

BIGS STUDIE

Brandenburgisches Institut für **Gesellschaft** und **Sicherheit**

AIRCIS – Artificial Intelligence in Rescue Chains

**Stärkung der Rettungskette unter
Extremwettereinflüssen durch den Einsatz von
Künstlicher Intelligenz am Beispiel Lausitz**

Projektergebnisse und -erkenntnisse
sowie Betrachtung von Einsatzpotentialen



Nr. 12 . Februar 2026

IMPRESSUM

Das Brandenburgische Institut für Gesellschaft und Sicherheit (BIGS) gGmbH ist ein unabhängiges, überparteiliches und nicht-gewinnorientiertes wissenschaftliches Institut, das zu gesellschaftswissenschaftlichen Fragen ziviler Sicherheit forscht. Das Institut publiziert seine Forschungsergebnisse und vermittelt diese in Veranstaltungen an eine interessierte Öffentlichkeit.

Das mFund-Projekt AIRCIS zielte darauf ab, die Resilienz der Daseinsvorsorge im Bereich Gesundheit und Mobilität in der Lausitz zu erhöhen. Dazu wurde das Einsatzaufkommen auf Basis der Realdaten einer Leitstelle mittels künstlicher Intelligenz prognostiziert und eine Simulation zur Abbildung der gesamten Rettungskette entwickelt werden. Durch die Integration weiterer Daten, wie z.B. Wetterwarnungen, können Leitstellen bei der gezielten Planung ihrer Ressourcen unterstützt werden. Das Vorhaben wurde geleitet durch die Björn Steiger Stiftung (BSS), die Projektpartner setzten sich aus dem Brandenburgischen Institut für Gesellschaft und Sicherheit (BIGS), der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), der Brandenburgischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU), dem Start-up MOXI und der Integrierten Regionalleitstelle (IRLS) Cottbus zusammen. Im Rahmen des mFund wurde das Projekt von Januar 2023 bis März 2026 vom BMW gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



BIGS

BRANDENBURGISCHES INSTITUT
für GESELLSCHAFT und SICHERHEIT

**Brandenburgisches Institut für
Gesellschaft und Sicherheit gGmbH**

Geschäftsführender Direktor:
Prof. Dr. Tim H. Stuchtey

Dianastraße 46
14482 Potsdam

Telefon: +49-331-704406-0

E-Mail: info@bigs-potsdam.org
www.bigs-potsdam.org

Autoren der Studie

Joachim von Beesten, Dr. Nahid Akhtar,
Dr. Jesse Beisegel, Hanna Denecke, Felix Dohmeier,
Prof. Dr. Armin Fügenschuh, Sai Jithendra Gangireddy,
Thorsten Hansler, Franz Kroll, Mario Müller,
Prof. Dr. Tim Stuchtey, Sascha Zell, Ingolf Zellmann

Titel der Studie:

AIRCIS - Artificial Intelligence in Rescue Chains
Stärkung der Rettungskette unter Extremwetter-
einflüssen durch den Einsatz von Künstlicher
Intelligenz am Beispiel Lausitz

Herausgeber:

Brandenburgisches Institut für Gesellschaft
und Sicherheit gGmbH

Prof. Dr. Tim H. Stuchtey (V.i.S.d.P.)

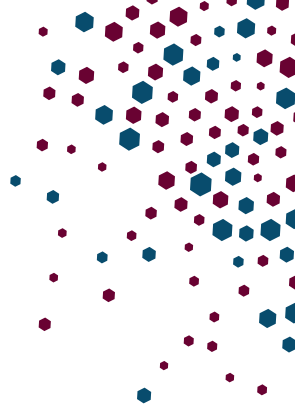
ISSN: 2191-6756

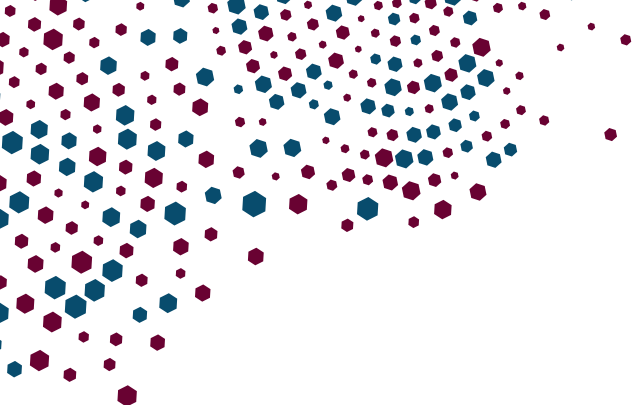
BIGS Studie Nr. 12, Februar 2026

Titelbild: Camilo Jimenez / Unsplash

Copyright 2026 © Brandenburgisches Institut für Gesellschaft und Sicherheit gGmbH. Alle Rechte vorbehalten. Die Reproduktion, Speicherung oder Übertragung (online oder offline) des Inhalts der vorliegenden Publikation ist nur im Rahmen des privaten Gebrauchs gestattet. Kontaktieren Sie uns bitte, bevor Sie die Inhalte darüber hinaus verwenden.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie die Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Brandenburgischen Instituts für Gesellschaft und Sicherheit reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.





AIRCIS - Artificial Intelligence in Rescue Chains

Stärkung der Rettungskette unter
Extremwettereinflüssen durch den Einsatz von
Künstlicher Intelligenz am Beispiel Lausitz

Projektergebnisse und -erkenntnisse
sowie Betrachtung von Einsatzpotentialen



INHALTSVERZEICHNIS

EXECUTIVE SUMMARY	7
1 EINLEITUNG	8
2 BESCHREIBUNG DER ANWENDUNGSFÄLLE	9
2.1 Exemplarisches Vorgehen	9
2.2 Planungs- und Trainingstool	10
2.2.1 Zielsetzung und Nutzen	10
2.2.2 Funktionsumfang und Module	11
2.2.3 Vorteile für die Praxis	11
2.3 Extremwetter	11
2.3.1 Hintergrund und Relevanz	12
2.3.2 Bedarfe bei Extremwetterlagen	13
2.3.3 Mehrwert für Einsatzorganisationen und Bevölkerung	13
2.4 Konzeptmodell für die Daseinsgrundversorgung	14
2.4.1 Hintergrund und Zielsetzung	14
2.4.2 Chancen in der Lausitz	14
2.4.3 Gesundheit & Notfallhilfe	15
2.4.4 Mobilität in der Lausitz	16
2.4.5 Konzeptmodell AIRCIS	16
2.4.6 Fazit	16
2.5 AIRCIS Lastenheft	16
3 TECHNISCHE UND OPERATIONALE UMSETZUNG	17
3.1 Systemarchitektur und IABG-Entwicklerdashboard	17
3.2 Datenaufbereitung	18
3.3 Datenanalyse	19
3.3.1 Zeitliche Faktoren	19
3.3.2 Radarbasierte Niederschlagsmengen	20
3.3.3 Hitzeindikatoren, Hitzewellen und Hitzewarnungen	20
3.3.4 Amtlichen Wetterwarnungen des DWDs	21
3.3.5 Wetterparameter	22
3.4 Überblick der Anwendungsfälle der Prognosemodelle	23
3.5 Regressionsmodelle zur Prognose des Anruf- und Einsatzvolumens	23
3.5.1 Visuelle Analyse historischer Notruf- und Einsatzprognosen für die Lausitz bei aktiven Wetterwarnungen	23

