu machen. Die Sammlung sollte über eine übersichtliche und einfach zu bedienende Webseite durchsuchbar und abrufbar sein. Darüber hinaus ist es für die maschinelle Verarbeitung zusätzlich hilfreich, wenn die Daten über eine API zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht es anderen Anwendungen, automatisiert auf die aktuelle Liste der Mapping-Dateien zuzugreifen. Die Struktur der API ist in der folgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 6.2: Struktur der EZSTA-List-API für die Mapping-Dateien.

API-Endpoint	Beschreibung
/mappings	Liste aller Mapping-Dateien
/mappings/<mapping_id>.json	einzelne Mapping-Datei

Die Liste kann beispielsweise über ein Git-Repository verwaltet und ggf. direkt dort gehostet werden. Neue Mapping-Dateien könnten von der Community über Pull-Requests hinzugefügt werden. Die API könnte dann die neue Mapping-Datei automatisch hinzufügen und die Liste aktualisieren. Neben der Veröffentlichung der Listen soll auch eine Webseite erstellt werden, über die die Mapping-Dateien durchsucht und gefiltert werden können. Die Daten sollen aus der beschriebenen Liste von Mapping-Dateien stammen. Eine Filterung nach Server-URL oder Begriffen wird hier als geeignet angesehen.



Abbildung 6.6: Mockup von EZSTA-Search. (Eigene Darstellung)

Das vorliegende Mockup zeigt eine mögliche Gestaltung der Weboberfläche. Hierbei soll die Suche als zentrales Element im Vordergrund stehen. Dabei soll die Suche technisch so umgesetzt werden, dass auch Begriffe und Ergebnisse angezeigt werden, die dem Suchbegriff ähnlich sind, aber nicht direkt mit ihm übereinstimmen. Die Ergebnisse sollen auch die Informationen zur API übersichtlich darstellen, dazu gehören eine Kurzbeschreibung sowie zwei Links, ein Link zum Mapping-Input, der dann verwendet werden kann und ein weiterer Link zur eigentlichen API.

6.4. Zusammenfassung des EZSTA-Konzeptes

Die Nutzung heterogener Datenquellen zur Anreicherung des Lagebildes ist für den Katastrophenschutz und die Einsatzkräfte von entscheidender Bedeutung. Wichtig ist, dass hierfür einfach zu bedienende IT-Systeme zur Verfügung stehen. Allerdings ist das Expertenwissen innerhalb der Einsatzkräfte nicht immer vorhanden, so dass es wichtig ist, auch kleineren Akteuren eine Lösung zur Anbindung bereitzustellen. Der EZSTA-Service bietet hier eine Lösung, indem er eine Schnittstelle bereitstellt, die mittels Mapping und ohne fortgeschrittene Programmierkenntnisse eine Anbindung ermöglicht. Der von EZSTA verwendete einheitliche Standard STA kann auch von anderen Anwendungen verwendet werden, was den Datenaustausch erleichtert. Die in diesem Kapitel vorgestellten Hilfsmittel zur Verwendung von EZSTA können dabei die Integration und Verwendung des Konzeptes vereinfachen. Mit EZSTA-Web beispielsweise können die Benutzer über das Web in Form eines Fragebogens ein Mapping erstellen, das ihr Verständnis der Situation verbessert, ohne dass sie über fortgeschrittene Kenntnisse der zu integrierenden Schnittstelle verfügen müssen.

Die im Rahmen des Konzeptes durchgeführten Schritte hinsichtlich des Mappings sowie der Einrichtung von EZSTA in der von den Einsatzkräften verwendeten Software können bereits vor dem Eintreten einer Katastrophe erfolgen. Es wird empfohlen, dass sich die Einsatzkräfte regelmäßig anhand der Listen über weitere Schnittstellen in ihrer Region informieren und diese mittels EZSTA in ihre jeweilige Software integrieren. Die Integration kann auch während eines Einsatzes erfolgen, wenn beispielsweise zusätzliche Einheiten, z. B. ähnliche Systeme wie der mobile Pegeltrupp, eingesetzt werden und eine Anbindung noch nicht erfolgt ist. Auch hier kann EZSTA-Web zur effizienten und schnellen Erstellung des Mapping-Inputs genutzt werden.

7. Implementierung von MOTARK und EZSTA zur Unterstützung von Einsatzkräften durch mobil-autarkes Monitoring und Open Data

In diesem Kapitel wird die Implementierung eines mobil-autarken Monitoringsystems namens MOTARK zur Unterstützung von Einsatzkräften vorgestellt. Es nutzt die Technologie des Internet der Dinge (IoT) und die Verwendung von Open Data. Zunächst wird der verwendete Softwarestack vorgestellt, gefolgt von einer Beschreibung des Basic-Sensor-Kits, das als Grundmodul für die Datenerfassung dient. Es folgt die Beschreibung der Implementierung von EZSTA, einem Service zur Verarbeitung und Vereinheitlichung von APIs, sowie die Zusammenführung von EZSTA und MOTARK. Ziel ist es, ein umfassendes und effektives Monitoringsystem zu schaffen, das mit selbst erhobenen und öffentlich zugänglichen Daten die Einsatzkräfte in die Lage versetzt, schnell und zielgerichtet zu handeln. Aufbauend auf dem im Kapitel 5 vorgestellten Konzept werden im Folgenden konkrete Soft- und Hardwarekomponenten ausgewählt. Bei der Auswahl der Software ist Open-Source-Software zu bevorzugen. Die Hardwarekomponenten sollen aus bereits am Markt etablierten und frei verfügbaren Komponenten bestehen. Durch diese Auswahlkriterien wird die Abhängigkeit von einem Anbieter reduziert und gleichzeitig der Umstieg auf alternative Komponenten erleichtert. Es ist zudem zu beachten, dass die Auswahl und Zusammenstellung der Sensorik im Rahmen dieser Arbeit nur beispielhaft durchgeführt wurden. Das Sensorkit ist als Basismodul zu verstehen, an die sich verschiedene Arten von Sensoren anschließen lassen.

7.1. Auswahl der Softwarekomponenten

In diesem Kapitel werden die ausgewählten Softwarekomponenten beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf offener und freier Software liegt. Das gesamte Softwaresystem soll über Konfigurationsdateien installiert und administriert werden können. Dazu wird im Rahmen der prototypischen Umsetzung auf die Verwendung von Docker zurückgegriffen. Docker ist eine Plattform zur Erstellung, Verwaltung und Bereitstellung von Containern. Ein Container ist eine eigenständige und in sich geschlossene Einheit, die Anwendungen und deren Abhängigkeiten enthält. Durch die Verwendung von Containern können Anwendungen in einer isolierten Umgebung ausgeführt werden, die von anderen Anwendungen auf demselben System unabhängig ist. Docker verwendet Images, die als Vorlagen für die Erstellung von Containern dienen. Ein Image enthält den Quellcode einer Anwendung und alle Abhängigkeiten, die für die Ausführung notwendig sind. Mit Hilfe dieser Images

können einzelne Komponenten eines Softwaresystems isoliert in einer eigenen virtualisierten Umgebung betrieben werden, ohne dass es zu Konflikten mit anderen Anwendungen auf demselben System kommt. Über ein gemeinsames Netzwerk können die Komponenten dennoch miteinander kommunizieren. Dadurch lassen sich Anwendungen und Systeme isolieren, verteilen und skalieren. Durch die Verwendung von Docker-Containern können Anwendungen einfacher auf verschiedenen Systemen ausgeführt werden, ohne dass es zu Inkompatibilitäten mit der Systemumgebung kommt. In Konfigurationsdateien werden die zu verwendenden Images sowie weitere Parameter wie die Freigabe von Netzwerkports oder Zugriffsrechte oder Partitionen des Hostsystems definiert. [58]

Reverse Proxy: Traefik

Als Reverse Proxy wird das Open-Source-Projekt Traefik verwendet. Dieses Projekt wurde insbesondere wegen seiner einfachen Bedienung und Konfiguration ausgewählt. Die Einstellungen für den Reverse Proxy können über sogenannte Labels (dt. Beschreibung) in den Konfigurationsdateien der einzelnen Komponenten vorgenommen werden [216]. Hier werden unter anderem Informationen zum Hostnamen, Zugriff von Ports und zu Zwischenschichten wie Sicherheitsmaßnahmen angegeben.

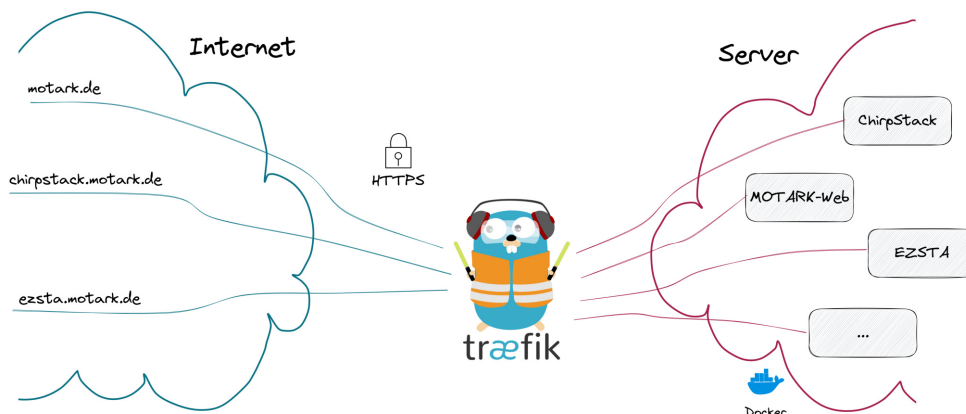


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der Traefik-Architektur. (Eigene Darstellung nach [216])

Die allgemeinen Einstellungen von Traefik erfolgen ebenfalls über eine Konfigurationsdatei, die im YAML-Format vorliegt. Zudem wird das System als eigenen Docker-Container betrieben.

LoRaWAN-Server: ChirpStack

Im Bereich der Server gibt es, wie bereits beschrieben, verschiedene Open Source Systeme. Insbesondere die beiden Projekte ChirpStack und The Things Stack werden aktiv weiterentwickelt und kommen aufgrund der vorhandenen Integrationen und der großen Community in Frage. Im Rahmen dieser Arbeit wird ChirpStack als LoRaWAN-Server ausgewählt. Dieses System bietet im Gegensatz zu The Things Stack keine kommerzielle Version, d. h. alle Funktionalitäten sind in der Open Source Variante enthalten. Die benötigten Komponenten von ChirpStack stehen als Docker-Container zur Verfügung und können auf allen gängigen Betriebssystemen

eingesetzt werden, auf denen Docker oder eine Docker-kompatible Containersoftware installiert ist. Die Konfiguration des Systems erfolgt über verschiedene Konfigurationsdateien. In der Version 3 des ChirpStack-Projekts sind der Netzwerk- und der Applikationsserver noch unabhängig und getrennt voneinander verfügbar. In der Version 4, die auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, wurden beide Komponenten zu einem Dienst zusammengefasst. Dies erleichtert die Installation und den Betrieb des Backends, da insbesondere Kommunikationsprobleme zwischen den beiden Serverkomponenten vermieden werden [160]. Außerdem reduziert sich der Konfigurationsaufwand. Neben dem zusammengefassten Netzwerk- und Applikationsserver, der im Folgenden nur als ChirpStack bezeichnet wird, sind weitere Komponenten für den Betrieb des Backends notwendig wie zum Beispiel die Gateway Bridge (siehe Abbildung 7.2).

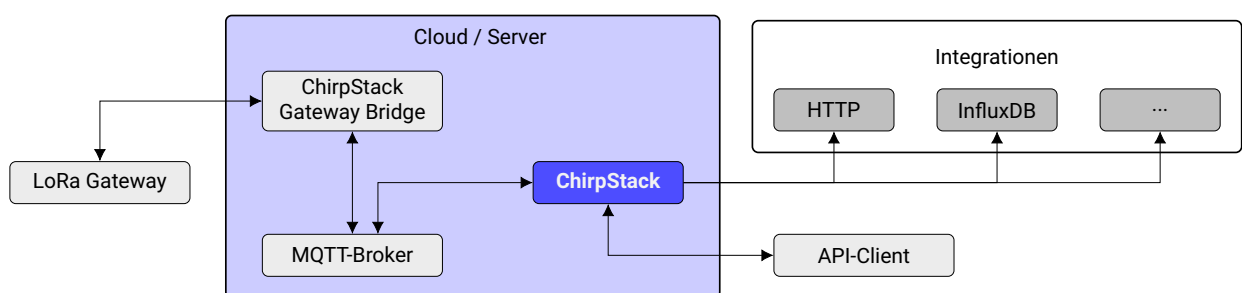


Abbildung 7.2: Darstellung der Komponenten des ChirpStack-Systems. (Eigene Darstellung nach [160])

Die Übertragung der Daten vom Gateway zum Backend erfolgt über die ChirpStack Gateway Bridge. Die Bridge sendet dann die Inhalte über den MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) - Broker an das Backend. Der Broker ist die zentrale Einheit für die Übertragung von Nachrichten über das MQTT-Protokoll innerhalb des Servers. Neben diesen beiden Komponenten sind noch die Integrationen zu nennen, die die Daten vom Backend entsprechend an weitere Applikationen weiterleiten. Im Rahmen dieser Arbeit werden beispielsweise die HTTP-Integration sowie die InfluxDB-Integration verwendet. Der Zugriff auf die gerätespezifischen Daten kann über die integrierte gRPC-API¹⁸ oder über eine REST-API erfolgen [160]. Über die Schnittstellen können neben den Informationen der Geräte auch die Nachrichten (sogenannte Downlinks) an die Sensorkits versendet werden. Die APIs werden dabei mit einem Authentifizierungstoken abgesichert. Ein Token kann in der Benutzeroberfläche von ChirpStack generiert und anschließend verwendet werden. Die Benutzeroberfläche von ChirpStack bietet auch die Möglichkeit, Geräte und Gateways anzulegen und zu verwalten. Zusätzlich kann der Status der Geräte und Gateways angezeigt werden. Insgesamt ist die Anzeige jedoch auf die Darstellung gerätespezifischer Informationen ausgerichtet und dient somit nicht der Darstellung von Sensorwerten für Einsatzkräfte oder die Bevölkerung. Vielmehr wird das Tool von der dem MOTARK-System zugeordneten technischen Einheit zur Einstellung und Überprüfung der Technik verwendet. Das MOTARK-Basic-Kit ist bereits vollständig konfiguriert und ohne weitere Einstellungen einsatzbereit. Änderungen sind daher derzeit nur bei der Neuinstallation von Geräten oder bei LoRaWAN-spezifischen Einstellungen erforderlich.

¹⁸gRPC ist ein modernes, quelloffenes und hochleistungsfähiges Remote Procedure Call (RPC) Framework. <https://grpc.io/>.

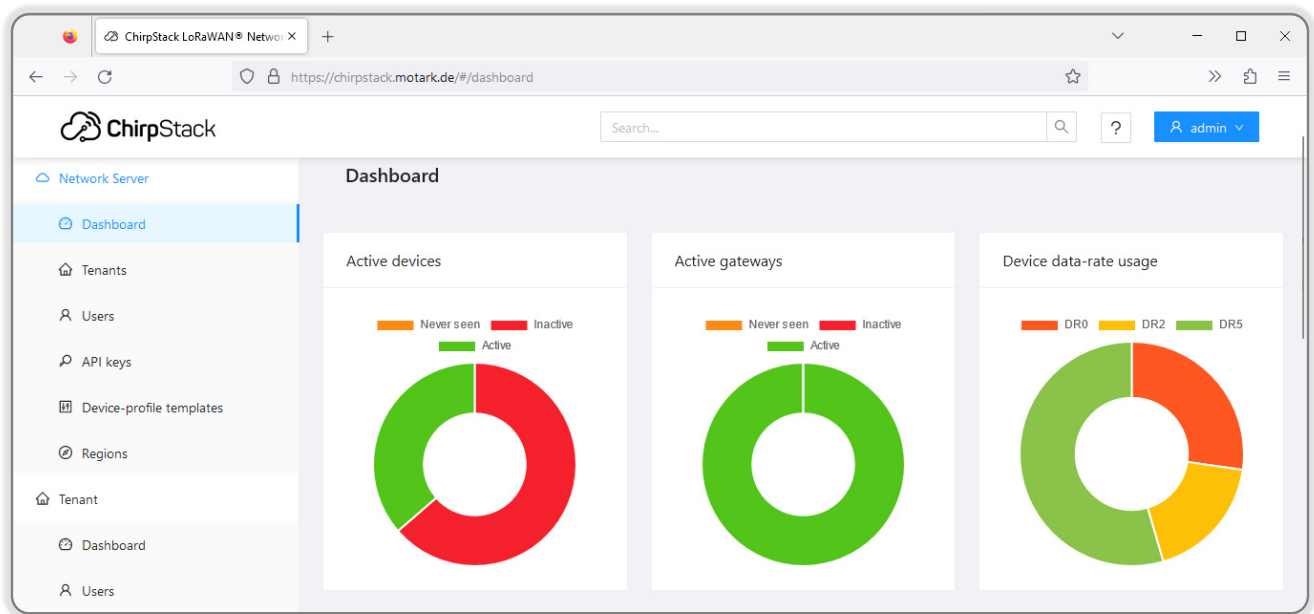


Abbildung 7.3: Screenshot der Benutzeroberfläche von ChirpStack.

Integrationen des ChirpStack-Backends

Das ChirpStack-Backend bietet eine API sowie eine Reihe von Schnittstellen, die eine Integration in bestehende Systeme oder eine Erweiterung des Systems ermöglichen. Für die Speicherung der Daten in einer *Time-Series-Datenbank* wird die offizielle InfluxDB-Integration verwendet. Mit Hilfe dieser Integration werden die Daten automatisch formatiert und in die Tabelle in der InfluxDB eingefügt, die in der Integration angegeben ist, wenn die Daten vom Applikationsserver empfangen werden. Von dort können die Daten direkt oder z. B. über das Dashboard-Tool Grafana ausgelesen und dargestellt werden. Im Konzept wurde die Anforderung einer STA-konformen Schnittstelle zur interoperablen Anbindung weiterer Anwendungen definiert. Für die Anbindung des FROST-Servers an ChirpStack existiert keine offizielle Integration. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine eigene Integration entwickelt.

SensorThings API (STA) Server: FROST-Server

Der FROST-Server wurde als STA-Server ausgewählt, da es sich um eine aktuelle Entwicklung handelt und eine Open-Source-Lizenz vorliegt. Durch den erfolgreichen Einsatz in anderen Forschungsprojekten konnte seine Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit nachgewiesen werden [59], [68], [73], [180]. Darüber hinaus ist der FROST-Server OGC-zertifiziert, was die Kompatibilität mit anderen Systemen und die Einhaltung des Standards gewährleistet. Zudem ist es durch das mitgelieferte Docker-Image einfach in den bestehenden Softwarestack zu integrieren. Neben dem FROST Server wird zusätzlich eine PostGIS-Datenbank für die Datenspeicherung verwendet. In dieser werden die Daten gespeichert, die über den STA-Server abgefragt werden können. FROST verfügt außer einer rudimentären Übersichtsseite zur testweisen Abfrage der Daten über keine Benutzeroberfläche. Die Darstellung der Daten wird daher hauptsächlich in einem der unterstützten

Programme erfolgen. Über Webabfragen lassen sich die Daten als JSON auch im Browser anzeigen. Der Übertragung der Daten vom LoRaWAN-Server (ChirpStack) über die STA in die PostGIS-Datenbank soll dabei mithilfe einer Integration automatisch erfolgen. Da für diesen Anwendungsfall keine Integration von ChirpStack angeboten wird, wurde der nachfolgend beschriebene Service mit dem Namen ChirpSTA entwickelt.

ChirpStack-STA-Integration: ChirpSTA

Wie beschrieben ist es Ziel des Konzeptes, die Daten auch über eine STA-Schnittstelle zur Verfügung zu stellen. Um die Daten automatisch vom LoRaWAN-Server zum STA-Server zu übertragen, gibt es zum Zeitpunkt der Entwicklung keine offizielle Integration. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine eigene Integration entwickelt. Diese wird im Folgenden als ChirpSTA bezeichnet. Der Service basiert auf einem Python-Server, der die jeweiligen *Uplinks* (Dateneingänge) der einzelnen Sensoren per HTTP von ChirpSTA empfängt und anschließend auswertet. Hierzu wird die HTTP-Integration von ChirpSTA verwendet. Nach der Analyse der Daten werden diese per STA in die Datenbank des FROST-Servers eingefügt. Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Vorgehensweise.

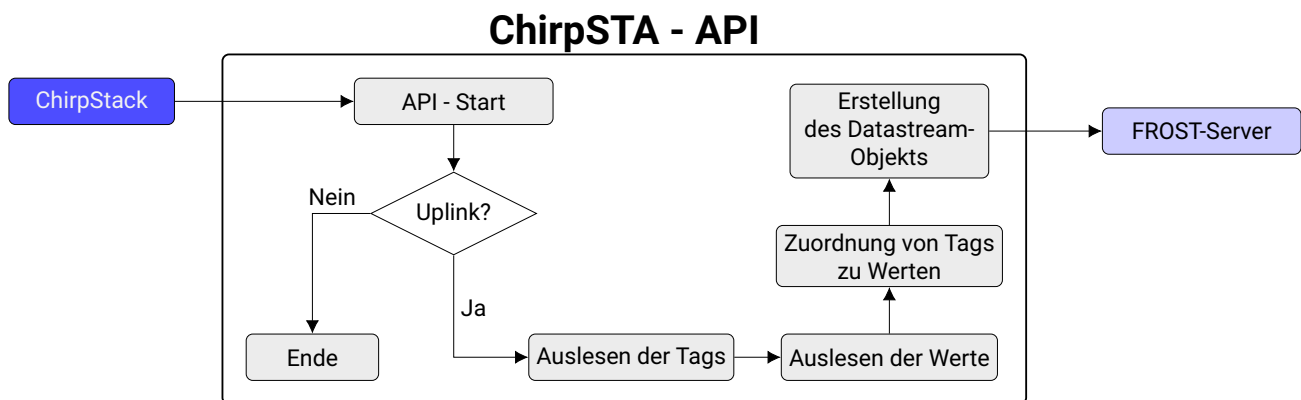


Abbildung 7.4: Ablauf des ChirpSTA-Services. (Eigene Darstellung)

Die Anwendung ist als API konzipiert und verfügt derzeit über eine einzige Route. Um die HTTP-Integration in ChirpStack zu nutzen, muss diese Route inklusive des Containernamens als URL angegeben werden. Anschließend werden die Daten per HTTP-Post-Request vom LoRaWAN-Backend an ChirpSTA als JSON übertragen. Die Integration überträgt dabei alle vom Gerät empfangenen und zugewiesenen Nachrichten, dazu gehören z. B. auch *Join*-Nachrichten. Da diese jedoch nicht über ChirpSTA in die Datenbank übertragen werden sollen, wird die Nachricht zunächst analysiert. Ist die Nachricht kein *Uplink*, wird kein Eintrag erzeugt und die Nachricht verworfen. Ist die Nachricht ein *Uplink*, wird die Payload des Ereignisses ausgelesen. Der Payload enthält die Messwerte und den Zeitpunkt der Messung für jeden Sensor. Wie in den Grundlagen zu STA beschrieben, werden diese Informationen als Observation gespeichert. Eine Observation muss jedoch einem Datastream zugeordnet werden, in dem spezifiziert ist, für welche Sensoren, in welcher Einheit und was gemessen wird. Die Zuordnung zum Datastream erfolgt über sogenannte Tags, die in ChirpStack für ein Gerät angelegt werden. In diesen Tags wird die ID des jeweiligen Datastreams gespeichert. ChirpSTA liest diese Tags

zusammen mit den Sensorwerten aus und ordnet die Tags den einzelnen Sensoren zu. Anschließend wird für jeden Messwert eine Observation erzeugt und über den STA-Server in die Datenbank eingefügt.

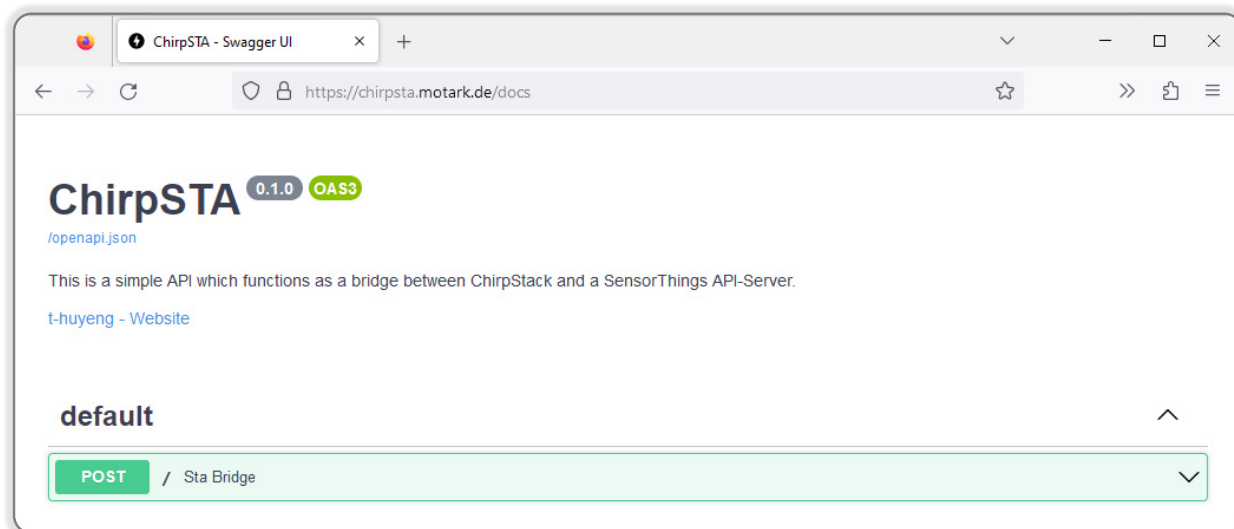


Abbildung 7.5: Screenshot der ChirpSTA-API-Dokumentation.

Der API-Server wurde in Python mit der Bibliothek FastAPI [185] implementiert. FastAPI erzeugt aus dem geschriebenen Quellcode der Schnittstelle automatisch eine API-Spezifikation im OpenAPI-Format (siehe Abbildung 7.5). Im Rahmen der prototypischen Entwicklung ist die API nicht durch einen Token geschützt, sondern nur im eigenen Netzwerk des Servers und von außen nicht erreichbar. Somit kann nur der ChirpStack Server bzw. die Integration die API ansprechen und Daten hinzufügen. Mit Hilfe dieser Implementierung wurde eine Anbindung an einen STA-Server über die HTTP-Integration von ChirpStack erfolgreich umgesetzt.

Time-Series-Datenbank: InfluxDB

Neben der Speicherung der Daten auf dem STA-Server erfolgt eine zusätzliche Speicherung in einer *Time-Series-Datenbank*. Hier wurde die InfluxDB gewählt. Dies ermöglicht neben der Abfrage über die STA auch die Abfrage bzw. Speicherung der Daten in einem für Monitoringdaten üblichen Format. Bei der Verwendung von Visualisierungstools wie z. B. Grafana wird InfluxDB vollständig unterstützt. Die Übernahme der Daten aus dem LoRaWAN-Backend ChirpStack erfolgt automatisch über eine Integration. Die Daten werden in die in der Integration angegebene Tabelle eingefügt und können anschließend über den Applikationsnamen oder den Gerätenamen gefunden werden. Für jeden einzelnen Messparameter wird eine eigene Spalte angelegt. Dazu wurden die Decoder in ChirpStack entsprechend angepasst. Für die InfluxDB existieren ebenfalls Docker-Images, welche direkt verwendet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird InfluxDB in der Version 1.6 verwendet [113].

Dashboard: Grafana

Zur Visualisierung der Daten wird Grafana verwendet. Dieses Tool bietet eine große Auswahl an Visualisierungsmöglichkeiten. Grafana unterstützt offiziell InfluxDB als Datenquelle und durch die Installation eines Plugins können auch STA-konforme Schnittstellen eingebunden werden [75], [81]. Die Installation bzw. das Deployment ist auch über ein Docker-Image möglich, so dass eine einfache Integration in das Gesamtsystem gegeben ist. Neben der Darstellung der Sensordaten kann Grafana auch zur Überwachung des Gesamtsystems verwendet werden. So können beispielsweise die Zugriffszahlen auf einzelne Komponenten oder die Auslastung des Systems in einem Dashboard dargestellt werden. Hierzu können unter anderem die Logs des Reverse Proxy verwendet. Dadurch kann ein langfristiger Betrieb sowie eine einfache Wartung des Systems sichergestellt werden.

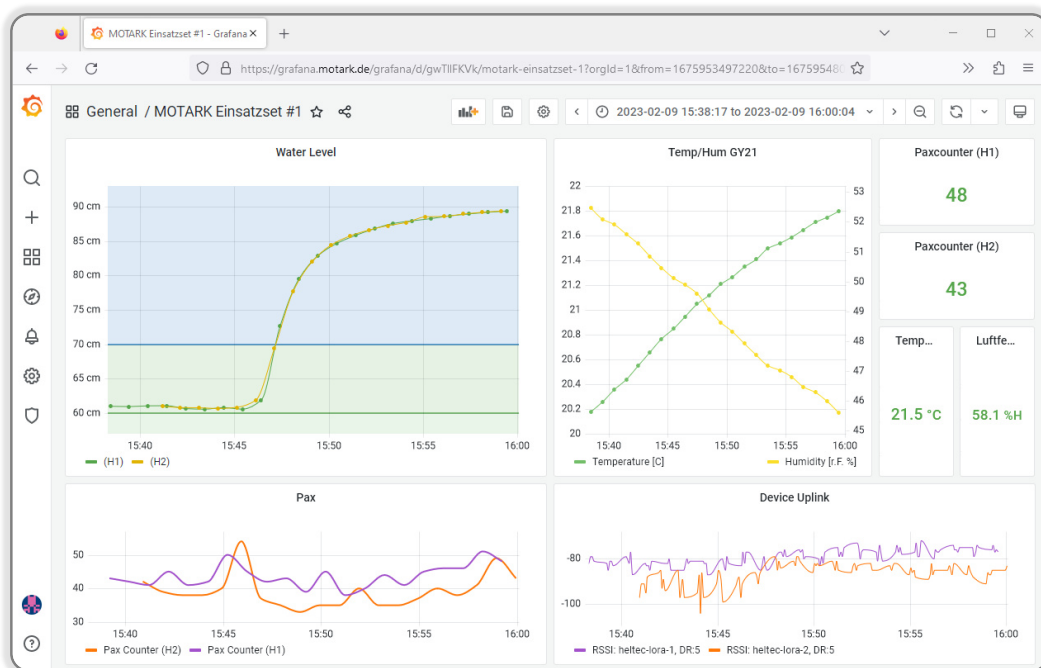


Abbildung 7.6: Beispielhaftes Layout für ein Grafana-Dashboard. Das Dashboard zeigt die Wasserstände von zwei Sensoren sowie weitere Messparameter (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, erfasste Personen).

Das hier gezeigte Beispiel-Dashboard (Abbildung 7.6) zeigt die Daten von zwei MOTARK-Sensoren während einer Testmessung. Im Mittelpunkt steht der Wasserstand, der graphisch als Liniendiagramm dargestellt wird. Neben dem Wasserstand werden die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Anzahl der erfassten Personen angezeigt. Grafana kann aufgrund der modularen Komponenten sehr einfach an die Bedürfnisse der Einsatzkräfte angepasst werden. Zudem ist die webbasierte Anwendung mit gängigen Internetbrowsern auf verschiedenen Systemen und ohne spezielle Schulung nutzbar. Im Rahmen der prototypischen Entwicklung werden weitere Daten zur Übertragungsqualität des Sensormoduls sowie der aktuelle Batteriestatus in Grafana angezeigt. Diese Daten können den für die MOTARK-Sets eingeteilten Einsatzkräften einen Überblick über den Zustand der Sensorkits geben.

Benachrichtigungen und Warnmeldungen für Einsatzkräfte

Neben der Visualisierung von Daten verfügt Grafana über weitere für den Anwendungsfall relevante Funktionen, wie z. B. die Möglichkeit, Benachrichtigungen zu versenden, wenn bestimmte Grenzwerte überschritten werden. Wenn Grenzwerte überschritten werden oder sich Parameter durch äußere Einflüsse schnell ändern können die Einsatzkräfte automatisch über die Situation informiert werden. Bei Grafana kann dies mit sogenannten *Alerts* umgesetzt werden, die Benachrichtigungen versenden können. Dazu werden für einen Wert bestimmte Regeln definiert. Sobald diese Regel ausgelöst wird, wird eine Benachrichtigung über den ausgewählten Service versendet. Als Dienste können eine Vielzahl von Kommunikationsmitteln ausgewählt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde prototypisch die Benachrichtigung per E-Mail und einem Messenger (Telegram) verwendet. Neben der Warnmeldung enthält die Telegram-Nachricht Links zum Dashboard. Über diese kann der Nutzer direkt auf die aufgezeichneten Daten zugreifen. Das THW nutzt einen eigenen Messenger-Dienst *hermine@THW*, der für die Kommunikation zwischen den Kräften eingesetzt wird. Über diesen wurden beispielsweise auch die Helferinnen und Helfer bei der Hochwasserkatastrophe im Juli 2021 teilweise koordiniert [209]. Eine Anbindung an dieses System ist in Zukunft möglich. Insgesamt sind automatisierte Warnmeldungen neben dem Dashboard eine wichtige Ergänzung, um vor Ort schnell auf Veränderungen aufmerksam gemacht zu werden und entsprechend reagieren zu können. Um sicherzustellen, dass die Warnmeldung beim Empfänger angekommen ist und auch gelesen wird, ist eine Bestätigung erforderlich. Wird keine Bestätigung vom Empfänger zurückgesendet, muss automatisch die nächste Stufe der Einsatzleitung oder weitere Einsatzkräfte informiert werden. Um diese Prozessschritte abbilden zu können, sind weitere Entwicklungen und ggf. ein weiterer Dienst zur Verwaltung von Alarmierungen und Bestätigungen notwendig. Zur Darstellung der Daten wurde neben Grafana eine weitere webbasierte Darstellung für die Messdaten sowie die Steuerung der Sensorkits implementiert. Diese Entwicklung wird im Folgenden als MOTARK-Web bezeichnet.

Infoportal: MOTARK-Web

Neben den sehr umfangreichen Möglichkeiten, die das Dashboard-Tool Grafana bietet, wurde zusätzlich ein Informationsportal mit Administrationsfunktionalitäten prototypisch entwickelt. Diese webbasierte Anwendung ermöglicht einerseits den Einsatzkräften die Lage vor Ort mittels einfacher Tabellen und Grafiken zu erkennen, andererseits sind auch Übersichtsseiten zur Information der Bevölkerung vorgesehen. Die Seiten für die Einsatzkräfte sind durch ein Login geschützt. Technisch wurde MOTARK-Web als NuxtJS [157] Projekt mit dem Vuetify [219] UI Framework entwickelt. Vuetify basiert auf Vue und ermöglicht die einheitliche Erstellung von Frontend-Komponenten sowie die Erstellung von responsiven Webseiten, die sich an die Bildschirmgröße des Endgerätes anpassen. Damit ist die Anwendung einerseits für Einsatzkräfte an PC-Arbeitsplätzen, andererseits aber auch für die Nutzung auf mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets geeignet. Die Startseite von MOTARK-Web enthält für eingeloggte Benutzer eine Übersicht über die einzelnen Softwarekomponenten von MOTARK (siehe Abbildung 7.7). Dazu gehören unter anderem externe Links zu Grafana, ChirpStack und den EZSTA-Anwendungen. Außerdem sind Links zu MOTARK-Web Seiten wie der Sensorübersicht und der Kartendarstellung vorhanden.

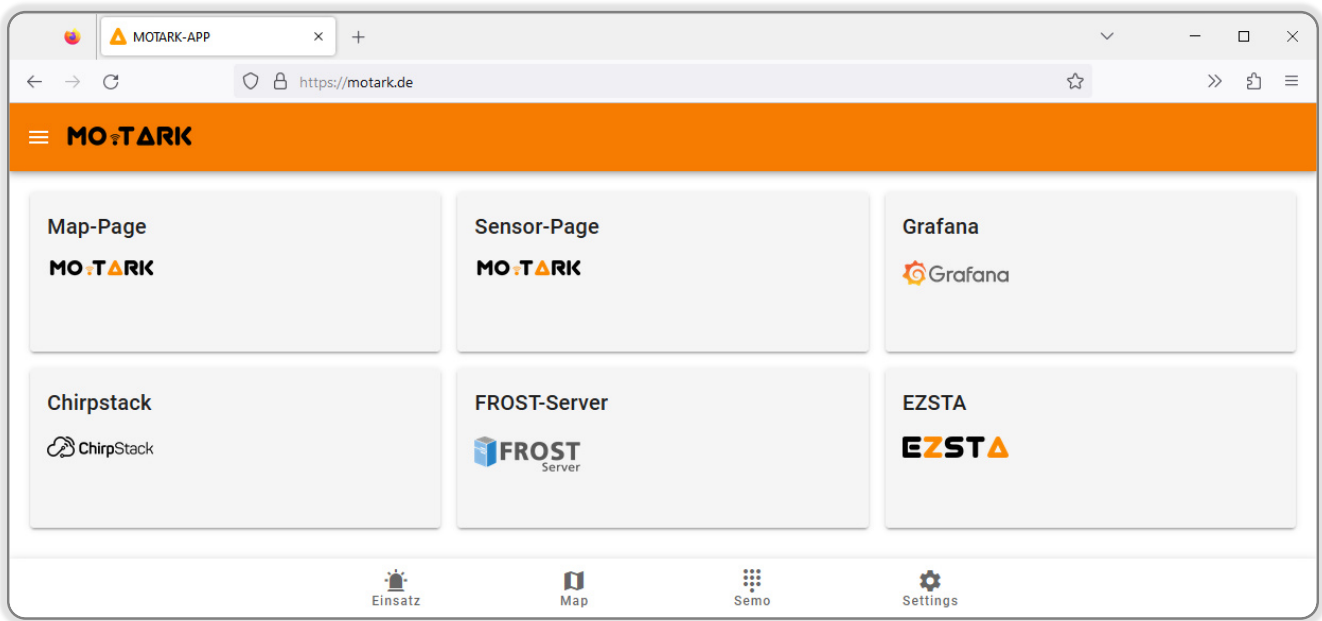


Abbildung 7.7: Screenshot der Startseite von MOTARK-Web.

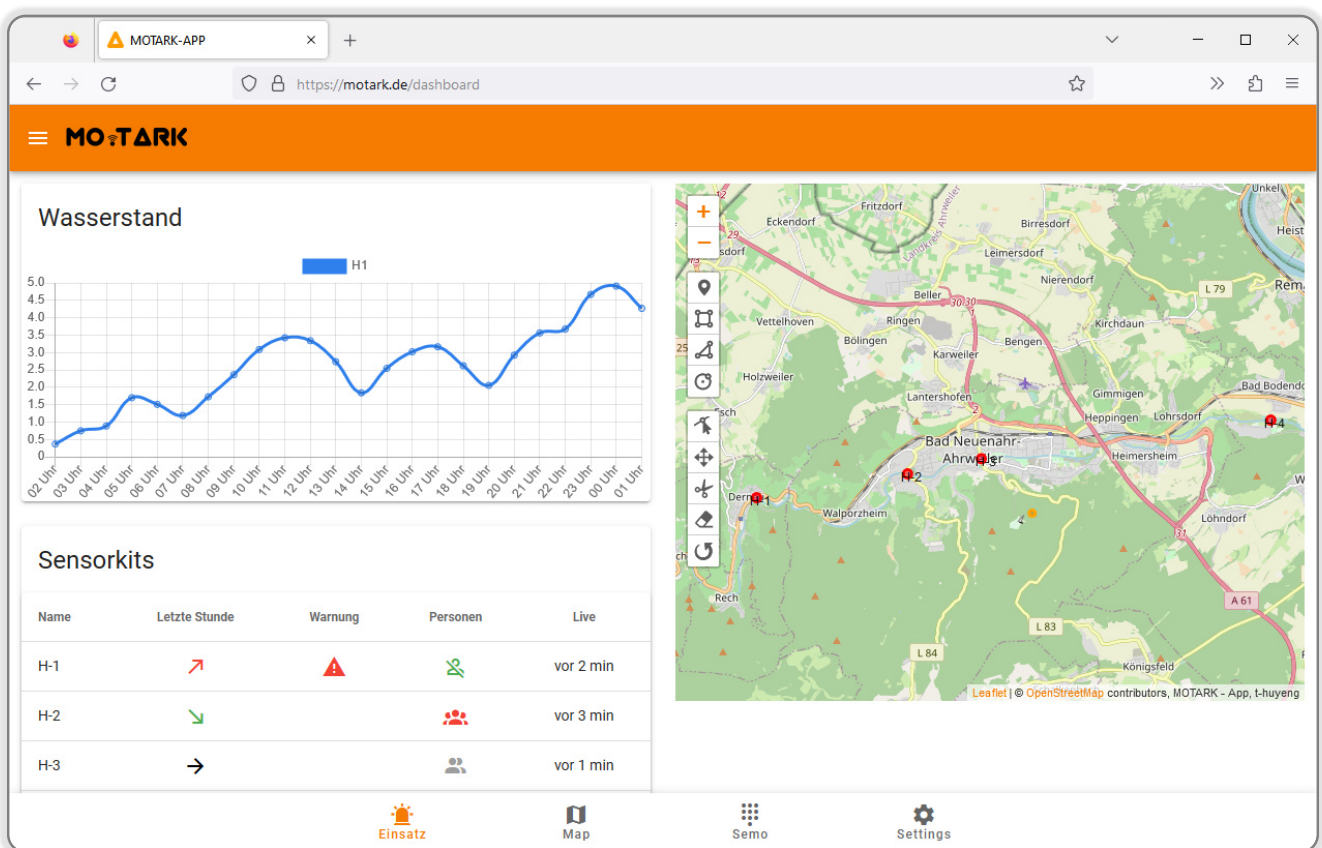


Abbildung 7.8: Darstellung der Kartenansicht von MOTARK-Web. Die Platzierung der Sensoren sowie die Sensorwerte wurden für diese Bildaufnahme simuliert.