3.5.2	Evaluation und Erklärbarkeit	25
3.5.3	Ausblick zur Verbesserung der Prognosegenauigkeit	25
3.6	Test zur Prognose von Ausreißern für die Notrufe	26
3.7	Verteilungsmodell	26
3.8	Simulationsmodell	26
3.8.1	Methoden	26
3.8.2	Software	27
3.8.3	Modell (Prozesse, Agenten, Ereignisse, Eingabe- und Ausgabedaten, Validierung und Verifikation)	28
3.8.4	Extremwetterereignisse	33
3.8.5	Einordnung und Nutzung der Simulationsergebnisse	34
3.8.6	Ausblick und Weiterentwicklungsmöglichkeiten	34
3.9	Dashboard für die praktische Nutzung	35
3.9.1	Methodik / Workshopergebnisse	35
3.9.2	Funktionsweise und GUI	36
3.9.3	Berücksichtigung weiterer Extrem(wetter)lagen	38
4	AUSBLICK	39
5	WIRTSCHAFTLICHE MACHBARKEIT	40
5.1	Kostenbetrachtung	40
5.2	Nutzenbetrachtung	41
5.3	Finanzierungsmöglichkeiten	41
6	HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	42
6.1	Empfehlungen an die Träger der Leitstellen	42
6.2	Empfehlungen an die Politik / Regulierer	42
7	LITERATURVERZEICHNIS	44
8	AUTORENVERZEICHNIS	45
9	ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS	45
10	VERBUNDPARTNER DES AIRCIS PROJEKTES	46
10.1	Björn Steiger Stiftung	46
10.2	BIGS	46
10.3	BTU Cottbus-Senftenberg	46
10.4	IABG	47
10.5	MOXI	47
10.6	IRLS Lausitz	47

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AAO	Alarm- und Ausrückeordnung
ABM	Agentenbasierte Modellierung
AFO	Allgemeine Führungsorganisation
AIRCIS	Artificial Intelligence in Rescue Chains
API	Application Programming Interface
BFO	Besondere Führungsorganisation
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMV	Bundesministerium für Verkehr
DES	Discrete-Event Simulation
DWD	Deutscher Wetterdienst
ELS	Einsatzleitsystem
EMS	Emergency Medical Services
FKZ	Förderkennzeichen
GIS	Geoinformationssystem
GUI	Graphical User Interface
HAP	Hitzeaktionsplan
IRLS	Integrierte Regionalleitstelle
IRR	Inzidenzratenverhältnis
LightGBM	Light Gradient Boosting Machine
MCS	Monte Carlo Simulation
ML	Maschinelles Lernen
MOSMIX	Model Output Statistics-MIX
NEF	Notarzteinsatzfahrzeug
R^2	Bestimmtheitsgrad
RADOLAN	Radar-Online-Aneichung
RTW	Rettungswagen
SHAP	SHapley Additive exPlanations
SoSi	Sondersignal
STKDE	Spatio-Temporal Kernel Density Estimation
XGBoost	eXtreme Gradient Boosting



EXECUTIVE SUMMARY

Im Projekt AIRCIS – Artificial Intelligence in Rescue Chains wurde untersucht, wie daten- und KI-gestützte Methoden zur Stärkung der Leistungsfähigkeit und insbesondere der Resilienz des Rettungswesens eingesetzt werden können. Ausgangspunkt waren die zunehmenden Herausforderungen durch den demografischen Wandel, den Fachkräftemangel, die steigende Komplexität von Einsätzen sowie die wachsende Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen. Leitstellen nehmen dabei als zentrale Steuerungsinstanzen der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr eine Schlüsselrolle ein.

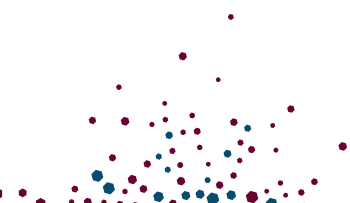
Ziel des Projektes war es, praxisnahe, wissenschaftlich fundierte Ansätze zu entwickeln, mit denen Leitstellen Entscheidungen vorausschauender, transparenter und robuster treffen können. Im Fokus standen dabei zwei Anwendungsfelder: ein KI-gestütztes Planungs- und Trainingstool zur simulationsbasierten Entscheidungsunterstützung und die systematische Integration von Extremwetterereignissen in die Leitstellenarbeit.

Methodisch verfolgte AIRCIS einen interdisziplinären Ansatz, der reale Leitstellendaten, agentenbasierte Modellierung, statistische und KI-gestützte Prognoseverfahren sowie simulationsbasierte Analysen kombiniert. Die Anforderungen der Praxis wurden in enger Zusammenarbeit mit beteiligten Leitstellen erhoben und in strukturierte Anwendungsfälle und User Stories überführt. Dadurch konnte eine hohe Praxisnähe und Akzeptanz der entwickelten Konzepte sichergestellt werden.

Die Projektergebnisse zeigen, dass simulations- und prognosegestützte Werkzeuge einen signifikanten Mehrwert für Leitstellen bieten. Das Planungs- und Trainingstool ermöglicht es, komplexe Einsatzlagen virtuell abzubilden, Engpässe frühzeitig zu identifizieren und Entscheidungsoptionen systematisch zu bewerten. Damit leistet AIRCIS einen konkreten Beitrag zur operationellen Resilienz. Diese wird als die Fähigkeit des Rettungssystems definiert, Störungen frühzeitig zu antizipieren, ihre Auswirkungen zu absorbieren, sich adaptiv anzupassen und die Versorgung auch unter veränderten oder verschlechterten Rahmenbedingungen aufrechtzuerhalten.

Im Anwendungsfeld Extremwetter konnte gezeigt werden, dass die Verknüpfung von meteorologischen Daten mit Leitstellendaten eine belastbare Grundlage für Frühwarnung, Ressourcenplanung und taktische Entscheidungen schafft. Durch die simulationsgestützte Betrachtung von Erreichbarkeiten, Einsatzzeiten und Ressourcenauslastungen werden Verwundbarkeiten der Rettungskette sichtbar und können gezielt adressiert werden, wodurch die Resilienz der Daseinsvorsorge insgesamt gestärkt wird.

AIRCIS verdeutlicht, dass KI-gestützte Entscheidungsunterstützung im Rettungswesen technisch machbar, organisatorisch integrierbar und fachlich sinnvoll ist. Für eine nachhaltige Wirkung sind jedoch einheitliche Datenstandards, skalierbare IT-Architekturen sowie geeignete politische und regulatorische Rahmenbedingungen erforderlich. Zukünftiger Forschungsbedarf besteht insbesondere in der systematischen Erfassung und Auswertung seltener Extremereignisse, der Weiterentwicklung erklärbarer KI-Modelle sowie der Integration langfristiger Klimaszenarien in die strategische Resilienz- und Vorhalteplanung. Das Projekt liefert hierfür eine belastbare wissenschaftliche und praktische Grundlage und leistet einen wichtigen Beitrag zur strategischen Weiterentwicklung des Rettungswesens im Kontext der Digitalisierung, Klimaanpassung und Resilienz der Daseinsvorsorge.





1. EINLEITUNG

Deutschland steht im Rettungswesen vor einem tiefgreifenden Transformationsprozess. Zwar wurde in den vergangenen Jahrzehnten ein leistungsfähiges, flächen-deckendes System aufgebaut, doch zeigen sich heute zunehmend strukturelle Defizite in Bezug auf Digitalisierung, Skalierbarkeit und Resilienz. Besonders in strukturschwachen Regionen, die von demografischem Wandel, Fachkräftemangel und großen Flächen geprägt sind – wie die Lausitz –, geraten bestehende Versorgungsmodelle unter Druck. Gleichzeitig nehmen die Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen wie Starkregen, Hochwasser, Hitzeperioden und Waldbränden deutlich zu. Diese Entwicklungen erhöhen nicht nur das Einsatzaufkommen, sondern führen auch zu komplexen Störungen der Infrastruktur und der etablierten Rettungsketten.

Vor diesem Hintergrund adressierte das vom Bundesministerium für Verkehr (BMV) geförderte mFund-Projekt AIRCIS (Artificial Intelligence in Rescue Chains) die Fragestellung, wie Leitstellen und Einsatzorganisationen

durch daten- und KI-gestützte Methoden in die Lage versetzt werden können, ihre Ressourcen vorausschauend, adaptiv und resilient zu planen und einzusetzen. Das Vorhaben wurde durch die Björn Steiger Stiftung (BSS) geleitet, die Projektpartner waren das Brandenburgische Institut für Gesellschaft und Sicherheit (BIGS), die Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), die Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU), das Start-up MOXI und die Integrierte Regionalleitstelle (IRLS) Cottbus. Der regionale Fokus des Projekts lag auf der Lausitz, primär auf der kreisfreien Stadt Cottbus und den Landkreisen Spree-Neiße, Oberspreewald-Lausitz, Dahme-Spreewald und Elbe-Elster, die das Einsatzgebiet der IRLS Lausitz ausmachen. Sekundär wurden auch die Landkreise Görlitz und Bautzen betrachtet, die zum Einsatzgebiet der IRLS Ost-sachsen gehören.

Aufbauend auf einer vorangegangenen, vom BMDV geförderten Machbarkeitsanalyse zur „KI-gestützten Datenanalyse und Simulation des Rettungswesens“ (För-



derkennzeichen (FKZ): 45KI09A011) wurden im Projekt zwei zentrale Anwendungsfelder identifiziert und weiterentwickelt:

1. ein KI-basiertes Planungs- und Trainingstool für den Regelbetrieb sowie
2. die Abbildung und Analyse des Einflusses von Extremwetterereignissen auf Rettungsdienst und Katastrophenschutz.

Die Bedarfsanalyse im Projekt AIRCIS basiert auf der zentralen Erkenntnis, dass Leitstellen bereits große Mengen an Daten entlang der gesamten Rettungskette erfassen, diese jedoch überwiegend operativ genutzt und kaum systematisch ausgewertet werden. Insbesondere fehlen Instrumente, um komplexe Einsatzlagen – etwa unter Extremwettereinflüssen – vorab zu simulieren, Wechselwirkungen sichtbar zu machen und belastbare Prognosen für Einsatzaufkommen, Ressourcenauslastung und Versorgungsqualität zu erstellen.

Gleichzeitig zeigen aktuelle politische und fachliche Diskussionen in der Bundesrepublik Deutschland, dass Resilienz der Daseinsvorsorge zunehmend als Querschnittsaufgabe verstanden wird. Leitstellen nehmen dabei eine Schlüsselrolle ein, da sie als zentrale Steuerungsinstanzen sowohl im Regelbetrieb als auch in Krisenlagen fungieren. Die Bedarfsanalyse verdeutlichte, dass insbesondere folgende Aspekte bislang unzureichend adressiert sind: die Berücksichtigung von Extremwetterdaten in der Einsatzplanung, die systematische Nutzung historischer Leitstellendaten für Prognosen sowie die fehlende Möglichkeit, Maßnahmen vorab virtuell zu erproben.

Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt AIRCIS das Ziel verfolgt, KI-basierte Prognosemodelle und eine agentenbasierte Simulationsumgebung zu konzipieren, die reale Leitstellendaten mit externen Einflussfaktoren – insbesondere Wetter- und Infrastrukturdaten – verknüpfen und so eine evidenzbasierte Entscheidungsunterstützung ermöglichen.

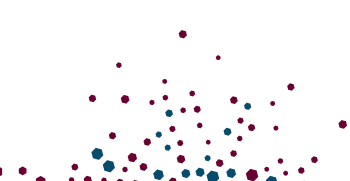
2. BESCHREIBUNG DER ANWENDUNGSFÄLLE

2.1 Exemplarisches Vorgehen

Die Entwicklung der Anwendungsfälle folgte einem mehrstufigen, iterativen und wissenschaftlich fundierten Prozess. Ausgangspunkt bildeten die Ergebnisse der vorangegangenen Machbarkeitsanalyse sowie strukturierte Workshops mit den beteiligten Leitstellen (u. a. IRLS Lausitz und IRLS Ostsachsen). Das Ziel bestand darin, reale Bedarfe aus der operativen Praxis systematisch zu erfassen und in übertragbare, modellierbare Anwendungsfälle zu überführen. In einem ersten Schritt wurden die identifizierten Anwendungsfelder „Planungs- und Trainingstool“ und „Extremwettereinfluss“ inhaltlich spezifiziert und abgegrenzt. Darauf aufbauend erfolgte die Übersetzung der Anwendungsfälle in sogenannte User Stories, die als zentrales Bindeglied zwischen fachlicher Anforderung, wissenschaftlicher Modellierung und technischer Umsetzung dienen. Dieses Vorgehen ermöglicht es, komplexe Anforderungen aus Sicht der späteren Nutzerrollen – etwa Disponent, Lagedienstführer, Leitstellenleitung oder Wissenschaft – präzise zu beschreiben und gleichzeitig Akzeptanz- und Qualitätskriterien zu definieren. Die User Stories wurden in mehreren Iterationsschleifen gemeinsam mit allen Konsortialpartnern weiterentwickelt, priorisiert und verfeinert. Dadurch konnte sichergestellt werden,

dass sowohl operative Anforderungen (z. B. Alarm- und Ausrückeordnung (AAO), Rettungsfristen) als auch wissenschaftliche Aspekte (z. B. Prognosemodelle, Unsicherheiten, ethische Rahmenbedingungen) konsistent berücksichtigt werden.

Die Bedarfsanalyse im Projekt AIRCIS ist eng mit der Entwicklung der Anwendungsfälle verknüpft. Sie basiert nicht nur auf theoretischen Annahmen, sondern auch auf der systematischen Auswertung realer Prozesse, Datenflüsse und Entscheidungslogiken in Leitstellen. Dabei wurden sowohl der Regelbetrieb als auch Stör- und Krisenszenarien untersucht. Ein zentrales methodisches Element ist die Nutzung agentenbasierter Modellierung. Mithilfe der formalen Beschreibung von Akteuren, Ressourcen, Entscheidungsregeln und Umweltparametern lassen sich die komplexen Wechselwirkungen innerhalb der Rettungskette abbilden und simulieren. Ergänzt wird dieser Ansatz durch statistische Analysen historischer Leitstellendaten sowie durch Prognosemodelle für kurz- und mittelfristige Entwicklungen – etwa im Hinblick auf das Einsatzaufkommen oder das Notrufvolumen. Hierbei wurde neben der zeitlichen Entwicklung auch die geografische Verteilung berücksichtigt. Ein besonde-



res Augenmerk wurde auf die Integration von Extremwetterdaten gelegt. Aufbauend auf den Definitionen und Rohdaten des Deutschen Wetterdienstes wurden Mechanismen entwickelt, um Wetterinformationen in konkrete Einsatzszenarien zu übersetzen. Damit wurde erstmals eine Brücke zwischen meteorologischen Prognosen und operativ relevanten Auswirkungen auf Rettungsdienst und Katastrophenschutz geschlagen.

Das im Projekt AIRCIS gewählte Vorgehen verbindet praxisnahe Anwendungsfallentwicklung mit wissenschaftlicher Modellierung und trägt damit wesentlich zur Weiterentwicklung datenbasierter Entscheidungs-

unterstützung im Rettungswesen, Katastrophenschutz und bei der Feuerwehr bei. Die Kombination aus User-Story-basierter Bedarfsanalyse, agentenbasierter Simulation und KI-gestützter Prognostik ermöglicht es, sowohl kurzfristige operative Entscheidungen als auch langfristige strategische Fragestellungen evidenzbasiert zu adressieren. Vor dem Hintergrund zunehmender Extremwetterereignisse und der aktuellen Debatte um die Resilienz kritischer Infrastrukturen liefert AIRCIS einen methodischen Rahmen, der über das primäre Projektgebiet hinaus übertragbar ist und einen wichtigen Beitrag zur Modernisierung und Zukunftsfähigkeit des deutschen Rettungswesens leistet.