Die Startseite für nicht eingeloggte Benutzer enthält nur ein Infofeld sowie den Link zur Kartenübersicht. Diese zeigt die Position der Sensorkits sowie deren letzte Messwerte. Damit kann sich die Öffentlichkeit einen Überblick über die Situation vor Ort verschaffen. Auch für die Einsatzkräfte ist diese Übersicht eine wichtige Ergänzung zum Dashboard in Grafana. So können die Einsatzkräfte schnell erkennen, wo sich die Sensorkits befinden und ob diese noch aktiv sind. In der Kartenansicht stehen den Einsatzkräften zusätzlich Informationen über die erfassten Personengruppen zur Verfügung. Außerdem kann die Position von Einsatzkräften oder Einsatzfahrzeugen, die mit einem GPS-Sensor ausgestattet sind, angezeigt werden.

Neben der Kartenansicht steht den Einsatzkräften auch eine Administrationsseite für die Sensorkits zur Verfügung (siehe Abbildung 7.9). Hier werden detaillierte Informationen zu den einzelnen Kits angezeigt. Darüber hinaus können die Einsatzkräfte Einstellungen an den Geräten vornehmen. Dazu gehören unter anderem das Ein- und Ausschalten einzelner Sensoren, die Änderung der Messintervalle sowie die Einstellung der Zeit im Energiesparmodus zwischen den Messintervallen. Diese Einstellungen haben einen großen Einfluss auf die Batterielebensdauer.

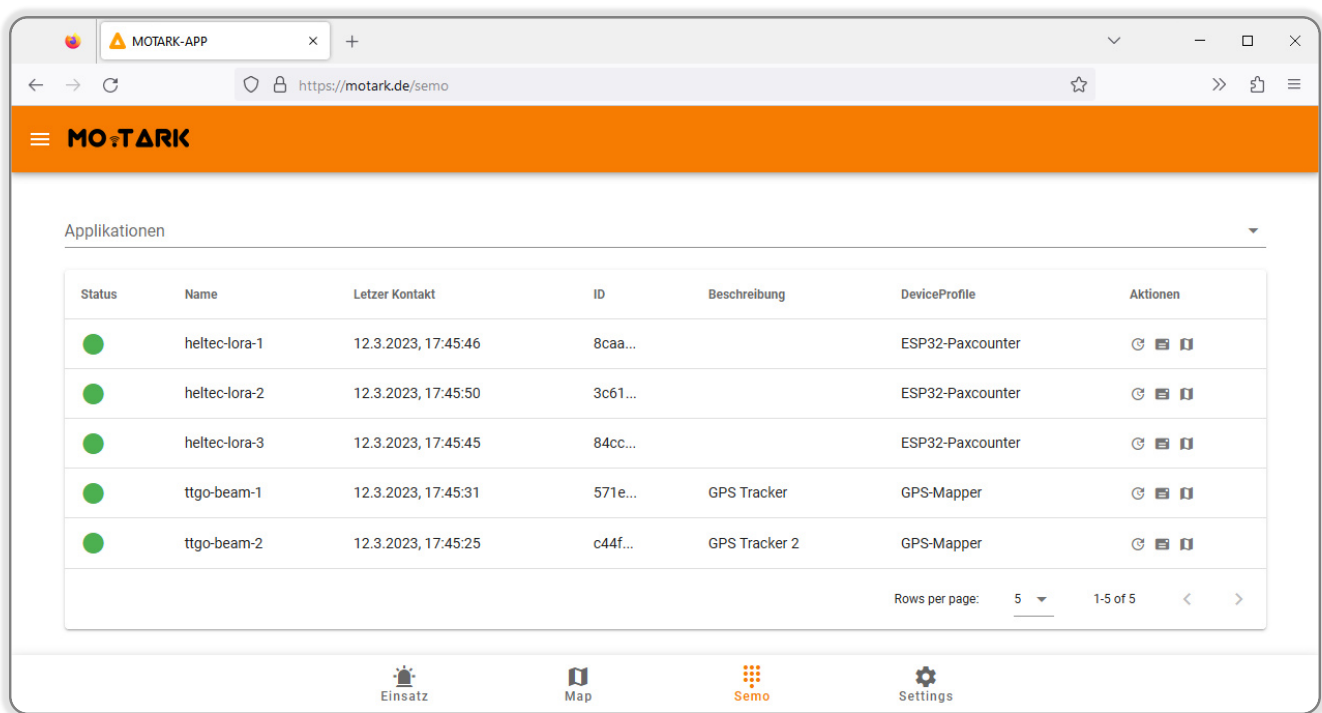


Abbildung 7.9: Darstellung der Geräteübersicht für einen MOTARK-Einsatz-Koffer in MOTARK-Web.

Die hier prototypisch dargestellte Webanwendung fragt die gerätespezifischen Daten über die ChirpStack REST-API ab und sendet über diese auch die Downlinks an die Geräte. Die Sensorwerte werden von der InfluxDB abgefragt. Mit Hilfe dieser übersichtlich gestalteten Anwendung ist eine schnelle und einfache Lagebeurteilung sowie die Steuerung der Sensorkits möglich.

Zusammenfassung und Deployment der Softwarekomponenten

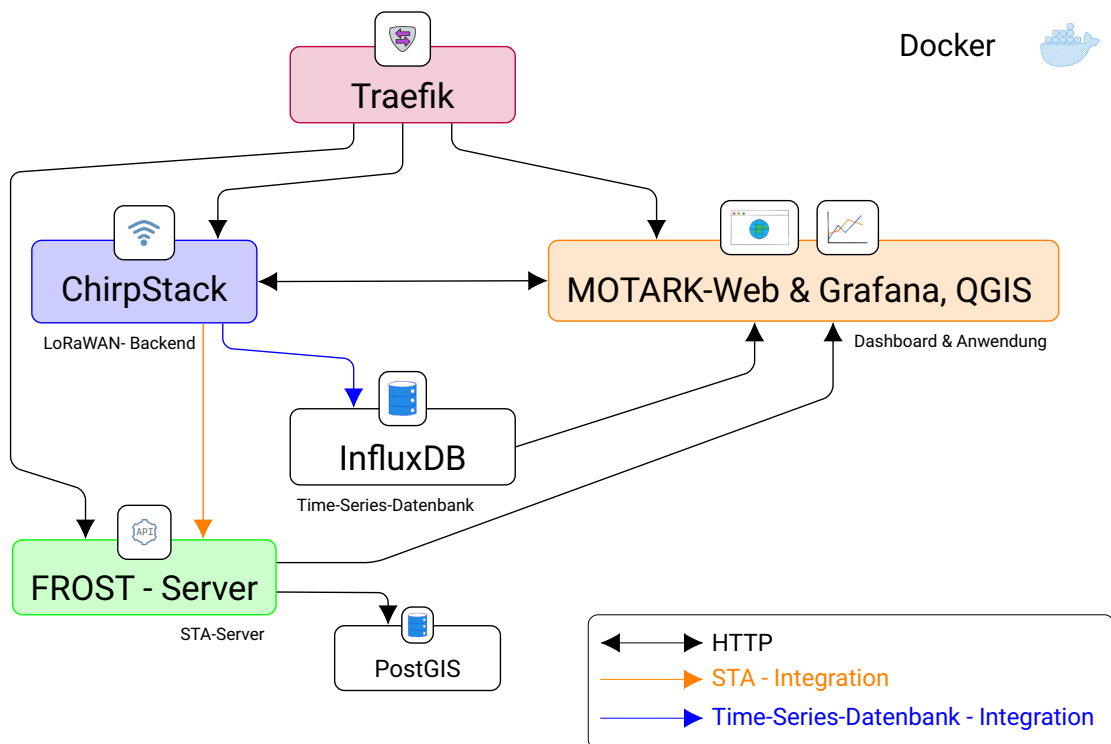


Abbildung 7.10: Darstellung der ausgewählten Softwarekomponenten für das MOTARK-System.
(Eigene Darstellung)

Die Abbildung 7.10 zeigt die im Rahmen der prototypischen Entwicklung ausgewählten Softwarekomponenten sowie deren Interaktion untereinander. Besonders hervorzuheben ist die STA-ChirpStack Integration, die ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Als zentrale Verwaltungseinheit können die Einsatzkräfte über MOTARK-Web alle wichtigen Belange einstellen und einsehen. Die beschriebenen Systeme sind wie beschrieben mit Hilfe von Docker virtualisiert und kommunizieren intern über ein eigenes Netzwerk miteinander. Der Zugriff von außerhalb des Netzwerkes z. B. über eine externe Internetverbindung erfolgt über Traefik.

7.2. Auswahl der Hardware für das MOTARK-Einsatz-Set

Das Einsatzset besteht aus einer Basisstation und mehreren MOTARK-Basic-Kits, die ebenfalls in einem robusten Schutzkoffer untergebracht sind. Das gesamte System ist so konzipiert, dass es sich ideal für den Einsatz in einer speziellen Einsatzgruppe eignet. Die Basisstation und die einzelnen Kits können flexibel und schnell eingesetzt werden, um je nach Bedarf und Anforderung den bestmöglichen Einsatz zu gewährleisten. Dabei sorgt die Kombination aus Basisstation und Kits für eine nahtlose Kommunikation und Verbindung zwischen den einzelnen Gruppenmitgliedern, um eine effiziente und erfolgreiche Zusammenarbeit zu ermöglichen. Das

Einsatzset ist somit eine zuverlässige und praktische Lösung für spezielle Einsatzszenarien, bei denen es auf eine schnelle und koordinierte Zusammenarbeit ankommt.

7.2.1. Vorstellung der mobilen Basisstation

Die im Rahmen dieser Arbeit als Basisstation bezeichnete Komponente umfasst das Gateway, die Antenne sowie die Stromversorgung. Falls eine Datenübertragung zum Server über Mobilfunk möglich ist, wird diese genutzt. Ist dies nicht der Fall, ist ein Einplatinencomputer Bestandteil der Komponente, auf dem dann die entsprechenden Softwarekomponenten für den vollständig mobil-autarken Einsatz ausgeführt werden.

Im Bereich der LoRaWAN-Gateways gibt es eine Reihe von Anbietern, die verschiedene Modelle für den Indoor- und Outdoor-Einsatz anbieten. Durch die Standardisierung von LoRaWAN bieten die Geräte ähnliche Funktionalitäten. Unterschiede können z. B. in der Anzahl der Kanäle oder in der Software zur Bedienung liegen. Die Anforderungen von MOTARK an das Gateway sind gering, da derzeit nur wenige Geräte mit einem Gateway kommunizieren, so dass auf ein kostengünstiges Gateway zurückgegriffen wurde. Der von *RAKwireless Technology Limited* entwickelte RAK7258 bietet alle notwendigen Einstellungen sowie die Möglichkeit, eine externe Antenne und eine SIM-Karte für die Datenübertragung zu verwenden.



Abbildung 7.11: LoRaWAN-Gateway RAK7258 (links) sowie die verwendete Antenne (rechts). (Quelle: RAK-wireless Technology Limited)

Im Rahmen der prototypisch Entwicklung wurde zur Verbesserung der Reichweite eine externe 80 cm lange Fiberglas Antenne an das Gateway angeschlossen. Diese Antenne kann außen an dem Schutzkoffer der Basisstation angebracht werden. Die Basisstation sollte im Einsatzgebiet möglichst an einer erhöhten Stelle installiert werden, um eine optimale Abdeckung des Gebietes zu erreichen. Die elektronischen Komponenten müssen vor Witterungseinflüssen, insbesondere Regen, geschützt werden. Hierzu wird ein Schutzkoffer verwendet, in dem das Gateway, die Batterie für den Betrieb sowie ein Einplatinencomputer installiert werden können. Die Antenne kann außen am Gehäuse oder, falls örtlich möglich, an Strukturen oder Bauwerken befestigt werden. Das Signalkabel von der Antenne zum Gateway wird durch eine Kabelverschraubung geführt.



Abbildung 7.12: Fotoaufnahme der Basisstation. In dem Schutzkoffer sind das Gateway sowie die Batterie untergebracht. Die Antenne ist außen angebracht. (Eigene Aufnahmen)

Die Befestigung der Antenne an der Seite des Schutzkoffers wurde durch eine 3D-gedruckte Halterung realisiert. Zusätzlich wurde eine Halterung für das Gateway im Inneren des Koffers entwickelt, die eine ausreichende Luftzirkulation für einen sicheren Betrieb im geschlossenen Koffer gewährleistet. Die Stromversorgung erfolgt über eine Powerbank, wobei die Power Delivery Funktion des USB-C-Standards genutzt wird. Mit Hilfe eines Moduls wird eine 12 Volt Stromversorgung von der Powerbank über ein USB-C Kabel hergestellt. Für die praktischen Versuche wurde zudem noch eine Halterung für ein handelsübliche Kamerastativ für die Antenne entwickelt. Hiermit ist die Installation beispielsweise auf Dächern sowie anderen Bauwerke möglich (siehe Kapitel 8.1.2).

7.2.2. Basic-Sensor-Kit für den Hochwassereinsatz

Das nachfolgende Sensorkit ist im Rahmen dieser Arbeit als Basismodul zu verstehen. Wie bereits im Konzept beschrieben, ist ein zentraler Parameter für die Lagebeurteilung im Hochwassereinsatz die Pegelmessung. Das hierfür vorgeschlagene Sensorkit verwendet einen Ultraschallsensor, der die relativen Abstandsänderungen zum Sensor ermittelt. Das Kit ist so konzipiert, dass es einfach und unkompliziert an verschiedenen Befestigungspunkten angebracht werden kann. Zusätzlich zur Messung des Wasserstandes im Gewässer kann mit dem Sensorkit auch festgestellt werden, ob sich Wasser oder eine Änderung des Wasserstandes auf Straßen oder anderen Wegen befindet. Diese Informationen können den Einsatzkräften Daten über die Befahrbarkeit liefern und somit die Anfahrtsplanung erleichtern.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Einsatzkoffer mit verschiedenen Sensoren entwickelt und umgesetzt. Dabei wurden Sensoren für unterschiedliche Einsatzzwecke entwickelt. Grundsätzlich ist es möglich, auf Basis des vorgestellten Kits weitere Sensoren anzuschließen und in das System zu integrieren. Das sogenannte MO-TARK-Basic-Kit umfasst derzeit folgende Sensorkits: Pegelsensor (Ultraschallsensor), Bodenfeuchtesensoren (kapazitive Sensoren), Temperatur- und Feuchtesensor, GPS-Tracker sowie die Möglichkeit zur Erfassung von Personenströmen. Im Folgenden werden die ausgewählten Komponenten, deren Verbindungen sowie

die entwickelte Leiterplatte und das Gehäuse des MOTARK-Basic-Kits vorgestellt. Bei den Entwicklungen handelt es sich um prototypische Umsetzungen, die die Realisierung des Konzeptes demonstrieren sollen. Für einen massenhaften und flächendeckenden Einsatz kann der Bausatz im Bereich der Komponenten sowie des Gehäuses noch weiterentwickelt werden. Denkbar ist z. B. die Verwendung von Einzelkomponenten anstelle eines vorgefertigten Mikrocontrollers. Dies würde zwar mehr Entwicklungszeit in Anspruch nehmen, könnte aber langfristig die Kosten bzw. die Größe der Sensorbox reduzieren.

Komponenten

Die folgenden Komponenten wurden für das Basic-Sensor-Kit ausgewählt: Heltec ESP32 LoRa V2, HC-SR04, GY-21, Moisture Sensor V.2.0 (siehe auch Tabelle 7.1). Es ist zu beachten, dass es sich bei den Komponenten nur um beispielhaft ausgewählte Komponenten handelt und ein ähnliches Kit auch mit anderen Sensoren sowie Mikrocontrollern realisiert werden kann. Beispielsweise könnte anstelle des gewählten Mikrocontrollers auch ein Typ mit integriertem GPS-Modul wie der TTGO-Beam verwendet werden.

Tabelle 7.1: Ausgewählte Komponenten für das MOTARK-Basic-Sensor-Kit.

Komponente	Beschreibung
Heltec ESP32 LoRa V2	Mikrocontroller mit integriertem LoRa-Modul
HC-SR04	Ultraschallsensor zur Erfassung von relativen Pegeländerungen
GY-21	Sensor zur Erfassung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit
Moisture Sensor V.2.0	Sensor zur Erfassung von Bodenfeuchte

Der hier vorgestellte Ultraschallsensor sowie der Temperatursensor GY-21 verfügen auch über eine Reihe von Alternativprodukten, die jedoch in der Regel in ähnlicher Weise an das Steuergerät angeschlossen werden. Daher wird im Folgenden eine Platine vorgestellt, die den Austausch der Komponenten ermöglichen soll.

Platine

Die Entwicklung im Rahmen dieser Arbeit soll prototypisch zeigen, wie ein Sensorkit aussehen könnte. Dabei soll die Hardware, wie beschrieben, möglichst einfach zu handhaben und austauschbar sein. Die Verbindung zwischen dem Mikrocontroller und den angeschlossenen Modulen kann für eine Umsetzung mittels sogenannter Lochrasterplatinen realisiert werden. Für eine zuverlässigere Verbindung aller Komponenten wurde eine Platine entworfen. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Sensoren möglichst flexibel über Schraubklemmen angeschlossen werden können. Dies ermöglicht einen einfachen Austausch von Sensoren und Komponenten. Wie in Abbildungen Abbildung 7.13 zu sehen ist, verfügt die Platine zum einen über einen Anschluss für den Ultraschallsensor (5V, GND, TRIG, ECHO), einen Anschluss für den Temperatur- und Feuchtesensor GY-21 (3,3V GND, SDA, SCL) sowie eine Anschlussmöglichkeit für einen Analogsensor (3,3V, GND, SIGNAL). Zusätzlich sind sogenannte Female Header für die Platzierung des Level-Up Moduls sowie für den Einbau des GY-21 vorgesehen. Grundsätzlich ist es sinnvoll, Temperatur und Luftfeuchte außerhalb der Sensorbox zu messen, da die Parameter sonst durch den Betrieb oder durch Sonneneinstrahlung und andere Umwelteinflüsse

beeinflusst werden können. Für den Betrieb im Freien muss jedoch ein entsprechendes Gehäuse vorgesehen werden. Das Level-Up Modul ist notwendig, da die kostengünstigen *HC-SR04* Ultraschallsensoren nur mit 5 V zuverlässig arbeiten. Im Batteriebetrieb stehen dem Mikrocontroller nur 3,3 V zur Verfügung, die durch das Modul für den Sensor auf 5 V gewandelt werden. Der Schaltplan für die beschriebenen Anschlüsse befindet sich im Anhang A.4.

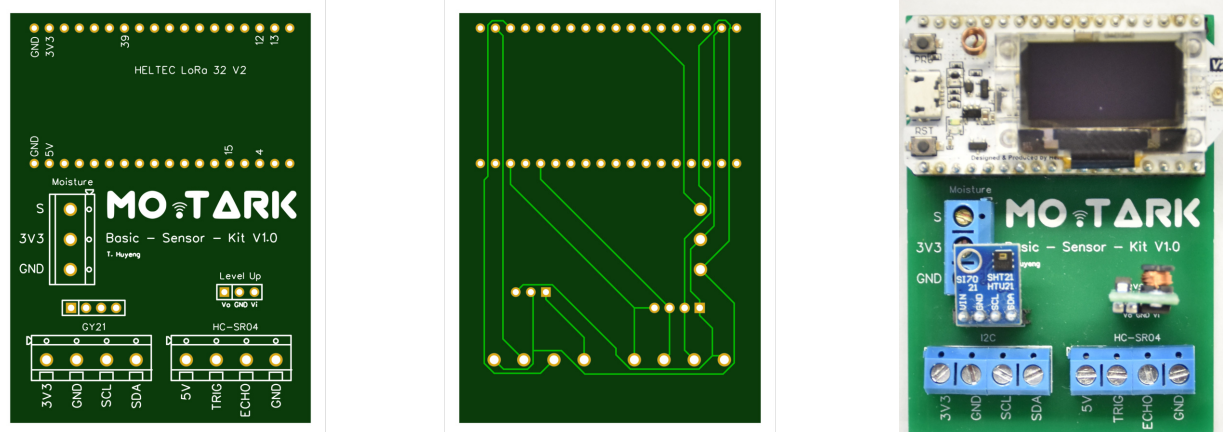


Abbildung 7.13: Platine mit Anschlüssen für Ultraschallsensor, Temperatur- und Feuchtesensor sowie Analogsensor. Vorder- (links) und Rückseite (mitte) der Platine sowie Foto der Platine mit installierten Komponenten (rechts). (Eigene Aufnahmen)

Gehäuse

Für die beschriebenen Komponenten ist entsprechend der im Konzept dargestellten Anforderungen ein möglichst flexibel einsetzbares und montierbares Gehäuse zu entwickeln. Die Basis bildet ein fertiges Sensorgehäuse mit Kabeldurchführung. In dieser wird der Mikrocontroller inklusive der entwickelten Platine und den entsprechenden Anschlüssen untergebracht. Außerdem ist in der Box die Batterie für den Betrieb enthalten. An dieser Box sind zum einen die Halterung für den Ultraschallsensor sowie eine Vorrichtung zur einfachen und flexiblen Befestigung des Gesamtsystems angebracht. Diese beiden Teile wurden mit Hilfe einer 3D-Software so konstruiert, dass sie optimal und formschlüssig an der Sensorbox befestigt werden können. Die Halterung des Ultraschallsensors ist in dieser prototypischen Umsetzung für den *HC-SR04* ausgelegt. Dieser wird in eine Box eingebaut und mit einem Kabel verbunden. Das Kabel wird über eine Kabelverschraubung wasserdicht montiert. Die Halterung des Sensors besteht ebenfalls aus zwei Teilen, zum einen aus der Halterung an der Box und zum anderen aus der Box, in die der Sensor installiert wird. Diese beiden sind durch eine Verschraubung so miteinander verbunden, dass die Ausrichtung des Sensors frei einstellbar ist. Dies ist wichtig, um sicherzustellen, dass der Sensor senkrecht zur zu messenden Oberfläche orientiert ist. Um den Sensor während des Einsatzes schnell und einfach ausrichten zu können, ist auf der Oberseite des Kastens eine Dosenlibelle angebracht. Die an der Oberseite der gesamten Box angebrachte Vorrichtung zur Befestigung des Systems verfügt über mehrere Löcher in verschiedenen Ausrichtungen zur Durchführung von z. B. Kabelbindern. Zusätzlich erleichtern die überstehenden Flächen die Befestigung mit Klebeband.



Abbildung 7.14: 3D-Renderings der konstruierten Halterungen sowie der Sensorbox. (Eigene Darstellung)

Für den wasserdichten Anschluss der Signalkabel der Sensoren sowie der Antenne werden ebenfalls Kabelverschraubungen verwendet. Der Temperatursensor kann entweder direkt auf der Leiterplatte montiert oder optional per Kabel extern in einem Gehäuse betrieben werden. Der Anschluss des Feuchtesensors ist ebenfalls über Kabel möglich. Eine separate Halterung für den Feuchtesensor muss noch entwickelt werden. Die in Abbildung 7.14 dargestellten Renderings zeigen die Sensorbox sowie die beschriebenen Komponenten zur Befestigung und zum Anschluss der Sensoren. Mit Ausnahme der Sensorbox sowie der Kabelverschraubungen wurden die Komponenten mittels 3D-Druck hergestellt. Als widerstandsfähiges und witterungsbeständiges Material wurde PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) verwendet. Ein detaillierter bemaßter Plan des 3D-Modells befindet sich im Anhang (siehe Kapitel A.4).



Abbildung 7.15: Fotoaufnahme eines Sensorkits befestigt an verschiedenen Laternen (links, mitte) sowie an einem Brückengeländer (rechts). Angeschlossen auf diesem Foto ist ein Ultraschallsensor. (Eigene Aufnahmen)

Die hier vorgestellte Konstruktion ermöglicht eine flexible Befestigung des Sensorkits für unterschiedliche Einsatzoberflächen und -bedingungen. Neben der Befestigung mit Kabelbindern, weiteren Kabeln sowie Klebeband kann das Gehäuse auch mit Verschraubungen an z. B. Holzkonstruktionen o. ä. befestigt werden. Im Rahmen der praktischen Versuche (siehe Kapitel 8.1) wurde das Befestigungssystem getestet. Die Sensorbox inklusive Halterung erfüllt die notwendige Flexibilität und einfache Handhabung für unterschiedliche Standorte und Befestigungsmethoden.

Auf dem Markt verfügbare Sensorkits

Aufgrund der großen Verbreitung und Weiterentwicklung von LoRaWAN-Sensoren und -Modulen gibt es bereits eine Vielzahl von fertigen Sensorkomponenten, die frei verfügbar sind. Geräte und Module werden zum Beispiel auf dem Marketplace von *The Things Network* angeboten [142]. Die Integration von *fertigen* Sensorkits sowie der Austausch von Sensoren (Eigenbau) ist durch die offene Architektur ohne weiteres möglich. Zu beachten ist, dass gekaufte Sensorkits in der Regel nicht über einen offenen Quellcode verfügen. Zudem ist eine Erweiterung um weitere Sensoren meist nicht vorgesehen.

7.2.3. Programmierung des Mikrocontrollers

Für einen breiten und flexiblen Einsatz der für das beschriebene System entwickelten Sensorboxen wurde auf Basis des offenen Quellcodes des Paxcounter-Projektes ein Baukastensystem entwickelt. Das Paxcounter-Projekt ist ein Projekt, welches zur Erfassung von sogenannten *Pax* (Synonym für Personen) entwickelt wurde [19]. Dabei werden die von Personen üblicherweise benutzten mobilen Endgeräte als Indikator für die Anwesenheit einer Person verwendet. Das Projekt ist mit einer Reihe von ESP32-Boards kompatibel und nutzt je nach Einstellung die Wi-Fi- oder BLE-Module der Mikrocontroller, um damit mobile Endgeräte zu erkennen. Das Projekt zeichnet sich auch dadurch aus, dass eine Reihe von Einstellungen bezüglich Messdauer, Messzyklus und Übertragungsart vorgenommen werden können. Dabei können die Einstellungen entweder initial beim Aufspielen des Quellcodes auf den Controller festgelegt werden oder die Parameter können später aus der Ferne verändert werden. Um die Daten der erfassten Personen an eine externe Anwendung zu übertragen, kann entweder Wi-Fi oder LoRa verwendet werden. Es ist auch möglich, das Gerät komplett ohne Übertragung zu betreiben und die Daten auf einer SD-Karte zu speichern. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Übertragung über LoRa verwendet. Das Projekt verwendet die in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Ports zur Unterscheidung der einzelnen Informationen. Mit Hilfe des im Projekt enthaltenen Decoders können die Nachrichten im Applikationsserver entsprechend entschlüsselt werden. Der Decoder gibt an, auf welchem Port die jeweiligen Parameter übertragen werden und in welches Format diese konvertiert werden müssen.

Das Projekt ist so aufgebaut, dass neben der Personenerkennung auch weitere Sensorik integriert werden kann. So unterstützt das Projekt beispielsweise Sensoren zur Erfassung der Luftqualität, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Projekt um die bereits vorgestellte Sensorik erweitert. Dazu gehören spezielle Erweiterungen für den Temperatur- und Feuchtesensor (GY-21), den Bodenfeuchtesensor sowie den Ultraschallsensor. Für die jeweiligen Sensoren wurde zunächst der Quellcode zur

Kommunikation und Abfrage des Sensors implementiert. Dies beinhaltet die Kommunikationsverbindungen sowie die notwendigen Initialisierungen und die eigentliche Abfrage der Sensorwerte. Anschließend wurde die Übertragung mittels LoRa implementiert. Hierzu wurden spezielle Konverter implementiert, die die jeweiligen Sensorwerte in Bytes für die Übertragung mit LoRaWAN formatieren. Außerdem wurde der Decoder entsprechend angepasst, damit die Daten auf der Seite des Applikationsservers entsprechend decodiert werden können. Zur Abfrage des Temperatur- und Feuchtesensor wurde eine Bibliothek verwendet, welche die Kommunikation über das I2C-Protokoll sowie das Auslesen der Sensorwerte übernimmt [61].

Bei der Messung von Wasserständen mit Ultraschall, insbesondere bei der Verwendung von Low-Cost-Geräten, ist mit sogenannten Ausreißern in den Datensätzen zu rechnen. Diese Ausreißer können z. B. durch externe Störungen oder Reflexionen durch Wellen entstehen [154, S. 69]. Die Übermittlung des Wasserstandes erfolgt im vorliegenden Konzept in bestimmten Zeitintervallen, die von den jeweiligen Einsatzkräften eingestellt werden können. Empfohlen werden Zeitintervalle zwischen 1 und 30 Minuten, um einerseits den Stromverbrauch durch wenige Übertragung zu minimieren und andererseits regelmäßig Daten zur Lagebeurteilung zu erhalten. Das Zeitintervall kann von den Einsatzkräften auch situationsbedingt verändert werden. Um sicherzustellen, dass bei der Übertragung möglichst keine Ausreißer übertragen werden, wird eine Methode verwendet, die bereits auf dem Sensorkit die Ausreißer aus den Daten entfernt. Dazu werden zum einen Werte, die außerhalb des Messbereiches liegen aussortiert und zum anderen wird eine modifizierte Z-Score-Methode zur Erkennung von Ausreißern verwendet [8], [112]. Um den jeweiligen Z-Score eines Messwertes berechnen zu können wird zunächst der Median der absoluten Abweichung (engl. Median Absolute Deviation (MAD)) wie folgt berechnet:

$$MAD = \text{median}_i \{|x_i - \tilde{x}|\} \quad (7.1)$$

Dabei ist \tilde{x} der Median aller Messwerte. Der MAD gibt den Median der absoluten Abweichung der Messwerte vom Median aller Messwerte an. Anschließend wird der normalisierte MAD (MADN) berechnet. Dazu wird das 75 %-Quantil der Standardnormalverteilung verwendet [112].

$$MADN = \frac{MAD}{0.6745} \quad (7.2)$$

Für jeden Einzelwert wird dann der modifizierte Z-Score berechnet, mit dessen Hilfe festgestellt werden kann, ob es sich bei dem Messwert um einen Ausreißer handelt.

$$Z_i = \frac{|x_i - \tilde{x}|}{MADN} < \beta \quad (7.3)$$

Nach Iglewicz und Hoaglin liegt ein Ausreißer vor, wenn β , das Ausschlusskriterium, größer als 3,5 ist [112]. Eine detaillierte Untersuchung der Methode zur Eliminierung von Ausreißern bei Ultraschallsensoren zur Pegelmessung wurde von Bae und Ji durchgeführt und zeigt, dass die Methode zu einer Reduktion der Ausreißer eingesetzt werden kann [8]. Dabei wurden auch verschiedene β -Werte untersucht. In dieser Arbeit wird der empfohlene Wert von $\beta = 3,5$ verwendet. Pro Übertragung werden 50 Messwerte aufgenommen und

anschließend die Ausreißer mit der beschriebenen Methode entfernt. Aus den verbleibenden Messwerten wird der Mittelwert berechnet und dieser dann übertragen. Vor der Messung einer Messreihe wird die Temperatur gemessen und die Messwerte entsprechend korrigiert (siehe auch Kapitel 3.2.2). Zwischen den einzelnen Messungen des Ultraschallsensors wird eine Pause von 100 ms eingehalten, um zu verhindern, dass die Messwerte durch Reflexionen von vorherigen Messungen beeinflusst werden. Das folgende Ablaufdiagramm veranschaulicht den Ablauf der Messung, der Ausreißerentfernung und der Übertragung.

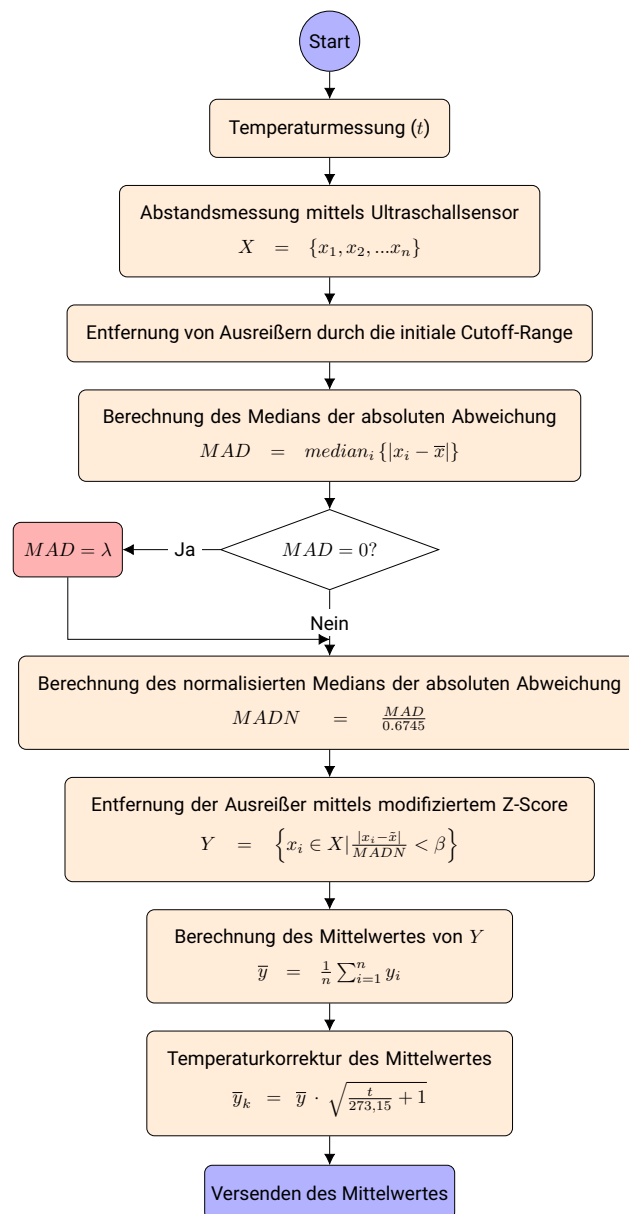


Abbildung 7.16: Ablaufdiagramm der Datenverarbeitung zur Eliminierung von Ausreißern für Wasserstandsdaten, die mit einem Ultraschallsensor gemessen wurden. (Eigene Darstellung)

Unter bestimmten Bedingungen kann es sein, dass MAD gleich null ist. Ist dies der Fall muss MAD manuell festgelegt werden, um eine Berechnung von MADN sowie des Z-Scores zu ermöglichen. Bae und Ji schlagen vor in diesem Fall MAD auf 0,03 (λ) zu setzen, da dies die Messgenauigkeit der eingesetzten Sensoren entspricht [8]. Die im Rahmen der Arbeit verwendeten Ultraschallsensoren, haben laut Kushwaha und Bojewar ebenfalls eine Messgenauigkeit von 0,03 cm [127]. Der Parameter λ wird dementsprechend auf 0,03 gesetzt.

Nachfolgend ist eine beispielhafte Messung eines Ultraschallsensors mit den aufgezeichneten Messwerten und den mit der vorgestellten Methode eliminierten Ausreißern dargestellt. Für diese Darstellung wurde ein Sensor an einer Brücke über einem Bach montiert. Auf der zu messenden Wasseroberfläche waren konstant kleine Wellenbewegungen durch Verwirbelungen vor der Messstelle vorhanden. Für den Versuch wurden die Rohwerte des Ultraschallsensors mit Hilfe eines Skripts direkt vom Mikrocontroller aufgezeichnet. Insgesamt wurden 2200 Messwerte aufgezeichnet. Gemäß der vorgeschlagenen Vorgehensweise (siehe Abbildung 7.16) werden jeweils 50 Messwerte als eine Messreihe betrachtet.

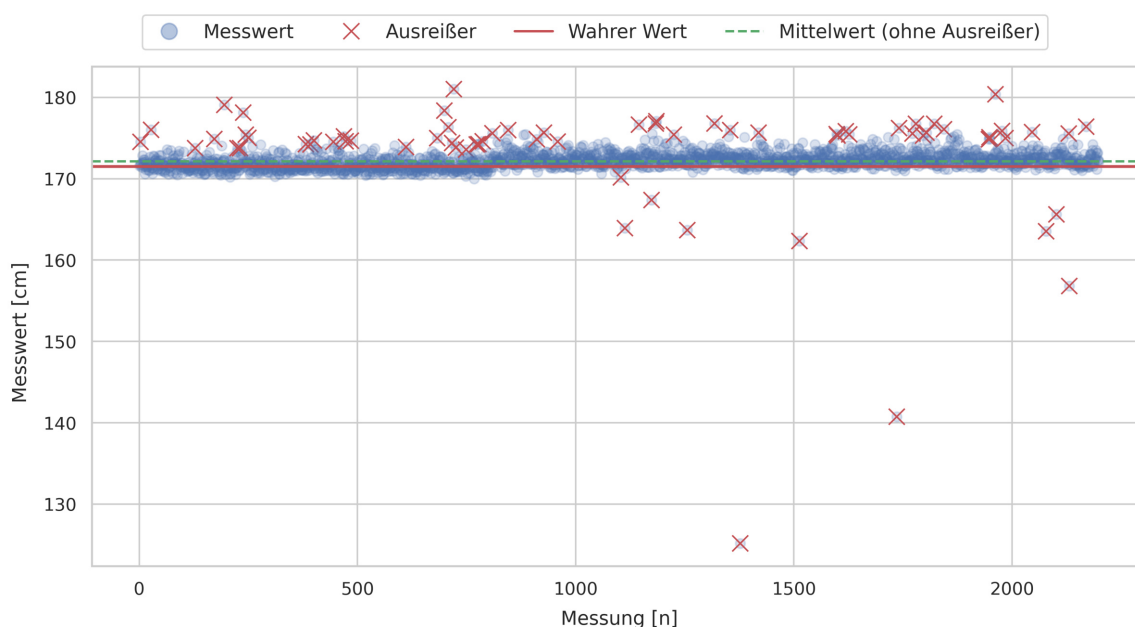


Abbildung 7.17: Beispielhafte Messungen eines Ultraschallsensors mit den aufgezeichneten Messwerten und den mit der vorgestellten Methode eliminierten Ausreißern. (Eigene Darstellung)

Für jede Messreihe werden zunächst die Ausreißer mit Hilfe des initialen Cutoffs und anschließend mit Hilfe des modifizierten Z-Scores entfernt. Aus den verbleibenden Messwerten wird dann der Mittelwert gebildet. Die Auswertung aller Messpunkte ist beispielhaft in der folgenden Abbildung dargestellt. Der hier dargestellte Mittelwert entspricht dem Mittelwert der Mittelwerte der einzelnen Messreihen ohne Ausreißer. Der tatsächliche Abstand des Sensors wurde manuell ermittelt (ca. 171,5 cm) und mit dem Mittelwert der Messwerte verglichen. Die mit der vorgestellten Methode eliminierten Messwerte sind rot markiert. Die Einzelauswertung aller 44 Messreihen findet sich im Anhang (Abbildung A.6). Auch hier wird deutlich, dass bei Messreihen ohne große Schwankungen keine oder nur wenige Messwerte eliminiert werden. Grundlegende kleinere

Schwankungen, die z. B. durch Wellenbewegungen natürlicherweise auftreten, werden nicht eliminiert und gehen in den Mittelwert der Messreihe ein. Durchschnittlich wurden 1,6 Messwerte pro Messreihe eliminiert. Bei größeren Störungen durch Reflexionen und Wellen ist davon auszugehen, dass diese Anzahl höher ausfällt. Die exemplarischen Messungen zeigen, dass die Methode zur Eliminierung von Ausreißern funktioniert. Messwerte, die deutlich vom wahren Wert abweichen, werden entfernt.