2.2 Planungs- und Trainingstool

Im Rahmen des Projektes AIRCIS wurde das Anwendungsfeld „Planungs- und Trainingstool“ als zentrales Element zur Stärkung der operativen und strategischen Leistungsfähigkeit von Leitstellen identifiziert und ausgearbeitet. Ausgangspunkt war die Erkenntnis, dass bestehende Planungs- und Trainingsansätze im Rettungswesen überwiegend retrospektiv, erfahrungsbasiert und nur begrenzt datengetrieben sind. Insbesondere bei knappen Ressourcen, steigender Einsatzkomplexität und sich verändernden Rahmenbedingungen fehlen bislang Werkzeuge, um Entscheidungen systematisch vorzubereiten, zu bewerten und zu trainieren. Das im Projekt konzipierte Planungs- und Trainingstool adressiert diese Lücke durch die Entwicklung eines KI-gestützten Prognoseverfahren und einer simulationsbasierten Umgebung, die reale Leitstellendaten, operative Regelwerke (z. B. AAO) sowie externe Einflussfaktoren integriert. Ziel ist es, Leitstellen in die Lage zu versetzen, sowohl im Regelbetrieb als auch in besonderen Lagen fundierte, nachvollziehbare und reproduzierbare Entscheidungen zu treffen.

Methodisch basiert das Tool auf der KI-gestützten Vorhersage der stündlichen Anzahl und Verteilung von Anrufen und Rettungsdiensteinsätzen sowie auf der Abbildung zentraler Akteure, Ressourcen und Entscheidungslogiken der Leitstelle in Form agentenbasierter Modelle. Unterschiedliche Nutzerrollen – von Disponenten über Lagedienstführer bis hin zu Leitstellenleitungen und Planern – werden dabei explizit berücksichtigt. Die funktionale Ausgestaltung folgt dem Prinzip der rollenbasierten Nutzung: Während Disponenten bewusst nicht in ihren Arbeitsprozessen beeinflusst werden, erhalten Lagedienstführer und Planer erweiterte Möglichkeiten zur Parametrisierung, Szenarienbildung und Analyse.

Ein wesentlicher Mehrwert des Planungs- und Trainingstools liegt in der Möglichkeit, komplexe Einsatzlagen virtuell zu simulieren. Durch die Variation zentraler Parameter – etwa Ressourcenverfügbarkeit, Einsatzdichte oder organisatorische Vorgaben – können Engpässe identifiziert, Alternativen bewertet und Wirkzusammenhänge transparent gemacht werden. Dies ermöglicht nicht nur eine verbesserte strategische Einsatz- und Ressourcenplanung, sondern schafft zugleich einen realitätsnahen Trainingsraum für Aus- und Weiterbildung. Entscheidungen können dabei nicht nur getroffen, sondern ihre Auswirkungen unmittelbar nachvollzogen werden. Insgesamt leistet das Planungs- und Trainingstool einen zentralen Beitrag zur Erhöhung der Handlungssicherheit, zur Standardisierung von Entscheidungsprozessen und zur nachhaltigen Professionalisierung von Leitstellenbetrieb und -training.

2.2.1 Zielsetzung und Nutzen

Ziel des Planungs- und Trainingstools ist es, Einsatzorganisationen entlang der Rettungskette bei der strategischen und operativen Entscheidungsfindung zu unterstützen. Hierzu zählt insbesondere die mittel- und langfristige Planung von Flotten, Personalressourcen und Einsatzkonzepten für Rettungsdienst, Feuerwehr und Katastrophenschutz. Durch simulationsgestützte Analysen können unterschiedliche Vorhalte- und Einsatzstrategien vergleichend bewertet und an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden.

Darüber hinaus dient das Tool der Aus- und Weiterbildung, indem ein virtueller Übungsraum bereitgestellt wird, in dem Einsatzkräfte, Schichtleiter und Koordinatoren realistische Szenarien durchspielen können. Diese simulationsbasierte Ausbildung ermöglicht es,



auch seltene oder besonders komplexe Lagen systematisch zu trainieren. Ergänzend unterstützt das Tool eine schnellere und fundierte Entscheidungsfindung, indem Schadenslagen simuliert und bestehende Notfall- und Einsatzpläne gezielt überprüft und weiterentwickelt werden können.

2.2.2 Funktionsumfang und Module

Der Funktionsumfang des Planungs- und Trainingstools umfasst mehrere modular aufgebaute Komponenten. Die erste Komponente besteht aus der Prognose der Service-, Notruf- und Einsatzdaten. Die Gespräche und Workshops mit den Leitstellen haben ergeben, dass ein siebentägiger Zeithorizont mit stündlichen Werten zur Planungsverbesserung ausreichend ist. Das Prognosemodell wurde auf Basis der historischen Daten der IRLS Lausitz trainiert und berechnet die erwartete stündliche Anzahl an Serviceanrufen, Notrufen und Rettungsdienstseinsätzen, jeweils für die nächsten sieben Tage. Diese Prognose wird alle 30 Minuten automatisch aktualisiert. Für die Planung der Rettungsdienstseinsätze wird zudem deren erwartete geografische Verteilung visualisiert. In der zweiten Komponente werden die Anruf- und Einsatzzahlen, sowie die Einsatzverteilung in eine agentenbasierte Simulation überführt, welche die Abläufe entlang der Rettungskette abbildet. Dadurch können Einsatzzeiten sowie Personal- und Ressourcenbedarf berechnet werden. Die Ergebnisse der Prognosen und Simulationen werden in einer eigens entwickelten, web-basierten Benutzeroberfläche dargestellt, die in enger Rücksprache mit den Leitstellen konzipiert wurde.

Ein zentrales Element des Planungs- und Trainingstools ist die Szenariogenerierung. Dabei können vielfältige

Parameter wie Wetterbedingungen, Verkehrsführung und die Verfügbarkeit von Ressourcen flexibel eingestellt werden. Auf dieser Grundlage lassen sich fiktive, aber realitätsnahe Einsatzsituationen abbilden, die ein breites Übungsspektrum ermöglichen. Ergänzt wird dies durch integrierte Analysewerkzeuge, die in regelmäßigen Abständen eine Beurteilung des Ressourcenbedarfs, der Einsatzzeiten und der Reaktionsketten erlauben. So können Engpässe, etwa durch fehlende Fahrzeuge, personelle Unterdeckungen oder infrastrukturelle Einschränkungen, frühzeitig erkannt und bewertet werden. Die Ergebnisse dieser Analysen bilden eine belastbare Grundlage für strategische Entscheidungen und Anpassungen in der Einsatzplanung.

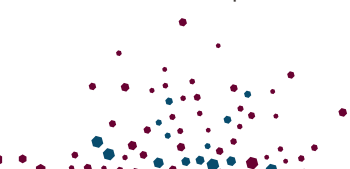
2.2.3 Vorteile für die Praxis

Aus praktischer Sicht trägt das Planungs- und Trainingstool wesentlich zur Risikominimierung bei, da Schwachstellen und Abhängigkeiten durch realitätsnahe Simulationen bereits vor dem Eintritt eines Ereignisses identifiziert werden können. Dies erhöht die Robustheit der Einsatzplanung und reduziert die Wahrscheinlichkeit kritischer Fehlentscheidungen im Ernstfall. Zugleich unterstützt das Tool eine höhere Kosteneffizienz, da konkrete Bedarfsanalysen und strukturierte Trainings langfristig zu einer zielgerichteten Beschaffung und Nutzung von Ressourcen beitragen. Nicht zuletzt fördert das System die Standardisierung von Trainingskonzepten und Planungsansätzen. Einheitliche Werkzeuge und vergleichbare Szenarien schaffen Transparenz und Vergleichbarkeit und erleichtern somit die Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Akteuren und Organisationen im Rettungswesen.

2.3 Extremwetter

Das zweite zentrale Anwendungsfeld im Projekt AIRCIS ist die systematische Analyse und Berücksichtigung von Extremwetterereignissen im Rettungswesen. Die zunehmende Relevanz dieses Themenfeldes ergibt sich aus der Beobachtung, dass Extremwetterlagen nicht mehr als seltene Ausnahmeereignisse zu betrachten sind, sondern zunehmend den Regelbetrieb von Leitstellen, Rettungsdiensten und Katastrophenschutz beeinflussen. Vor diesem Hintergrund zielt AIRCIS darauf ab, Leitstellen durch daten- und KI-gestützte Verfahren in die Lage zu versetzen, Extremwetterereignisse frühzeitig zu erkennen, deren Auswirkungen auf die Rettungskette zu prognostizieren und geeignete Maßnahmen vorausschauend zu planen.