Die Abfrage der Bodenfeuchtesensoren besteht aus einer einfachen Abfrage des Analogwertes des Sensors. Die preiswerten Sensoren können dabei in der Regel nur über die zeitliche Änderung Rückschlüsse auf die Feuchteänderung geben. Sie können aber auch so eingesetzt werden, dass sie wie handelsübliche Wasserlecksensoren funktionieren. Dazu ist es möglich, die Sensoren in einer bestimmten Höhe zu installieren. Tritt eine große Änderung des Sensorwertes auf, kann davon ausgegangen werden, dass die Sensoren von Wasser umgeben sind. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Erfassung des Wasserstandes mittels der beschriebenen Sensorik. Aus diesem Grund wurden keine umfangreichen Tests mit Bodenfeuchtesensoren durchgeführt. Langfristig ist zu untersuchen, wie diese Sensoren weiter verbessert und effizient zur Anreicherung des Lagebildes eingesetzt werden können.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Platine ist flexibel, so dass weitere analoge oder digitale Sensoren angeschlossen werden können. Als Basis für den Quellcode des Sensorkits diente, wie beschrieben, das Paxcounter-Projekt. Die Anpassungen für die hier prototypisch verwendeten Sensoren sowie die Ausreißerentfernung durch den modifizierten Z-Score wurden an den entsprechenden Stellen des Quellcodes implementiert. Die Erweiterungen sind als Open-Source-Quellcode auf GitHub einsehbar und frei verfügbar [98].

Kommunikation zum Sensorkit

Das Projekt Paxcounter ermöglicht die Anpassung der Einstellungen des Mikrocontrollers über Downlinks. Diese Funktionalität ist insbesondere für Änderungen oder Anpassungen während eines Einsatzes sehr wichtig. So kann z. B. der Messzyklus an die Situation angepasst oder angeschlossene Sensoren ein- oder ausgeschaltet werden. Die Befehle können in die entsprechende Weboberfläche des Applikationsservers eingegeben werden und werden nach einer Datenübertragung an das Gerät gesendet. Je nach Server müssen die Befehle gegebenenfalls formatiert werden. In der für die Administration der Sensorkits entwickelten Webapplikation MOTARK-Web (siehe Kapitel 7.1) können die Einsatzkräfte über entsprechende Schaltflächen die Einstellung über die API des LoRaWAN-Backends an die Sensorkits senden.

7.2.4. Kostenzusammenstellung

Nachfolgend sind die Kosten für ein Einsatzset beispielhaft zusammengefasst. Es ist zu beachten, dass die Preise je nach Verfügbarkeit und Marktlage variieren können. Die in der Tabelle angegebenen Preise beziehen sich auf den Stand Februar 2023. Teilweise sind in der Tabelle die Preise der am Markt verfügbaren Nachfolgemodelle angegeben.

Tabelle 7.2: Beispielhafte Kostenzusammenstellung für ein Einsatzset (Stand Februar 2023).

Artikel	Anzahl	Einzelpreis (brutto)	Gesamtpreis (brutto)
Schutzkoffer	2	40 €	80 €
Basic-Sensor-Kit	5	89 €	445 €
- Ultraschallsensor (z. B. HC-SR04)		2 €	
- Bodenfeuchtesensor (z. B. DEBO CAP SENS)		3 €	
- Temperatur / Luftfeuchtigkeitssensor (z. B. GY-21)		7 €	
- GPS Modul		17 €	
- Boxen, 3D Bauteile, Platine		10 €	
- Mikrocontroller (z. B. Heltec LoRa32), Batterie		50 €	
Basisstation	1	250 €	250 €
- Gateway (z. B. RAK 7258)		130 €	
- Antenne		90 €	
- Powerbank		30 €	
Gesamt			775 €

Die in der Tabelle aufgeführten Preise wurden aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und aufgerundet. Die jeweiligen Internetquellen der einzelnen Produkte sind der Tabelle A.4 im Anhang zu entnehmen. Auch wenn die hier aufgeführte Kostenzusammenstellung aufgrund der unterschiedlichen Preisentwicklung und Verfügbarkeit der einzelnen Komponenten nur einen groben Überblick gibt, so wird doch deutlich, dass ein komplettes Einsatzset bestehend aus einer autarken Basisstation und 5 Sensorkits für unter 1000 € erhältlich ist.

7.3. Implementierung des EZSTA-Systems

Neben der Datenaufnahme durch das MOTARK-System sollen wie im Konzept erwähnt auch die Daten aus anderen öffentlichen Datenquellen verwendet und in die Lageeinschätzung mit einfließen. Um diese Daten bzw. die Schnittstellen möglichst interoperable vorliegen zu haben soll EZSTA verwendet werden. Nachfolgend wird die Implementierung von EZSTA beschrieben.

7.3.1. Technische Umsetzung des Services

Für die Implementierung wird die Python-Bibliothek FastAPI [185] verwendet. Mit Hilfe dieses Pakets ist es möglich, eine API-Struktur mit automatischer Dokumentation in Form einer OpenAPI-Spezifikation zu erstellen. Die API imitiert eine STA bzw. stellt die gleichen Endpunkte zur Verfügung. Neben den üblichen Parametern, die an einen Endpunkt übergeben werden, wie z. B. der Entitätsname sowie Filter, muss der

EZSTA-API zusätzlich der Mapping-Input übergeben werden. Wie im Konzept beschrieben, enthält dieser Mapping-Input alle Informationen, um die Daten von einer API in eine STA-konforme Antwort umzuwandeln.

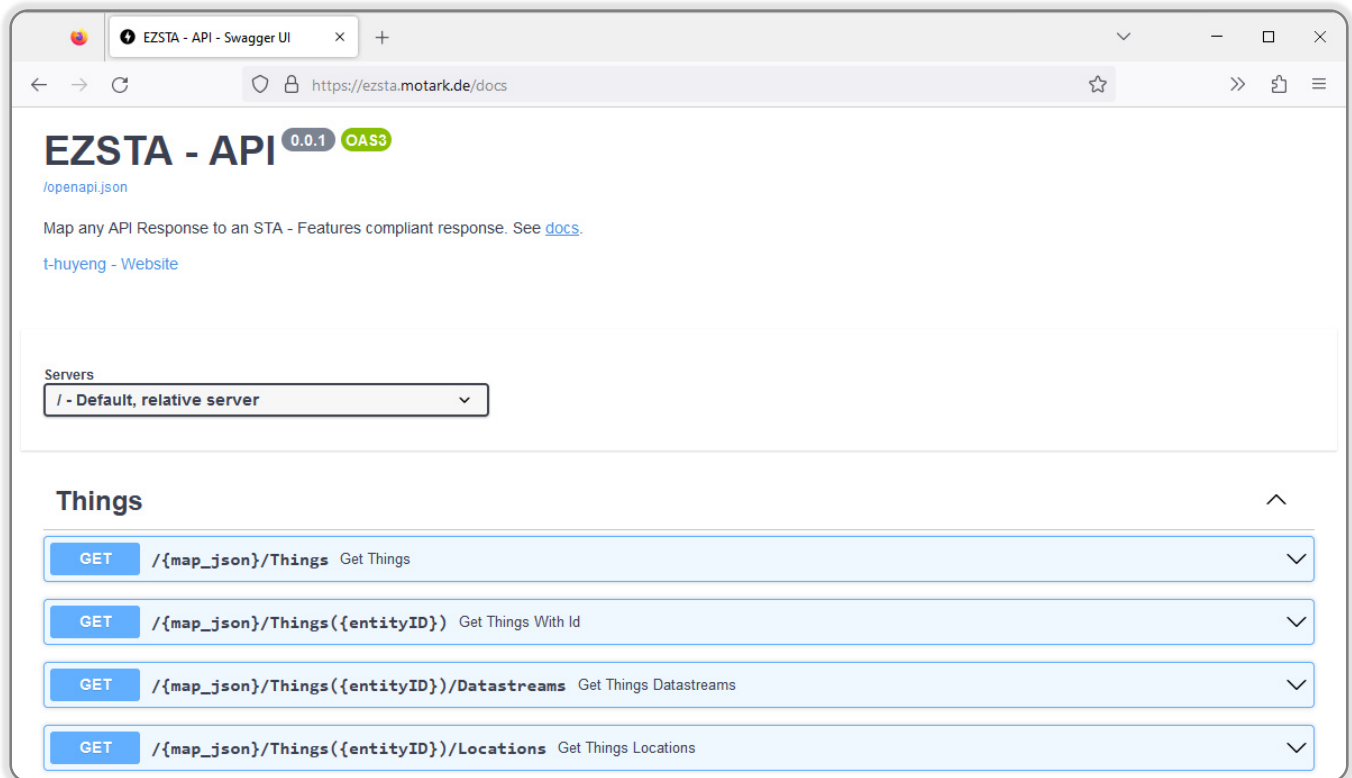


Abbildung 7.18: Screenshot der EZSTA-API Dokumentation.

Für die Übergabe des Mapping-Inputs sind verschiedene Möglichkeiten implementiert. Zum einen kann der gesamte Inhalt decodiert in der URL übergeben werden. Zum anderen soll es durch die Angabe einer UUID möglich sein, den Inhalt des Mapping-Inputs aus einer externen Quelle abzurufen. Da eine STA-konforme Antwort die URLs der jeweiligen Entität sowie der verknüpften Entität enthält, führt die Verwendung bzw. Übergabe des Inputs in der URL dazu, dass die URLs sehr lang werden und die Antwort zumindest schwerer menschenlesbar ist. Der Vorteil ist jedoch, dass solche Abfragen nicht von einer weiteren Datenquelle abhängig sind. Wird eine UUID in der URL übergeben, so wird der Inhalt aktuell aus der öffentlichen Sammlung von Mappings (siehe Kapitel 7.3.2) abgerufen.

Beide Möglichkeiten werden in der prototypischen Implementierung getestet und umgesetzt. Für die einzelnen Entitäten werden sogenannte Router-Klassen erstellt, die eine Abfrage über alle Einträge einer Entität sowie eine spezifische Abfrage über die ID eines Eintrags ermöglichen. Zusätzlich werden Filtermethoden bzw. Erweiterungen wie im Konzept angegeben unterstützt. Alle Routen werden dann in der Hauptklasse zusammengefasst und der API hinzugefügt. Beim Aufruf einer Route wird zunächst geprüft, ob der Teil der Mapping-Input-URL eine UUID oder eine decodierte Information ist (siehe auch nachfolgenden Quellcode).

Quellcode: Ausschnitt aus der `things.py` - Router-Klasse für die Entität Things vom EZSTA-Projekt

```
@router_things.get("/Things({entityID})")
async def get_things_with_id(entityID: str, expand=ExpandQuery, map_json: str = MapPath):
    """Get a Thing by ID."""

    # read out the mapping
    (map_id, encoded_mapping) = check_map_json(map_json)

    # run the mapping process and return sta-conform response
    return run_mapping(
        mapping=encoded_mapping,
        output_class="Things",
        object_id=entityID,
        expand_class=expand,
        map_id=map_id
    )
```

Die Grundidee hinter EZSTA ist die einfache Nutzung bestehender APIs in verschiedenen Programmen, die STA unterstützen. Im Kapitel 4.4.2 wurden bereits einige Anwendungen vorgestellt. Um sicherzustellen, dass diese auch mit EZSTA voll funktionsfähig sind, wurde analysiert, welche Art von Anfragen von diesen Programmen bzw. Erweiterungen an STA gestellt werden. Anschließend wurden Tests für diese Abfragen geschrieben. Während der Entwicklung wurden diese Tests verwendet, um die Kompatibilität für die Erweiterungen QGIS und Leaflet zu gewährleisten. Die Tests prüfen für ein beispielhaftes Mapping, ob die Struktur mit einem STA-Server übereinstimmt. Außerdem werden die spezifischen Abfragen der angeschlossenen Programme getestet. Die Tests können automatisch ausgeführt werden, wenn der Quellcode angepasst wird.

7.3.2. Umsetzung der EZSTA-Tools

Die zur Verbreitung und zur einfachen Nutzung von EZSTA entwickelten Tools werden in diesem Kapitel vorgestellt. Die Tools sind Open Source und jeweils in einem GitHub-Repository veröffentlicht.

Hilfestellung bei der Erstellung von Mapping-Inputs

Die Input-Dateien sind neben dem eigentlichen EZSTA-Service die wichtigste Komponente. Nur mit einem Mapping-Input kann eine externe API mit EZSTA verwendet werden. Da die Erstellung aufgrund der umfangreichen STA-Struktur insbesondere für fachfremde Personen sehr komplex sein kann, wurde ein Tool zur einfachen Erstellung von Input-Dateien entwickelt. Das Tool ist eine webbasierte Anwendung, die auf Basis einer OpenAPI-Spezifikation einer API den Benutzer anhand von Fragen durch die Erstellung einer Input-Datei führt.

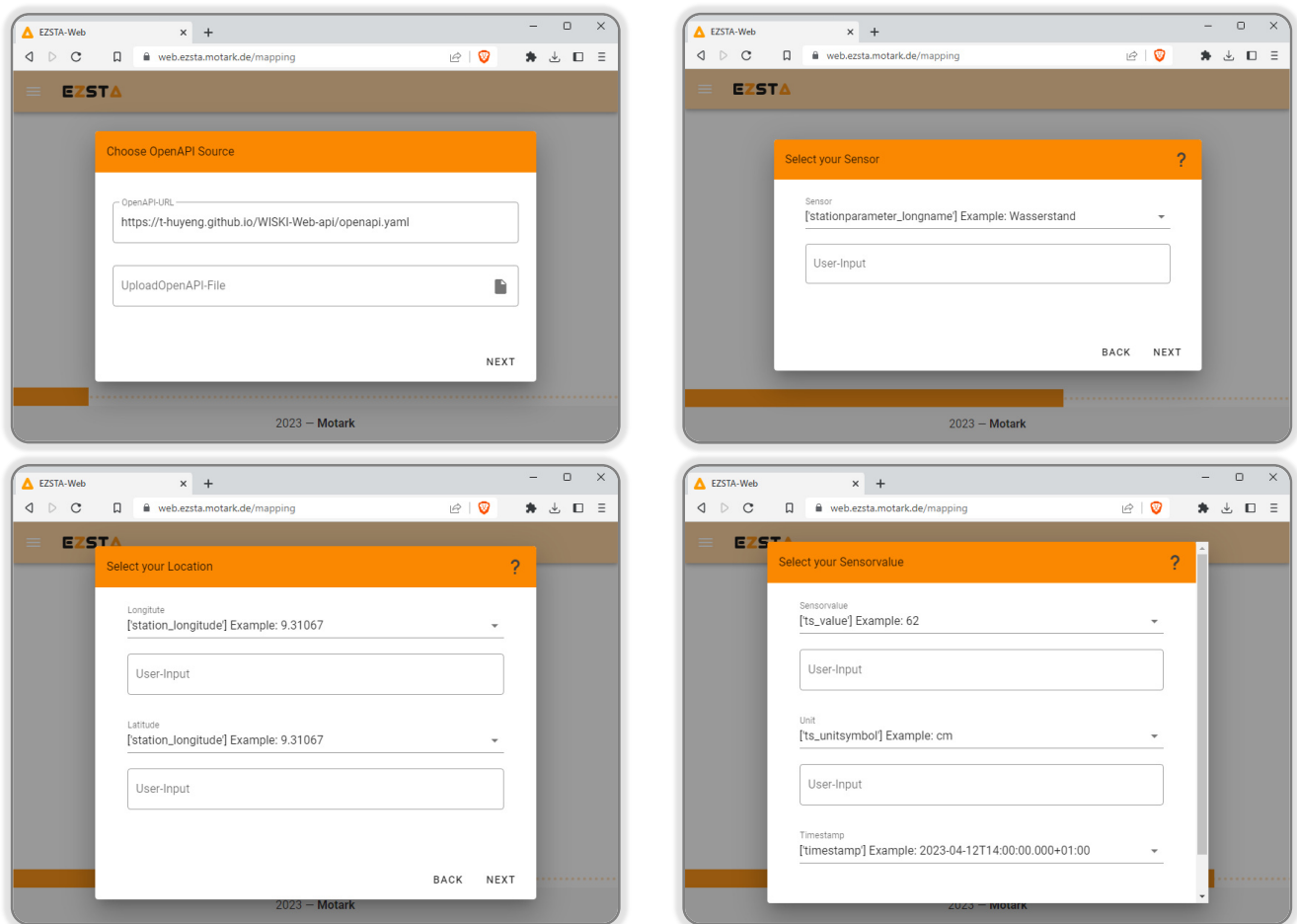


Abbildung 7.19: Screenshots der EZSTA-Web-Anwendung. Auszugsweise sind hier die Auswahl der OpenAPI (oben links), die Auswahl der Sensorparameter (oben rechts), der Lokationsparameter (unten links) sowie der Observationsparameter (unten rechts) anhand der API-Antwort dargestellt.

Die Abbildung 7.19 zeigt auszugsweise einzelne Prozessschritte von EZSTA-Web. Die einzelnen Schritte sind im Anhang dargestellt (siehe Kapitel A.5). Zunächst wird die Quelle der OpenAPI-Datei ausgewählt. Hier kann entweder ein Link angegeben oder eine Datei hochgeladen werden. Anschließend analysiert der Dienst die Spezifikation und stellt die verfügbaren Pfade als Auswahlmöglichkeit zur Verfügung. Nach der Auswahl eines Pfades kann die Mapping-Strategie ausgewählt werden. Dabei kann das Mapping entweder über eine Testabfrage an die API oder über das bereits in der OpenAPI-Spezifikation beschriebene erwartete Antwortmuster erfolgen. Eine Testabfrage ist z. B. notwendig, wenn die Dokumentation keine detaillierte Beschreibung enthält, außerdem kann mit einer Testabfrage auf die aktuelle Version der API zugegriffen werden. Nach der Auswahl der Strategie wird der Benutzer durch das Mapping der wichtigsten Informationen geführt. Die Abbildung zeigt beispielhaft die Auswahlmöglichkeiten für das *Thing* und das Sensorattribut-Mapping. Für das *Thing* kann der Benutzer z. B. aus einer Dropdown-Liste ein Attribut der API-Antwort auswählen, das den Namen des *Things* am besten beschreibt. Wenn keine der Auswahlmöglichkeiten passt, kann auch eine Benutzereingabe erfolgen. Für das Mapping der Sensorwerte wählt der Benutzer den Pfad zum Sensorwert, der

Einheit sowie dem Zeitstempel aus. Dabei wird für den Benutzer nicht zwischen *Observations*- und *Datastream*-Klasse unterschieden, um die Attributierung für den Benutzer möglichst intuitiv und konsistent zu gestalten. Beispielsweise werden für das Sensorattribut-Mapping Daten der *Observations*- und der *Datastream*-Klasse abgefragt. Der von EZSTA-Web erzeugte Mapping-Input kann dann in der Anwendung weiter bearbeitet und angepasst werden. Nach Abschluss der Bearbeitung kann die Eingabedatei heruntergeladen werden. Diese kann dann in EZSTA verwendet oder z. B. der öffentlichen Sammlung von Mappings hinzugefügt werden.

API-List

Basierend auf dem Konzept von EZSTA wurden die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Mapping-Dateien in einem GitHub-Repository veröffentlicht. Um diese Liste maschinell verarbeiten zu können, wurde zusätzlich eine API implementiert, mit der die gesamte Liste und die einzelnen Mapping-Dateien abgefragt werden können. Die Dokumentation der API wurde durch eine OpenAPI-Spezifikation realisiert (siehe Abbildung 7.20). Diese wird ebenso wie die Liste und die Dateien über GitHub-Pages gehostet.

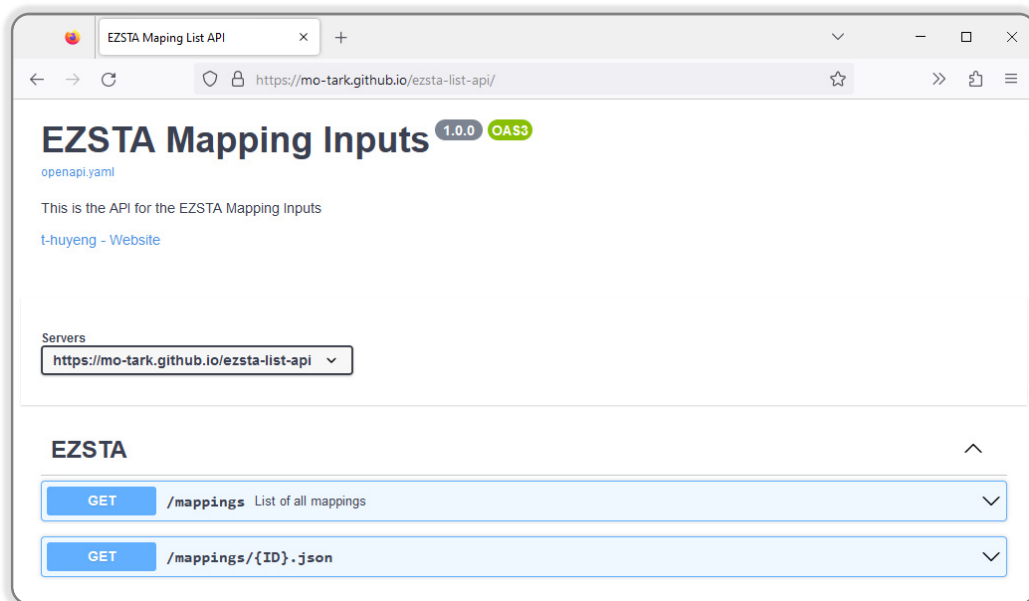


Abbildung 7.20: Screenshot der Dokumentation der EZSTA-List-API.

Die Liste umfasst Mappings für verschiedene APIs, wie z. B. die Hochwasserzentrale Hessen oder verschiedene Abfragen für die Pegelonline API. Die Struktur der Mapping-Liste enthält folgende Parameter: `id`, `name`, `description`, `url`, `tags` und `mappingURL`. Die `id` ist eine eindeutige Kennung des Mappings. Der `name` ist der Name der API und die `description` ist eine kurze Beschreibung des Mappings. `url` ist die URL der API, die abgefragt werden soll. Der Zugriff auf die Mapping-Datei ist über die `mappingURL` möglich. Der nachfolgende Quellcode zeigt als Auszug den Eintrag eines Mappings für die Pegelstände der Hochwasserzentrale Hessen.

Quellcode: Beispiel für einen Eintrag der EZSTA-List-API. Der hier aufgeführte Eintrag ist für die Pegelstände der Hochwasserwarnzentrale Hessen.

```
{
  "id": 3,
  "name": "HLNUG",
  "description": "Hochwasserwarnzentrale Hessen Pegelstände",
  "url": "https://www.hlnug.de/static/pegel/wiskiweb3/data/internet/layers/10/index.json",
  "mappingURL": "https://mo-tark.github.io/ezsta-list-api/mappings/3.json",
  "tags": [
    "HLNUG",
    "Wasserstand",
    "Hochwasserschutz"
  ]
}
```

API-Search

Wie im Grundlagenkapitel zu Open Data beschrieben, ist für eine erfolgreiche Nutzung öffentlicher Daten und Schnittstellen auch die Auffindbarkeit und einfache Nutzung wichtig. Zu diesem Zweck wurde EZSTA-Search auf Basis der beschriebenen EZSTA-Liste prototypisch entwickelt. Es wurde eine webbasierte Anwendung in Form eines Nuxt-Projekts [156] mit UnoCSS [76] als UI-Framework entwickelt. Die Anwendung sucht in den Mappings nach einer Übereinstimmung zwischen dem Suchbegriff und dem Namen oder der Beschreibung der API. Die Ergebnisse werden in einer Liste angezeigt. Das Suchergebnis enthält neben der Beschreibung und dem Namen zwei Links. Ein Link führt direkt zum entsprechenden Mapping-Input, der zweite Link führt zur API.

Die Abbildung 7.21 stellt beispielhaft eine Sucheingabe für den Fluss Rhein dar. EZSTA-Search liefert die Ergebnisse als Liste unterhalb des Suchfeldes. Hier wird als best passendes Ergebnis das Mapping der Pegelonline-API angezeigt, welches alle Pegel des Rheins mappt. Das Ergebnis ist zusätzlich grün eingefärbt, um dem Nutzer einen Hinweis auf eine hohe Übereinstimmung mit seiner Suche zu geben. Neben der Beschreibung und den Namen werden auch die in der EZSTA-List-API beschriebenen API-Tags angezeigt (siehe Abbildung 7.21: graue Textboxen). Die Suche wurde mit Fuse.js [177] umgesetzt und ist nicht auf exakte Übereinstimmungen beschränkt, sondern liefert auch Suchbegriffe mit einer gewissen Ähnlichkeit. Das Webinterface ist im Sinne des Open-Source-Gedankens von EZSTA in einem öffentlichen GitHub-Projekt verfügbar und wird über einen entsprechenden Workflow automatisch von GitHub-Pages gehostet [104].

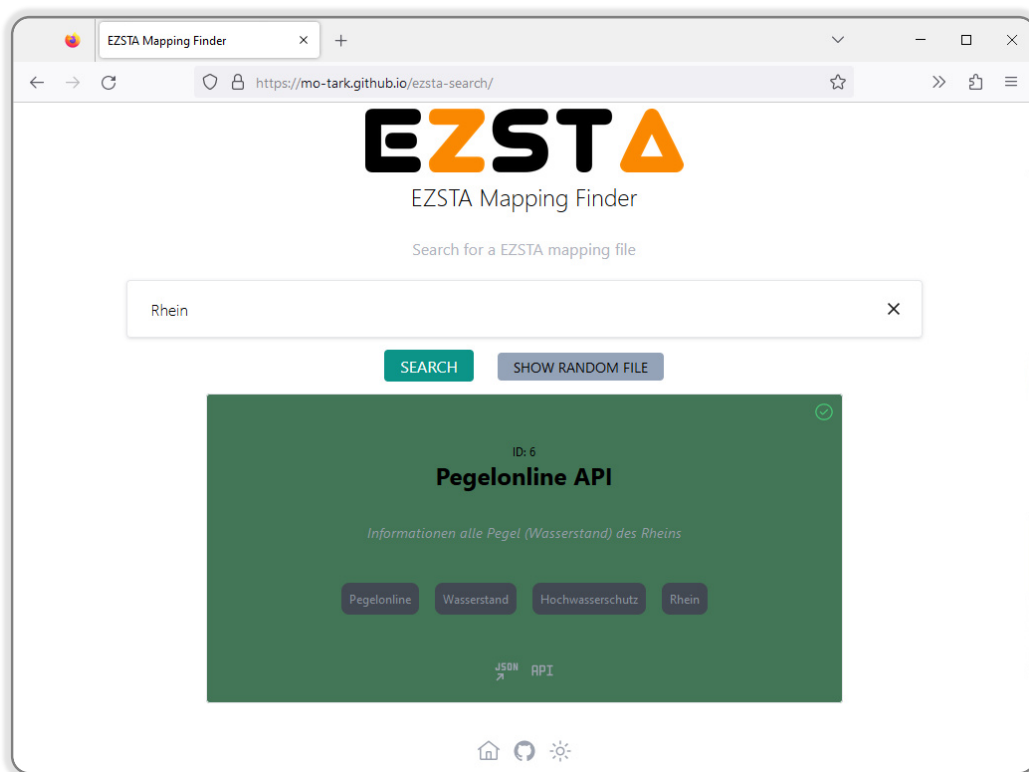


Abbildung 7.21: Screenshot der Implementierung von EZSTA-Search. Einem Webinterface zum einfachen Suchen von Mapping-Inputs für EZSTA.

7.3.3. Einbindung von EZSTA in MOTARK

Das Ziel von EZSTA ist die Standardisierung und damit die Vereinfachung der Integration verschiedener Datenquellen in Anwendungen. Im Folgenden wird anhand der Einbindung von Datenquellen, die über einen EZSTA-Service zur Verfügung stehen, gezeigt, wie die Daten in MOTARK-Web dargestellt werden können. Dazu wurde in MOTARK-Web eine Übersichtsseite implementiert, auf der die vorhandenen Mappings, die über die List-API abgerufen werden können, angezeigt und beispielhaft aufgerufen werden können. Zusätzlich können die Datenquellen nach dem Plug-and-Play Prinzip in das Übersichtsdashboard für die Einsatzkräfte eingebunden werden.

Die Übersichtsseite stellt alle Informationen zu den Datenquellen in einer Tabelle zur Verfügung. Neben der Tabelle wird eine Karte sowie ein weiteres Panel zur Anzeige eines ausgewählten Sensorwertes angezeigt. Über die in der Tabelle für jede Datenquelle vorhandenen Schaltflächen ist es möglich, eine Datenquelle auf der Karte mit allen Standorten einzublenden. Für jede Sensoreinheit wird ein Marker erzeugt, der bei einem Klick auf den Marker die Sensorwerte der Sensoreinheit anzeigt. Zusätzlich wird oberhalb des Markers die zugehörige ID angezeigt. Diese einfache und übersichtliche Webseite ermöglicht den Einsatzkräften eine schnelle Identifikation von Datenquellen, die sich in der Nähe des Einsatzortes befinden, neben der Möglichkeit einzelne Sensorwerte anzuzeigen, kann auch die gesamte Datenquelle zum Dashboard hinzugefügt werden.

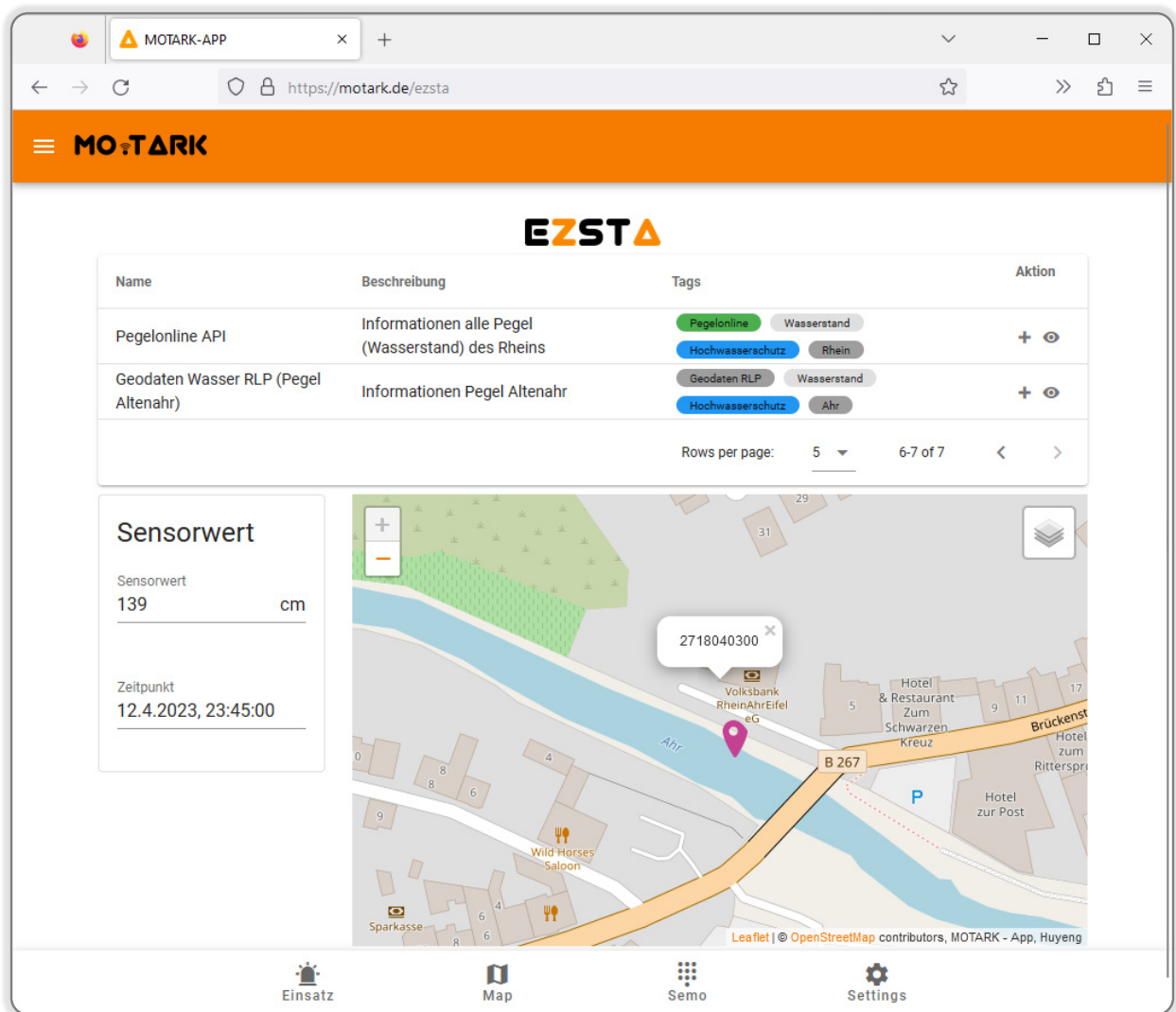


Abbildung 7.22: Screenshot der Implementierung von MOTARK-Web EZSTA-Einbindungseite. Einer Webseite zum einfachen Einbinden von EZSTA-Datenquellen in das MOTARK-Web-Dashboard.

8. Evaluation und Anwendungsbeispiel

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Konzeption und prototypischen Entwicklung des mobil-autarken Monitoringsystems sowie der Nutzung von Open Data im Hochwasserfall. Um die Einsatzfähigkeit der Entwicklungen zu überprüfen, werden im Folgenden Untersuchungen in verschiedenen Einsatzsituationen durchgeführt. Dazu wird zunächst die Sensorik durch Tests auf ihre Funktionalität und Zuverlässigkeit untersucht. Anschließend wird der Einsatz des Funkübertragungssystems mit der entwickelten Basisstation anhand von zwei unterschiedlichen Anwendungsszenarien getestet. Abschließend wird der Einsatz des Gesamtsystems anhand eines Anwendungsbeispiels im Einzugsgebiet der Ahr demonstriert. Für dieses Beispiel wird neben dem Einsatz des Monitoringsystems auch die Anbindung öffentlicher Daten über den EZSTA-Service an verschiedene Anwendungen dargestellt.

8.1. Praktische Versuche des MOTARK-Systems

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der praktischen Versuche beschrieben. Zunächst wird der verwendete Distanzsensor hinsichtlich seiner Genauigkeit und Zuverlässigkeit untersucht. Dabei wird zum einen die allgemeine Genauigkeit und zum anderen die Erprobung in einem Versuchsaufbau dargestellt. Anschließend wird die Methode zur Erfassung von Personengruppen anhand von Messungen beschrieben.

8.1.1. Untersuchungen des Wasserstandssensors

Wie bereits bei der Implementierung beschrieben, ist der Sensorbausatz bzw. die Platine so ausgelegt, dass verschiedene Sensoren angeschlossen werden können. Der im Rahmen dieser Arbeit ausgewählte und im Low-Cost-Bereich verbreitete Ultraschallsensor *HC-SR04* soll anhand von Messungen unter kontrollierten Bedingungen auf seine grundsätzliche Einsatzfähigkeit getestet werden. Dabei wird zum einen die Genauigkeit und zum anderen die Zuverlässigkeit des Sensors anhand eines Vergleichs von drei Sensorkits in einem Versuchsaufbau mit wechselnden Wasserständen untersucht.

Untersuchung der Genauigkeit

Während einer Hochwasserlage ist keine Genauigkeit im Sinne der Hydrometrie erforderlich. Zur Beurteilung der Lage sind, wie beschrieben, Genauigkeiten von 10 cm für die Pegelmessung ausreichend [184, S. 155]. In dynamischen Situationen kann es darüber hinaus durch Treibgut und andere Störeinflüsse zu größeren Schwankungen bzw. Ausreißern gegenüber einer normalen Pegelmessung kommen, so dass die Experten zur

Beurteilung der Lage auf mehrere Datenpunkte zurückgreifen. Je genauer die Wasserstände erfasst werden können, desto besser können diese Informationen für die Bewertung genutzt werden. Für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und prototypisch implementierte Basic-Sensor-Kit wird im Folgenden anhand eines Versuchs die Genauigkeit in einer kontrollierten Umgebung für den Sensor bzw. für das Sensorsystem inklusive Halterung und Verkabelung untersucht. Der Versuchsaufbau ist dabei wie folgt: Die Sensorboxen werden so auf einer Fläche montiert, dass der Ultraschallsensor den Abstand zwischen dem Sensorkopf und einem verschiebbaren Metallwinkel messen kann. Zur Einstellung der verschiedenen Abstände wird dann der Metallwinkel verschoben. Der jeweils eingestellte, manuell ermittelte Messwert wird als wahrer Wert angenommen. Nach DIN 1319 wird unter dem wahren Wert der Idealwert verstanden, d. h. der Wert, der bei einer fehlerfreien und perfekten Messung gemessen würde [53]. Die Messungen werden im Bereich von 50 bis 400 cm in Abständen von 50 cm durchgeführt. Pro Messpunkt werden 100 Entfernungsmessungen erfasst. Für drei Sensorkits wurden jeweils zwei Messreihen an den 8 Messpunkten durchgeführt (siehe Abbildung 8.1).

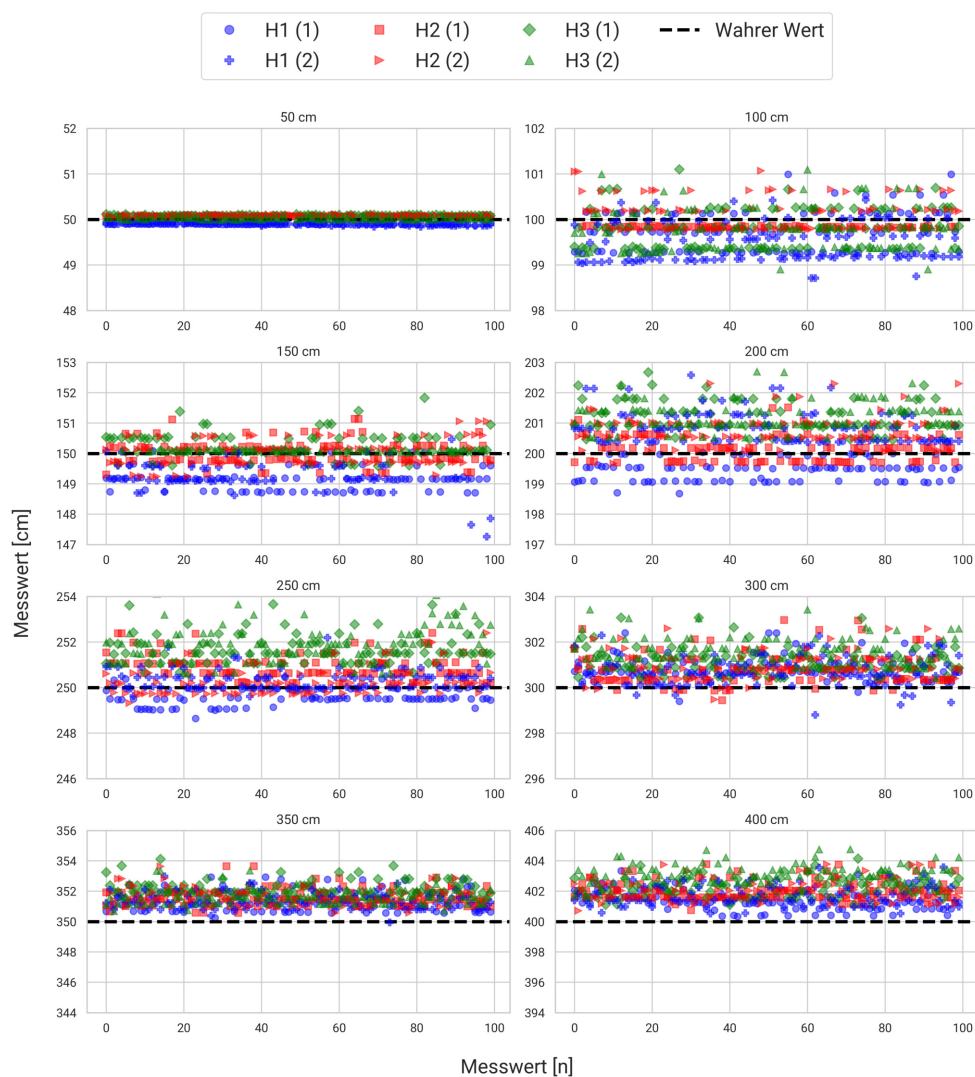


Abbildung 8.1: Messwerte der drei Sensorkits mit jeweils zwei Messreihen. (Eigene Darstellung)

Auch in der kontrollierten Umgebung können durch Störeinflüsse Ausreißer auftreten. Diese werden daher mit der im Kapitel 7.2.3 beschriebenen Methode ermittelt und aus den Messreihen entfernt. Da, wie beschrieben, die Temperatur einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit und damit auch auf die berechnete Entfernung hat, wurde jeweils vor einem Messpunkt die Temperatur gemessen und die Werte entsprechend korrigiert (siehe auch Kapitel 3.2.2). In Abbildung 8.1 sind die Ausreißer bereits entfernt, eine Grafik inklusive der Ausreißer ist im Anhang zu finden (siehe Abbildung A.8). Während der Versuchsdurchführung lag die Temperatur zwischen 21,18 und 21,75°Celsius. Aus der Abbildung 8.1 ist bereits ersichtlich, dass die Abweichungen vom wahren Wert mit zunehmender Entfernung vom Sensor größer werden. Um die mittlere Abweichung einer Messreihe an einem Messpunkt zu bestimmen, wurde für jede Messreihe der Mittelwert der Messungen (ohne Ausreißer) pro Messpunkt gebildet und die Abweichung vom wahren Wert berechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 8.2 dargestellt.

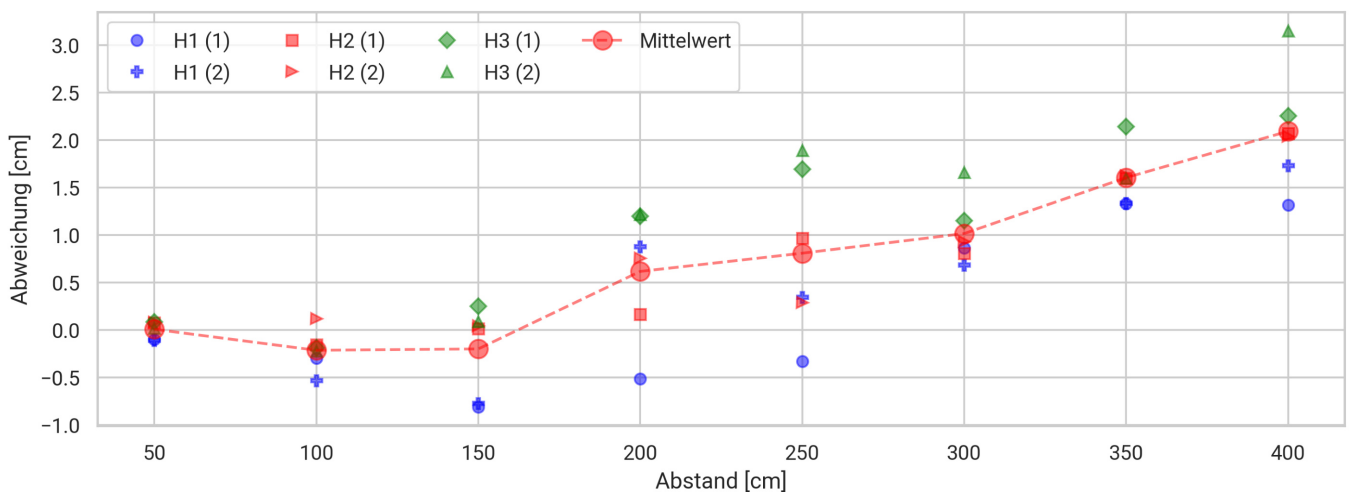


Abbildung 8.2: Abweichung der Mittelwerte der drei Sensorkits jeweils zwei Messreihen für die Messpunkte (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 cm). (Eigene Darstellung)

Die Abweichungen liegen zwischen -0,9 cm und 3,1 cm und nehmen bei größeren Abständen zu. Es wird deutlich, dass bereits in der kontrollierten Umgebung Unterschiede zwischen den einzelnen Sensorkits bestehen. Diese Unterschiede können auf Unterschiede in der Herstellung der Module, auf Unterschiede in der Temperaturmessung durch die verschiedenen Temperatursensoren oder auf den Einbau des Sensormoduls in die Halterung zurückzuführen sein. Die prototypische Halterung des Ultraschallsensors wurde beispielsweise im 3D-Druckverfahren hergestellt und kann daher Ungenauigkeiten aufweisen. Ein Einfluss des Spannungswandlermoduls, das die Spannung von 3,3 V auf 5 V erhöht, ist ebenfalls möglich, da hier leichte Schwankungen auftreten können, die sich auf die Messung der Ultraschallsensoren auswirken können. Nachfolgend sind die prozentualen Abweichungen der Messwerte vom wahren Wert in Abhängigkeit von der Entfernung mit dem Ultraschallsensor *HC-SR04* dargestellt.

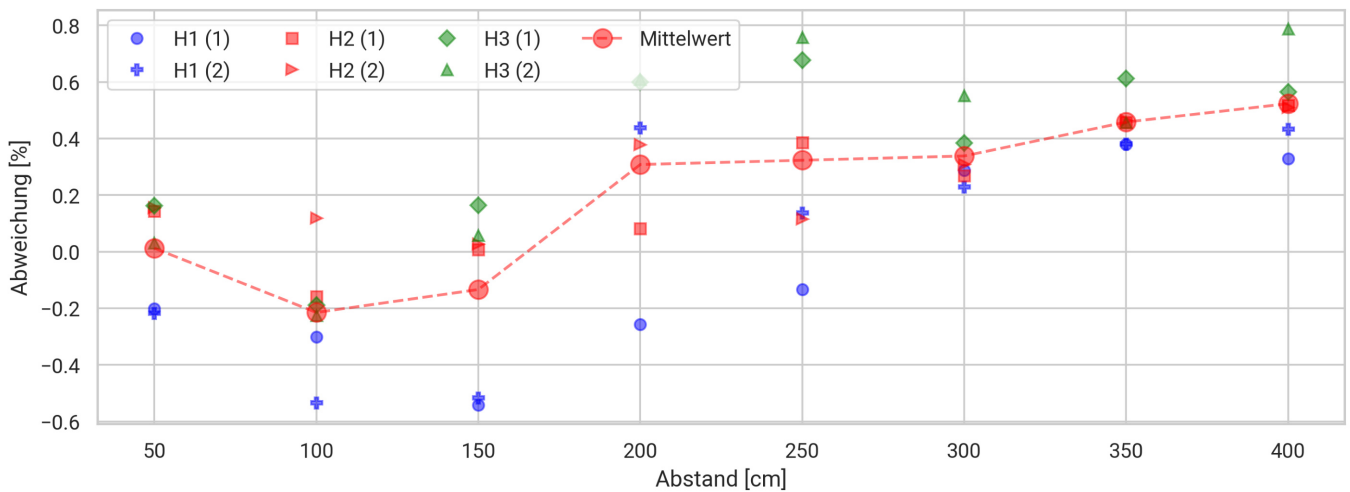


Abbildung 8.3: Prozentuale Abweichung der Messungen mit dem Ultraschallsensor *HC-SR04*. (Eigene Darstellung)

Die Untersuchung zeigt, dass die in der prototypischen Implementierung verwendeten Sensoren eine mittlere Abweichung von -0,2 bis 0,5 % vom Messwert aufweisen. An der oberen Grenze des Messbereichs von 400 cm ergeben sich somit Abweichungen von ca. 2 cm. Für die Beurteilung einer Hochwassersituation wird diese Genauigkeit als ausreichend eingestuft [184]. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass bei dynamischen Hochwassersituationen durch Wellenbewegungen und andere Objekte im Gewässer die Messungen einen größeren Schwankungsbereich aufweisen als die hier ermittelte Genauigkeit.

Untersuchung in einer Versuchsrinne

Die Einsatzfähigkeit des kostengünstigen Ultraschallsensors *HC-SR04* soll neben der Überprüfung der Genauigkeit durch einen praktischen Versuch in einer Versuchsrinne untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden drei Sensorkits in einem Versuch im Forschungslabor für Wasserbau der Technischen Universität Darmstadt getestet. Ziel dieser Untersuchung war es, zu prüfen, ob eine Korrelation zwischen den Sensorkits besteht und ob schnelle Wasserstandsänderungen über einen kurzen Zeitraum zuverlässig erfasst werden können. Die drei Sensoren konnten aufgrund ihrer flexiblen Halterung einfach mit Gewebe-Klebeband an der Innenwand der Versuchsrinne befestigt werden. Dabei wurde auf eine einsetztypische Montage und Ausführung des Aufbaus geachtet, um das System auch unter diesem Aspekt überprüfen zu können. So erfolgte die Ausrichtung der Sensorköpfe mit Hilfe der angebrachten Libelle ohne weitere Hilfsmittel. Nach der Montage wurden im Rahmen der Untersuchungen verschiedene Wasserstände im Gerinne angefahren und für eine bestimmte Zeit gehalten. Nach einer bestimmten Zeit wurde der Wasserstand wieder abgesenkt und der Vorgang wiederholt. Die Messungen wurden im Minutentakt durchgeführt und mittels LoRaWAN an das MOTARK-System übertragen. Neben der Erfassung von Wasserstand, Temperatur und Feuchte wurde auch die Erfassung von Personengruppen aktiviert (siehe Abbildung 8.7).

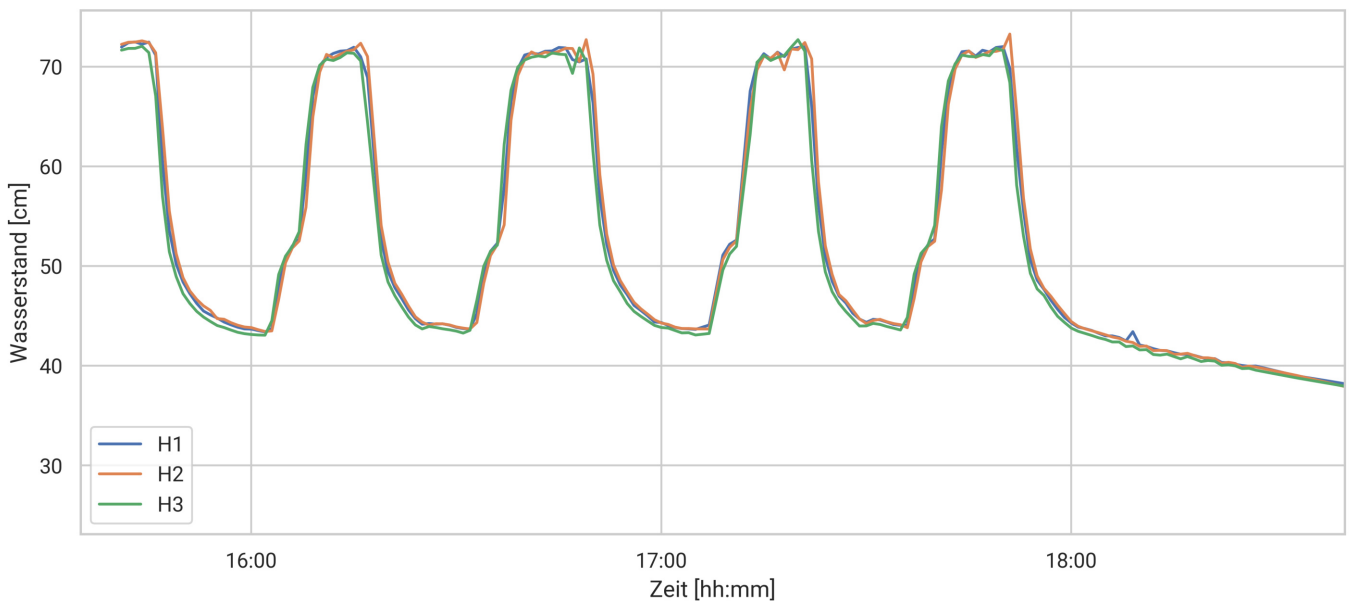


Abbildung 8.4: Aufgezeichnete Wasserstände der drei Sensoren im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt. (Eigene Darstellung)

Für die in Abbildung 8.4 dargestellten Werte wurde der Sohlabstand von den Sensorwerten subtrahiert. Die Sohlmessung wurde am nächsten Tag im leeren Gerinne durchgeführt. Die anschließende Auswertung der Sensordaten zeigt geringfügige Unterschiede in den absolut gemessenen Distanzen, die z. B. auf die unterschiedliche Neigung der Sensorköpfe zurückzuführen sind. Insgesamt zeigen die Sensoren jedoch einen konsistenten Verlauf. Damit zeigt der Versuch, dass die Sensoren auch bei einer einsatztypischen Montage ohne Hilfsmittel zur Ausrichtung und Positionierung eine zuverlässige und konsistente Messung der Wasserstände ermöglichen. Darüber hinaus belegt der Versuch, dass die Sensoren auch schnelle Wasserstandsänderungen erfassen können. Im Hochwasserfall ist eine Messung bis zur Gewässersohle nicht möglich. Es wird daher empfohlen, wie im Konzeptteil beschrieben, die zum Zeitpunkt des Einbaus gemessene Distanz als Basismessung zu betrachten und die nachfolgenden Messwerte auf diesen Messwert zu beziehen. Auf diese Weise kann die zeitliche Veränderung des Wasserspiegels dargestellt werden.

Untersuchungen zur Erfassung von Personengruppen

Im Folgenden wird die Methode der Erfassung von Personengruppen mittels BLE- und Wi-Fi-Scanning auf ihre Anwendbarkeit und Einsatzfähigkeit hin untersucht. Wie beschrieben ist eine direkte Zuordnung der detektierten Geräte zu einer exakten Personenanzahl nicht möglich. Daher soll nachfolgend geprüft werden, ob die Sensormodule Personengruppen zuverlässig erfassen können. Dazu werden die Daten eines Langzeitversuchs in einem Universitätsgebäude sowie die Daten während der Untersuchung im wasserbaulichen Forschungslabor ausgewertet. Das System ermöglicht grundsätzlich die Verwendung von BLE und Wi-Fi gleichzeitig, zur Beurteilung der Anzahl der Personen wird allerdings die Verwendung von BLE empfohlen [19]. Daher werden nachfolgend nur diese Daten verwendet. Ob ein Gerät erfasst wird, hängt dabei hauptsächlich

von der BLE-Reichweite des jeweiligen Gerätes und dem Mikrocontroller ab, der nach den Geräten sucht. Störeinflüsse oder Strukturen wie Wände oder Gebäude können einen Einfluss haben.

Für den Langzeitversuch wurde in einem Büro ein Sensormodul installiert, welches alle fünf Minuten die Anzahl der erfassten Geräte an den Server übermittelte. Die ausgewerteten Daten wurden im Zeitraum vom 08.02.2022 bis zum 20.02.2023 erhoben. Für den Untersuchungszeitraum liegen keine tatsächlichen Informationen über die Anzahl der Personen vor Ort vor. Die Auswertung erfolgt daher auf Basis bekannter Zeiträume, in denen sich keine oder nur wenige Personen im Gebäude aufhalten. Zum einen kann z. B. die durchschnittliche Anzahl der erfassten Personen pro Wochentag untersucht werden (siehe Abbildung 8.5).

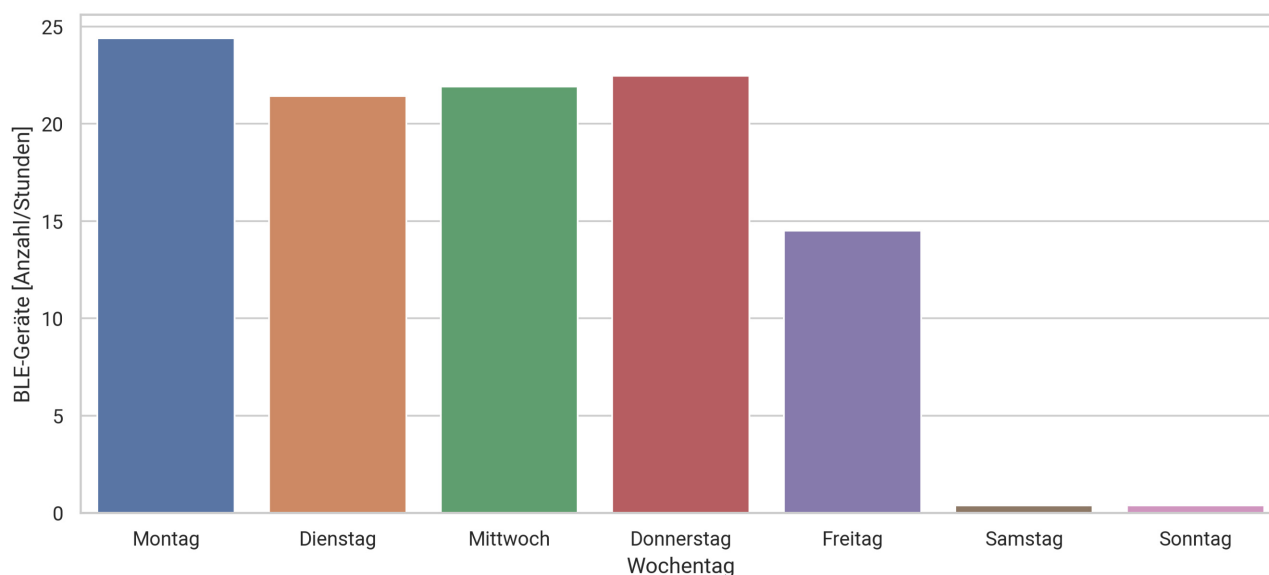


Abbildung 8.5: Durchschnittliche Anzahl der erfassten Personen in einem Bürogebäude an den jeweiligen Wochentagen. Berücksichtigt wurden nur die Stunden zwischen 08:00 und 20:00 Uhr. (Eigene Darstellung)

Diese Untersuchung zeigt, dass am Wochenende im Durchschnitt keine oder nur wenige Personen vom Sensor erfasst wurden. Dies deckt sich mit der allgemeinen Belegung des Gebäudes. Für eine zeitliche Analyse der erfassten Personen wird die Anzahl der erfassten Personen über die Tage einer Woche dargestellt (siehe Abbildung 8.6). Diese Auswertung zeigt eine Übereinstimmung mit der üblichen Belegung des Gebäudes. So ist z. B. aus den Daten ersichtlich, dass sich während der Mittagszeit weniger Personen im Gebäude bzw. in der Nähe des Sensormoduls aufhalten. Insgesamt zeigen die Untersuchungen des Langzeittests deutlich, dass durch die Erfassung der Geräte Rückschlüsse auf die Anzahl der Personengruppen vor Ort gezogen werden können.

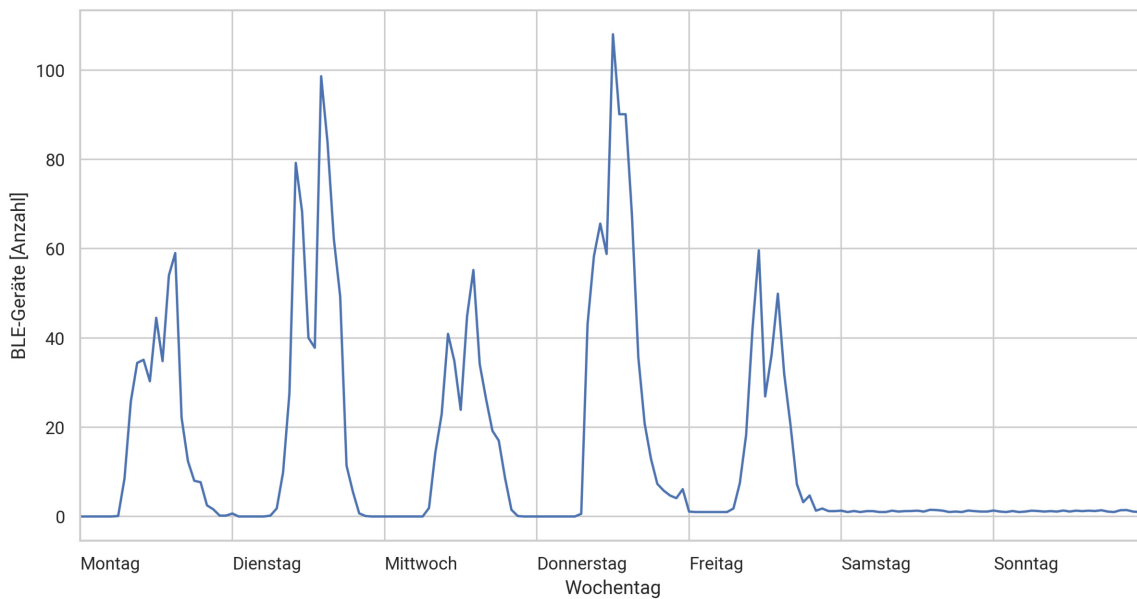


Abbildung 8.6: Anzahl der erfassten Personen in einem Bürogebäude während einer ausgewählten Woche. Als Beispiel ist hier die Woche vom 05.12. bis 12.12.2022 dargestellt. (Eigene Darstellung)

Neben dem Langzeitversuch wurden die Daten auch während des Versuchs in dem wasserbaulichen Forschungslabor ausgewertet. Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung war eine Gruppe von Studierenden und Betreuern vor Ort. Im Folgenden wird anhand der von den einzelnen Sensorkits erfassten und aufgezeichneten Geräte überprüft, inwieweit eine Veränderung der Personenzahl am Ende der Veranstaltung erkennbar ist.

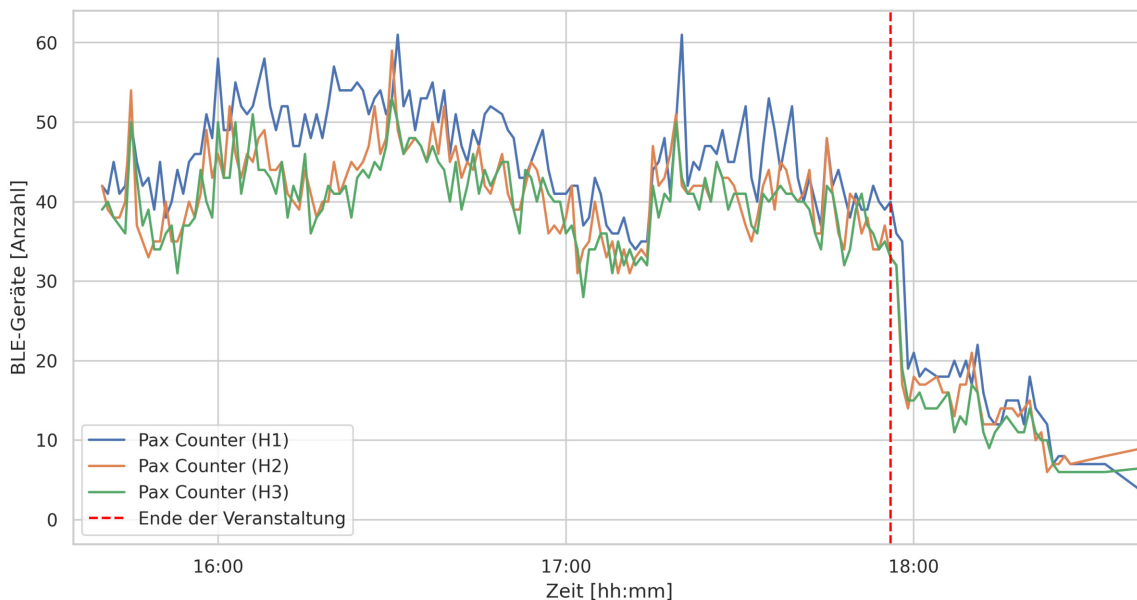


Abbildung 8.7: Zeitlicher Verlauf der erfassten Personen der drei eingesetzten Sensoren während einer Versuchsreihe in der Wasserbauhalle. (Eigene Darstellung)

Die Daten zeigen, dass sich während der Versuchsdurchführung ca. 40 - 50 Personen in der Nähe der Versuchsrinne aufhielten. Zum Ende der Veranstaltung gegen 18:00 Uhr sinkt diese Zahl innerhalb weniger Minuten auf ca. 15 Personen. Darüber hinaus zeigt die Auswertung der Daten, dass die Module eine ähnliche Anzahl von Personengruppen erfassen. Der Sensor (H1) erfasst im Durchschnitt mehr Personen, was darauf zurückzuführen ist, dass er ca. 1,5 m näher an den Personengruppen montiert war als die beiden anderen Module.

Die Untersuchungen im Bürogebäude sowie während des Einsatzes in der Wasserbauhalle zeigen das Potenzial der Erfassung von Personengruppen mit einfachen, auf dem Controller vorhandenen Technologien. Die ermittelten Personenzahlen werden aufgrund der Erfahrungen des Autors als realistisch eingeschätzt. Insbesondere die schnelle Erfassung der Veränderung der Personenanzahl um die Sensorkits kann den Einsatzkräften im Katastrophenfall, z.B. bei Hochwasser, Hinweise zur Einordnung der Lage geben. Wobei, wie bereits geschrieben, diese Daten nicht allein zur Entscheidungsfindung der Einsatzkräfte herangezogen werden können. Sie können aber ein weiteres Indiz für die Priorisierung von Rettungsmaßnahmen sein.

8.1.2. Untersuchungen der Datenübertragung

Wie in den Grundlagen beschrieben, ist die Übertragung von den Sensoren zur Basisstation mit der gewählten Funktechnologie (LoRaWAN) von verschiedenen Faktoren abhängig. Eine allgemeingültige Aussage über die maximale Entfernung zwischen Sensorkit und Basisstation kann nicht getroffen werden. Das System ist so konzipiert, dass es ohne detaillierte Ortskenntnisse eingesetzt werden kann. Um eine Einordnung der Reichweite der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten prototypischen Basisstation inklusive Antenne zu ermöglichen, wurden zwei Untersuchungen durchgeführt. Der erste Versuch wurde in einer städtischen Umgebung und der zweite Versuch in einer ländlichen Umgebung durchgeführt. Für die praktische Erprobung des Einsatzsets wurde die Antenne auf einem handelsüblichen Kamerastativ befestigt. Für die Befestigung wurde eine angepasste Halterung entwickelt und mittels 3D-Druckverfahren hergestellt (siehe Abbildung 8.8). Die Montage auf dem Kamerastativ ermöglicht einen flexiblen Einsatz der Basisstation unabhängig vom Untergrund und erlaubt zudem, dass die Antenne über kleine Dachaufbauten hinausragt.

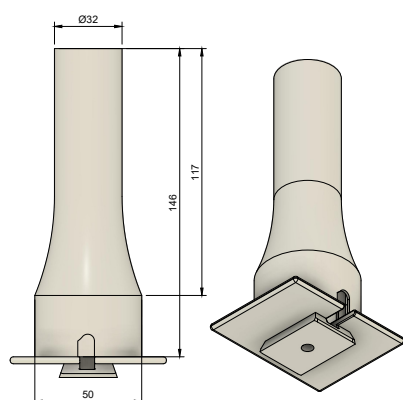


Abbildung 8.8: Darstellung des Entwurfs der Antennenhalterung (links) und Nahaufnahme der 3D-gedruckten Antennenhalterung (rechts). (Eigene Aufnahmen)

Für eine optimale Reichweite des Systems sollte möglichst eine Sichtverbindung zwischen den Sensorkits und der Basisstation bestehen. Daher ist ein erhöhter Standort der Basisstation besonders vorteilhaft. Die Auswahl der Standorte für die Basisstation erfolgte in den Versuchen auf Basis der Verfügbarkeit, einer Analyse von Höhenkarten sowie mit Hilfe des Online-Tools *Panorama* von Kosowsky. Das Tool ermöglicht es, die direkten Sichtverbindungen für einen ausgewählten Punkt zu berechnen und auf einer Karte zu visualisieren [124]. Dazu wird zunächst ein Standort ausgewählt und ggf. eine Höhe über Grund angegeben, z. B. wenn die Station auf einem Gebäude installiert ist. Anschließend führt das Tool eine Analyse durch und zeigt auf einer Karte alle Gebiete an, die direkten Sichtkontakt zum angegebenen Punkt haben (siehe beispielsweise Abbildung 8.11 links). Zusätzlich ist es möglich, sich die direkte Verbindungslinie zwischen zwei Punkten anzeigen zu lassen (siehe Abbildung 8.9). Dies ist hilfreich, um abzuschätzen, wie viele Strukturen sich zwischen einem angestrebten Messpunkt und der Basisstation befinden. Das Tool greift auf verschiedene Datenquellen zurück, wie z. B. Daten der amerikanischen Weltraumbehörde *NASA* oder des *U.S. Naval Observatory* (Forschungsinstitut der U.S. Navy) [124].

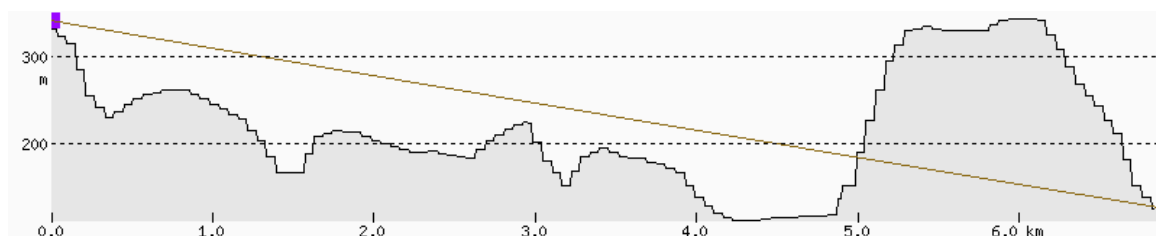


Abbildung 8.9: Beispielhaftes Profil der Sichtverbindung zwischen dem Standort einer Basisstation (Ausichtspunkt Bad Neuenahr, Ahrweiler) und einem Punkt im Ort Dernau. (Erstellt mit *Profil-Tool* [124]).

Um die Abdeckung und damit die mögliche Datenverbindung zwischen einem Sensor und der Basisstation testen zu können, wurden zwei Mikrocontroller, die über ein GPS-Modul verfügen, so programmiert, dass sie regelmäßig ihre GPS-Koordinaten senden. Dazu wurde der von Gabriel entwickelte Quellcode angepasst und auf zwei *TTGO-Beam* Mikrocontroller geladen [77]. Dieser Controller verfügt über ein fest eingebautes GPS-Modul, welches bei vorhandenem GPS-Signal automatisch die Position ermittelt und in dem im Quellcode festgelegten Intervall an die Basisstation sendet. Die Basisstation speichert dann die Stärke des empfangenen Signals und die Koordinaten des Sensors in einer Datenbank. Für das *MOTARK*-System wird hier die Datenbank *InfluxDB* verwendet. Während der Versuchsdurchführung können die Daten live über ein Dashboard verfolgt werden. Diese Darstellung entspricht der Positionsverfolgung einer Einsatzkraft oder eines Sensors im Katastropheneinsatz. Hierfür wurde in *Grafana* ein separates Dashboard mit Kartendarstellung implementiert. Zur Auswertung und Darstellung wurden die Daten anschließend in das Geoinformationssystem *QGIS* geladen. Wie in den Grundlagen beschrieben, verfügt *LoRaWAN* über verschiedene Einstellmöglichkeiten, welche die Reichweite der Übertragung sowie den Abstand zwischen den einzelnen Nachrichten beeinflussen. Für die Untersuchungen wurde jeweils ein Controller mit der *Data Rate 0*, dies entspricht der Data Rate mit der größtmöglichen Reichweite und ein Controller mit der *Data Rate 2* programmiert. Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

Versuchsaufbau städtisches Umfeld

Zunächst wird die Reichweite sowie die generelle Einsatzfähigkeit des entwickelten Systems anhand eines Versuchs in einer hessischen Stadt (Darmstadt) untersucht. Dazu wurde die Basisstation am Stadtrand auf dem Dach eines Gebäudes des Campus Lichtwiese der Technischen Universität Darmstadt installiert. Anschließend wurde das Stadtgebiet auszugsweise mit zwei GPS-Mapper abgefahren. Die Abbildung 8.10 zeigt die Installation der Basisstation, bei der das bereits vorgestellte Stativ sowie der wetterfeste Schutzkoffer zum Einsatz kamen. Die Basisstation wurde entsprechend dem Konzept autark über eine Powerbank mit Strom versorgt.



Abbildung 8.10: Fotoaufnahmen der Basisstation montiert auf dem Dach des L5|01 Gebäudes der TU Darmstadt. (Eigene Aufnahmen)

Auswertung

Die Daten der GPS-Mapper zeigen, dass ein großer Teil des Stadtgebietes abgedeckt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass der durchgeführte Versuch keine abschließende Bewertung für alle Gebiete liefern kann, da nur exemplarisch bestimmte Bereiche der Stadt untersucht wurden. Anhand der durchgeführten Sichtkontaktanalyse (siehe Abbildung 8.11 links) wird deutlich, dass der Standort der Basisstation auf dem Campus Lichtwiese eine gute Abdeckung des Stadtgebietes ermöglicht. In nördlicher Richtung konnte mit 5,2 km die größte Entfernung gemessen werden. Weiterhin zeigt die Untersuchung, dass auch in Bereichen, in denen aufgrund der Topologie keine Sichtverbindung zur Basisstation besteht, eine Verbindung möglich ist. Darüber hinaus wird deutlich, dass auch mit den im städtischen Bereich vorhandenen Störeinflüssen und Gebäuden das Stadtgebiet gut abgedeckt werden kann.

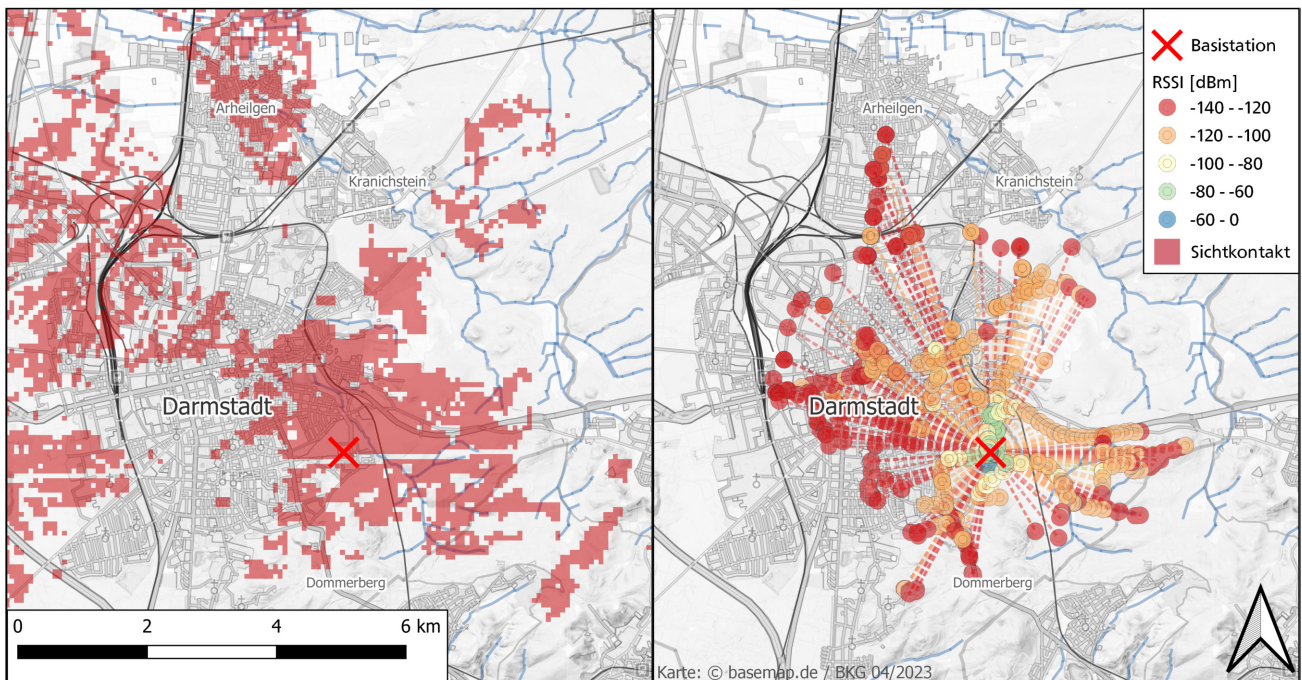


Abbildung 8.11: Messpunkte während des Versuchs im städtischen Umfeld. (Eigene Darstellung)

Der gewählte Standort auf dem Campus Lichtwiese stellt somit für das Stadtgebiet eine gute Netzabdeckung dar. Im westlichen Bereich des Standortes ist die Abdeckung, insbesondere aufgrund der Topologie geringer. Darüber hinaus konnte im Rahmen der Untersuchung festgestellt werden, dass der Verlauf des Darmbachs, ein kleines Fließgewässer in der Nähe des Campus, von der Quelle bis zur Mündung in den Badesee Woog vollständig erfasst werden kann.

Versuchsaufbau ländliches Umfeld

Wie in den Grundlagen zu LoRaWAN beschrieben, ist die Reichweite in ländlichen Gebieten im Allgemeinen höher als in städtischen Gebieten. Um dies auch für das entwickelte System zu bestätigen, wurde ein Versuchsaufbau im ländlichen Raum gewählt. Das ausgewählte Gebiet umfasst das Einzugsgebiet des Fischbachs, einem Fließgewässer im nördlichen Odenwald. In diesem Gebiet wird zudem seit 2016 vom *Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung (ihwb)* der Technischen Universität Darmstadt ein hydrologisches Feldlabor betrieben [49], [66]. Die Standortwahl erfolgte analog zum städtischen Versuchsaufbau anhand der Auswertung von Höhenkarten sowie der Verfügbarkeit. Als Standort für die Basisstation wurde der ehemalige Geschützturm *Bollwerk* im Stadtteil Fischbachtal ausgewählt. Der Turm befindet sich bereits in erhöhter Lage und die Installation der Basisstation ist zudem auf dem Dach des Turmes möglich. Anschließend wurde das Einzugsgebiet mit zwei GPS-Mappern abgefahren. Die Abbildung 8.16 zeigt die Installation der Basisstation auf dem Turm. Analog zu den städtischen Versuchen wurde wieder das Stativ sowie die Stromversorgung über eine Powerbank verwendet.



Abbildung 8.12: Fotoaufnahmen der Basisstation montiert auf dem Geschützturm Bollwerk in Fischbachtal. (Eigene Aufnahmen)

Auswertung

Wie bereits bei der Untersuchung im städtischen Bereich konnte die generelle Einsatzfähigkeit des Systems festgestellt werden. Der Aufbau sowie die Installation der Basisstation erfolgt ohne weitere Hilfsmittel und ist einfach durchführbar. Das System ist flexibel genug, um auf die Gegebenheiten vor Ort reagieren zu können. Der gewählte Standort hat sich bereits aufgrund der Sichtverbindungsanalyse als besonders geeignet erwiesen (siehe Abbildung 8.13 links). Dies konnte auch durch die durchgeführten Messungen bestätigt werden. Eine maximale Reichweite von 13,2 km sowie die Abdeckung des größten Teils des Fischbachlaufs und Teile der Gersprenz und weiterer Gewässer zeigen das Potenzial des Systems.