Das Projekt adressiert dabei insbesondere die bislang bestehende Lücke zwischen meteorologischen Warnungen und operativ nutzbaren Entscheidungsgrundlagen für Leitstellen. Während Wetterdaten in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung verfügbar sind, fehlt es bislang an Instrumenten, um diese Informationen systematisch in einsatzrelevante Szenarien, Ressourcenbedarfe und taktische Entscheidungen zu überführen. AIRCIS setzt hier an und integriert Extremwetterdaten als festen Bestandteil einer simulations- und prognosegestützten Entscheidungsunterstützung.



2.3.1 Hintergrund und Relevanz

Die Relevanz des Anwendungsfeldes Extremwetter ergibt sich aus der zunehmenden Häufigkeit und Intensität klimabedingter Wetterereignisse. Starkregen, Hochwasser, Sturmfluten, Hitzeperioden oder Waldbrände treten nicht nur häufiger auf, sondern wirken sich zunehmend gleichzeitig auf mehrere Infrastrukturbereiche aus. Zudem sind vermehrt Regionen betroffen, die bislang kaum oder nur in abgeschwächter Form Erfahrung mit extremen Wetersituationen haben. Für Rettungsdienste, Feuerwehr und Katastrophenschutz entstehen dadurch komplexe Einsatzlagen, die durch eingeschränkte Erreichbarkeiten, beschädigte Infrastruktur und erhöhte Einsatzlast gekennzeichnet sind.

Für Deutschland zeigen aktuelle Auswertungen eine deutliche Häufung von Rekordtemperaturen. Die Jahre 2022, 2023 und 2024 waren die jeweils wärmsten seit Beginn der systematischen Wetteraufzeichnungen.¹ Regional sind diese Entwicklungen unterschiedlich ausgeprägt. In Brandenburg, insbesondere für die Lausitz, ist eine überdurchschnittliche Zunahme von Hitzetagen zu beobachten. In der Stadt Cottbus wurden zwischen 2011 und 2020 im Mittel fast 20 heiße Tage pro Jahr registriert.² Anhaltende Trockenperioden in Kombination mit hohen Temperaturen erhöhen zudem das Risiko von Waldbränden. Brandenburg ist hiervon besonders betroffen, da neben klimatischen Faktoren auch großflächig munitionsbelastete Gebiete existieren, die Löscharbeiten erschweren und die Gefährdung für Einsatzkräfte erhöhen.

Die gesundheitlichen Auswirkungen von Extremwetter, insbesondere von Hitze, sind gut dokumentiert. Die Übersterblichkeit infolge von Hitzewellen lässt sich, je nach methodischem Ansatz und Definition von Hitzewellen, unterschiedlich beziffern.³ Langfristige Analysen kommen zu dem Ergebnis, dass zwischen 2014 und 2023 etwa 48.000 Menschen in Deutschland infolge von Hitzewellen verstorben sind.⁴ Ältere Menschen, Schwangere, Kleinkinder sowie Personen mit Vorerkrankungen, vor allem des Herz-Kreislauf-Systems, sind besonders gefährdet. Zusätzlich können sich hohe Temperaturen negativ auf die Luftqualität auswirken und beispielsweise durch erhöhte Feinstaubbelastungen zu weiteren gesundheitlichen Beschwerden führen. Studien zeigen, dass während Hitzeperioden die Zahl der Einweisungen in Notaufnahmen steigt.⁵ Auch wenn der Zusammenhang zwischen Hitzewellen und der Gesamtzahl von Rettungsdiensteinsätzen in Deutschland noch nicht eindeutig quantifiziert ist, deutet die vorhandene Evidenz auf eine erhöhte

Nachfrage nach Rettungswagen hin.⁶ Somit gewinnen auch präventive Konzepte wie der brandenburgische Hitzeaktionsplan, der unter anderem ein verbessertes Monitoring von Morbidität und Mortalität während Hitzeperioden vorsieht, an Bedeutung.

Auch Starkregenereignisse stellen eine wachsende Herausforderung dar. Zwar ist der eindeutige Zusammenhang zwischen Klimawandel und der Häufigkeit von Starkregenereignissen derzeit noch nicht in allen Aspekten abschließend belegt, doch führen lange Trockenphasen dazu, dass Böden weniger Wasser aufnehmen können.⁷ In der Folge steigt das Risiko von Sturzfluten und Überschwemmungen. Die Dynamik solcher Lagen wird durch die oftmals kurzfristigen und räumlich begrenzten Wetterwarnungen zusätzlich verstärkt. Bei Gewittern und Starkregen kann sich die Situation innerhalb kurzer Zeit ändern, was eine kontinuierliche Neubewertung der Lage und eine flexible Anpassung der Maßnahmen erfordert. Die Flutkatastrophe im Ahrtal im Jahr 2021 hat eindrücklich gezeigt, welche gravierenden Folgen eintreten können, wenn Warnungen nicht rechtzeitig in wirksame Maßnahmen übersetzt werden.

Ein zentrales Problem stellt die Beeinträchtigung der Infrastruktur dar. Überschwemmungen, Sturmereignisse, Schnee oder Glatteis können Verkehrswege unpassierbar machen und einzelne Ortschaften zeitweise von der Außenwelt abschneiden. Auch die Einsatzmittel selbst sind betroffen. Rettungshubschrauber können bei ungünstigen Wetterbedingungen nicht starten, und bodengebundene Fahrzeuge erreichen Einsatzorte nur eingeschränkt oder verzögert. Dadurch verlängern sich Einsatzzeiten und die Belastung des Personals steigt.

Auch das Fehlen belastbarer Erfahrungswerte erschwert die Interpretation von Prognosen und Warnmeldungen. So hält auch der Bericht des Untersuchungsausschusses zur Flutkatastrophe im Ahrtal fest: „Im Laufe des Untersuchungsverfahrens trat ferner zutage, dass aufgrund fehlender Erfahrungswerte im Landkreis Ahrweiler Pegelprognosen vor Ort nicht hinreichend bewertet werden konnten. Bei welchem Pegelstand im jeweiligen Verantwortungsbereich die Ahr über die Ufer tritt (Ausuferung) und ab welchem Pegelstand massive Schäden bzw. lebensbedrohliche Gefährdungslagen drohen, war nicht hinreichend bekannt.“⁸ Daraus ergibt sich ein hoher Bedarf an unterstützenden Systemen, die Entscheidungsprozesse auf Basis von Daten strukturieren und transparent machen. Um den Nutzen dieser Systeme

1 Deutscher Wetterdienst/Extremwetterkongress (2025).

2 Lass et al. (2022).

3 Siehe z.B. an der Heiden et al. (2019); Winklmayr et al. (2022); Wang et al. (2024).

4 Wang et al. (2024).

5 Ghada et al. (2021).

6 Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen (2023).

7 Deutscher Wetterdienst/Extremwetterkongress (2025).

8 Landtag Rheinland-Pfalz (2024), S. 1475, Absatz 5680.



voll ausschöpfen zu können, muss jedoch der Umgang mit diesen und die Eingliederung in bestehende Abläufe geübt werden. Wenn Aus- und Fortbildungsangebote im Bereich des Katastrophenschutzes nicht wahrgenommen werden, wie es seitens der Kreisverwaltung Ahrweiler der Fall war, helfen auch unterstützende Systeme nur bedingt.

Darüber hinaus führen häufiger auftretende Extremwetterlagen zu neuen Anforderungen an Fahrzeugflotten und Logistik. Einsatzfahrzeuge müssen unter Umständen geländegängiger sein, höhere Temperaturen oder Kälte aushalten und auch bei überfluteten oder beschädigten Straßen einsatzfähig bleiben. Gleichzeitig gewinnen alternative Antriebstechnologien an Bedeutung, deren Einsatzfähigkeit unter extremen Wetterbedingungen ebenfalls berücksichtigt werden muss.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass Extremwetter nicht isoliert betrachtet werden können, sondern integraler Bestandteil einer resilienten Einsatz- und Ressourcenplanung sein müssen. AIRCIS greift diese Entwicklung auf und verankert Extremwetter systematisch in der Modellierung und Simulation der Rettungskette.

2.3.2 Bedarfe bei Extremwetterlagen

Im Projekt AIRCIS wurden mehrere Anwendungsbedarfe identifiziert, die den Umgang mit Extremwetterlagen entlang der gesamten Rettungskette abbilden. Ein erster Schwerpunkt liegt auf Unwetterwarnungen und Frühwarnsystemen. Meteorologische Daten werden in das Planungs- und Trainingstool integriert und durch KI-gestützte Verfahren ausgewertet. Auf dieser Grundlage lässt sich abschätzen, wie sich frühere Extremwittersituationen auf das Einsatzaufkommen ausgewirkt haben und welche Entwicklungen bei vergleichbaren Prognosen zu erwarten sind. Überschreiten prognostizierte Parameter definierte Schwellenwerte, können zudem automatisierte Warnmeldungen ausgelöst werden. Ergänzend ist es möglich, kontextspezifische Handlungsempfehlungen zu generieren oder auf geeignete Maßnahmen aus bestehenden Alarm- und Einsatzplänen hinzuweisen. Ein zentraler Faktor im Vorfeld von extremen Wetterereignissen ist die Personalplanung. Simulationen erlauben es, unterschiedliche Szenarien durchzuspielen und abzuschätzen, wie viel Personal zu welchen Zeiten benötigt wird, um ein erhöhtes Einsatzaufkommen bewältigen zu können.

Ein weiterer Anwendungsfall betrifft die angepasste Einsatzlogistik. Auf Basis der Simulation von Starkrege-

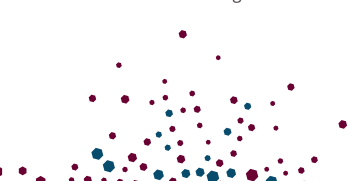
nerereignissen, Überschwemmungen oder Sturmschäden können Ausweichrouten geplant und Einsatzmittel präventiv ausgelagert werden. Durch den agentenbasierten Aufbau der Simulation könnte zukünftig auch die Verfügbarkeit spezieller Einsatzmittel, wie Aggregate, Pumpen oder Hochwasserschutzfahrzeuge, sowie deren logistische Einbindung berücksichtigt werden. Die Einbindung von Rettungshubschraubern in die Simulation ist bereits erfolgt. Grundsätzlich könnten in weiterführenden Projekten auch der Einsatz von Drohnen und unbemannten Luftfahrzeugen zur Lageerkundung in unzugänglichen Regionen simuliert werden.

Die Simulationen können für bestehende Maßnahmen wie den Hitzeaktionsplan (HAP) des Landes Brandenburg zudem wertvollen Input liefern. Dazu ist die Integration weiterer organisatorischer und taktischer Maßnahmen in die Simulation möglich. Hierzu könnten in Zukunft erweiterte Einsatzpläne für Hitze- und Kälteereignisse, etwa durch zusätzliche Versorgungspunkte, Notunterkünfte oder spezielle Schutzausstattung für Einsatzkräfte, zählen. Auch Aspekte der Arbeitssicherheit, wie Wetterschutzkleidung oder Schulungen im Umgang mit neuen Gefahrenlagen, könnten Berücksichtigung finden.

Über die kurzfristige Einsatzunterstützung hinaus ermöglicht das AIRCIS System auch eine langfristige Resilienzplanung. Durch die Anpassung von Parametern in den Modellen können klimatische Trends berücksichtigt und deren Auswirkungen auf Einsatzaufkommen und Infrastruktur simuliert werden. Dies unterstützt Entscheidungen bei der Beschaffung neuer Fahrzeuge, etwa im Hinblick auf Allradantrieb, erhöhte Bodenfreiheit oder den Einsatz emissionsärmerer Antriebstechnologien.

2.3.3 Mehrwert für Einsatzorganisationen und Bevölkerung

Der im Projekt AIRCIS entwickelte Ansatz zum Umgang mit Extremwetterereignissen schafft einen klaren Mehrwert für Einsatzorganisationen und die Bevölkerung. Frühzeitige Warnungen erweitern den Handlungsspielraum der Verantwortlichen vor allem bei der Personalplanung und der geografischen Verteilung von Ressourcen und Einsatzmitteln. Kontinuierliche Aktualisierungen der Simulation mit aktuellen Daten ermöglichen es zudem, Handlungsempfehlungen und darauf basierende Maßnahmen an das Geschehen anzupassen. Gerade in dynamischen Wetterlagen kann so die Einsatzleitung bzw. der Verwaltungsstab in der Reaktionsfähigkeit unterstützt werden.



Durch vorbereitete, datenbasierte Konzepte wird die Handlungssicherheit der Einsatzkräfte deutlich erhöht. Entscheidungen können schneller, präziser und auf einer transparenten Informationsbasis getroffen werden, auch unter hohem Zeitdruck und unsicheren Rahmenbedingungen. Auch in Situationen, in denen nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann, ermöglicht die Simulation eine bessere Einschätzung der Lage. Dabei hilft es besonders, wenn mögliche Extremwetterszenarien bereits trainiert wurden, um Bedarfe, potenzielle Versorgungslücken und notwendige Maßnahmen im Vorfeld zu identifizieren. Eine darauf aufbauende, vorausschauende Planung trägt dazu bei, Risiken zu minimieren und Schäden an Leben, Gesundheit und Sachwerten zu reduzieren.

Gleichzeitig liefert die Prognose und Simulation des Einsatzgeschehens eine belastbare Grundlage für den Informationsaustausch zwischen Behörden und Einsatzorga-

nisationen und kann auch zur präziseren Information der Bevölkerung genutzt werden. Warnungen über die Auswirkungen von extremen Wetterlagen auf das Einsatzgeschehen können mithilfe des Systems erstellt werden. Eine erwartete, besonders hohe Auslastung des Notrufs und der Einsatzkräfte kann der Bevölkerung frühzeitig kommuniziert werden, sodass diese zur besonderen Vorsicht und Rücksichtnahme aufgefordert werden kann.

Nicht zuletzt unterstützt der Ansatz eine zukunftsfähige Ausrichtung der Einsatzmittel, der in einem weiteren mFund-Projekt Power2Rescue¹⁰ untersucht wurde. Die Simulation von Einsätzen unter zukünftigen Klimaszenarien bietet eine Grundlage für die Auswahl und Beschaffung passender Einsatzmittel für die jeweilige Region. Auch die Nutzung alternativer Antriebe kann mithilfe der richtigen Datengrundlage simuliert werden. Damit leistet AIRCIS einen wesentlichen Beitrag zur Stärkung der Resilienz des Rettungswesens im Kontext des Klimawandels.

2.4 Konzeptmodell für die Daseinsgrundversorgung

Im Projekt AIRCIS wurde ein integriertes Konzeptmodell für die Daseinsgrundversorgung entwickelt, das die Bereiche Gesundheit, Notfallhilfe und Mobilität systematisch zusammenführt. Ziel des Modells ist es, die Auswirkungen struktureller Veränderungen und externer Störungen – insbesondere durch Extremwetterereignisse – auf die Versorgungssicherheit der Bevölkerung sichtbar, bewertbar und planbar zu machen. Der Fokus liegt dabei auf der Region Lausitz, die in besonderem Maße von tiefgreifenden Transformationsprozessen betroffen ist.

Das Konzeptmodell versteht Daseinsgrundversorgung nicht als statisches Leistungsversprechen, sondern als dynamisches System, dessen Resilienz maßgeblich von der Wechselwirkung zwischen Infrastruktur, Mobilität, Bevölkerung und institutionellen Steuerungsmechanismen abhängt. AIRCIS leistet hierzu einen methodischen Beitrag, indem simulationsgestützte Analysen genutzt werden, um Versorgungslücken zu identifizieren und Handlungsoptionen evidenzbasiert zu bewerten.