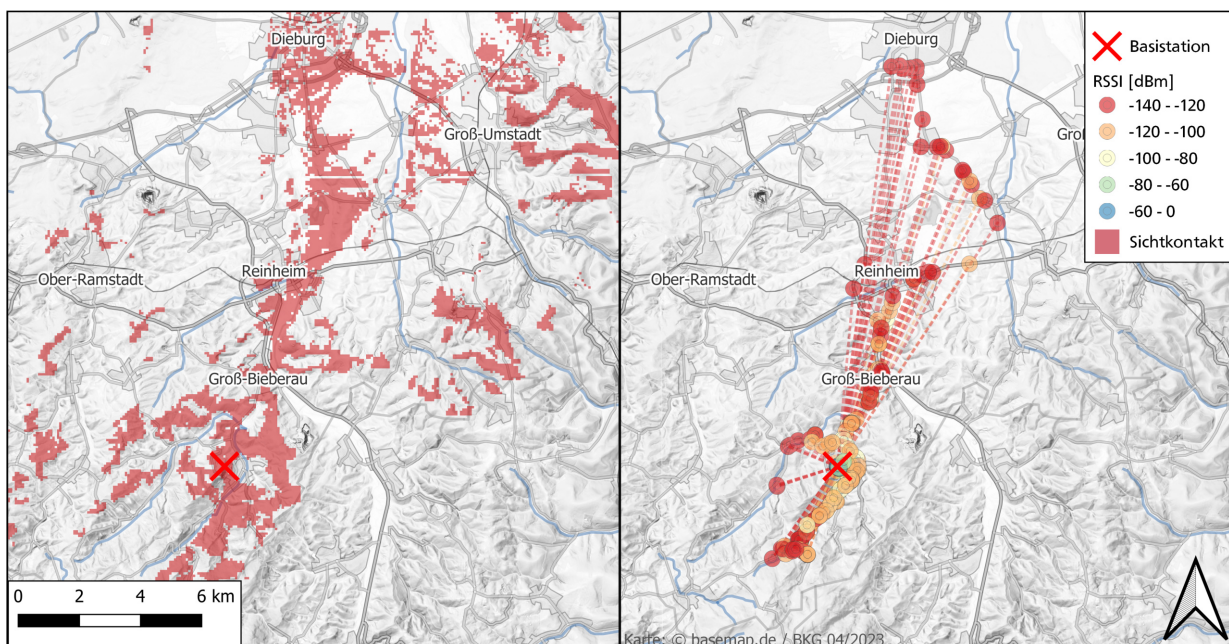


Abbildung 8.13: Messpunkte während des Versuchs im ländlichen Umfeld. (Eigene Darstellung)

Zusätzlich wurde die Abdeckung einiger der im Rahmen des Feldlabors des *ihwb* im Einzugsgebiet des Fischbachs vorhandenen Messstellen ausgewertet. Die Daten zeigen (siehe Abbildung 8.14), dass ein Großteil der Messstellen durch die Basisstation abgedeckt werden kann.

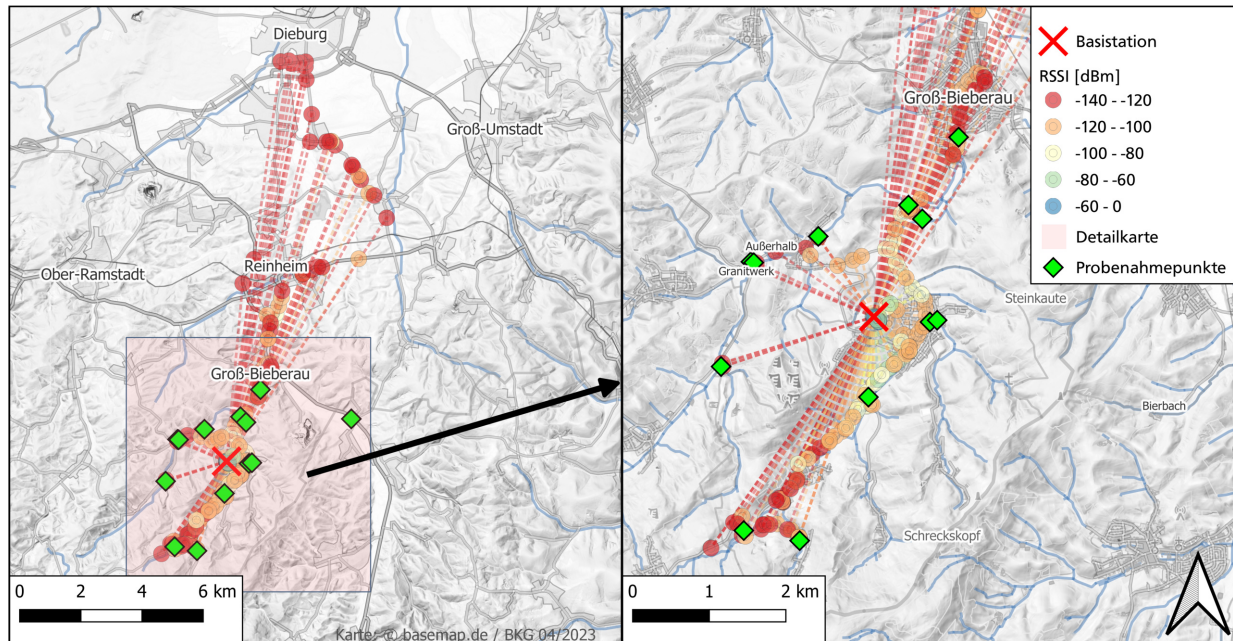


Abbildung 8.14: Messpunkte während des Versuchs im ländlichen Umfeld, einschließlich Probenahmestellen [49]. (Eigene Darstellung)

8.1.3. Zusammenfassung der Versuche

Die durchgeführten Praxistests zeigen, dass einerseits das im Rahmen der Arbeit entwickelte Sensorkit einsatzfähig ist und andererseits mit den prototypisch entwickelten Basisstationen und Sensorkits eine ausreichende Reichweite für städtische und ländliche Gebiete erreicht werden kann. Die Darstellung der Auswertungen mit der Überlagerung der Sichtkontaktanalysen für die jeweiligen Versuche sind im Anhang zu finden (siehe Kapitel A.7). Wie bereits im konzeptionellen Teil sowie in der demonstrierten Umsetzung anhand der Grundlagen beschrieben, hängt die Reichweite im Wesentlichen von einer möglichen Sichtverbindung sowie von Hindernissen wie z.B. Gebäuden ab. Dies wird auch durch die Auswertung der Empfangsstärke in Abhängigkeit von der jeweiligen Entfernung zur Basisstation verdeutlicht (siehe Abbildung 8.15). In diese Grafik sind auch die Daten aus dem nachfolgend beschriebenen Versuch im Ahrtal eingeflossen.

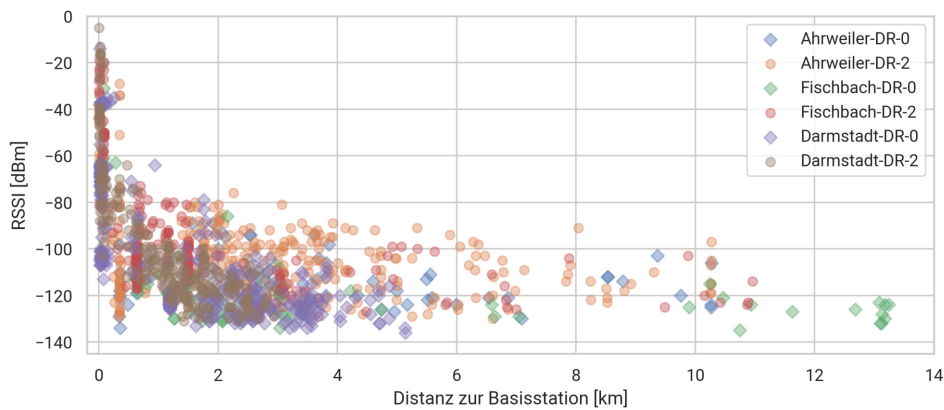


Abbildung 8.15: Empfangsstärke in Abhängigkeit der Entfernung zur Basisstation. (Eigene Darstellung)

Darüber hinaus haben die Praxistests gezeigt, dass Tools wie *Panorama* von Kosowsky die Standortwahl deutlich vereinfachen können. Das Tool ermöglicht auch die Suche nach dem höchsten Punkt in einem bestimmten Kartenbereich. Für den praktischen Einsatz im MOTARK-System sollte diese Funktionalität langfristig in MOTARK-Web integriert werden, um keine weitere Abhängigkeit von einem externen Tool zu haben und eine einfachere Bedienung für die Einsatzkräfte zu gewährleisten. Auch die Integration von 3D-Gebäudeinformationen in das Tool erweitert die Auswahlmöglichkeiten für einen geeigneten Standort. Darüber hinaus ist die Installation der Antenne auf Stativen mit einer Höhe von 10 - 20 m eine Möglichkeit, die Abdeckung zu erweitern, insbesondere bei einer Installation in der Nähe einer Einsatzzentrale.

Im Rahmen der praktischen Versuche wurde gleichzeitig das für das MOTARK-Basic-Sensor-Kit konzipierte Befestigungssystem untersucht. Zum einen wurde ein Sensor mittels Klebeband an einer Brücke befestigt, zum anderen wurde ein Sensor an einem Baum installiert. Bei beiden Installationen wurden außer den genannten Befestigungsmaterialien keine weiteren Hilfsmittel benötigt. Die Auswertung der Daten der installierten Sensoren zeigt zudem, dass in den Daten keine Veränderungen aufgrund der Halterung oder der Befestigungsmethode zu erkennen sind.



Abbildung 8.16: Fotoaufnahmen der befestigten Sensoren an einem Baum (links) und einer Brücke (rechts). (Eigene Aufnahmen)

8.2. Anwendungsbeispiel: Ahrtal

Die Hochwasserkatastrophe im Ahrtal wurde bereits im Kapitel 2.4 als Beispiel für eine außergewöhnliche und lokal sehr unterschiedliche Hochwassersituation dargestellt. In diesem Kapitel wird zum einen der demonstrative Einsatz eines MOTARK-Einsatz-Sets im Kreis Ahrweiler vorgestellt. Zum anderen wird exemplarisch die Anbindung der für das Einzugsgebiet der Ahr zur Verfügung stehenden öffentlichen Daten mit Hilfe von EZSTA an verschiedene Programme dargestellt.

8.2.1. Beispielhafter Einsatz eines MOTARK-Einsatz-Sets

Als Beispiel wurde die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler gewählt. Die Stadt liegt westlich von Sinzig kurz vor der Mündung der Ahr in den Rhein und war vom Hochwasser besonders stark betroffen. Von den 134 Toten im Ahrtal sind mehr als die Hälfte in diesem Gebiet zu verzeichnen [14, S. 32]. Die vorangegangene Untersuchung zur Abdeckung des mobil-autarken Monitoringsystems konnte die in den Grundlagen beschriebenen Inhalte zur Reichweite bestätigen. Insbesondere wenn eine Sichtverbindung zwischen den Sensorkits und der Basisstation ohne größere Hindernisse besteht, ist eine Übertragung über große Entfernungen möglich. Ausschlaggebend hierfür ist vor allem der Standort der Basisstation. Der Aussichtspunkt Neuenahrer Berg hat sich anhand der Analyse der Höhenkarte als ein hoher, gut erreichbarer und frei verfügbarer Standort herausgestellt. Zusätzlich verfügt der Aussichtspunkt über einen Turm (ca. 10 m hoch), auf dem die Basisstation inklusive Antenne montiert wurde (siehe Abbildung 8.17). Die Analyse mit dem Online-Tool *Panorama* von Kosowsky zeigt bereits, dass von diesem Standort eine gute Sichtverbindung zu den umliegenden Ortschaften besteht [124].



Abbildung 8.17: Fotoaufnahme der Basisstation (links) montiert auf dem Aussichtsturm (rechts) am Aussichtspunkt Neuenahrer Berg. (Eigene Aufnahmen)

8.2.2. Auswertung des Einsatzes im Kreis Ahrweiler

Mit Hilfe der beiden eingesetzten GPS-Mapper konnte untersucht werden, mit welcher Empfangsqualität die Daten entlang der Ahr übertragen werden können. Dazu wurden, wie auch bei den anderen Versuchen, die *Data Rate 0* sowie die *Data Rate 2* verwendet. Mit der *Data Rate 0* (SF 12 BW 125) ist die höchste Reichweite realisierbar. Insgesamt konnten ca. 17 Flusskilometer der Ahr im Rahmen des Versuches erfasst werden. In westlicher Richtung wurde eine Reichweite von ca. 7 km erreicht. Im weiteren Verlauf sind die Störungen aufgrund der geographischen Gegebenheiten zu groß, um eine größere Reichweite zu erzielen. In östlicher Richtung wurden im Rahmen der Untersuchungen Messungen bis zur Rheinmündung durchgeführt. Hier betrug die Reichweite ca. 10,3 km, es ist jedoch aufgrund der Auswertung der Sichtkontakte sowie der guten Empfangsstärke an der Mündung davon auszugehen, dass die Reichweite in dieser Richtung noch größer ist.

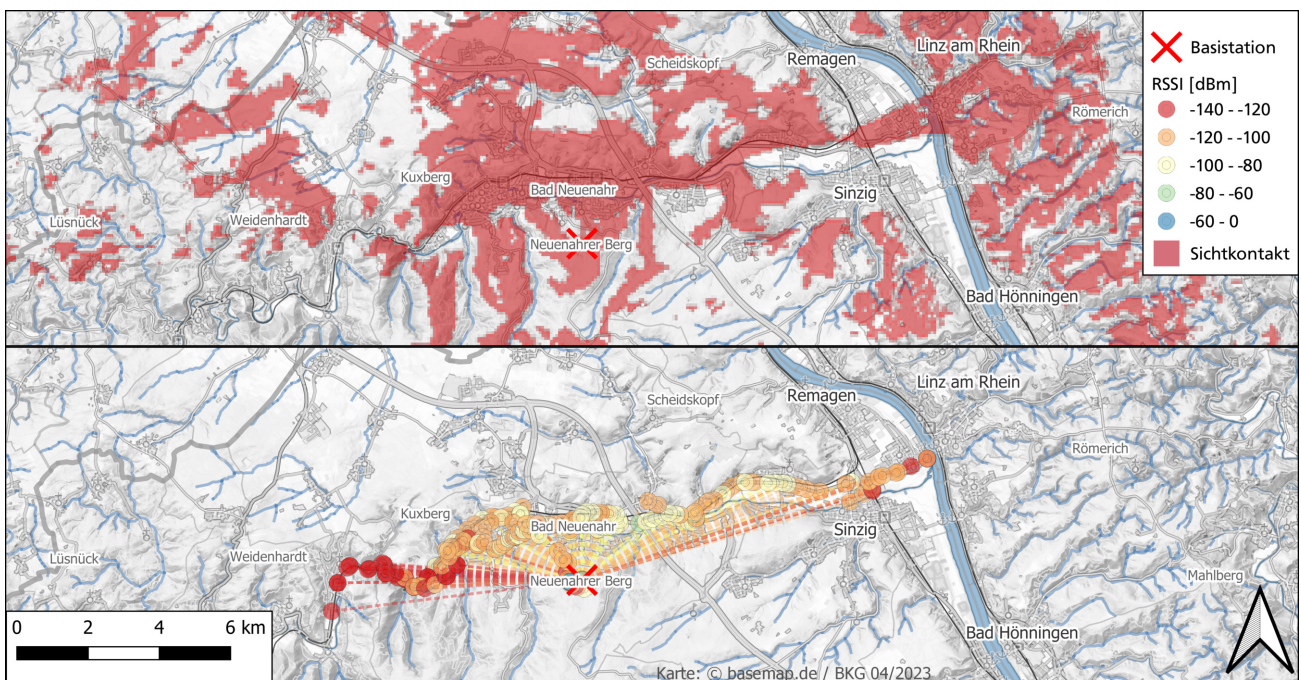


Abbildung 8.18: Abdeckung der Ahr mit den eingesetzten Sensorkits. (Eigene Darstellung)

In diesem Versuch wurde mit dem Aussichtsturm ein sehr guter Standort für eine Abdeckung gewählt (siehe Abbildung 8.18). Die Darstellung der Auswertung mit der Überlagerung der Sichtkontaktanalyse für den Untersuchungsraum im Ahrtal befindet sich im Anhang (siehe Kapitel A.7). Die Studie zeigt, dass das Stadtgebiet vollständig abgedeckt werden kann. Hier wäre z.B. die Installation von Sensorkits in Straßen oder in der Nähe von kritischen Infrastrukturen möglich. Darüber hinaus wäre auch die Installation von Sensoren an Brücken denkbar, um den Wasserstand an verschiedenen Stellen im Vorfeld einer Hochwassersituation zu erfassen. Im Einsatzfall ist die freie Standortwahl auch aus zeitlichen Gründen nicht immer gegeben. Daher wurde nachfolgend untersucht, inwieweit eine Installation der Basisstation auf dem Gebäude der Kreisverwaltung Ahrweiler, in dem sich auch der Kristenstab befindet, möglich ist. Dabei wurde eine Gebäudehöhe von 15 m sowie die Installation der Antenne auf einem Stativ (10 m hoch) angenommen. Die

berechneten Sichtkontakte zeigen, dass die Versorgung entlang der Ahr sowie im gesamten Kreisgebiet durch eine Basisstation sichergestellt wäre. Vorteil der Installation direkt am Krisenstab ist auch, dass keine weitere Übertragung von der Station zu den Entscheidungsträgern notwendig ist. Im Einsatzfall wird empfohlen, möglichst an beiden Standorten eine Basisstation zu installieren, so dass zum einen durch den Standort am Aussichtsturm eine optimale Abdeckung gegeben ist und gleichzeitig mit der Basisstation beim Krisenstab jederzeit die Informationsweitergabe gewährleistet werden kann.

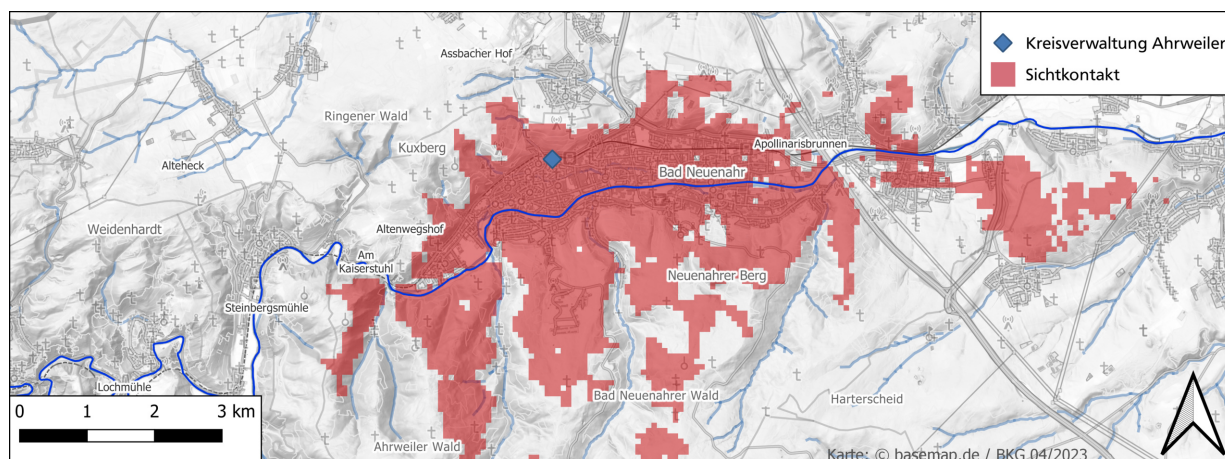


Abbildung 8.19: Mögliche Sichtverbindungen vom Standort Kreisverwaltung Ahrweiler. (Eigene Darstellung)

8.2.3. Verwendung von EZSTA

Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept EZSTA und die zugehörigen Tools sollen dazu dienen Datenquellen, welche öffentlich als Schnittstellen zur Verfügung stehen einfach nutzbar zu machen. Für das Ahrtal stehen als offiziellen Daten die Pegelstationen zur Verfügung (siehe Kapitel 2.4.3). Üblicherweise werden die Daten von den Einsatzkräften hierzu über die Weboberfläche eingesehen. Beispielhaft wird in diesem Kapitel die Einbindung der Pegelstände in die Software *Grafana* und *QGIS* und in einer einfachen Weboberfläche gezeigt. Dabei wurde für die Pegelstationen ein Mapping angelegt, welches mittels des EZSTA-Service eine STA-konforme Rückgabe der Daten ermöglicht.

Einbindung in Grafana

Grafana ist, wie beschrieben, ein webbasiertes Tool zur Darstellung von Daten in Form eines Dashboards. Besonders hervorzuheben ist die Flexibilität und die Möglichkeit, Informationen aus verschiedenen Quellen zusammenzustellen. So ist es möglich, dass sich die Einsatzkräfte ein spezielles Dashboard z. B. für den Hochwassereinsatz zusammenstellen können. Für die Integration der Daten in Grafana wurde das bereits in den Grundlagen beschriebene Plugin *Grafana-STA-Datasource* [75] verwendet. Für den Pegel Altenahr wurde eine neue Datenquelle mit Angabe der EZSTA-Service-URL sowie der zugehörigen ID des Mappings angelegt. Anschließend konnten die Daten wie gewohnt in Grafana verwendet und dargestellt werden. Auch hier ist wieder die Standardisierung als großer Vorteil zu nennen, ist einmal ein Dashboard für eine STA-Datenquelle

erstellt, also Panels zur Kartendarstellung sowie Graphen, in denen die Sensorwerte angezeigt werden können, so muss nur die Datenquelle ausgetauscht werden, um eine andere Schnittstelle verwenden zu können, unabhängig davon, wie die Daten ursprünglich vorlagen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber der herkömmlichen Vorgehensweise, bei der die Parameter für jede API einzeln ausgewählt werden müssen.

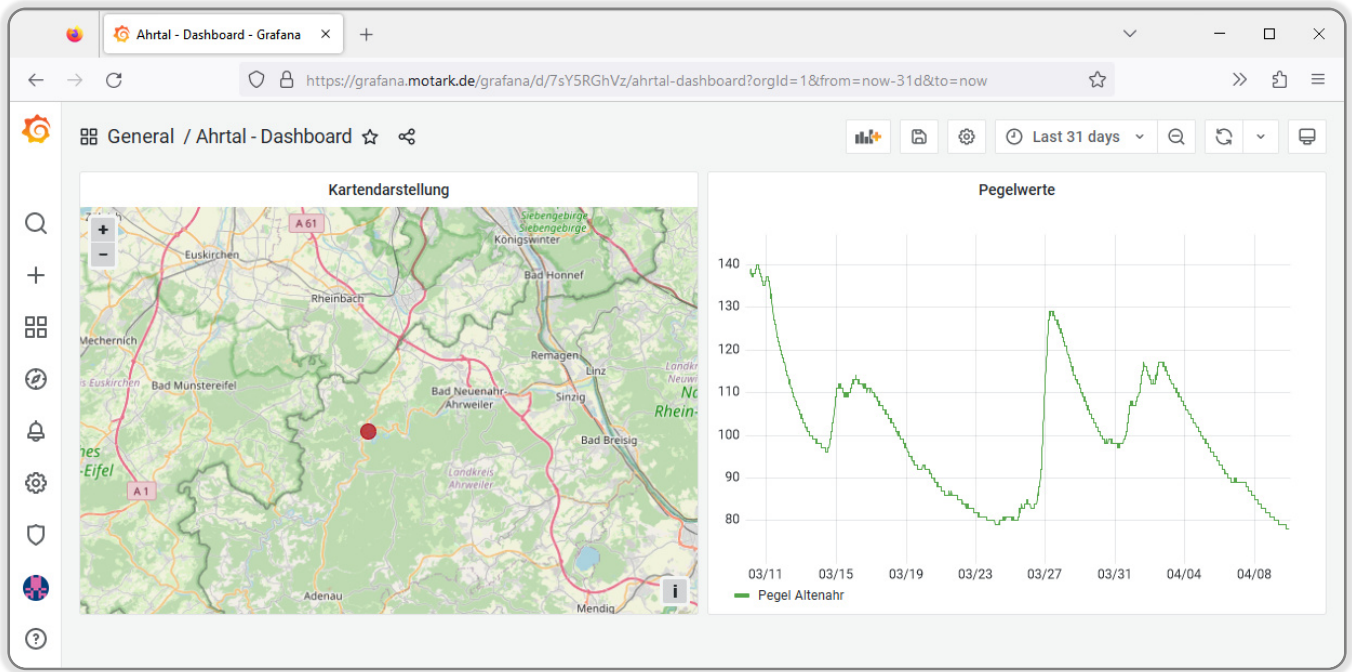


Abbildung 8.20: Beispielhaftes Dashboard in Grafana mit den Pegelständen der Pegelstation Altenahr. (Eigene Aufnahme)

Einbindung in QGIS

Wie beschrieben, sind insbesondere GIS ein häufig verwendetes Werkzeug zur Darstellung geographischer Situationen. Darüber hinaus können eine Reihe weiterer Datenquellen wie Luftbilder oder Höhenkarten über bestehende Schnittstellen und Integrationen in dieses System eingebunden werden. Die Integration von Sensordaten und deren Verortung ist hingegen weniger verbreitet. Mittels EZSTA und dem *SensorThings API QGIS Plugin* [4] ist eine Anbindung möglich. Die folgende Abbildung zeigt eine Karte mit der ausgewählten Pegelstation Altenahr. Das Plugin ermöglicht die Darstellung der Sensorwerte in einem Graphen sowie die Darstellung des Standortes und weiterer Parameterinformationen.

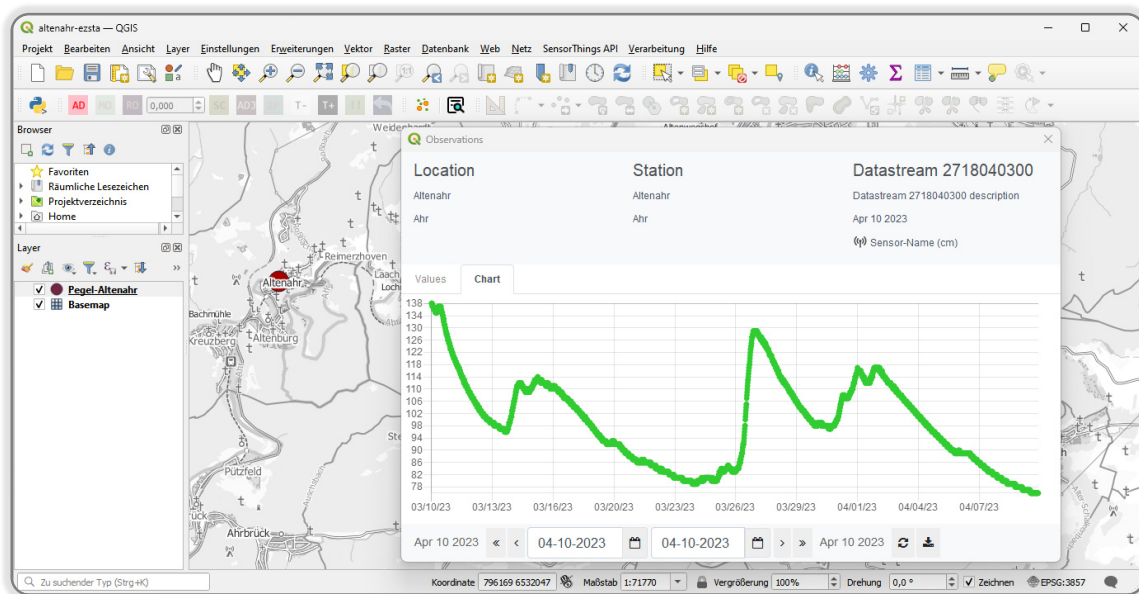


Abbildung 8.21: Anbindung der Pegelstände in QGIS über *SensorThings API QGIS-Plugin* mittels EZSTA. Beispielpfahl für den Pegel Altenahr. (Eigene Aufnahme)

Einbindung in eine Weboberfläche

Abschließend wird die Nutzung des EZSTA-Services anhand der Einbindung in eine einfache HTML-Seite demonstriert. Die bereits beschriebene Integration für die Web-basierte Kartenbibliothek Leaflet (*STAM*) [48] ermöglicht, wie bei den anderen Integrationen, die Einbindung in eine Karte allein durch die Angabe der URL.



Abbildung 8.22: Beispielpfahl Webseite: Leaflet-Kartendarstellung mit der Pegelstation Altenahr, Anbindung mittels *STAM* und EZSTA (Eigene Aufnahme)

Die Beispielseite (siehe Abbildung 8.22) zeigt die grafische Darstellung der Sensorwerte, die nach einer Standortauswahl auf einer Karte erfolgt. Aus dieser Darstellung können die Daten heruntergeladen oder der Zeitraum angepasst werden. Die Bibliothek lädt nur die Geräte, die für den Kartenausschnitt benötigt werden, indem die Standortparameter gefiltert werden. Zusätzlich können Einstellungen für ein Clustering vieler Sensorpunkte gewählt werden. Das System ist einfach zu konfigurieren und kann statisch betrieben werden. Somit ist keine aufwendige serverseitige Programmierung für diese Art der Darstellung notwendig. Zudem kann die webbasierte Kartenanwendung einfach durch weitere Bibliotheken erweitert und angepasst werden. Die Darstellung der beispielhaften Anbindung einer Open Data Schnittstelle (Pegel Altenahr) zeigt das große Potential und die Flexibilität, die durch einen Standard möglich sind. So musste für diese Beispiele das Mapping nur einmal erstellt werden und die Einbindung in die jeweilige Anwendung erfolgte jeweils durch Angabe der EZSTA-URL. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die von den Anwendungen an den Dienst gestellten Anfragen beantwortet werden können.

9. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Inhalte der vorliegenden Arbeit durch die Zusammenfassung der einzelnen Bereiche, die Diskussion der Ergebnisse und die sich hieraus ergebenden Perspektiven dargestellt.

Zusammenfassung

Aufgrund des Klimawandels ist mit einer Zunahme von Unwetterereignissen zu rechnen. Zu diesen Unwettern zählen in Deutschland u. a. Überschwemmungen und Zerstörungen durch Hochwasser. Der Schutz vor Hochwasser wird unter anderem durch das Hochwasserrisikomanagement gestaltet. Die darin enthaltenen vorbeugenden und technischen Maßnahmen können die Auswirkungen von Hochwasserereignissen auf die Bevölkerung und die Infrastruktur verringern. Allerdings können insbesondere Extremereignisse in Verbindung mit lokalen Besonderheiten auch durch solche Maßnahmen nicht vollständig verhindert werden. Zudem können die Maßnahmen zeit- und kostenintensiv sein, da sie in regelmäßigen Abständen an die Situation vor Ort angepasst werden müssen. Im Rahmen der Vorhersage bzw. der Bewältigung von Hochwassersituationen sind drei Ebenen zu nennen.

Die erste Ebene umfasst die meteorologische Beurteilung des Wettergeschehens und der damit verbundenen Warnungen, z. B. durch den Deutschen Wetterdienst. Dieser erstellt auf der Basis von Messungen und Modellen Wettervorhersagen und -warnungen. Diese Warnungen bedeuten jedoch nicht zwangsläufig, dass es vor Ort zu Katastrophen kommen muss, da sich die Wetterlage je nach lokalen Gegebenheiten sehr unterschiedlich auswirken kann. Dabei spielen sowohl topographische Gegebenheiten, als auch dynamische Veränderungen im Rahmen eines Ereignisses eine Rolle.

Die zweite Ebene umfasst die hydrologische Vorhersage und Bewertung von Hochwasserereignissen durch die dafür zuständigen Behörden. Hochwasservorhersagen, die von landesweiten Organisationen wie den Landesumweltämtern auf der Basis von Modellen, Pegeldata sowie Wetterdaten und -vorhersagen berechnet werden, können für bestimmte Hochwasserereignisse ausreichend sein. In der Regel decken die Berechnungen und Modelle jedoch nur einen begrenzten Zeitraum und nur eingeschränkt die dynamische Situation vor Ort ab. Daher sind Vorhersagen für extreme und insbesondere lokale Hochwassersituationen oft unzureichend. Auch aufwändige Simulationsmodellierungen mit 3D-Modellen sind für kurzfristige Vorhersagen derzeit nur bedingt durchführbar. Hinzu kommt, dass insbesondere kleine und mittelgroße Flüsse und Gewässer in der Regel nicht oder nur mit wenigen Pegeln überwacht werden, die in die Modelle einfließen können. Ein flächen-

deckendes behördliches Monitoring zur Erfassung extremer Hochwasserereignisse wird für kleinere Gebiete und Gewässer schon aufgrund der geringen Jährlichkeit dieser Ereignisse als nicht sinnvoll erachtet. Die nachträglich ermittelte Jährlichkeit des Hochwassers am Pegel Altenahr beträgt beispielsweise 850 Jahre [16, S. 28]. Dies bedeutet das statische alle 850 Jahre ein Hochwasser in diesen Ausmaßen auftritt. Es ist davon auszugehen, dass diese Ergebnisse in Zukunft aufgrund von Veränderungen, u.a. durch den Klimawandel, häufiger auftreten werden.

Die dritte Ebene umfasst die Entscheidungsträger und Einsatzkräfte vor Ort. Katastrophen führen in der Regel zu zeitlichen und persönlichen Belastungen der Betroffenen und Einsatzkräften. Die Verantwortlichen, die auch in den Krisenstäben eingesetzt werden, müssen weitreichende Entscheidungen für ihren Bereich treffen. Auch wenn hier qualifiziertes Personal eingesetzt wird, sind die zum Teil extremen Anforderungen auch durch Übungen nur schwer trainierbar. Dies betrifft u.a. die Lageeinschätzung anhand von Daten und Berichten der Einsatzkräfte. Auch die Weitergabe der von den Fachbehörden berechneten und bereitgestellten Informationen an die Einsatzkräfte vor Ort stellt eine Herausforderung dar. Der übliche Warnweg z. B. über E-Mail oder KATWARN-Meldungen kann für die Übermittlung der komplexen Informationen und Zusammenhänge nicht ausreichend sein. Es ist daher davon auszugehen, dass auch bei zukünftig verbesserten und schneller verfügbaren datenbasierten Echtzeitmodellen die Ergebnisse so aufbereitet werden müssen, dass die Entscheidungskompetenz der Einsatzkräfte vor Ort gestärkt wird. Dazu müssen leicht verständliche und strukturierte Informationen zur Verfügung gestellt werden. Neben den übergeordneten Lageinformationen sind für die akute Hilfeleistung vor Ort insbesondere lokale Informationen erforderlich, die durch Ortskenntnis zur Verfügung stehen können. So können die Einsatzkräfte vor Ort topographische Zusammenhänge sowie Gefahren für die Bevölkerung und Infrastruktur unmittelbar einschätzen. Diese wichtigen Hinweise basieren derzeit auf Erfahrungswerten und Beobachtungen vor Ort. Neben der Beobachtung durch erfahrene Einsatzkräfte sind auch Beobachtungen von Augenzeugen aus der Bevölkerung als Informationsquelle heranzuziehen. Dabei ist zu beachten, dass im Rahmen eines Extremereignisses nicht von einer normalen Kommunikation zwischen Einsatzkräften und Bevölkerung ausgegangen werden kann. So kann z. B. das Notrufsystem überlastet sein und die Filterung der Informationen eine Herausforderung darstellen, so dass lokale Informationen über die Situation vor Ort nicht an die Einsatzzentrale und die Einsatzkräfte vor Ort weitergegeben werden können. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Lageeinschätzung der Menschen vor Ort sehr unterschiedlich sein kann. Im Hochwasserfall können persönliche Kenntnisse und Empfindungen über die Gefährdung bereits zu unterschiedlichen Einschätzungen der Wasserstände führen. Auch die Lokalisierung der Wasserstände und der zeitliche Verlauf sind durch Augenzeugen nur schwer und einheitlich zu beurteilen.

Insgesamt wird aus den Grundlagen des Katastrophenschutzes und der Hochwasseranalyse im Einzugsgebiet der Ahr deutlich, dass nachvollziehbare und lokale Sensordaten und deren Darstellung notwendig sind, um das Verständnis für die Lagebeurteilung zu erhöhen. Ein flächendeckendes und permanentes Monitoring in Form von weiteren Pegelmessstellen wird auch aufgrund der hohen Kosten als nicht sinnvoll erachtet. Vielmehr müssen mobile und spezialisierte Einsatzgruppen mit entsprechender Technik zur Verfügung stehen, die bei einem gewissen Gefahrenpotential in das Gebiet entsandt werden, um dort mobil-autarke Sensoren

zu installieren. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit ein mobil-autarkes, kostengünstiges und flexibles System entwickelt. Dabei wurden zunächst die Soft- und Hardwarekomponenten auf Basis der Grundlagen konzeptionell festgelegt. Anschließend erfolgte eine prototypische Implementierung der einzelnen Bereiche. Im Hardwarebereich wurde einerseits eine zentrale Basisstation entwickelt, die als Datensammelstelle für die Sensorkits dient. Andererseits wurde ein Basic-Sensor-Kit für den Hochwassereinsatz entwickelt. Dieses enthält die notwendigen Komponenten zur autarken Messung von Wasserständen, Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie einen analogen Sensor (z. B. Bodenfeuchtesensor). Da, wie beschrieben, im Katastrophenfall von einer Stresssituation mit besonderen Bedingungen ausgegangen werden muss, ist auch die Handhabung und Befestigung des Kits an diese Bedingungen angepasst. Hierfür wurde eine spezielle flexible Halterung entwickelt, die mit einfachen Hilfsmitteln wie Gewebeklebeband und Kabelbindern die Montage an verschiedenen Untergründen und Strukturen ermöglicht. Für die Übertragung der Sensorwerte zwischen den Kits und der Basisstation wird LoRaWAN verwendet. Die Analyse möglicher Funktechnologien ergab, dass diese Technologie aufgrund der großen Reichweite, des offenen Standards sowie der breiten Unterstützung hierfür am besten geeignet ist. Die übertragenen Daten werden von der Basisstation entweder per Mobilfunk an einen Server übertragen oder, falls kein Mobilfunk verfügbar ist, lokal ausgewertet und bereitgestellt. Bei der Visualisierung der Daten wurde auf eine möglichst verständliche und übersichtliche Darstellung geachtet. Zum einen wird hier das Dashboard Grafana vorgeschlagen, welches eine weit verbreitete Anwendung im Bereich der Datenvisualisierung ist. Zum anderen wurde ein Webinterface implementiert, welches den Einsatzkräften eine Lagedarstellung auf Basis der Sensordaten ermöglicht und gleichzeitig Informationen für die Bevölkerung bereitstellt. Bei beiden Tools stehen der Verlauf der Wasserstände sowie die Lokalisierung dieser Daten im Vordergrund. Zusätzlich können über das entwickelte Webinterface auch Einstellungen an den Sensorkits durch die jeweiligen Einsatzkräfte vorgenommen werden. Das entwickelte Gesamtsystem wird MOTARK bezeichnet. Eine Kombination der Wörter mobil und autark. In praktischen Versuchen wurde die Einsatzfähigkeit des Systems zur Erfassung von Wasserständen, zur Detektion von Personen in der Nähe eines Sensorkits, zur Datenübertragung sowie zur Abdeckung verschiedener Gebiete nachgewiesen. Dazu wurden verschiedene Untersuchungen im Labor, in städtischer und ländlicher Umgebung durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Untersuchung im Einzugsgebiet der Ahr durchgeführt, die während des Hochwassers 2021 stark betroffen war.

Es ist zu diskutieren, wie groß das Potenzial einer vollständig autarken Version ohne mobile Datenverbindung im Vergleich zu einer mobil-autarken Version mit Datenübertragung zu einem externen Server und der damit verbundenen Übertragung auch zu anderen Einheiten zum jetzigen Zeitpunkt ist. Ist keine Kommunikation mit dem Webserver möglich, z. B. durch Totalausfall der Mobilfunkinfrastruktur, können die Daten weiterhin vor Ort, d. h. in der Nähe der Basisstation ausgewertet und dargestellt werden. Der Standort der Basisstation muss besonders sorgfältig ausgewählt werden, z. B. in der Nähe einer lokalen Einsatzzentrale. Am Beispiel der Einschätzung der Lage in Ahrweiler wäre dies z. B. die Kreisverwaltung, bei der der Krisenstab seinen Sitz hat. Die Analyse zeigt, dass dieser Standort für die Abdeckung des Stadtgebietes ausreichend ist. Sein volles Potenzial entfaltet das System mit der Übertragung der Daten auf einen Webserver, da so auch die Bevölkerung und weitere Einsatzkräfte direkten Zugriff auf die Live-Daten haben. Zukünftig kann die

Datenfernübertragung z. B. mittels Satelliteninternet permanent sichergestellt werden. Betrachtet man den zeitlichen Ablauf und die damit verbundenen Folgen eines Hochwassers, so ist folgendes anzunehmen: Solange Mobilfunk verfügbar ist, kann die Basisstation die Daten übertragen und der Bevölkerung zur Verfügung stellen, sobald die Übertragung nicht mehr möglich ist, bleibt die Lagedarstellung für die Einsatzkräfte vor Ort weiterhin möglich. Zu diesem Zeitpunkt ist ebenfalls davon auszugehen, dass sich die Lage bereits so weit zugespitzt hat, dass ein unmittelbares und intuitives Handeln der Einsatzkräfte vor Ort erforderlich ist, welches sich weiterhin auf die vom MOTARK-System gelieferten Daten stützen kann. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass auch der Datenzugriff der Bevölkerung über die üblichen Verbindungen, wie z. B. Mobilfunk oder Internetverbindungen gestört ist. Neben der Nutzung von Satelliteninternet zur Überbrückung von Mobilfunkausfällen kann auch die Nutzung anderer Kommunikationsmöglichkeiten, wie z. B. des Digitalfunks der Behörden, zur Informationsübermittlung in Betracht gezogen werden. Auch die Installation von mehreren Basisstationen kann zur Ausweitung der Reichweite sowie für eine redundante Datenübertragung genutzt werden.

Das hier vorgestellte Basic-Sensor-Kit konnte bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen eine ausreichende Genauigkeit sowie insgesamt eine konsistente Lageerfassung erreichen. Es ist jedoch zu diskutieren, ob der Einsatz von extrem kostengünstigen Modulen wie dem hier verwendeten *HC-SR04* und die damit verbundenen Herausforderungen im Bereich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit nicht durch den Einsatz von teureren Modulen behoben werden können. Die beispielhafte Kostenzusammenstellung des Kits ergab einen Wert von unter 100 €. Der Ultraschallsensor hat mit 2 € nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtsumme. Hochwertige Module verfügen beispielsweise über eine automatische Temperaturkalibrierung und werden teilweise auch vollständig wasserdicht angeboten. Der Einsatz des Bodenfeuchtesensors ist noch nicht umfassend erforscht. Allerdings bietet das Kit sowie die Platine die Möglichkeit, verschiedene Sensortypen anzuschließen, um die das System erweitert werden kann.

Neben der Entwicklung und Implementierung von MOTARK wurde im Rahmen dieser Arbeit auch der Bereich Open Data zur Unterstützung der Einsatzkräfte untersucht. Zunächst wurde die rechtliche Situation sowie der aktuelle Stand von öffentlichen Schnittstellen, insbesondere von Behörden und öffentlichen Einrichtungen, analysiert. Dabei wurde deutlich, dass die rechtlichen Grundlagen für die Veröffentlichung und Bereitstellung von Daten durch verschiedene Gesetze geschaffen wurden. Diese allein reichen jedoch nicht aus, vielmehr ist ein Paradigmenwechsel innerhalb der Institutionen von geschlossenen und behördeninternen Datenbeständen hin zu öffentlichen, frei verfügbaren und dokumentierten Datenschnittstellen erforderlich. Hierzu wurde auch die Initiative BundDEV und deren Arbeitsweise bzw. Vorgehensweise anhand eines bereitgestellten Templates und bereits beschriebener API-Spezifikationen vorgestellt. Für Hochwassersituationen wurde untersucht, welche Daten bereits per API verfügbar sind und wie diese genutzt werden können. Dabei wird deutlich, dass selbst bei einer einheitlichen Dokumentation die Nutzung der öffentlichen Daten durch die uneinheitlichen Formate, in denen die API-Antworten vorliegen, erschwert wird. Als Standard für Sensordaten-APIs ist der vom Open Geospatial Consortium (OGC) entwickelte SensorThings-API-Standard zu nennen. Dieser hat aufgrund seiner umfangreichen Struktur, die neben den Sensordaten auch weitere Informationen zur Position

und Sensortechnologie enthält, das Potenzial, als zukünftiger Standard für derartige Schnittstellen zu dienen.

Es ist allerdings derzeit nicht zu erwarten, dass die bestehenden APIs eine zusätzliche STA-konforme Schnittstelle zur Verfügung stellen werden. Um dieses Problem zu überwinden, wurde im Rahmen dieser Arbeit EZSTA (EZ=*Easy*, STA=*SensorThings API*) konzipiert und entwickelt. Dieser Service ermöglicht es, mit Hilfe eines zuvor definierten Mappings eine API in eine STA umzuwandeln. Neben dem eigentlichen EZSTA-Service wurden noch verschiedene Hilfsanwendungen implementiert, um das Konzept insgesamt breiter und einfacher nutzbar zu machen. So wurde mit EZSTA-Web eine webbasierte Anwendung entwickelt, die durch die Analyse einer Schnittstellenspezifikation sowie einfacher Abfragen ein Mapping für eine API erstellt. Darüber hinaus werden im Sinne der öffentlichen Datenbereitstellung die bereits erstellten Mappings für verschiedene APIs veröffentlicht und durch eine weitere webbasierte Anwendung (EZSTA-Search) für Nutzer einfach durchsuchbar gemacht. Mit der Entwicklung und Konzeption von EZSTA wird ein neuer Weg im Bereich der Schnittstellenvereinheitlichung beschritten, der zwar auf einen Standard setzt, diesen aber nicht zwangsläufig auf Seiten der Datenanbieter vorgibt. Inwieweit sich STA als Standard für die Bereitstellung von Sensordaten etablieren wird, wird sich in den nächsten Jahren zeigen. Dabei kann EZSTA zur Verbreiterung und einfachen Nutzung von STA beitragen. Die aufgeführten Erweiterungen verschiedener Programme zur Integration von STA zeigen bereits das Potenzial dieser Standardisierung. Auch die beispielhaften Untersuchungen im Rahmen des Ahrtals sowie der Einbindung des Pegels Altenahr in die verschiedenen Anwendungen zeigen, wie effektiv die Nutzung von STA bzw. EZSTA sein kann. Für die Abfrage großer Datenmengen kann der Dienst weiter optimiert werden. So sind beispielsweise Caching-Methoden sowie eine weitere Parallelisierung des Mappings denkbar.

Im Rahmen des Katastrophenschutzes und der Lagedarstellung während eines Hochwassers ist kritisch zu prüfen, ob Daten von externen Datenanbietern, die nun mit Hilfe von EZSTA in gängige Systeme wie GIS-Programme integriert werden können, einen unterstützenden Beitrag leisten können. Es ist davon auszugehen, dass durch die Zusammenführung von Informationen in einer Anwendung, ohne die Notwendigkeit der Implementierung verschiedener Erweiterungen, mehr unterschiedliche Datenquellen einfach genutzt werden können. Bei der Integration von ungeprüften Quellen und Daten, die von privaten Gruppen erhoben wurden, muss die Validität dieser Daten von den Fachleuten bewertet werden. Zudem ist es möglich, dass die externen Datenquellen während einer Katastrophe nicht zur Verfügung stehen. Insgesamt können diese Daten, soweit verfügbar, allerdings zur Ergänzung und Anreicherung des Lagebildes herangezogen werden.

Ausblick für die entwickelten Konzepte und Systeme

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systeme sind als Demonstratoren zu verstehen und bedürfen bis zum tatsächlichen Einsatz im Rahmen einer Hochwassersituation weiterer Entwicklung. Im Bereich der Hardware ist zum einen die detaillierte Untersuchung weiterer Ultraschallsensoren auch außerhalb des Low-Cost-Bereiches durchzuführen, zum anderen sind die Untersuchungen und Potenziale des Bodenfeuchtesensors weiterzuführen. Des Weiteren ist die entwickelte Sensorbox hinsichtlich Befestigung, Größe und

einfacher Handhabung weiter zu optimieren. Je kleiner und handlicher die Box ist, desto einfacher kann sie transportiert und an Bauwerken befestigt werden. Hierzu ist die Zusammenarbeit und Befragung von Einsatzkräften und deren Vorstellungen in die Weiterentwicklung einzubeziehen. Darüber hinaus kann zukünftig die Übertragung über eine satellitengestützte Internetverbindung in das Konzept integriert werden. Diese unabhängige Übertragungstechnologie ermöglicht auch unter extremen Bedingungen die Übertragung der Daten von der Basisstation zum Server. Im Bereich der Software sind die Weiterentwicklung von MOTARK-Web sowie weitere Auswertungen und Vorverarbeitungen der Sensorwerte zu nennen. So können beispielsweise die von den Sensoren ermittelten Wasserstände zukünftig mit Methoden der künstlichen Intelligenz ausgewertet und verarbeitet werden. Auch wenn bereits auf dem Mikrocontroller eine Detektion und Eliminierung von Ausreißern stattfindet, können auch hier weitere Methoden zur Filterung der Daten eingesetzt werden. Mit Hilfe von künstlicher Intelligenz kann auch die Erkennung von kritischen Situationen verbessert werden, hier kann z. B. auch eine Kombination von Wasserstands- und Personengruppendaten verwendet werden. Neben diesen Verbesserungen ist ebenfalls die Integration des Systems in die Arbeit des Technischen Hilfswerk (THW) zu untersuchen. Das THW wird dabei perspektivisch als Betreiber eines solchen Monitoringsystems gesehen, da durch die Struktur des Verbandes bereits Fachgruppen für spezialisierte Aufgaben vorgesehen sind und zudem die Anbindung der im Rahmen der Hochwasserhilfe des THW erbrachten Leistungen möglich ist. Auch die Anbindung an den THW-internen Messenger kann langfristig zu einer Stärkung des Systems führen. Für den Bereich der übergeordneten Lagebeurteilung ist der Einsatz von EZSTA weiter zu untersuchen. Die entwickelten Systeme sowie die bereits existierenden Mappings zeigen das Potenzial zur Erweiterung der Lagedarstellung. Es muss jedoch weiter untersucht werden, in welcher Form die Daten benötigt werden und wie die unterschiedliche Qualität der Daten berücksichtigt werden kann. Dabei sind insbesondere lokale Daten aus z. B. Community-Projekten und deren APIs für die jeweilige Region zu berücksichtigen. Langfristig muss der STA-Standard weiter verbreitet werden und die Erweiterung bzw. Unterstützung von STA für mehr Anwendungen verfügbar sein. Auch die verstärkte Integration von Datenschnittstellen, die über EZSTA im STA-Format bereitgestellt werden, in MOTARK-Web bedarf der Weiterentwicklung für eine einfache und intuitive Nutzung.

Insgesamt zeigt die Arbeit die großen Herausforderungen bei der Lagebeurteilung während Extremwetterereignissen am Beispiel von Hochwasser auf. Die entwickelten Systeme wie das Monitoringsystem sowie die Vereinheitlichung öffentlicher Daten können hier ergänzend zu den Maßnahmen der Einsatzkräfte zur Vervollständigung des Lagebildes beitragen. Insbesondere in kleineren Regionen und bei der Erfassung von Informationen, die für die Einsatzkräfte vor Ort wichtig sind, hat das mobil-autarke Monitoringsystem großes Potential. In Kombination mit der Vereinheitlichung bereits vorhandener Datenschnittstellen können Einsatzkräfte und Entscheidungsträger in kritischen Situationen insgesamt effektiv unterstützt werden.

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface.
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.
BLE	Bluetooth Low Energy.
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben.
bzw.	beziehungsweise.
CAP	Common Alerting Protocol.
CORS	Cross-Origin Resource Sharing.
CSV	Comma-Separated Values.
DLRG	Deutsche Lebens-Rettungs-Gesellschaft.
dt.	deutsche Übersetzung.
DWD	Deutscher Wetterdienst.
engl.	englische Übersetzung.
EZSTA	Easy STA.
FwDV	Feuerwehr-Dienstvorschrift.
GIS	Geoinformationssystem.
GPS	Global Positioning System.
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.
HWRM	Hochwasserrisikomanagement.
IoT	Internet of Things (dt. Internet der Dinge).
JSON	JavaScript Object Notation.
LoRa	Long Range.
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network.
LPWAN	Low Power Wide Area Network.
MOTARK	Mobil-autarkes Monitoringsystem.
MoWas	Modulare Warnsystem.
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport.
OGC	Open Geospatial Consortium.

PDF	Portable Document Format.
STA	SensorThings API.
THW	Technisches Hilfswerk.
u. a.	unter anderem.
URL	Uniform Resource Locator.
UUID	Universally Unique Identifier.
Wi-Fi	Wireless Fidelity (dt. Drahtlose Kommunikation).
z. B.	zum Beispiel.

Gesetzestextverzeichnis

- DNG** Gesetz für die Nutzung von Daten des öffentlichen Sektors vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 2941, 2942; 4114).
- DWDG** Gesetz über den Deutschen Wetterdienst vom 10. September 1998 (BGBl. I S. 2871), das zuletzt durch Artikel 341 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.
- EGovG** Gesetz zur Förderung der elektronischen Verwaltung vom 25. Juli 2013 (BGBl. I S. 2749), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 2941) geändert worden ist.
- GG** Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 23. Mai 1949 (BGBl. S. 1), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes zur Änderung des Grundgesetzes (Artikel 82) vom 19. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2478).
- HBKG** Hessisches Gesetz über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz (Hessisches Brand- und Katastrophenschutzgesetz - HBKG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Januar 2014 (GVBl. S. 26), zuletzt geändert durch Gesetz vom 30. September 2021 (GVBl. S. 602).
- HSOG** Hessische Gesetz über die öffentliche Sicherheit und Ordnung (HSOG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Januar 2005 (GVBl. I S. 14), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 30. September 2021 (GVBl. S. 622).
- HWG** Hessisches Wassergesetz (Landesrecht Hessen) vom 14. Dezember 2010 (GVBl. I S. 548), zuletzt geändert durch Artikel 9 des Gesetzes vom 9. Dezember 2022 (GVBl. S. 764).
- THWG** Gesetz über das Technische Hilfswerk (THW-Gesetz, THWG) vom 22. Januar 1990 (BGBl. I S. 118), zuletzt geändert durch Gesetz vom 15.04.2020 (BGBl. I S. 808).
- WHG** Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. Januar 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 5) geändert worden ist.
- ZSKG** Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz vom 25.03.1997 (BGBl. I S. 726), zuletzt geändert durch Artikel 144 der Elften Zuständigkeitsanpassungsverordnung vom 19.06.2020 (BGBl. I S. 1328).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1.	Hochwasserlage in einem Ort sowie Einsatz des THW im Rahmen des Hochwassers in Deutschland im Juli 2021	2
Abbildung 1.2.	Zusammenfassung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Komponenten und ihrer Zusammenhänge.	4
Abbildung 1.3.	Sechsstufiger DSRM-Prozess mit Verweisen auf die Kapitel dieser Arbeit.	5
Abbildung 2.1.	Führungsorganisation im Katastrophenfall, schematische Darstellung.	14
Abbildung 2.2.	Festgelegte Sitzordnung nach der Stabsdienstordnung für den obersten Fü-Stab / KatS-Stab (Hessen)	15
Abbildung 2.3.	Gerätewagen Feuerwehr Kreis Ahrweiler	17
Abbildung 2.4.	THW Einsatz während der Unwetterkatastrophe in Südwestdeutschland (Tief Bernd).	18
Abbildung 2.5.	Screenshot des Inter-Organizational Situation Assessment Client sowie des Inter-Organizational Information Repository.	21
Abbildung 2.6.	Hochwasserrisikomanagement-Kreislauf mit den einzelnen Teilbereichen.	25
Abbildung 2.7.	Überblick über mobile Hochwasserschutzsysteme.	27
Abbildung 2.8.	Schematische Darstellung einer Sandsackbarriere sowie eines Dammbalkensystems	28
Abbildung 2.9.	Fotografie eines Lattenpegels. Aufgenommen im Fischbachtal (Odenwald).	31
Abbildung 2.10.	Zerstörte Brücke im Ahrtal sowie Ersatzbrücke des THW in der Nähe von Rech (Ahrtal, Rheinland-Pfalz).	39
Abbildung 2.11.	Darstellung der Textanalyse einer MoWaS-Warnung im PDF-Format zu einem verarbeitbaren Objekt.	40
Abbildung 2.12.	Zeitliche Übersicht über Warnungen des MoWaS während der Unwetterkatastrophe im Juli 2021.	41
Abbildung 2.13.	Karte des Verlaufs der Ahr.	42
Abbildung 2.14.	Lage der Pegelstationen an der Ahr.	43
Abbildung 2.15.	Pegelwerte der Pegel entlang der Ahr. Darstellung der Pegeldata sowie der rekonstruierten Höchststände.	45
Abbildung 2.16.	Vorhergesagte Höchststände für den Pegel Altenahr (Vorhersagezeitpunkt), sowie Messung des Pegel Altenahr (Höchststand rekonstruiert).	46
Abbildung 2.17.	Fotografien des Pegels Altenahr und des Pegels Müsch.	47
Abbildung 2.18.	Zeitlicher Verlauf der veranlassten Hochwasserfrühwarnungen (Veröffentlichungszeitpunkt) für das Ahr-Einzugsgebiet.	48
Abbildung 2.19.	Zeitlicher Verlauf der veranlassten KATWARN-Meldungen (Datensatz B) für den Landkreis Ahrweiler.	50
Abbildung 2.20.	Warnmeldung des Kreises Ahrweiler auf Twitter.	51
Abbildung 3.1.	Vereinfachte Darstellung der Architektur eines Mikrocontrollers.	57
Abbildung 3.2.	Schematische Funktionsdarstellung der Ansteuerung und Empfang von Signalen eines Ultraschallsensors.	60

Abbildung 3.3.	Überblick über den Einsatzbereich von LPWAN sowie vergleichbarer Funktechnologien.	62
Abbildung 3.4.	Mobilfunk-Monitoring: Kartendarstellung Ausschnitt Odenwald sowie Ausschnitt für Ahrweiler.	62
Abbildung 3.5.	Grundlegende Struktur eines Low Power Wide Area Networks (LPWAN).	64
Abbildung 3.6.	Screenshot der Abdeckung von Sigfox im Ahrtal.	65
Abbildung 3.7.	NB-IoT-Abdeckung: Kartendarstellung Ausschnitt Odenwald sowie Ausschnitt für Ahrweiler.	66
Abbildung 3.8.	Darstellung des Zusammenhangs zwischen Spreadingfaktor, Reichweite, Energieverbrauch und Übertragungszeit.	67
Abbildung 3.9.	Mobiler Pegeltrupp im Einsatz während der Hochwasserkatastrophe in Südwestdeutschland 2021.	70
Abbildung 4.1.	Standardisierungsbedarf der Metadatenföderation GovData.	77
Abbildung 4.2.	Beispiel des CORS Mechanismus anhand von zwei Webserver und einer Webseite.	78
Abbildung 4.3.	Logo von OpenAPI.	79
Abbildung 4.4.	Logo der Geoportal-API-Sammlung. Kombination aus dem OpenAPI-Logo und einem Kartenicon.	82
Abbildung 4.5.	Ablaufdiagramm des Go-Skriptes zur automatischen Erfassung der OpenAPI-Spezifikationen.	82
Abbildung 4.6.	Logo des OpenAPI-Viewers.	83
Abbildung 4.7.	Screenshot des OpenAPI-Viewers, Übersichtseite, sowie Detailansicht einer ausgewählten API des Geoportals Hessen.	84
Abbildung 4.8.	Klassendiagramm der OGC SensorThings API.	87
Abbildung 4.9.	Logo des FROST-Server-Projekts.	89
Abbildung 5.1.	Schematische Darstellung der Lage während einer Hochwassersituation und einem Ausfall einer Pegelstation in einem Gebiet.	94
Abbildung 5.2.	Vereinfachte Darstellung des Gesamtkonzeptes sowie den Teilbereichen.	96
Abbildung 5.3.	Schematische Darstellung des Aufbaus eines LoRaWAN-Netzwerks.	100
Abbildung 5.4.	Spektrogramm, das die Struktur der LoRa Übertragung zeigt.	101
Abbildung 5.5.	Vereinfachte Zusammensetzung einer LoRaWAN-Nachricht.	105
Abbildung 5.6.	Beispielhafter Verlauf der Signalstärke einer LoRa-Übertragung.	106
Abbildung 5.7.	Schematische Übertragungswege des MOTARK-Systems im Einsatzfall und vorhandene Mobilfunkübertragung an der Basisstation.	108
Abbildung 5.8.	Schematische Übertragungswege des MOTARK-Systems im Einsatzfall ohne direkte Internetverbindung.	109
Abbildung 5.9.	Schematische Darstellung der Messung der Bodenfeuchte und des Wasserstands.	111
Abbildung 5.10.	Schematische Darstellung der Befestigung des Sensorkits an einem Baum und an einer Laterne.	112
Abbildung 5.11.	Mockup der zentralen Visualisierung von MOTARK-Web.	117
Abbildung 5.12.	Schematische Darstellung der Softwarekomponenten des mobil-autarken Monitoringsystems.	118
Abbildung 6.1.	Aktueller Stand bei der Anbindung von verschiedenen APIs an unterschiedliche Applikationen.	120
Abbildung 6.2.	Schematische Darstellung des EZSTA-Konzeptes.	121
Abbildung 6.3.	Allgemeiner Ablauf einer Anfrage an den EZSTA-Service.	124

Abbildung 6.4.	Auszugsweise Darstellung der API-Antwort, des Mapping-Inputs sowie der durch EZSTA erzeugten Thing-Klasse für die Pegelonline-API für eine Pegelstation.	126
Abbildung 6.5.	Mockups von EZSTA-Web.	128
Abbildung 6.6.	Mockup von EZSTA-Search.	129
Abbildung 7.1.	Schematische Darstellung der Traefik-Architektur.	132
Abbildung 7.2.	Darstellung der Komponenten des ChirpStack-Systems.	133
Abbildung 7.3.	Screenshot der Benutzeroberfläche von ChirpStack.	134
Abbildung 7.4.	Ablauf des ChirpSTA-Services.	135
Abbildung 7.5.	Screenshot der ChirpSTA-API-Dokumentation.	136
Abbildung 7.6.	Beispielhaftes Layout für ein Grafana-Dashboard.	137
Abbildung 7.7.	Screenshot der Startseite von MOTARK-Web.	139
Abbildung 7.8.	Darstellung der Kartenansicht von MOTARK-Web.	139
Abbildung 7.9.	Darstellung der Geräteübersicht für einen MOTARK-Einsatz-Koffer in MOTARK-Web.	140
Abbildung 7.10.	Darstellung der ausgewählten Softwarekomponenten für das MOTARK-System.	141
Abbildung 7.11.	LoRaWAN-Gateway RAK7258 sowie die verwendete Antenne	142
Abbildung 7.12.	Fotografie der Basisstation. In dem Schutzkoffer sind das Gateway sowie die Batterie untergebracht. Die Antenne ist außen angebracht.	143
Abbildung 7.13.	Platine mit Anschlüssen für Ultraschallsensor, Temperatur- und Feuchtesensor sowie Analogsensor. Vorder- und Rückseite der Platine sowie Foto der Platine mit installierten Komponenten.	145
Abbildung 7.14.	3D-Renderings der konstruierten Halterungen sowie der Sensorbox.	146
Abbildung 7.15.	Fotografie eines Sensorkits befestigt an verschiedenen Laternen sowie an einem Brückengeländer.	146
Abbildung 7.16.	Ablaufdiagramm der Datenverarbeitung zur Eliminierung von Ausreißern für Wasserstandsdaten, die mit einem Ultraschallsensor gemessen wurden.	149
Abbildung 7.17.	Beispielhafte Messungen eines Ultraschallsensors mit den aufgezeichneten Messwerten und den mit der vorgestellten Methode eliminierten Ausreißern.	150
Abbildung 7.18.	Screenshot der EZSTA-API Dokumentation.	153
Abbildung 7.19.	Screenshots der EZSTA-Web-Anwendung.	155
Abbildung 7.20.	Screenshot der Dokumentation der EZSTA-List-API.	156
Abbildung 7.21.	Screenshot der Implementierung von EZSTA-Search.	158
Abbildung 7.22.	Screenshot der Implementierung von MOTARK-Web EZSTA-Einbindungseite	159
Abbildung 8.1.	Messwerte der drei Sensorkits mit jeweils zwei Messreihen.	162
Abbildung 8.2.	Abweichung der Mittelwerte der drei Sensorkits jeweils zwei Messreihen für die Messpunkte	163
Abbildung 8.3.	Prozentuale Abweichung der Messungen mit dem Ultraschallsensor HC-SR04.	164
Abbildung 8.4.	Aufgezeichnete Wasserstände der drei Sensoren im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt.	165
Abbildung 8.5.	Durchschnittliche Anzahl der erfassten Personen in einem Bürogebäude an den jeweiligen Wochentagen.	166
Abbildung 8.6.	Anzahl der erfassten Personen in einem Bürogebäude während einer ausgewählten Woche.	167
Abbildung 8.7.	Zeitlicher Verlauf der erfassten Personen der drei eingesetzten Sensoren während einer Versuchsreihen in der Wasserbauhalle.	167
Abbildung 8.8.	Darstellung des Entwurfs der Antennenhalterung und Nahaufnahme der 3D-gedruckten Antennenhalterung.	168

Abbildung 8.9.	Beispielhaftes Profil der Sichtverbindung zwischen dem Standort einer Basisstation (Aussichtspunkt Bad Neuenahr, Ahrweiler) und einem Punkt im Ort Dernau. . .	169
Abbildung 8.10.	Fotoaufnahmen der Basisstation montiert auf dem Dach des L5 01 Gebäudes der TU Darmstadt.	170
Abbildung 8.11.	Messpunkte während des Versuchs im städtischen Umfeld.	171
Abbildung 8.12.	Fotoaufnahmen der Basisstation montiert auf dem Geschützturm Bollwerk in Fischbachtal.	172
Abbildung 8.13.	Messpunkte während des Versuchs im ländlichen Umfeld.	172
Abbildung 8.14.	Messpunkte während des Versuchs im ländlichen Umfeld, einschließlich Probenahmestellen.	173
Abbildung 8.15.	Empfangsstärke in Abhängigkeit der Entfernung zur Basisstation.	174
Abbildung 8.16.	Fotoaufnahmen der befestigten Sensoren an einem Baum und einer Brücke. . .	174
Abbildung 8.17.	Fotoaufnahme der Basisstation montiert auf dem Aussichtsturm am Aussichtspunkt Neuenahrer Berg.	175
Abbildung 8.18.	Abdeckung der Ahr mit den eingesetzten Sensorkits.	176
Abbildung 8.19.	Mögliche Sichtverbindungen vom Standort Kreisverwaltung Ahrweiler.	177
Abbildung 8.20.	Beispielhaftes Dashboard in Grafana mit den Pegelständen der Pegelstation Altenahr.	178
Abbildung 8.21.	Anbindung der Pegelstände in QGIS über SensorThings API QGIS-Plugin mittels EZSTA.	179
Abbildung 8.22.	Beispielhafte Webseite: Leaflet-Kartendarstellung mit der Pegelstation Altenahr.	179
Abbildung A.1.	Übersicht der MoWaS-Warnungen geordnet nach Ereignis.	212
Abbildung A.2.	Zeitlicher Verlauf der veranlassten KATWARN-Hochwasser-Warnungen (Alle ver- öffentlichen Regionen).	212
Abbildung A.3.	Struktur einer LoRaWAN-Nachricht.	213
Abbildung A.4.	Aufbau des Basic-Sensor-Kits.	214
Abbildung A.5.	Screenshots der EZSTA-Web-Anwendung.	216
Abbildung A.6.	Beispielhafte Messungen eines Ultraschallsensors mit den aufgezeichneten Mess- werten und den mit der vorgestellten Methode eliminierten Ausreißern.	217
Abbildung A.7.	Beispielhafte Messungen eines Ultraschallsensors mit den aufgezeichneten Mess- werten und den mit der vorgestellten Methode eliminierten Ausreißern.	218
Abbildung A.8.	Messwerte der drei Sensorkits jeweils zwei Messreihen für die Messpunkte inklu- sive Ausreißer	219
Abbildung A.9.	Fotoaufnahme des Versuchsaufbaus im Wasserbaulichen Forschungslabor. . . .	220
Abbildung A.10.	Messpunkte während des Versuchs im städtischen Umfeld.	221
Abbildung A.11.	Messpunkte während des Versuchs im ländlichen Umfeld.	222
Abbildung A.12.	Abdeckung der Ahr mit den eingesetzten Sensorkits.	223

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1.	Hochwasserarten, Auszüge aus [162, S. 597].	11
Tabelle 2.2.	Katastrophenschutzbehörden nach § 25 HBKG.	13
Tabelle 2.3.	Übersicht über die ausgewählten Softwaresysteme.	24
Tabelle 2.4.	Warnstufen, Bezeichnungen und Bedeutungen der Warnungen von MoWaS. . .	37
Tabelle 2.5.	Daten der Pegelstationen Altenahr.	44
Tabelle 2.6.	Pegelstationen im Ahrtal, Höchststand während des Hochwassers im Juli 2021 sowie der Zeitpunkt des letzten übertragenen Messwertes.	44
Tabelle 2.7.	Warnstufen des Frühwarnsystems für Hochwasser in Rheinland-Pfalz. Basierend auf [129]	49
Tabelle 3.1.	Vergleich der Funkübertragungstechnologie.	68
Tabelle 4.1.	Paradigmenwechsel im Umgang mit öffentlichen Verwaltungsdaten.	75
Tabelle 4.2.	Übersicht über die verschiedenen Ausgangslagen beim Vorfinden einer Schnittstelle.	81
Tabelle 4.3.	Übersicht über verschiedene APIs für den Hochwasserschutz.	85
Tabelle 4.4.	Beispielhafte Abfragerouten der SensorThings API gemäß [159].	88
Tabelle 4.5.	Liste von STA-Servern.	89
Tabelle 5.1.	Bewertung der Funktechnologien nach den Anforderungen für das Monitoring- system.	97
Tabelle 5.2.	LoRaWAN Data Rate für Frequenz EU863-870.	102
Tabelle 6.1.	Notwendige Funktionalitäten für die Umsetzung des EZSTA-Konzeptes.	123
Tabelle 6.2.	Struktur der EZSTA-List-API für die Mapping-Dateien.	129
Tabelle 7.1.	Ausgewählte Komponenten für das MOTARK-Basic-Sensor-Kit.	144
Tabelle 7.2.	Beispielhafte Kostenzusammenstellung für ein Einsatzset	152
Tabelle A.1.	Warnkriterien des DWDs für Starkregen.	211
Tabelle A.2.	Warnkriterien des DWDs für Dauerregen.	211
Tabelle A.3.	LoRaWAN Paketstruktur, Beschreibung der einzelnen Komponenten	213
Tabelle A.4.	Beispielhafte Kostenzusammenstellung für ein Einsatzset, inklusive Möglichkeiten zum Erwerb.	215

Literaturverzeichnis

- [1] 3GPP, *Specifications & Technologies*, <https://www.3gpp.org/specifications>. (besucht am 01. 02. 2023).
- [2] 52°North Spatial Information Research GmbH, *52North sensorweb-server-sta*, <https://github.com/52North/sensorweb-server-sta>, 2022. (besucht am 09. 01. 2023).
- [3] V. Agafonkin, *Leaflet — an open-source JavaScript library for interactive maps*, <https://leafletjs.com/>, 2023. (besucht am 20. 02. 2023).
- [4] AirBreak-UIA, *SensorThingsAPI QGIS plugin*, https://github.com/AirBreak-UIA/SensorThingsAPI_QGIS-plugin, Dez. 2022. (besucht am 12. 02. 2023).
- [5] M. A. M. Almuahaya, W. A. Jabbar, N. Sulaiman und S. Abdulmalek, „A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions,“ *Electronics*, Jg. 11, Nr. 1, S. 164, Jan. 2022, ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics11010164.
- [6] Arduino, *Arduino - Webseite*, <https://www.arduino.cc/>, 2023. (besucht am 12. 01. 2023).
- [7] V. Babu und V. Rajan, „Flood and Earthquake Detection and Rescue Using IoT Technology,“ in *2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Juli 2019, S. 1256–1260. DOI: 10.1109/ICCES45898.2019.9002406.
- [8] I. Bae und U. Ji, „Outlier Detection and Smoothing Process for Water Level Data Measured by Ultrasonic Sensor in Stream Flows,“ *Water*, Jg. 11, Nr. 5, S. 951, Mai 2019, ISSN: 2073-4441. DOI: 10.3390/w11050951.
- [9] J. Baumert, *Bessere Vorbereitung auf Katastrophen: Deshalb fliegen Drohnen über die Ahr*, <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/koblenz/drohnen-ueber-der-ahr-100.html>, Okt. 2022. (besucht am 06. 02. 2023).
- [10] J. Bayer, *Reichweite und Feedback von Lorawan in der Praxis - Teil 2*, <https://smartmakers.io/lorawan-reichweite-teil-2-reichweite-und-abdeckung-von-lorawan-in-der-praxis/>, Apr. 2019. (besucht am 04. 04. 2023).
- [11] J. Bayer, *Schlüsselfaktoren für eine gute Lorawan - Funkreichweite*, <https://smartmakers.io/lorawan-reichweite-teil-1-die-wichtigsten-faktoren-fuer-eine-gute-lorawan-funkreichweite/>, März 2019. (besucht am 04. 04. 2023).
- [12] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) und Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), *Länderübergreifendes Hochwasser Portal*, <https://hochwasserzentralen.de/>. (besucht am 12. 04. 2022).
- [13] *beAWARE*, <https://beaware-project.eu/>, 2020. (besucht am 25. 10. 2022).
- [14] R. Bell, W. Kron, B. Thiebes, A. Thieken, R. Winkhardt-Enz, M. Schwarz und I. Kleeschulte, *Die Flutkatastrophe im Juli 2021 Ein Jahr danach: Aufarbeitung und erste Lehren für die Zukunft* (DKKV-Schriftenreihe Nr. 62,), DKKV, Hrsg. Bonn, Juli 2022, ISBN: 978-3-933181-72-5.

-
- [15] N. Benkahla, H. Tounsi, Y.-Q. Song und M. Frikha, „Review and experimental evaluation of ADR enhancements for LoRaWAN networks,“ *Telecommunication Systems*, Jg. 77, Nr. 1, S. 1–22, Mai 2021, ISSN: 1572-9451. DOI: 10.1007/s11235-020-00738-x.
- [16] S. Berkler, D.-I. T. Bettmann, M. Böhm (HYDRON GmbH), N. Demuth, N. Gerlach, A. Hengst, Y. Henrichs, T. Heppelmann, C. Iber, D. M. Johst, H. Lehmann, S. Stickel, D. S. van der Heijden und D.-I. S. Wallisch (BGS Wasserwirtschaft GmbH), *Hochwasser im Juli 2021*, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Hrsg., 2022. (besucht am 25. 10. 2022).
- [17] Bernd Reder, *Low-Power-Funk treibt IoT voran - Drei Standards im Bereich Mobilfunk*, https://www.com-magazin.de/praxis/internet-dinge/low-power-funk-treibt-iot-voran-1217152.html?page=4_drei-standards-im-bereich-mobilfunk, Apr. 2017. (besucht am 04. 01. 2023).
- [18] F. Blumensaat, S. Dicht und C. Ebi, „Niedrigenergiefunk im Untergrund. Möglichkeiten und Grenzen einer neuen Daten-Fernübertragung in der Siedlungsentwässerung,“ *Aqua & Gas*, Jg. 99, Nr. 3, S. 52–60, 2019, ISSN: 2235-5197. (besucht am 09. 03. 2020).
- [19] O. Brandmüller und K. Wilting, *ESP32-Paxcounter*, <https://github.com/cyberman54/ESP32-Paxcounter>, Feb. 2023. (besucht am 17. 02. 2023).
- [20] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), *Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch*, 5. Auflage 2018 – Pegelhandbuch. Berlin: Kulturbuch-Verlag GmbH, 2018.
- [21] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), *Anlage 1 der Empfehlungen zur Aufstellung, Überprüfung und Aktualisierung von Hochwasserrisikomanagementplänen*, 2019.
- [22] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und Ständiger Ausschuss „Hochwasserschutz und Hydrologie“ der LAWA (LAWA-AH), Hrsg., *Empfehlungen zur Aufstellung, Überprüfung und Aktualisierung von Hochwasserrisikomanagementplänen*, 18.
- [23] bundDEV, *Bundesamt für Bevölkerungsschutz - NINA API*, <https://nina.api.bund.dev/>, 2021. (besucht am 29. 03. 2022).
- [24] bundDEV, *API-GitHub-Template*, <https://github.com/bundesAPI/api-doc-template>, 2022. (besucht am 09. 02. 2023).
- [25] bundDEV, *Deutschland*, <https://github.com/bundesAPI/deutschland>, Dez. 2022. (besucht am 03. 01. 2023).
- [26] bundDEV, *Entwicklungsportal - API Übersicht*, <https://bund.dev/>, 2022. (besucht am 30. 03. 2022).
- [27] bundDEV, *dwd-api*, <https://github.com/bundesAPI/dwd-api>, März 2023. (besucht am 12. 04. 2022).
- [28] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Hrsg., *Leitfibel vorbeugender Hochwasserschutz*. Bonn: Selbstverlag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 1998.
- [29] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), *Warnung der Bevölkerung: Extremhochwasser Juli 2021*, https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/Warnung-in-Deutschland/Warnung-HW/warnung-hw_node.html, 2021. (besucht am 09. 01. 2022).
- [30] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), *Wovor warnen wir und wann*, https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/Warnung-in-Deutschland/Wovor-warnen-wir-und-wann/wovor-warnen-wir-und-wann_node.html, 2021. (besucht am 17. 01. 2023).
- [31] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), *Aktuelle Warnmeldung*, <https://warnung.bund.de>, 2022. (besucht am 12. 04. 2022).

-
- [32] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), *MoWaS*, <https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/Warnung-in-Deutschland/MoWaS/mowas.html>, 2022. (besucht am 05. 01. 2023).
- [33] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), *Anforderungen an Warnmultiplikatoren*, https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/Warnung-in-Deutschland/Warnmultiplikatoren/Anforderungen/anforderungen_node.html. (besucht am 06. 04. 2023).
- [34] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), *Cell Broadcast*, https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/Warnung-in-Deutschland/So-werden-Sie-gewarnt/Cell-Broadcast/cell-broadcast_node.html. (besucht am 17. 01. 2023).
- [35] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), *Glossar*, https://www.bbk.bund.de/DE/Infothek/Glossar/_functions/glossar.html. (besucht am 16. 01. 2023).
- [36] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, *Sturmflut-Information*, <https://www.sturmflutwarndienst.de/>, 2022. (besucht am 01. 08. 2023).
- [37] Bundesministerium des Innern und für Heimat, *Open Data*, <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/moderne-verwaltung/open-government/open-data/open-data-node.html>, 2021. (besucht am 30. 03. 2022).
- [38] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, *Mobilfunk-Monitoring Karte*, <https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/MobilfunkMonitoring/Vollbild/start.html>. (besucht am 12. 04. 2023).
- [39] Bundesregierung, *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des E-Government-Gesetzes und zur Einführung des Gesetzes für die Nutzung von Daten des öffentlichen Sektors*, Juni 2021.
- [40] Bundeswehr, *Bundeswehr im Einsatz in den Hochwassergebieten*, <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/streitkraeftebasis/bundeswehr-einsatz-hochwassergebiet>, 2022. (besucht am 24. 10. 2022).
- [41] A.-K. Carstensen und J. Bernhard, „Design science research – a powerful tool for improving methods in engineering education research,“ *European Journal of Engineering Education*, Jg. 44, Nr. 1-2, S. 85–102, März 2019, ISSN: 0304-3797, 1469-5898. DOI: 10.1080/03043797.2018.1498459.
- [42] CENARIO systems GmbH, *Krisenmanagement-Portfolio*, <https://www.cenario.de/produkte/krisenmanagement/>. (besucht am 01. 11. 2022).
- [43] P. S. Cheong, J. Bergs, C. Hawinkel und J. Famaey, „Comparison of LoRaWAN classes and their power consumption,“ in *2017 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT)*, 2017, S. 1–6. DOI: 10.1109/SCVT.2017.8240313.
- [44] CivicActions, *DKAN Open Data Platform*, <http://getkdkan.org/>, 2022. (besucht am 12. 12. 2022).
- [45] CKAN - *The open source data management system*, <http://ckan.org/>, 2022. (besucht am 12. 12. 2022).
- [46] Copernicus, *European Flood Awareness System*, <https://www.efas.eu/en>, 2022. (besucht am 05. 02. 2022).
- [47] Copernicus, *Global Flood Awareness System – global ensemble streamflow forecasting and flood forecasting*, <https://www.globalfloods.eu/>. (besucht am 05. 02. 2022).