2.4.1 Hintergrund und Zielsetzung

Daseinsgrundversorgung umfasst die staatliche Bereitstellung lebensnotwendiger technischer und sozialer Dienstleistungen, darunter Energie- und Wasserversor-

gung, Mobilität, Bildung, Gesundheit, Rettungswesen und Abfallwirtschaft. In Deutschland ist diese Aufgabe im Rahmen der kommunalen Selbstverwaltung primär den Kommunen übertragen, während auf europäischer Ebene stärker zwischen wirtschaftlichen und nichtwirtschaftlichen Tätigkeiten differenziert wird.

Vor dem Hintergrund des strukturellen Wandels – insbesondere in Regionen wie der Lausitz – und verstärkt durch die zunehmende Häufigkeit von Extremwetterereignissen, verschiebt sich der Fokus der Daseinsvorsorge zunehmend von einem Maximalangebot hin zur Sicherstellung eines verlässlichen Mindeststandards flächendeckender Versorgung. Ziel des im Projekt AIRCIS entwickelten Konzeptmodells ist es, diese Mindeststandards quantifizierbar zu machen und ihre Einhaltung auch unter gestörten Rahmenbedingungen analytisch zu überprüfen. Für das Projekt AIRCIS stehen dabei insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Mobilität und medizinischer Notfallversorgung im Mittelpunkt.

2.4.2 Chancen in der Lausitz

Die Lausitz befindet sich in einer Phase tiefgreifender und zugleich chancenreicher Transformation. Der Ausstieg aus der Braunkohleverstromung geht einher mit umfangreichen Investitionen in Wissenschaft, Infrastruk-

¹⁰ Vgl. <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/power2rescue.html> [10.01.2026]



Quelle: ILRS Lausitz

tur, Industrie und Gesundheitsversorgung. Mit der Gründung der Medizinischen Universität – Carl Thiem entsteht ein neuer wissenschaftlicher und medizinischer ‚Förderturm‘, der nicht nur die klinische Versorgung stärkt, sondern auch Forschung, Lehre und Innovation in der Region verankert.

Ergänzt wird diese Entwicklung durch die Ausrichtung der Lausitz als Modellregion Gesundheit, in der neue Versorgungsformen, digitale Gesundheitsanwendungen und sektorübergreifende Kooperationen erprobt werden. Gleichzeitig tragen industrie- und verkehrsbezogene Großprojekte wie das ICE-Ausbesserungswerk in Cottbus zur wirtschaftlichen Stabilisierung, zur Schaffung qualifizierter Arbeitsplätze und zur Stärkung der regionalen Infrastruktur bei.

Diese Entwicklungen schaffen neue Voraussetzungen für eine leistungsfähige resiliente Daseinsgrundversorgung, die allerdings durch Extremwetterereignisse wie Starkregen, Hitzeperioden oder Sturmlagen zukünftig geprüft werden wird. Vor diesem Hintergrund erfordert die Wei-

terentwicklung der Versorgungsstrukturen in der Lausitz einen besonderen Fokus auf Resilienz, Anpassungsfähigkeit und datenbasierte Planung. Das AIRCIS-Konzeptmodell trägt dieser Ausgangslage Rechnung, indem es die Grundlage bildet, regionale Besonderheiten systematisch zu berücksichtigen und unterschiedliche Entwicklungspfade datenbasiert zu analysieren und zu begleiten.

2.4.3 Gesundheit & Notfallhilfe

Eine leistungsfähige Gesundheits- und Rettungsinfrastruktur ist ein zentraler Bestandteil der Daseinsgrundversorgung. Ihre Funktionsfähigkeit lässt sich anhand mehrerer Kernindikatoren beschreiben, darunter gesunde Lebensjahre, Einwohner pro Hausarzt, die Erreichbarkeit durch den Rettungsdienst innerhalb definierter Hilfsfristen, Pflegequoten, Bettenkapazitäten sowie umweltbezogene Einflussfaktoren wie Luftschadstoffemissionen.

Im Projekt AIRCIS liegt der Schwerpunkt auf der Simulation der Rettungskette im Normalzustand sowie unter

Störungen durch Extremwetterereignisse. Ziel ist es, die Robustheit der medizinischen Notfallversorgung zu bewerten und aufzuzeigen, unter welchen Bedingungen Versorgungsziele – insbesondere die Einhaltung der Hilfsfristen – gefährdet sind. Dabei werden demografische Faktoren ebenso berücksichtigt wie strukturelle Veränderungen, etwa durch die Konzentration von Krankenhausstandorten oder den Rückgang hausärztlicher Versorgung. Das Konzeptmodell ermöglicht es, diese Einflussfaktoren gemeinsam zu betrachten und ihre Auswirkungen auf die Erreichbarkeit und Leistungsfähigkeit der Notfallhilfe transparent darzustellen.

2.4.4 Mobilität in der Lausitz

Mobilität ist in der ländlich geprägten Lausitz eine zentrale Voraussetzung für gesellschaftliche Teilhabe und die Erreichbarkeit von Einrichtungen der Daseinsgrundversorgung. Dies gilt in besonderem Maße für medizinische Notfälle und qualifizierte Krankentransporte. Große Entfernungen, begrenzte Alternativen zum motorisierten Individualverkehr und eine teils heterogene Infrastruktur stellen hohe Anforderungen an die Einsatzlogistik.

Im Projekt AIRCIS liegt der Fokus daher auf der Abbildung von Rettungseinsätzen unter erschwerten Bedingungen, insbesondere bei Extremwetterereignissen. Das Konzeptmodell berücksichtigt dabei Fahrzeiten, Infrastrukturzustand und Standortverteilungen medizinischer Einrichtungen. Ziel ist es, aufzuzeigen, wie sich Veränderungen in der Mobilitätsinfrastruktur oder externe Störungen auf die Erreichbarkeit medizinischer Versorgung auswirken.

2.5 AIRCIS Lastenheft

Das entwickelte Lastenheft konkretisiert die Anforderungen und Bedarfe der Leitstellen und überführt diese in umsetzbare Spezifikationen. Dieser Input basiert auf den im Konsortium erhobenen Nutzerbedarfen, den Ergebnissen der durchgeführten Workshops sowie den bereits durch MOXI etablierten Denkmodellen zu Rollen, Prozessen und Datenflüssen entlang der Rettungskette. Im Lastenheft wurden die Anforderungen insbesondere in Form von Use Cases und User Stories ausformuliert und priorisiert, um eine nachvollziehbare Brücke zwischen operativer Praxis, wissenschaftlicher Modellierung und technischer Umsetzung zu schaffen.

Inhaltlich umfasst das Lastenheft sowohl funktionale Anforderungen (z. B. Szenarioanlage, Parametrisierung,

2.4.5 Konzeptmodell AIRCIS

Das AIRCIS-Konzeptmodell wurde entwickelt, um durch simulationsgestützte Analysen Optimierungen in der Notfallversorgung zu ermöglichen. Das Modell erlaubt darüber hinaus eine langfristige Planung unter Berücksichtigung von Bevölkerungsentwicklung, Infrastrukturveränderungen und Extremwetterereignissen. Durch die Einstellung der entsprechenden Parameter können zukünftige Szenarien simuliert und notwendige Anpassungen, etwa bei der Standortplanung von Rettungswachen oder der Vorhaltung von Ressourcen, abgeleitet werden. Damit schafft das Konzeptmodell eine analytische Grundlage, um strukturpolitische Entscheidungen im Rahmen des Lausitzer Strukturwandels evidenzbasiert zu begleiten und ihre Auswirkungen auf die Daseinsgrundversorgung frühzeitig zu bewerten.