-
- [48] DataCoveEU, *STAM*, <https://github.com/DataCoveEU/STAM>, Apr. 2022. (besucht am 12. 02. 2023).
- [49] A. David und B. Schmalz, „Flood hazard analysis in small catchments: Comparison of hydrological and hydrodynamic approaches by the use of direct rainfall,“ *Journal of Flood Risk Management*, Jg. 13, Nr. 4, e12639, 2020, ISSN: 1753-318X. DOI: 10.1111/jfr3.12639. (besucht am 07. 04. 2023).
- [50] DB Station & Service AG, *LibPAX*, <https://github.com/dbSuS/libpax>, Feb. 2023. (besucht am 02. 03. 2023).
- [51] Deutsche Telekom AG, *NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox: An up-to-date comparison*, <https://iot.telekom.com/en/downloads/mobile-iot-network-comparison-nb-iot-lorawan-sigfox>, Apr. 2021. (besucht am 12. 01. 2023).
- [52] Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e. V. (DKKV) – Der Vorstand –, Hrsg., *Hochwasservorsorge in Deutschland: Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet* (Schriftenreihe des DKKV 29). Bonn: Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V, 2003, ISBN: 978-3-933181-32-9.
- [53] DIN 1319, *Grundlagen der Messtechnik, Teil 1: Grundbegriffe*, 1995.
- [54] DIN 19712, *Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern*, 2013.
- [55] DIN 4049, *Hydrologie Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie*, 1994.
- [56] DIN EN 13757, *Kommunikationssysteme für Zähler Teil 4: Drahtlose M-Bus-Kommunikation*, 2019.
- [57] DIN EN ISO 4373, *Hydrometrie Geräte zur Wasserstandsmessung*, 2022.
- [58] *Docker Docs: How to build, share, and run applications*, <https://docs.docker.com/>, Feb. 2023. (besucht am 16. 02. 2023).
- [59] K. Emde, M. Budde, T. Fischer, T. Martin und D. Hilbring, „Interaktive Steuerung der Ausführung von KI-Algorithmen in Umweltinformationssystemen über OGC SensorThings,“ 2022, ISSN: 1617-5468. DOI: 10.18420/INF2022_130.
- [60] EnergieAgentur.NRW, „Wie die Digitalisierung die Energiewende beflügelt,“ Jg. innovation & energie, *Das Magazin der EnergieAgentur.NRW*, Nr. 1 | 2020, 2020. (besucht am 04. 01. 2023).
- [61] Enjoyneering, *HTU2xD/SHT2x/Si70xx*, https://github.com/enjoyneering/HTU2xD_SHT2x_Si70xx, Dez. 2022. (besucht am 19. 02. 2023).
- [62] ETSI EN 300 220, *Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 2: Harmonised Standard for access to radio spectrum for non specific radio equipment*, 2018. (besucht am 11. 01. 2023).
- [63] Europäische Kommission, *Das offizielle Portal für Daten zu Europa | data.europa.eu*, <https://data.europa.eu/de>, 2023. (besucht am 04. 01. 2023).
- [64] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, *Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (Text von Bedeutung für den EWR)*, Okt. 2007.
- [65] B. Eyermann, *Flutkatastrophe im Ahrtal: Fehlendes Formular war wohl Grund für ausbleibende „Nina“-Warnung*, https://ga.de/region/ahr-und-rhein/mehr-von-ahr-und-rhein/flutkatastrophe-an-der-ahr-fehlte-fuer-die-nina-warnung-eine-einfache-mail_aid-68578671, Apr. 2022. (besucht am 28. 12. 2022).

-
- [66] Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung (ihwb), *Feldlabor Gersprenz-Einzugsgebiet*, https://www.ihwb.tu-darmstadt.de/forschung_ihwb/feldlabor_ihwb/index.de.jsp. (besucht am 14. 02. 2023).
- [67] A. Fekete, D. Beckers, C. Hetkämper, Y. Berger, A. Welter, U. Kippnich, A. Klemm, M. Kippnich, E. Holzheimer, K. Lechner, M. Wieland, L. Schliesser, M. Gonder, F. M. Juhl, M. Luchtmann, A. Müller, M. S. Schüßler und P. Priesmeier, „Die Flut im Juli 2021. Erfahrungen und Perspektiven aus dem Rettungsingenieurwesen und Katastrophenrisikomanagement,“ Dez. 2022. DOI: 10.57684/COS-988.
- [68] M. Fischer, „Urban Data Platform Hamburg: Integration von Echtzeit IoT-Daten mittels SensorThings API,“ *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Nr. 1/2021, S. 47–56, 2021, ISSN: 1618-8950. DOI: 10.12902/zfv-0330-2020.
- [69] *FLIWAS3 - Infoportal*, <https://infoportal.fliwas3.de/start/entwicklung.html>. (besucht am 01. 11. 2022).
- [70] Frag den Staat, *Anfrage an das Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz*, <https://fragdenstaat.de/anfrage/hochwasser-ahr/>. (besucht am 28. 12. 2022).
- [71] Frag den Staat, *Meldungen über MoWaS*, <https://fragdenstaat.de/anfrage/meldungen-ueber-mowas/>. (besucht am 13. 02. 2023).
- [72] H. Frank, C. Colman-Meixner, K. D. R. Assis, S. Yan und D. Simeonidou, „Techno-Economic Analysis of 5G Non-Public Network Architectures,“ *IEEE Access*, Jg. 10, S. 70 204–70 218, 2022, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3187727.
- [73] Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation, *FROST Documentation*, <https://fraunhoferiosb.github.io/FROST-Server/>, 2022. (besucht am 13. 12. 2022).
- [74] Fraunhofer IVI, *MobiKat*, <https://www.mobikat.net/de.html>. (besucht am 02. 11. 2022).
- [75] FraunhoferIOSB, *FROST SensorThings API data source for Grafana*, <https://github.com/FraunhoferIOSB/frost-sensorthings-datasource>, Jan. 2023. (besucht am 12. 02. 2023).
- [76] A. Fu, *UnoCSS*, <https://github.com/unocss/unocss>, Jan. 2023. (besucht am 18. 01. 2023).
- [77] K. Gabriel, *TTGO T-Beam Tracker for TTN Mapper and TTN Tracker using US (915 MHz) and EU (868 MHz) frequencies*, <https://github.com/kizniche/ttgo-tbeam-ttn-tracker>, Sep. 2022. (besucht am 01. 02. 2023).
- [78] W. Gehrke und M. Winzker, „Mikrocontroller,“ in *Digitaltechnik: Grundlagen, VHDL, FPGAs, Mikrocontroller*, W. Gehrke und M. Winzker, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2022, S. 469–542, ISBN: 978-3-662-63954-2. DOI: 10.1007/978-3-662-63954-2_14.
- [79] Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS), *PEGELONLINE*, <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/start>, 2022. (besucht am 12. 04. 2022).
- [80] GOST-Mitwirkende, *GOST - Go implementation of OGC SensorThings API*, <https://github.com/gost/server>, 2022. (besucht am 09. 01. 2023).
- [81] Grafana Labs, *Grafana: The open observability platform*, <https://grafana.com/>, 2023. (besucht am 07. 02. 2023).
- [82] C. Haße, „Die Folgen des Klimawandels in Deutschland: was können wir tun und was kostet es?“ Hintergrundpapier, Sep. 2012.

-
- [83] W. Hennegriff, V. Kolokotronis, H. Weber und H. Bartels, „Klimawandel und Hochwasser,“ Jg. KA – Abwasser, Abfall, Nr. 8, 2006.
- [84] R. A. Herrmann und J. Jürgen, Hrsg., *Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen: Handbuch für Theorie und Praxis. Vol. 5: Vol. V - 2015*. Siegen: Universitätsverlag - universi, 2016, Bd. Symposium Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen, ISBN: 978-3-936533-67-5.
- [85] F. P. Hessel, „LoRaWAN Security Analysis: An Experimental Evaluation of Attacks,“ Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Masterarbeit, 2019.
- [86] Hessische Landesfeuerweherschule, *Feuerwehr-Dienstvorschrift 100*, Sep. 1999.
- [87] Hessische Landesfeuerweherschule, *Grundlagen des Zivil- und Katastrophenschutzes*, 2020.
- [88] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), *Hochwasserportal Hessen*, <https://www.hochwasser-hessen.de/>, 2022. (besucht am 12. 04. 2022).
- [89] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), *HWRM-Viewer*, <https://hwrn.hessen.de/>, 2023. (besucht am 13. 01. 2023).
- [90] Hessisches Ministerium des Innern und für Sport, „Krisenstab der Landesregierung Jahresbericht 2009,“ Techn. Ber., 2010.
- [91] Hessisches Ministerium des Innern und für Sport, *Stabsdienstordnung für den Führungs-Stab / Katastrophenschutz-Stab im Hessischen Ministerium des Innern und für Sport*, Apr. 2012.
- [92] Hessisches Ministerium des Innern und für Sport, *Katastrophenschutz in Hessen*, Jan. 2016.
- [93] Hessisches Ministerium des Innern und für Sport Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, *Leitfaden zur Vorsorge und Bewältigung von Hochwasser- und Starkregenereignissen (Hessen)*, Nov. 2021.
- [94] R. Hickling und S. P. Marin, „The use of ultrasonics for gauging and proximity sensing in air,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 79, Nr. 4, S. 1151–1160, Apr. 1986, ISSN: 0001-4966. DOI: 10.1121/1.393387. (besucht am 22. 03. 2023).
- [95] J. Höchst, L. Baumgärtner, F. Kuntke, A. Penning, A. Sterz und B. Freisleben, *LoRa-based Device-to-Device Smartphone Communication for Crisis Scenarios*. Mai 2020.
- [96] S. Horvat, *Aktueller Begriff Internet der Dinge*, Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag, Hrsg., Juli 2012.
- [97] T.-J. Huyeng, *Datenplattform Darmstadt API*, <https://github.com/t-huyeng/datenplattform-darmstadt-api>, Aug. 2022. (besucht am 12. 10. 2022).
- [98] T.-J. Huyeng, *Forks des ESP32-Paxcounter Projektes*, <https://github.com/t-huyeng/ESP32-Paxcounter>, Nov. 2022. (besucht am 12. 03. 2023).
- [99] T.-J. Huyeng, *Geoportal OpenAPI Finder*, <https://github.com/t-huyeng/geoportal-openapis>, Aug. 2022. (besucht am 12. 10. 2022).
- [100] T.-J. Huyeng, *OpenAPI Viewer*, <https://github.com/t-huyeng/openapi-viewer>, Sep. 2022. (besucht am 12. 10. 2022).
- [101] T.-J. Huyeng, *Sammlung von Hochwasser-APIs, MOTARK-Projekt*, <https://github.com/mo-tark/hochwasser-apisammlung>, Okt. 2022. (besucht am 25. 10. 2022).
- [102] T.-J. Huyeng, *THW Pegel API*, <https://github.com/t-huyeng/thw-pegel-api>, Dez. 2022. (besucht am 12. 12. 2022).

-
- [103] T.-J. Huyeng,
„Verwendung und Einbindung von Open-Data-Schnittstellen am Beispiel der Bundes-APIs,“
in *Proceedings of 33. Forum Bauinformatik*, München, Sep. 2022, S. 182–189.
DOI: 10.14459/2022MD1686600.
- [104] T.-J. Huyeng, *EZSTA Mapping Finder*, <https://mo-tark.github.io/ezsta-search/>, 2023.
(besucht am 12. 02. 2023).
- [105] T.-J. Huyeng, *Geodaten Wasser RLP API*, <https://github.com/t-huyeng/geodaten-wasser-rlp-api>,
März 2023. (besucht am 12. 04. 2023).
- [106] T.-J. Huyeng, *HLNUG API*, <https://github.com/t-huyeng/hlnug-api>, Jan. 2023.
(besucht am 12. 12. 2022).
- [107] T.-J. Huyeng,
MoWaS-Extremhochwasser-2021: Analyse der MoWaS Meldungen während des Hochwasser im Juli 2021,
<https://github.com/t-huyeng/mowas-extremhochwasser-2021>, 2023. (besucht am 12. 02. 2023).
- [108] T.-J. Huyeng, *WISKI-Web API*, <https://github.com/t-huyeng/WISKI-Web-api>, Feb. 2023.
(besucht am 12. 03. 2022).
- [109] T.-J. Huyeng, T. Bittner und U. Rüppel,
„Designing a framework for seamless integration of open data services to support disaster response,“
in *ECPPM 202 – eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*,
R. J. Scherer, Hrsg., London: Taylor & Francis, Sep. 2022.
- [110] T.-J. Huyeng, T. Bittner und U. Rüppel,
„Examining the feasibility of LoRa-based monitoring in large-scale disaster response scenarios,“
in *ISCRAM 2022 Conference Proceedings – 19th International Conference on Information Systems for
Crisis Response and Management*, H. Karray, A. D. Nicola, N. Matta und H. Purohit, Hrsg.,
Brussels, Belgium: International Association for Information Systems for Crisis Response and
Management (ISCRAM), Mai 2022, S. 541–550.
- [111] T.-J. Huyeng, J. Huang, A. Wagner, B. Lehmann und U. Rüppel,
„Digitalisierung im Verkehrswasserbau: BIM, Semantic Web und IoT-Sensorik,“
in *Komplexe Planungsaufgaben im Wasserbau und ihre Lösungen*,
I. f. W. u. t. H. Technische Universität Dresden, Hrsg., Bd. 62, Dresden, 2019,
ISBN: 978-3-86780-577-3. (besucht am 09. 03. 2020).
- [112] B. Iglewicz und D. C. Hoaglin,
How to detect and handle outliers (ASQC basic references in quality control),
American Society for Quality Control, Statistics Division, Hrsg.
Milwaukee, Wis: ASQC Quality Press, 1993, ISBN: 978-0-87389-247-6.
- [113] *InfluxDB OSS 1.6 Documentation*, <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.6/>.
(besucht am 16. 02. 2023).
- [114] IPCC, *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the
Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,
P. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. A. Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some,
P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz und J. Malley, Hrsg.
Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022.
DOI: 10.1017/9781009157926.
- [115] J.P. Meijers, *TTN Coverage*, <https://ttnmapper.org/heatmap/>, 2023. (besucht am 01. 02. 2023).

-
- [116] A. John, *Wenn die Warnung ausbleibt - die Flutkatastrophe im Ahrtal*, <https://www.tagesschau.de/inland/gesellschaft/katastrophenschutz-flut-ahrta-101.html>, Dez. 2022. (besucht am 28. 12. 2022).
- [117] M. Jouhari, E. M. Amhoud, N. Saeed und M.-S. Alouini, *A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges*, Feb. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2202.11082. arXiv: 2202.11082 [cs, eess].
- [118] T. Junghänel, P. Bissolli, J. Daßler, R. Fleckenstein, F. Imbery, W. Janssen, K. Lengfeld, T. Leppelt, M. Rauthe, A. Rauthe-Schöch, M. Rocek, E. Walawender und E. Weigl, „Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2022,“ Deutscher Wetterdienst, Hrsg., S. 16, Juli 2021.
- [119] R. Jüpner, *Parlamentarischer Untersuchungsausschuss V (Hochwasserkatastrophe) des Landtages von Nordrhein-Westfalen*, Jan. 2022. (besucht am 28. 12. 2022).
- [120] G. Kirschstein, *Kein Fax aus Ahrweiler: Warnung der Menschen im Ahrtal scheiterte an fehlendem schriftlichen Antrag für MoWas*, <https://mainzund.de/kein-fax-aus-ahrweiler-warnung-der-menschen-im-ahrta-1-scheiterte-an-fehlendem-schriftlichen-antrag/>, Apr. 2022. (besucht am 31. 10. 2022).
- [121] G. Kleinhans, „Anschluss von Warnsirenen an das Modulare Warnsystem,“ Jg. Bevölkerungsschutz, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), Hrsg., Feb. 2022, ISSN: 0940-7154.
- [122] Kompetenzzentrum Open Data (CCOD), *Open Data Handbuch*, https://www.bva.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Behoerden/Beratung/Methoden/open_data_handbuch.pdf?__blob=publicationFile&v=8, Aug. 2020. (besucht am 10. 10. 2022).
- [123] B. Koppe und B. Brinkmann, „Entwicklung und Einsatz von wassergefüllten Schlauchsystemen im Hochwasserschutz,“ in *Konferenzbeitrag acqua alta 2011*, Hamburg, 2011.
- [124] M. Kosowsky, *HeyWhatsThat*, <https://heywhatsthat.com/>, Dez. 2016. (besucht am 09. 04. 2023).
- [125] F. Kreienkamp, S. Y. Philip, J. S. Tradowsky, S. F. Kew, P. Lorenz, J. Arrighi, A. Belleflamme, T. Bettmann, S. Caluwaerts, S. C. Chan, A. Ciavarella, L. D. Cruz, H. de Vries, N. Demuth, A. Ferrone, E. M. Fischer, H. J. Fowler und K. Goergen, *Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021*, <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>, Aug. 2021. (besucht am 23. 10. 2022).
- [126] Kreis Ahrweiler [@KreisAhrweiler], *Lagebericht für den #KreisAhrweiler: #Hochwasser und #Starkregen an der Ahr. Aktueller Pegelstand 5,09 Meter (#Altenahr). Mit weiteren #Sturzfluten und #Überflutungen ist zu rechnen. Wichtige Informationen unter: http://bit.ly/3hC2P9B*, Tweet, Juli 2021. (besucht am 29. 12. 2022).
- [127] V. Kushwaha und S. Bojewar, „A Survey of Ultrasonic Sensors and their Applications,“ Jg. 8, Nr. 11, 2019.
- [128] C. Lamers, *Stabsarbeit im Bevölkerungsschutz: Historie, Analyse und Vorschläge zur Optimierung*, 2., überarbeitete Auflage. Edeweicht: S+K, Verlagsgesellschaft Stumpf + Kossendey mbH, 2021, ISBN: 978-3-96461-036-2.
- [129] Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, *Hochwasserfrühwarnung - Warnklassen*, <https://fruehwarnung.hochwasser-rlp.de/warnklassen.html>, 2022. (besucht am 17. 01. 2023).
- [130] Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Rheinland-Pfalz, *Anpassung des Pegelnetzes zur Sicherstellung des Messbetriebes bei Extremhochwasser*, Mai 2004.

-
- [131] Landtag Rheinland-Pfalz, *Untersuchungsausschuss 18/1*, <https://www.landtag.rlp.de/de/parlament/ausschuesse-und-gremien/fachausschuesse/untersuchungsausschuss-181-flutkatastrophe/>, 2022. (besucht am 29. 12. 2022).
- [132] LARSIM-Entwicklergemeinschaft, *Wasserhaushaltsmodell LARSIM*, <https://www.larsim.info/>, 2023. (besucht am 12. 01. 2023).
- [133] B. Lehmann, *Wasserbauliches Gutachten - Flutkatastrophe Ahrtal Juli 2021 Untersuchungsausschuss 18 / 1*, Jan. 2022.
- [134] B. Ley, T. Ludwig, V. Pipek, D. Randall, C. Reuter und T. Wiedenhoefer, „Information and Expertise Sharing in Inter-Organizational Crisis Management“, *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, Jg. 23, S. 347–387, Dez. 2014. DOI: 10.1007/s10606-014-9205-2.
- [135] B. Ley, V. Pipek, C. Reuter und T. Wiedenhoefer, *Supporting Inter-Organizational Situation Assessment in Crisis Management*. Apr. 2012.
- [136] M. Linnemann, R. Brockmann, A. Sommer und R. Leufkes, *450 MHz – Frequenz für kritische Infrastrukturen: Vorteile und Nutzen für Versorgungsunternehmen (essentials)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, ISBN: 978-3-658-36538-7. DOI: 10.1007/978-3-658-36538-7.
- [137] M. Linnemann, A. Sommer und R. Leufkes, *Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft: Praxisbuch zu Technik, Anwendung und regulatorischen Randbedingungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, ISBN: 978-3-658-26917-3. DOI: 10.1007/978-3-658-26917-3.
- [138] LoRa Alliance, „LoRaWAN™ Specification v1.1,“ LoRa Alliance Technical Committee, Techn. Ber., 2017.
- [139] LoRa Alliance, „LoRaWAN™ Specification v1.0.3,“ LoRa Alliance Technical Committee, Techn. Ber., Juli 2018.
- [140] LoRa Alliance, „LoRaWAN Specification, Security FAQ v2,“ Techn. Ber., Feb. 2020. (besucht am 07. 02. 2023).
- [141] LoRa Alliance, „RP2-1.0.2 LoRaWAN® Regional Parameters,“ LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, Techn. Ber., 2020.
- [142] LoRa Alliance, *Devices - Marketplace – The Things Network*, <https://www.thethingsnetwork.org/marketplace/products/devices>, 2022. (besucht am 17. 08. 2022).
- [143] K. C. V. G. Macaraeg, C. A. G. Hilario und C. D. C. Ambatali, „LoRa-based Mesh Network for Off-grid Emergency Communications,“ in *2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, Okt. 2020, S. 1–4. DOI: 10.1109/GHTC46280.2020.9342944.
- [144] A. Maier, A. Sharp und Y. Vagapov, „Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things,“ in *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Sep. 2017, S. 143–148. DOI: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.
- [145] MDN-Mitwirkende, *Cross-Origin Resource Sharing (CORS) - HTTP*, <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/CORS>. (besucht am 20. 10. 2022).

-
- [146] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel und F. Meyer, „A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,“ *ICT Express*, Jan. 2018, ISSN: 2405-9595.
DOI: 10.1016/j.ict.2017.12.005.
- [147] Minister des Innern und für Sport, Hessischer Landtag, *Kleine Anfrage: Drucksache 20/8836: Einführung einer einheitlichen Stabssoftware bei den Feuerwehren in Hessen*, Sep. 2022.
- [148] Ministerium des Inneren und für Sport,
Große Anfrage: Drucksache 18/4959 Kommunikationsmittel TETRA BOS Funk, Dez. 2022.
- [149] Ministerium des Inneren und für Sport (Rheinland-Pfalz), *Große Anfrage: Drucksache 18/1367: Hochwasserkatastrophe in Rheinland-Pfalz – Kommunikation, Warnung und Prävention*, Okt. 2021.
- [150] Ministerium des Inneren und für Sport (Rheinland-Pfalz),
Kleine Anfrage: Drucksache 18/ 3430: Rolle der Integrierten Leitstelle Koblenz bei der Warnung der Bevölkerung von Ahrweiler in der Flutkatastrophe vom 14./15. Juli 2021, Juni 2022.
- [151] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (MKUEM) (Rheinland-Pfalz),
Hochwasserrisikomanagements in Rheinland-Pfalz,
<https://hochwassermanagement.rlp-umwelt.de/servlet/is/391/>, 2023. (besucht am 12. 01. 2023).
- [152] Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (Rheinland-Pfalz),
Große Anfrage: Drucksache 18/3437: Überblick über die Beschädigung und Zerstörung kritischer Infrastruktur im Zusammenhang mit der Flutkatastrophe im Ahrtal im Juli 2021, Juni 2022.
- [153] S. L. Mohammed, A. Al-Naji, M. M. Farjo und J. Chahl, „Highly Accurate Water Level Measurement System Using a Microcontroller and an Ultrasonic Sensor,“
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Jg. 518, Nr. 4, S. 042 025, Mai 2019, ISSN: 1757-8981, 1757-899X.
DOI: 10.1088/1757-899X/518/4/042025. (besucht am 12. 01. 2023).
- [154] G. Morgenschweis,
Hydrometrie: Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen (VDI-Buch).
Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, ISBN: 978-3-662-55314-5.
DOI: 10.1007/978-3-662-55314-5.
- [155] MrMap -community, *GeoPortal.rlp*, <https://github.com/mrmap-community/GeoPortal.rlp>, 2023.
(besucht am 14. 01. 2023).
- [156] Nuxt, *Nuxt: The Intuitive Web Framework*, <https://nuxt.com>, 2023. (besucht am 18. 01. 2023).
- [157] Nuxt-Community, *Nuxt2: The Intuitive Vue Framework*, <https://nuxtjs.org/>, 2022.
(besucht am 14. 01. 2023).
- [158] R. O. Obe und L. S. Hsu, *PostGIS in action*, Third edition. Shelter Island: Manning Publications, 2021, ISBN: 978-1-61729-669-7.
- [159] Open Geospatial Consortium, *SensorThings API*, <https://github.com/opengeospatial/sensorthings>, Nov. 2022. (besucht am 28. 11. 2022).
- [160] Orne Brocaar, *Dokumentation ChirpStack*, <https://www.chirpstack.io/docs/>, 2022.
(besucht am 13. 12. 2022).
- [161] M. Pan, C. Chen, X. Yin und Z. Huang, „UAVs-Aided Emergency Environmental Monitoring in Infrastructure-Less Areas: LoRa Mesh Networking Approach,“
IEEE Internet of Things Journal, S. 1–1, 2021, ISSN: 2327-4662.
DOI: 10.1109/JIOT.2021.3095494.

-
- [162] H. Patt und R. Jüpner, Hrsg., *Hochwasser-Handbuch: Auswirkungen und Schutz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, ISBN: 978-3-658-26743-8. DOI: 10.1007/978-3-658-26743-8.
- [163] B. Paul, „An Overview of LoRaWAN,“ *WSEAS TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, Jg. 19, S. 231–239, Jan. 2021. DOI: 10.37394/23204.2020.19.27.
- [164] A. Paultre, *How Open-Source is the LoRaWAN IoT Community?* <https://embeddedcomputing.com/technology/open-source/linux-freertos-related/how-open-source-is-the-lorawan-iot-community>, Feb. 2020. (besucht am 02. 02. 2023).
- [165] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger und S. Chatterjee, „A Design Science Research Methodology for Information Systems Research,“ *Journal of Management Information Systems*, Jg. 24, Nr. 3, S. 45–77, Dez. 2007, ISSN: 0742-1222, 1557-928X. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- [166] F. Pinkard, T. Pratt, D. Ward, T. Holmes, J. Kelley, L. T. Lee, G. Sills, E. Smith, P. A. Taylor, N. Torres, L. Wakeley und J. Wibowo, „Flood-Fighting Structures Demonstration and Evaluation Program: Laboratory and Field Testing in Vicksburg, Mississippi,“ S. 343, Juli 2007.
- [167] P. Placidi, L. Gasperini, A. Grassi, M. Cecconi und A. Scorzoni, „Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks,“ *Sensors*, Jg. 20, Nr. 12, S. 3585, Jan. 2020, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20123585. (besucht am 30. 01. 2023).
- [168] P. Placidi, R. Morbidelli, D. Fortunati, N. Papini, F. Gobbi und A. Scorzoni, „Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors,“ *Sensors*, Jg. 21, Nr. 15, S. 5110, Jan. 2021, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21155110. (besucht am 30. 01. 2023).
- [169] IT-Planungsrat, *GovData - Datenportal für Deutschland*, <https://www.govdata.de>, 2022. (besucht am 06. 04. 2022).
- [170] PlatformIO Labs., *PlatformIO is a professional collaborative platform for embedded development*, <https://platformio.org>, 2023. (besucht am 12. 01. 2023).
- [171] S. Quoika und J. Wald, „Einsatz eines digitalen Informationssystems für das kommunale Hochwasserrisikomanagement,“ *Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel*, Nr. 63, Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik, Hrsg., S. 313–317, 2020. (besucht am 01. 11. 2022).
- [172] C. Reuter, *Emergent Collaboration Infrastructures*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, ISBN: 978-3-658-08586-5. DOI: 10.1007/978-3-658-08586-5. (besucht am 01. 11. 2022).
- [173] C. Reuter, Hrsg., *Sicherheitskritische Mensch-Computer-Interaktion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, ISBN: 978-3-658-19523-6. DOI: 10.1007/978-3-658-19523-6. (besucht am 27. 03. 2023).
- [174] C. Reuter, „Quo vadis? Digitalisierung und soziale Medien im Bevölkerungsschutz,“ in *Digitalisierung als Erfolgsfaktor für das Sozial- und Wohlfahrtswesen*, Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, März 2020, S. 309–318. DOI: 10.5771/9783748903604-309. (besucht am 01. 11. 2022).
- [175] C. Reuter, T. Ludwig und V. Pipek, „Kooperative Resilienz – ein soziotechnischer Ansatz durch Kooperationstechnologien im Krisenmanagement,“ *Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO)*, Jg. 47, Aug. 2016. DOI: 10.1007/s11612-016-0317-7.

-
- [176] Rhein-Zeitung, *Landesamt sah den Pegelstand von sieben Metern um 20 Uhr voraus – Evakuierungsaufruf erfolgte um 23.09 Uhr*, https://www.rhein-zeitung.de/region/rheinland-pfalz_artikel,-landesamt-sah-den-pegelstand-von-sieben-metern-um-20-uhr-voraus-evakuierungsaufruf-erfolgte-um-2309-_arid,2288104.html, Juli 2021. (besucht am 03. 01. 2023).
- [177] K. Risk, *Fuse.js: What is Fuse.js?* <https://fusejs.io/>, 2023. (besucht am 18. 01. 2023).
- [178] J. Rönnfeldt, *IT-Unterstützung in operativ-taktischen Stäben: Untersuchung der Möglichkeit existierender Programme*. München: GRIN Verlag GmbH, 2012, ISBN: 978-3-656-33492-7.
- [179] A. Sabatini, „A digital signal-processing technique for compensating ultrasonic sensors,“ *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Jg. 44, Nr. 4, S. 869–874, Aug. 1995, ISSN: 1557-9662. DOI: 10.1109/19.392873.
- [180] T. Santhanavanich, C. Kim und V. Coors, „Integration Of Heterogeneous Coronavirus Disease Covid-19 Data Sources Using OGC SensorThings API,“ *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Jg. VI-4/W2-2020, S. 135–141, Sep. 2020, ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprs-annals-VI-4-W2-2020-135-2020. (besucht am 21. 12. 2022).
- [181] Schemathesis.io s.r.o., *Schemathesis: Property-based testing for API schemas*, <https://schemathesis.io/>, 2022. (besucht am 14. 02. 2023).
- [182] A. Schmietendorf, „Öffentlich angebotene Daten und Funktionen (Open Data/Open APIs) als Rückgrat des digitalen Wandels in den deutschen Behörden – eine Bestandsaufnahme,“ in *Verständliche Verwaltungskommunikation in Zeiten der Digitalisierung*, R. Fisch, Hrsg., Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2020, S. 63–76, ISBN: 978-3-7489-0284-3. DOI: 10.5771/9783748902843-63.
- [183] A. E. Schüller, *Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des operativen Hochwasserschutzes- ein Beitrag aus wasserwirtschaftlicher Perspektive*. Shaker Verlag, 2022, ISBN: 978-3-8440-8730-7. DOI: 10.26204/KLUED0/6918. (besucht am 25. 10. 2022).
- [184] P. Schulze, M. Engelmann und F. Fuchs-Kittowski, „IoT-basierte Wasserstandmessung mittels Low-cost-Messsystem und -Sensorik an kleinen Fließgewässern,“ in *Umweltinformationssysteme - Wie trägt die Digitalisierung zur Nachhaltigkeit bei?*, F. Fuchs-Kittowski, A. Abecker und F. Hosenfeld, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2022, S. 151–167, ISBN: 978-3-658-35685-9. DOI: 10.1007/978-3-658-35685-9_9.
- [185] Sebastián Ramírez, *FastAPI framework, high performance, easy to learn, fast to code, ready for production*, <https://fastapi.tiangolo.com/>, 2023. (besucht am 14. 01. 2023).
- [186] W. Sedlak, „Krisenstab der Landesregierung Jahresbericht 2015,“ Techn. Ber., 2015.
- [187] O. B. A. Seller, „Wireless communication method,“ US 9,647,718 B2, Mai 2017.
- [188] Semtech Corporation, „AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics,“ Techn. Ber., Mai 2015.
- [189] Semtech Corporation, *Understanding the LoRa® Adaptive Data Rate*, Dez. 2019.
- [190] S. Sendra, L. Garcia, J. Lloret, I. Bosch und R. Vega-Rodríguez, „LoRaWAN Network for Fire Monitoring in Rural Environments,“ *Electronics*, Jg. 9, S. 531, März 2020. DOI: 10.3390/electronics9030531.
- [191] SensorThings Mozilla Sensorweb-Mitwirkende, *SensorThings Mozilla Sensorweb*, <https://github.com/mozilla-sensorweb/sensorthings>, 2017. (besucht am 09. 01. 2023).

-
- [192] S. Siedschlag, „Wasserstände und Durchflüsse – messen, speichern und übertragen im digitalen Zeitalter,“ in *38. Dresdner Wasserbaukolloquium 2015*, Dresden, 2015.
- [193] Sigfox, *Sigfox connected objects: Radio specifications*, <https://build.sigfox.com/sigfox-device-radio-specifications>, März 2022. (besucht am 01. 10. 2022).
- [194] Sigfox Germany GmbH, *Home - Sigfox Germany GmbH*, <https://sigfox.de/>, Mai 2019. (besucht am 29. 12. 2022).
- [195] Sigfox Germany GmbH, *Netzabdeckung*, <https://sigfox.de/netzabdeckung/>, März 2020. (besucht am 13. 07. 2022).
- [196] SmartBear Software, *Swagger Editor*, <https://editor.swagger.io/>, 2023. (besucht am 18. 06. 2022).
- [197] J. Song, R. Poovendran, J. Lee und T. Iwata, „RFC 4493: The AES-CMAC Algorithm,“ Network Working Group RFC 4493, Juni 2006. (besucht am 07. 02. 2023).
- [198] M. Stellin, S. Sabino und A. Grilo, „LoRaWAN Networking in Mobile Scenarios Using a WiFi Mesh of UAV Gateways,“ *Electronics*, Jg. 9, S. 630, Apr. 2020. doi: 10.3390/electronics9040630.
- [199] Stephan Gösser, *JSONPath - XPath for JSON*, <https://goessner.net/articles/JsonPath/>, Feb. 2007. (besucht am 12. 02. 2023).
- [200] Stoplight, *Spectral - Open Source API Description Linter*, <https://stoplight.io/open-source/spectral>, 2022. (besucht am 14. 01. 2022).
- [201] T. Strobl und F. Zunic, „Hochwasser,“ in *Wasserbau: Aktuelle Grundlagen — Neue Entwicklungen*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, S. 383–447, ISBN: 978-3-540-47857-7. doi: 10.1007/978-3-540-47857-7_8.
- [202] T. Strobl und F. Zunic, *Wasserbau: aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen*. Berlin Heidelberg: Springer, 2006, ISBN: 978-3-540-22300-9.
- [203] S. Sugumaran, *Grafana Infinity Datasource*, <https://yesoreyeram.github.io/grafana-infinity-datasource>, 2023. (besucht am 05. 01. 2023).
- [204] G. B. Tayeh, C. Guyeux, A. Makhoul, J. M. Bahi und S. Freidig, „A Personal LPWAN Remote Monitoring System,“ in *2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2021, S. 80–85. doi: 10.1109/IWCMC51323.2021.9498794.
- [205] Technisches Hilfswerk, *Stärke- und Ausstattungsnachweisung - Mobiler Hochwasserpegel (MHP)*, Juli 2018.
- [206] Technisches Hilfswerk, *Erprobung mobiler Hochwasserpegel zur Lagebeurteilung und Dokumentation*, Juni 2021.
- [207] Technisches Hilfswerk, *Handbuch Hochwasserschutz-Deichverteidigung*, Mai 2021.
- [208] Technisches Hilfswerk, „Bilanz THW-Einsatz Starkregen 2021,“ *Techn. Ber.*, Juni 2022. (besucht am 23. 10. 2022).
- [209] Technisches Hilfswerk, *Vernetzt und sicher: Messenger-Dienst „hermine@THW“ feiert 1. Geburtstag*, https://www.thw.de/SharedDocs/Meldungen/DE/Pressemitteilungen/national/2021/12/pressemitteilung_002_hermine.html, Dez. 2022. (besucht am 16. 02. 2023).
- [210] Technisches Hilfswerk, *Taschenkarte Deichverteidigung 2019 2017*.
- [211] Telekom Deutschland GmbH, *Mobile-IoT Mobilfunk-Abdeckung*, <https://t-map.telekom.de/tmap2/mobileiot/>, 2023. (besucht am 01. 02. 2023).

-
- [212] The Linux Foundation®, *OpenAPI Initiative*, <https://www.openapis.org/>. (besucht am 12. 10. 2022).
- [213] The Things Network, *The Things Network*, <https://www.thethingsnetwork.org/>, 2022. (besucht am 01. 02. 2023).
- [214] The Things Network, *The Things Stack, an open source LoRaWAN Network Server*, <https://github.com/TheThingsNetwork/lorawan-stack>, Jan. 2023. (besucht am 01. 02. 2023).
- [215] THW Ausbildungszentrum Neuhausen, *Mobiler Hochwasserpegel - THW*, <https://thw-pegel.de/>, 2023. (besucht am 18. 01. 2023).
- [216] Traefik Labs, *Traefik Proxy Documentation - Traefik*, <https://doc.traefik.io/traefik/>, 2023. (besucht am 07. 02. 2023).
- [217] Verschwörhaus e.V., *Hochwasser Ulm: Donau und Blau*, <https://hochwasser.ttnulm.de/>, 2019. (besucht am 18. 01. 2023).
- [218] J. Vrindavanam, R. Srinath, A. N. D und S. Y. R, „Incident Response System Prototype Using LoRa,“ in *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, Nov. 2020, S. 1–5. DOI: 10.1109/INOCON50539.2020.9298257.
- [219] Vuetify, *Vuetify — A Material Design Framework for Vue.js*, <https://v2.vuetifyjs.com/en/>, 2023. (besucht am 04. 01. 2023).
- [220] A. Wagenknecht, „Integrierte Ablauf- und Informationssteuerung in der Katastrophenabwehr,“ Diss., Shaker Verlag / TU Darmstadt, Aachen, Nov. 2010, ISBN: 978-3-8322-9542-4.
- [221] K. Weissenbach, D. K.-P. Schulz, S. Weimer, S. Schneider, J. Pampel, G. Schäfer, R. Vietzen, S. Hollstein, T. Batz, F. Chaves, D. T. Usländer, A. Schultze, R. Wolff und C. Brauner, „Harmonisierung der IuK-Systeme für das Krisenmanagement in Baden-Württemberg,“ Techn. Ber., 2011, S. 80.
- [222] D. C. Wernick, J. Knips, D. S. Tenbrock, D. S. S. Martins, M. R. Braun und D. M. Stronzik, „Der deutsche Telekommunikationsmarkt im internationalen Vergleich – Abschlussbericht –,“ Bad Honnef, Techn. Ber., Juli 2020, S. 201.
- [223] *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Warnungen aktuell - Warnkriterien*, https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html. (besucht am 14. 10. 2022).
- [224] Wissenschaftsstadt Darmstadt, *Datenplattform Darmstadt*, <https://datenplattform.darmstadt.de>, 2023. (besucht am 18. 01. 2023).
- [225] L. Wittmann, *Wenn die Zivilgesellschaft bei Open Data hilft*, <https://lilithwittmann.medium.com/wenn-die-zivilgesellschaft-bei-open-data-hilft-905add0aa21b>, 2021. (besucht am 28. 03. 2022).
- [226] H. Zanetti, *Kompetenz im Bevölkerungsschutz Das THW anfordern*, Bundesanstalt Technisches Hilfswerk, Hrsg., Dez. 2015.
- [227] D. J. Zedlitz, E. Priefer, J. Hauptvogel, D. Panic, N. Volkening, P. Kochmann, Christian Wittig, Antje Göldner, Christian Horn, Ludger Rinsche, Adam Kirschstein und Sebastian Sklarß, *DCAT-AP.de Spezifikation 2.0*, <https://www.dcat-ap.de/def/dcatde/2.0/spec/>, März 2022. (besucht am 12. 12. 2022).
- [228] Zurich Insurance Group, *PERC Ereignisanalyse Hochwasser „Bernd“*, Juni 2022.

A. Anhang

A.1. Warnkriterien des Deutschen Wetterdiensts

Tabelle A.1: Warnkriterien des DWDs für Starkregen. (Quelle: [223])

Warnereignis	Schwellenwert	Warnstufe
Starkregen	15 bis 25 l/m ² in 1 Stunde	2
	20 bis 35 l/m ² in 6 Stunden	
Heftiger Starkregen	25-40 l/m ² in 1 Stunde	3
	35-60 l/m ² in 6 Stunden	
Extrem heftiger Starkregen	>40 l/m ² in 1 Stunde	4
	>60 l/m ² in 6 Stunden	

Tabelle A.2: Warnkriterien des DWDs für Dauerregen. (Quelle: [223])

Warnereignis	Schwellenwert	Warnstufe
Dauerregen	25 bis 40 l/m ² in 12 Stunden	2
	30 bis 50 l/m ² in 24 Stunden	
	40 bis 60 l/m ² in 48 Stunden	
	60 bis 90 l/m ² in 72 Stunden	
Ergiebiger Dauerregen	40-70 l/m ² in 12 Stunden	3
	50-80 l/m ² in 24 Stunden	
	60-90 l/m ² in 48 Stunden	
	90-120 l/m ² in 72 Stunden	
Extrem ergiebiger Dauerregen	>70 l/m ² in 12 Stunden	4
	> 80 l/m ² in 24 Stunden	
	> 90 l/m ² in 48 Stunden	
	> 120 l/m ² in 72 Stunden	

A.2. Warnmeldungen zum Hochwasser Juli 2021

MoWaS Warnmeldungen

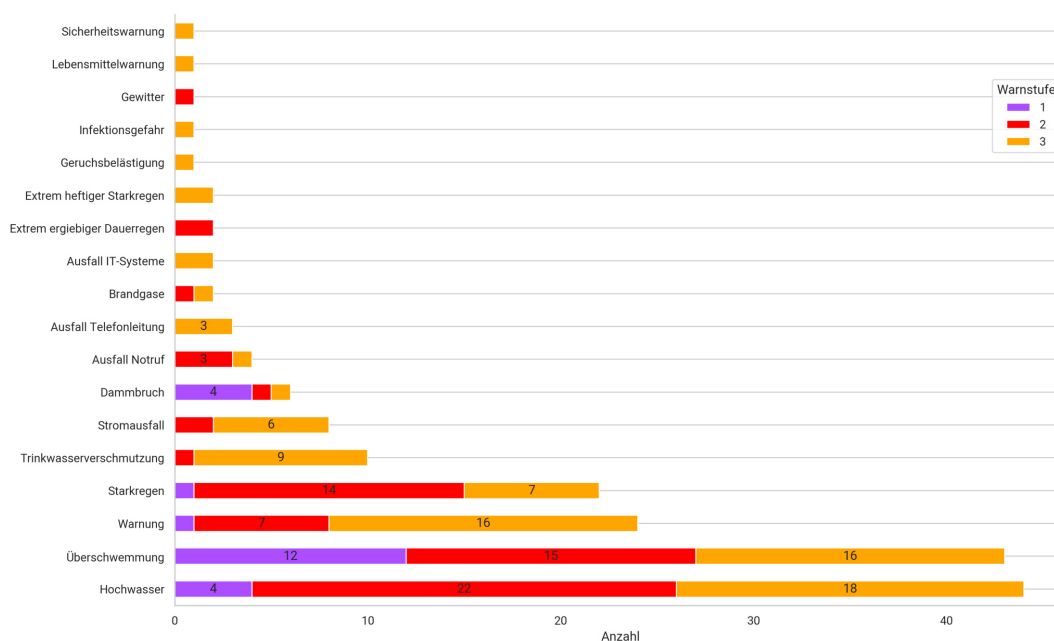


Abbildung A.1: Übersicht der Warnungen geordnet nach Ereignis. Entwarnungen sind hier nicht dargestellt. (Eigene Darstellung basierend auf den Warnungen des MoWaS [29])

KATWARN Warnmeldungen

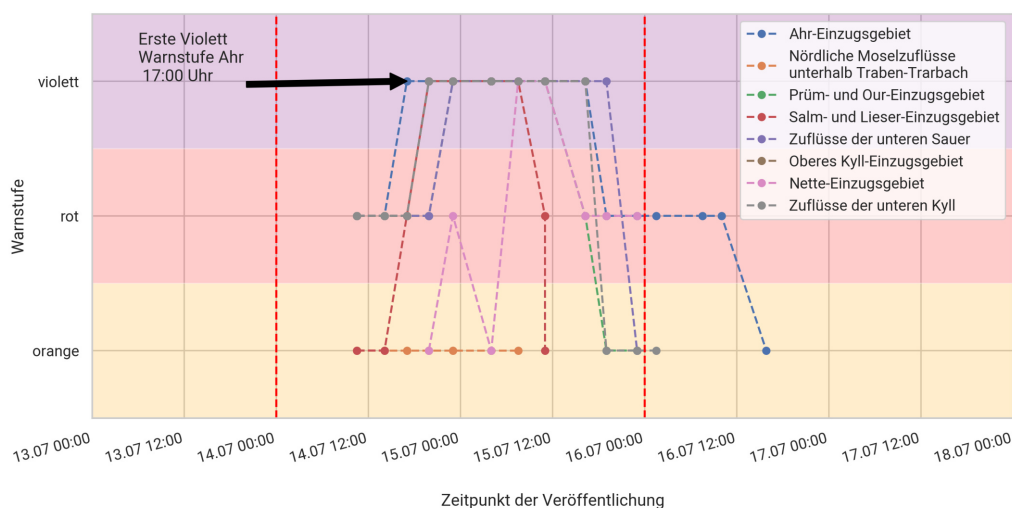


Abbildung A.2: Zeitlicher Verlauf der veranlassten KATWARN-Hochwasser-Warnungen (Alle veröffentlichten Regionen). (Eigene Darstellung basierend auf den Warnungen von KATWARN [70])

A.3. LoRaWAN-Nachrichtenstruktur

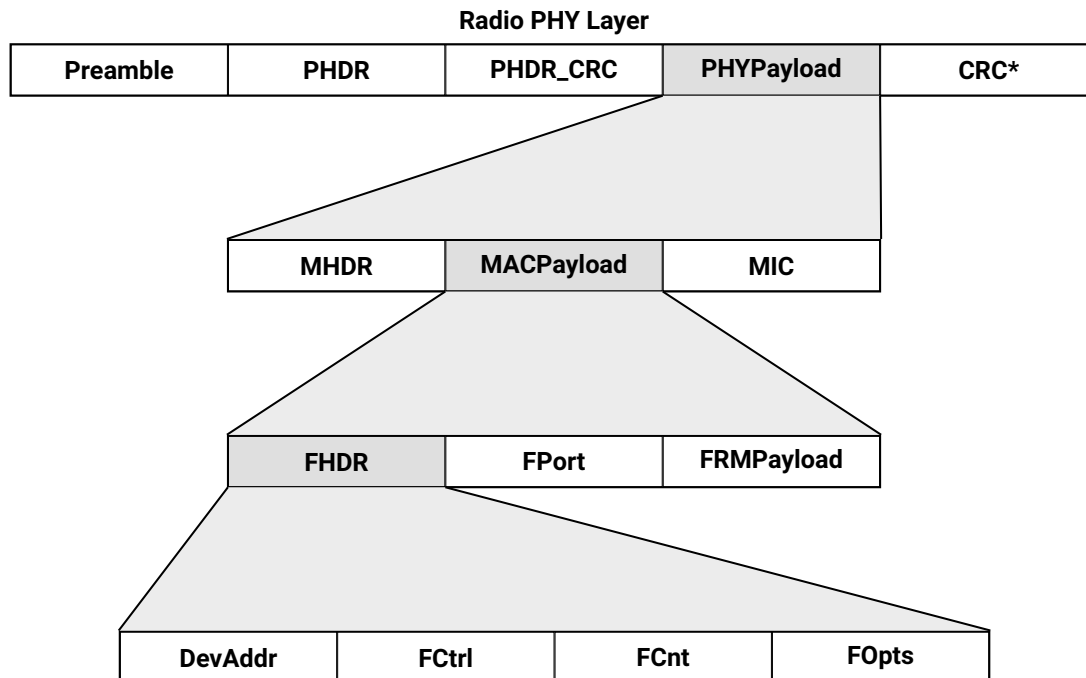


Abbildung A.3: Struktur einer LoRaWAN-Nachricht. *CRC** (Cyclic Redundancy Check) ist nur für Uplink-Nachrichten verfügbar. (Eigene Darstellung nach [139, S. 15])

Tabelle A.3: LoRaWAN Paketstruktur, Beschreibung der einzelnen Komponenten

Bezeichnung	Element	Beschreibung
PHYPayload	MAC Layer	:
MHDR	MAC Header	Nachrichtentyp und Version der Nachricht
MIC	Message Integrity Code	Integritätsüberprüfung
MACPayload	MAC Payload	:
FPort	Frame Port	Port des Payloads, der verwendet wird, um die Payloads zu identifizieren
FRMPayload	Frame Payload	Payload z. B. Sensordaten, die vom Endgerät gesendet wird
FHDR	Frame Header	:
DevAddr	Device Address	Geräteadresse
FCtrl	Frame Control	Zusätzliche Parameter wird z. B. bei Adaptive Data Rate (ADR) verwendet
FCnt	Frame Counter	Anzahl der gesendeten MAC-Frames
FOpts	Frame Options	Transport von MAC-Befehlen

A.4. MOTARK-Basic-Sensor-Set

Aufbau des Basic-Sensor-Kits

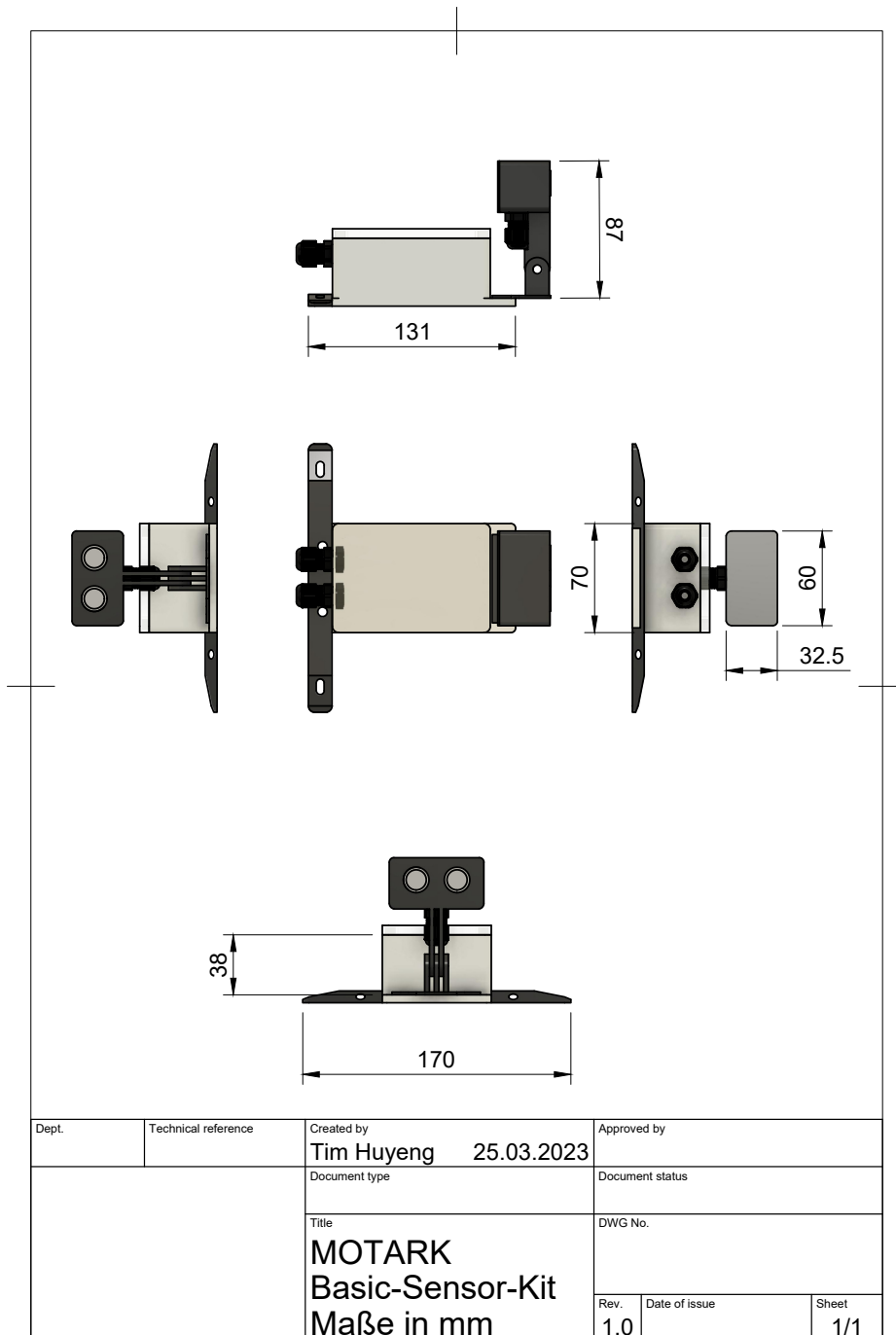


Abbildung A.4: Aufbau des Basic-Sensor-Kits. (Eigene Darstellung)

Beispielhafte Kostenzusammenstellung

Tabelle A.4: Beispielhafte Kostenzusammenstellung für ein Einsatzset, inklusive Möglichkeiten zum Erwerb (Stand Februar 2023).

Artikel	Anzahl	Einzelpreis	Gesamtpreis (brutto)
Schutzkoffer	2	40 €	80 €
Basic-Sensor-Kit	5	89 €	445 €
- Ultraschallsensor (HC-SR04) ^a		2 €	
- Bodenfeuchtesensor (DEBO CAP SENS) ^b		3 €	
- Temperatur / Luftfeuchtigkeitssensor (GY21) ^c		7 €	
- GPS Modul ^a		17 €	
- Boxen (Sonoff) ^d , 3D Bauteile, Platine		10 €	
- Mikrocontroller (Heltec LoRa32) ^a , Batterie ^a		50 €	
Basisstation	1	250	250 €
- Gateway (RAK7258) ^e		130 €	
- Antenne ^e		90 €	
- Powerbank (Voltcraft PB 20) ^f		30 €	
Gesamt			775 €

^a<https://eckstein-shop.de/>

^b<https://www.reichelt.de/>

^c<https://www.az-delivery.de/>

^d<https://www.berrybase.de/>

^e<https://store.rakwireless.com/>

^f<https://www.conrad.de/>

A.5. EZSTA-Web

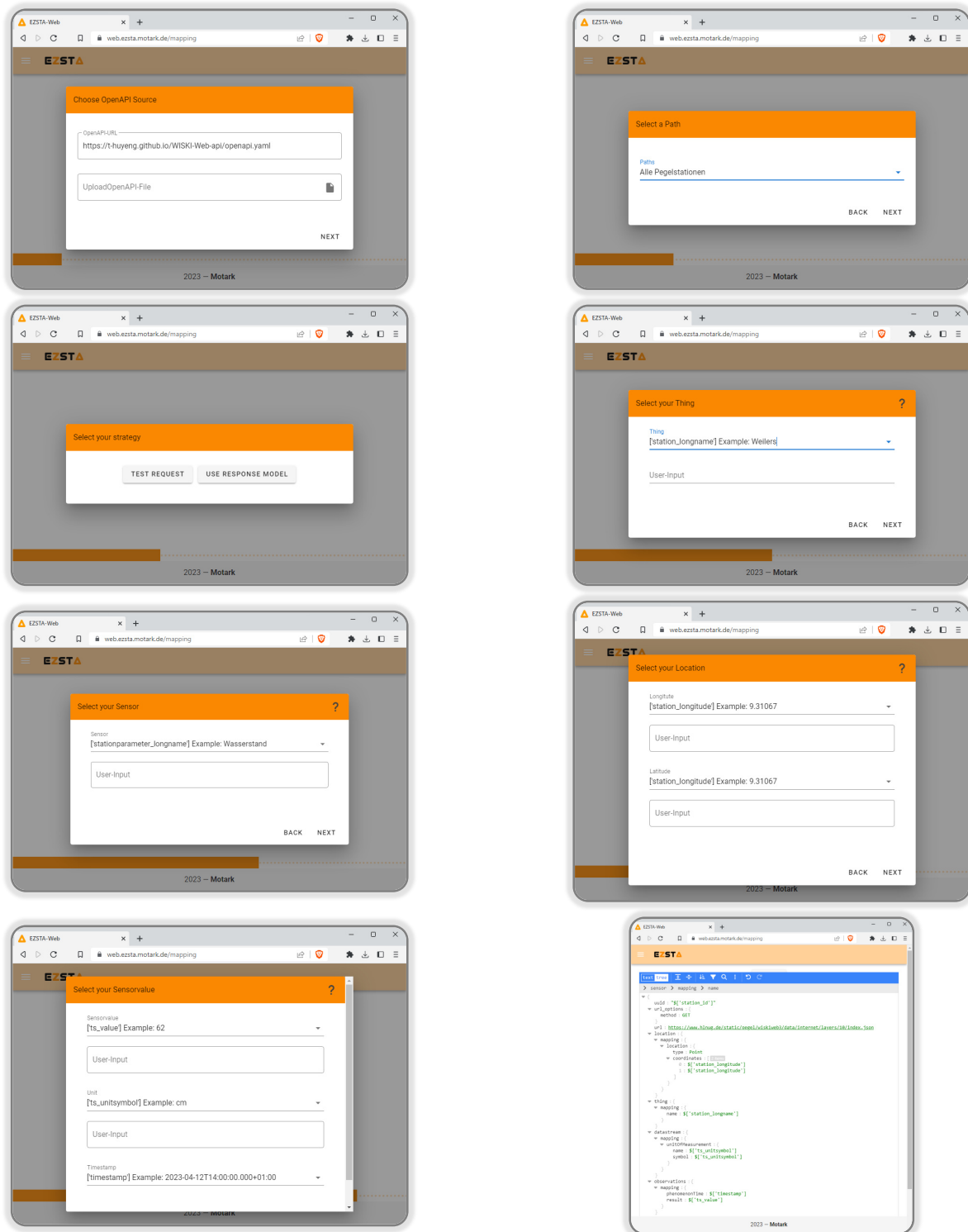


Abbildung A.5: Screenshots der EZSTA-Web-Anwendung. Beispielhaft wurde hier das Mapping für die Pegelstation der WISKI-API durchgeführt [108].

A.6. Praktische Versuche der Sensorik

Ausreißertest

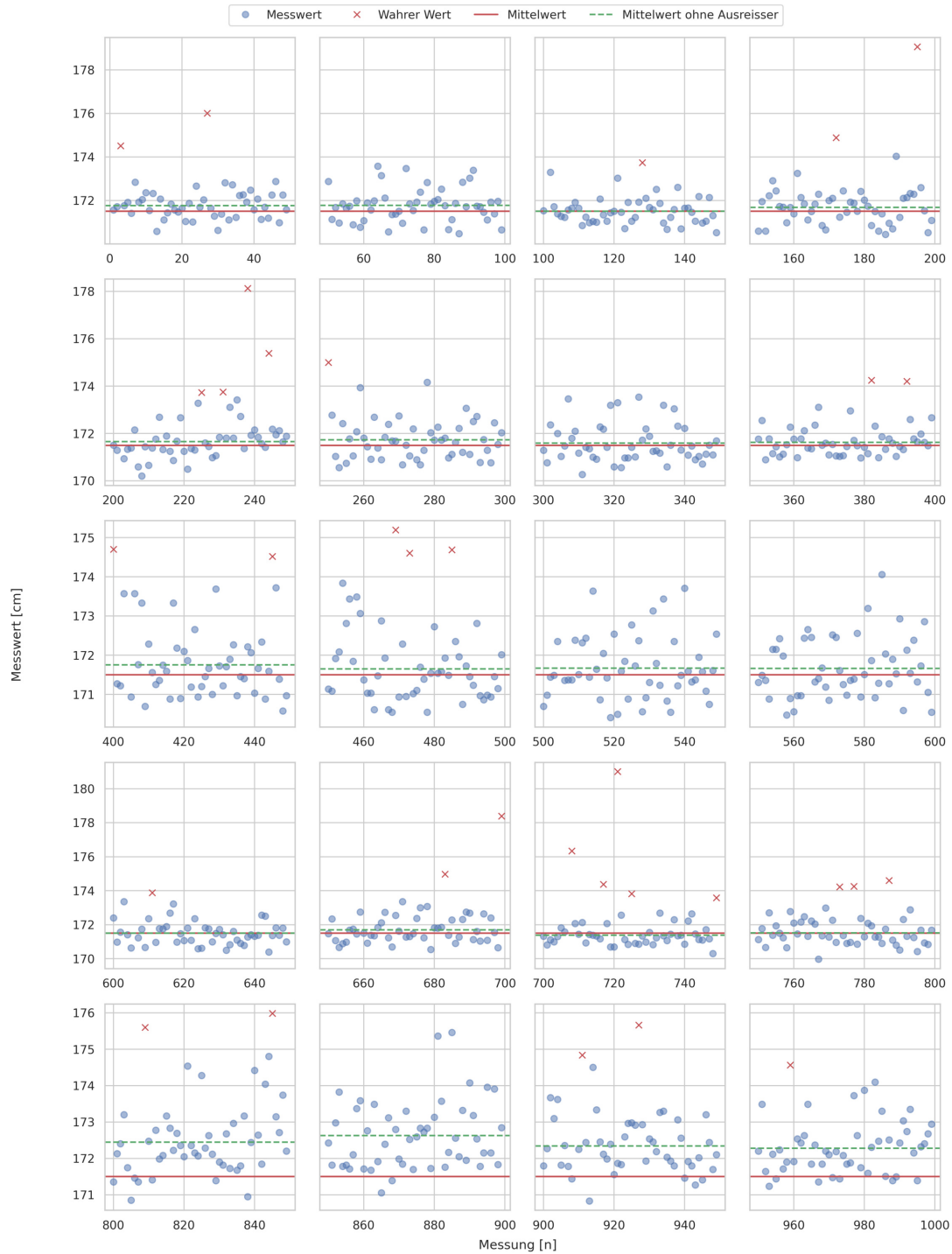


Abbildung A.6: Beispielhafte Messungen eines Ultraschallsensors mit den aufgezeichneten Messwerten und den mit der vorgestellten Methode eliminierten Ausreißern. (Eigene Darstellung)

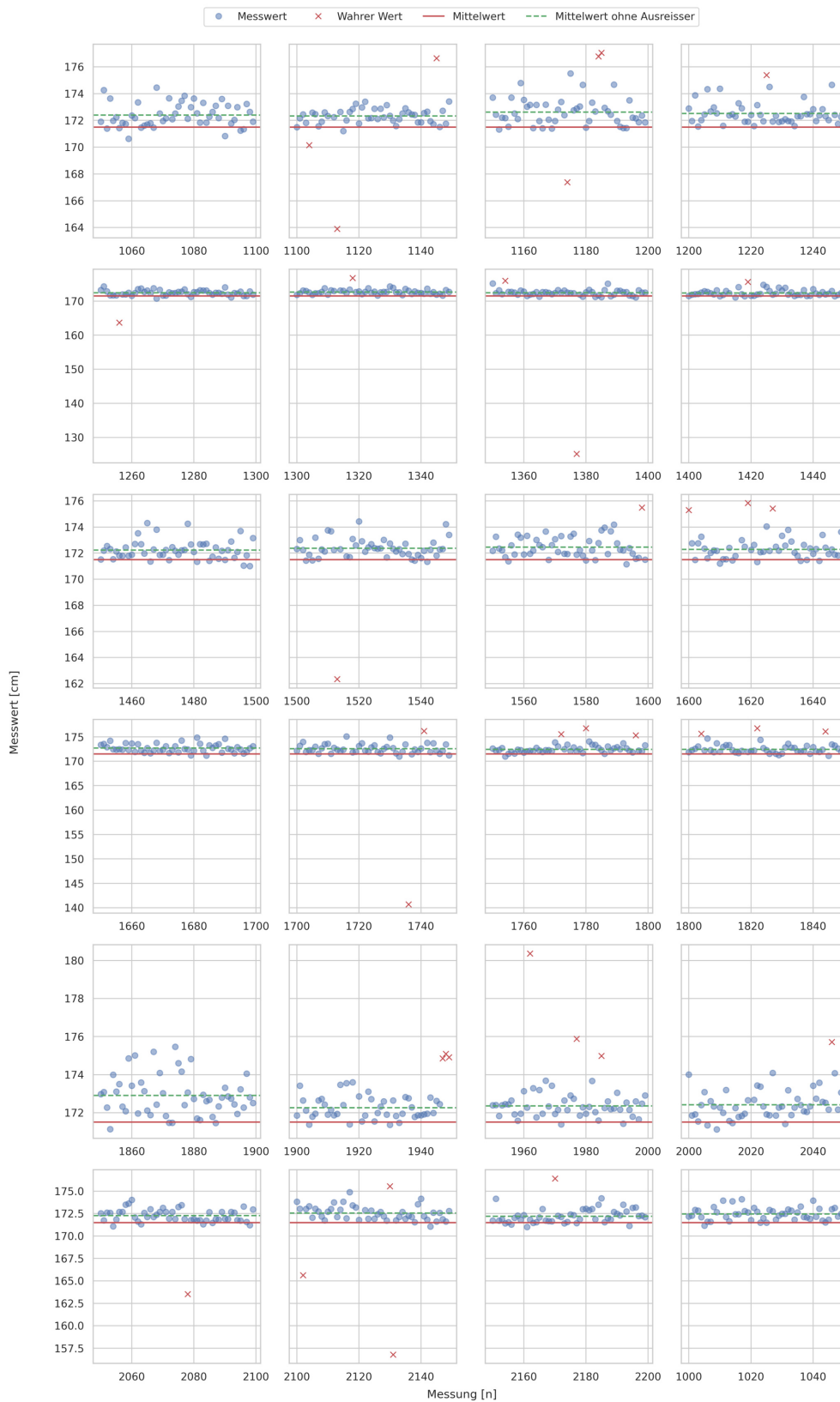


Abbildung A.7: Beispielhafte Messungen eines Ultraschallsensors mit den aufgezeichneten Messwerten und den mit der vorgestellten Methode eliminierten Ausreißern. (Eigene Darstellung)

Ultraschallsensor

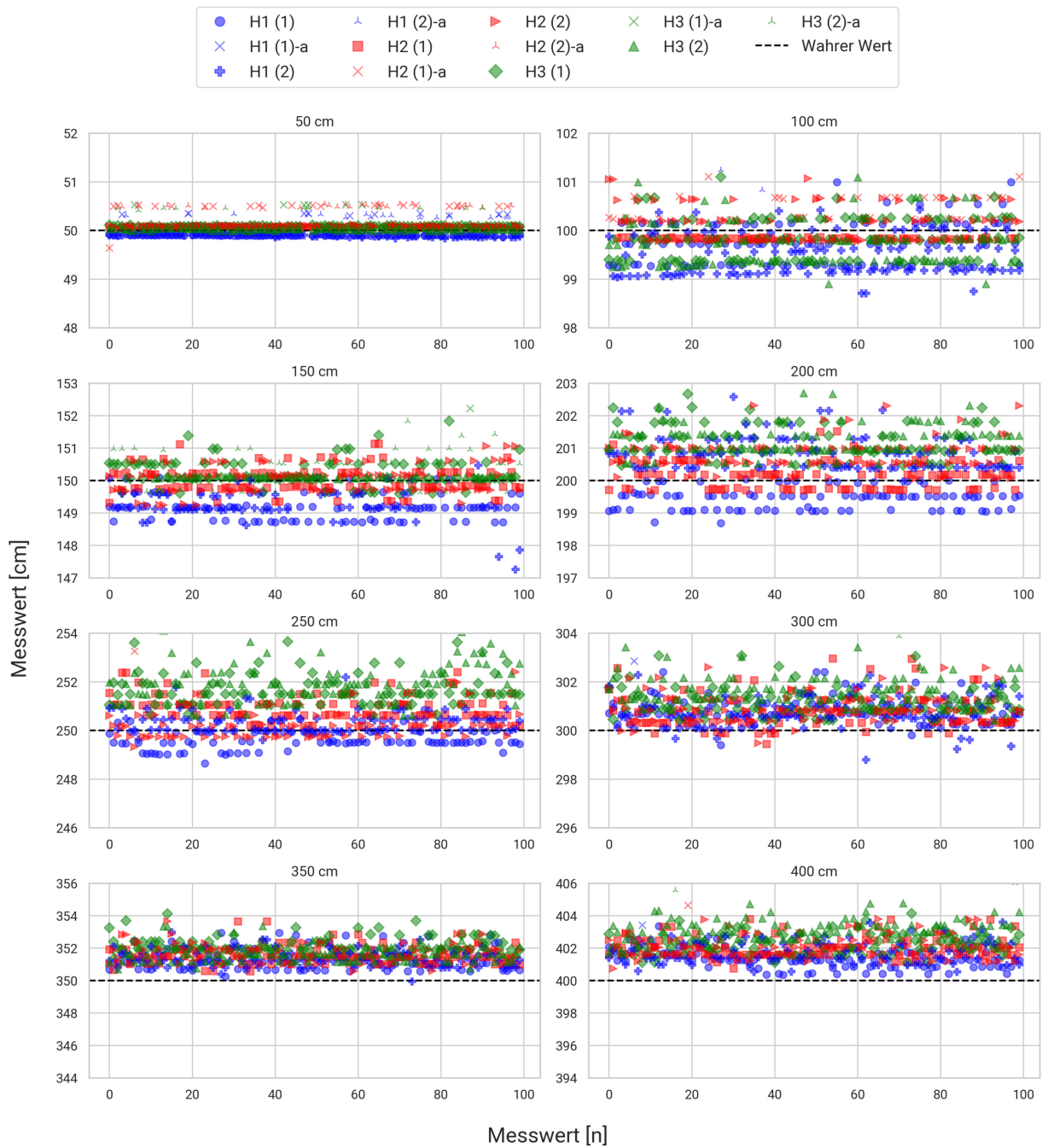


Abbildung A.8: Messwerte der drei Sensorkits jeweils zwei Messreihen für die Messpunkte (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 cm). Die Messreihen -a enthalten die Ausreißer der jeweiligen Messreihe. (Eigene Darstellung)

Versuchsaufbau Wasserbauliches Forschungslabor



Abbildung A.9: Fotoaufnahme des Versuchsaufbaus im Wasserbaulichen Forschungslabor.
(Eigene Aufnahmen)

A.7. Zusätzliche Karten der Feldversuche

Städtisches Umfeld - Darmstadt

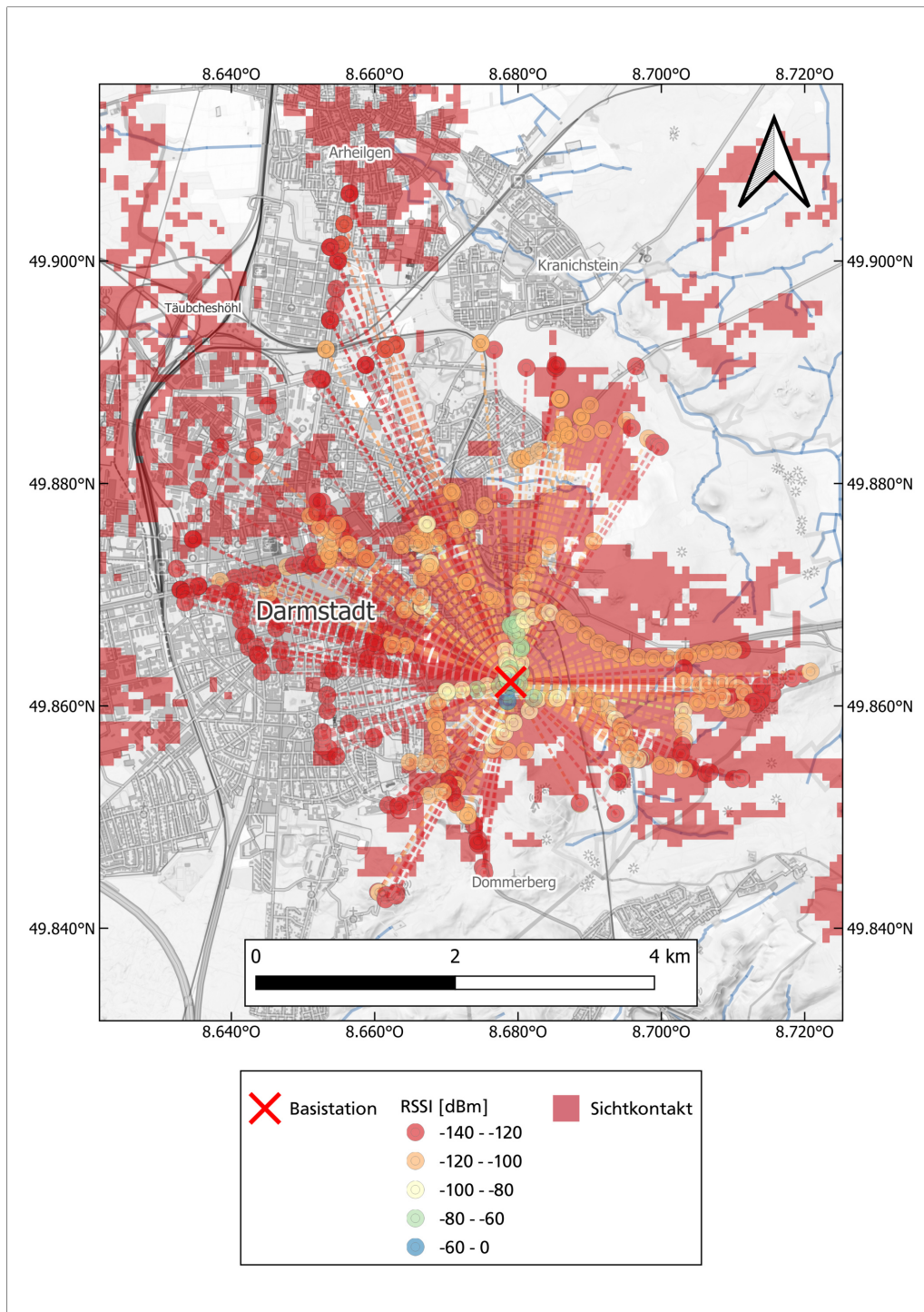


Abbildung A.10: Messpunkte während des Versuchs im städtischen Umfeld. (Eigene Darstellung)

Ländliches Umfeld - Fischbachtal

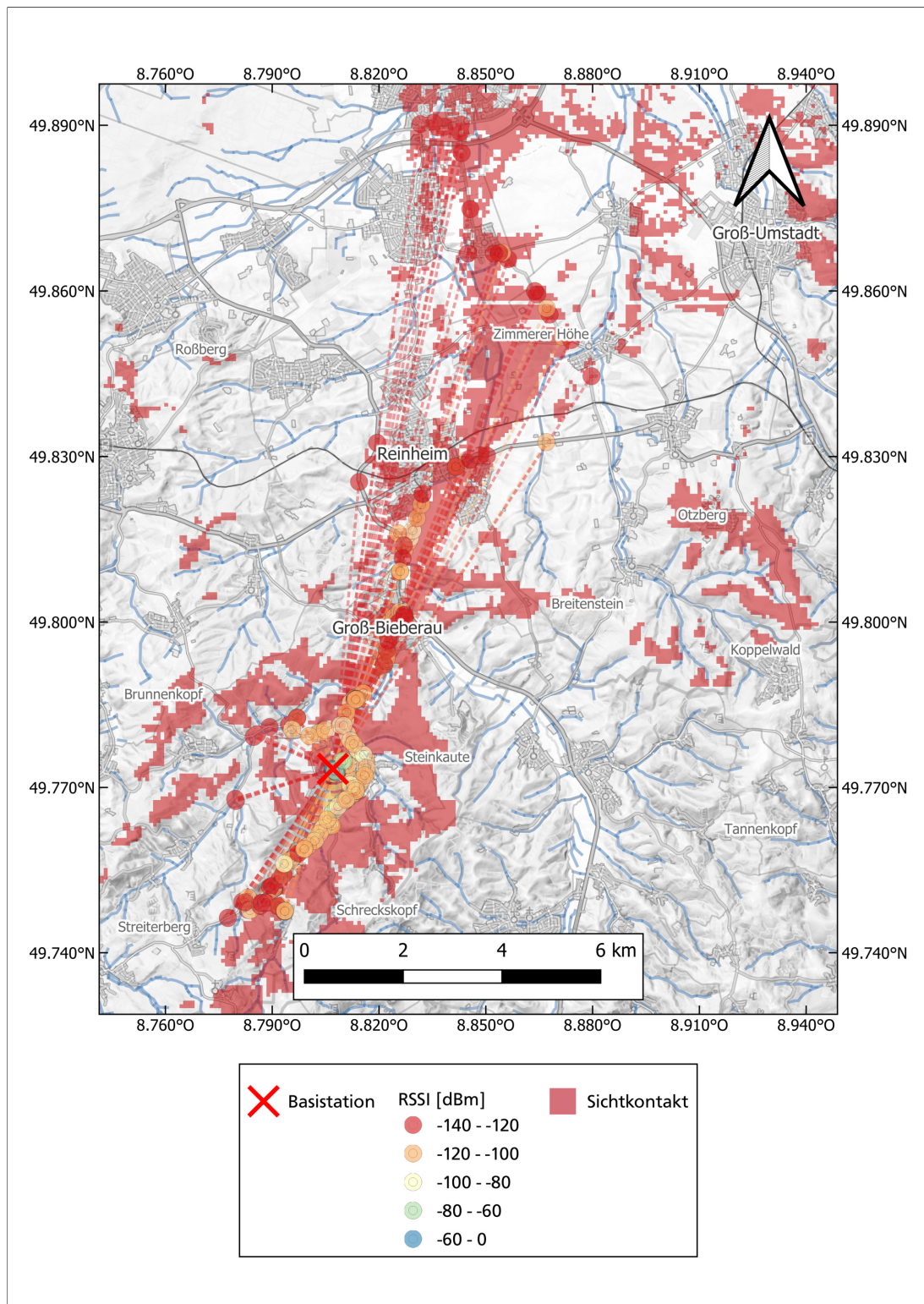


Abbildung A.11: Messpunkte während des Versuchs im ländlichen Umfeld. (Eigene Darstellung)

Anwendungsbeispiel - Ahrweiler

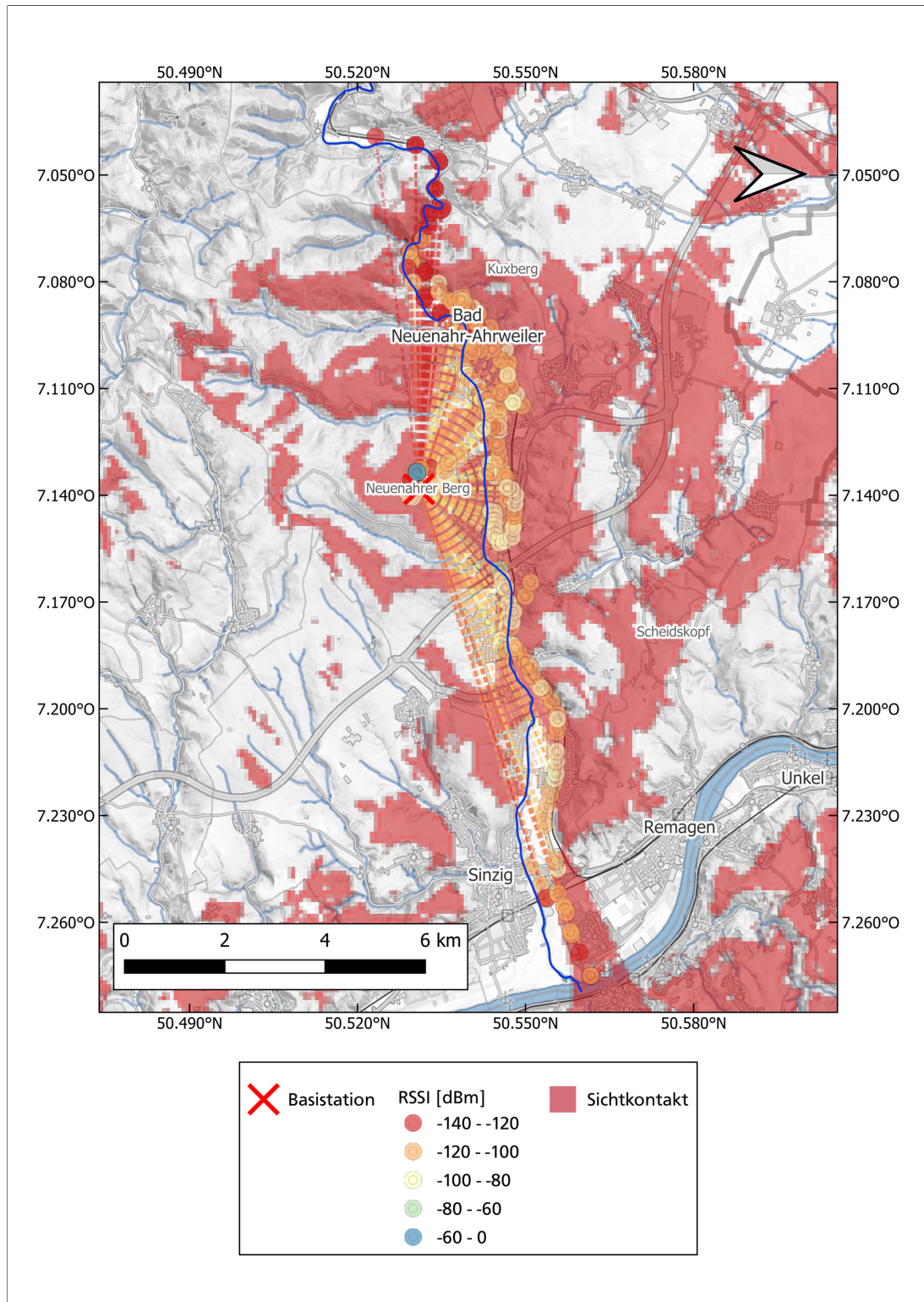


Abbildung A.12: Abdeckung der Ahr mit den eingesetzten Sensorkits. (Eigene Darstellung)