2.4.6 Fazit

Das im Projekt AIRCIS entwickelte Konzeptmodell stellt ein innovatives Werkzeug zur Bewertung und Optimierung der Daseinsgrundversorgung in Krisen- und Transformationszeiten dar. Durch die integrierte Betrachtung von Gesundheit, Notfallhilfe und Mobilität ermöglicht es eine differenzierte Analyse regionaler Versorgungslagen und ihrer Resilienz gegenüber externen Störungen. Gerade für strukturschwache Regionen wie die Lausitz bietet das Modell einen Mehrwert, indem es Planungsentscheidungen datenbasiert unterstützt und die langfristige Sicherstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse im Kontext des Strukturwandels fördert.

Simulation/Prognose-Outputs, Auswertungen und Visualisierung im Dashboard) als auch nicht-funktionale Anforderungen, die für eine spätere Überführung in den Regelbetrieb entscheidend sind. Dazu zählen u. a. Interoperabilität über standardisierte Schnittstellen (z. B. zu Einsatzleitsystemen und Datenquellen wie Wetter- und Infrastrukturdaten), Anforderungen an Datenqualität und Semantik (einheitliche Ereignis-/Einsatzkategorien, Zeitstempel- und Georeferenz-Logik), Rollen- und Rechtekonzepte (z. B. Disponent vs. Lagedienstführung vs. Leitstellenleitung/Planung), sowie Anforderungen an Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Ergebnisse (z. B. erklärbare Prognosen, dokumentierte Annahmen, Unsicherheiten). Ergänzend wurden betriebliche Rahmenbedingungen adressiert, darunter Skalierbarkeit,



Ausfallsicherheit, Datenschutz/IT-Sicherheit sowie die organisatorische Einbettung in bestehende Leitstellenprozesse. Damit liefert das Lastenheft ein Fundament, das sowohl die prototypische Demonstrator-Entwicklung

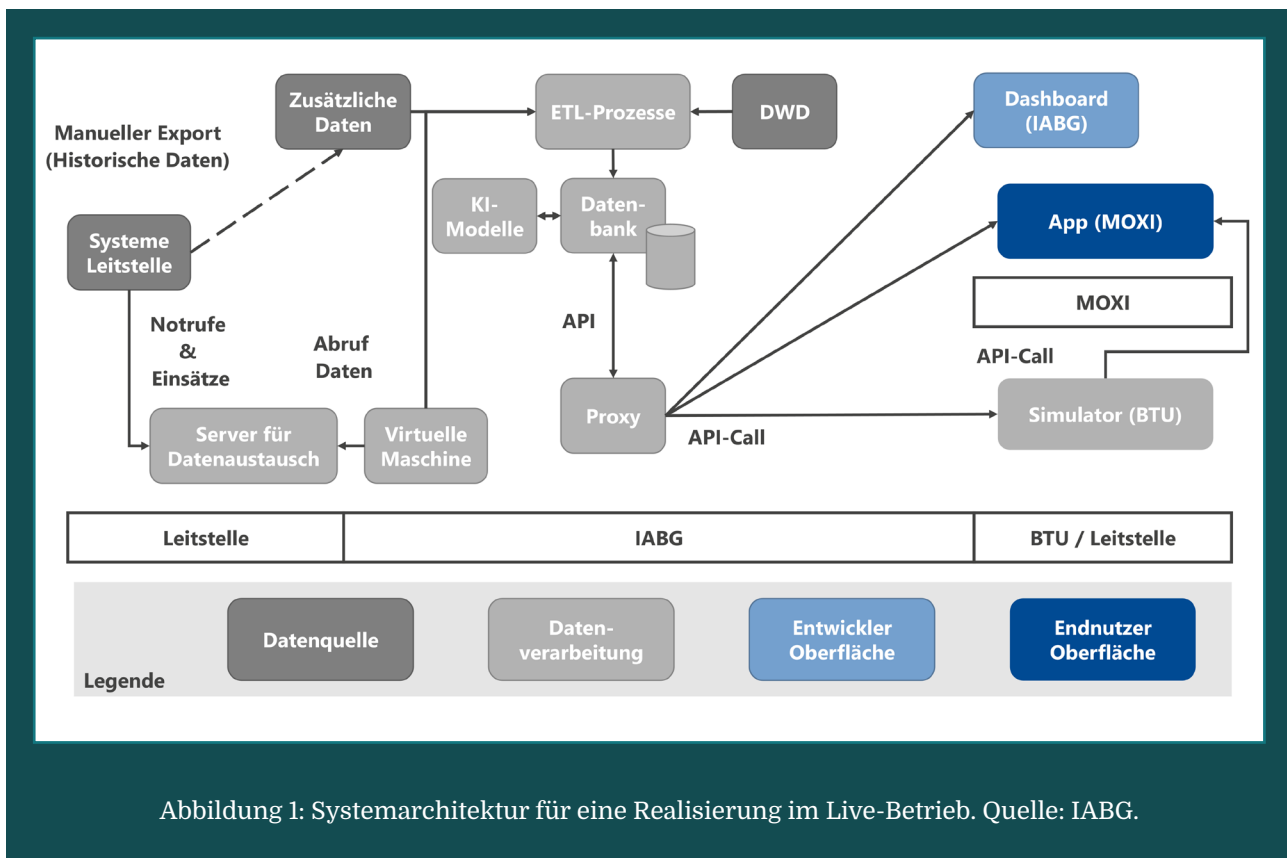
im Projekt als auch mögliche Folgevorhaben in Richtung Produktisierung und Skalierung methodisch und inhaltlich absichert.

3 TECHNISCHE UND OPERATIONALE UMSETZUNG

3.1 Systemarchitektur und IABG-Entwicklerdashboard

Für das Zusammenspiel der Systeme der Projektpartner wurden diverse Systemarchitekturen vorgeschlagen. Abbildung 1 visualisiert die finale Systemarchitektur, die genutzt wurde, um das AIRCIS Projekt in einem Live-Betrieb mit allen Forschungspartnern zu realisieren. Durch die IABG wird ein Application Programming Interface (API) für die Forschungspartner angeboten, welche den Austausch historisch aggregierter sowie prognostizierter Daten ermöglicht. In verschiedenen Endpunkten werden zum einen die historischen und aktuellen Wetterdaten des DWDs, einschließlich Wetterwarnungen, Hitzewarnungen und weiterer Wetterparameter,

in Verbindung mit den jeweiligen historischen und aktuellen Zahlen zu Einsätzen, Notrufen und Serviceanrufen bereitgestellt. Darüber hinaus wird die Prognose der Wetterparameter und Hitzewarnungen des DWDs, die stündlich für die nächsten sieben Tage ausgegeben werden, über die API bereitgestellt. Ergänzend dazu steht eine stündliche Volumenprognose für Einsätze, Notrufe und Serviceanrufe für den gleichen Siebentage Zeitraum zur Verfügung. Die API liefert ebenfalls eine stündliche Vorhersage der Einsatzverteilung nach einzelnen Landkreisen, ebenfalls für die kommenden sieben Tage.



Neben der IABG-API findet sich in der Systemarchitektur auch das IABG-Dashboard (siehe Abbildung 2), welches eine grafische Benutzeroberfläche für die Entwickler der IABG darstellt, um die Ergebnisse der Prognosemodelle zu überprüfen.

Ergänzend zu den modellbasierten Prognosen, werden Wetterwarnungen und die tatsächlich registrierten Einsatzzahlen bzw. Serviceanruf- oder Notrufzahlen im selben Diagramm abgebildet. Als Datenquelle für die Wet-

terinformationen dient die OpenData Datenbank des DWDs.¹¹ Das Dashboard fungiert für die Entwickler der IABG als Kontrollmittel für die Genauigkeit der Modelle und der Interpretation der Modelle von externen Wetterwarnungen im Live-Betrieb, indem prognostizierte und beobachtete Werte miteinander verglichen werden können. Die integrierte Visualisierung der Wetterdaten ermöglichte es im Verlauf des Projekts, einen Fehler in der Vorverarbeitung der Wetterwarnungen zu identifizieren, der anschließend korrigiert werden konnte.

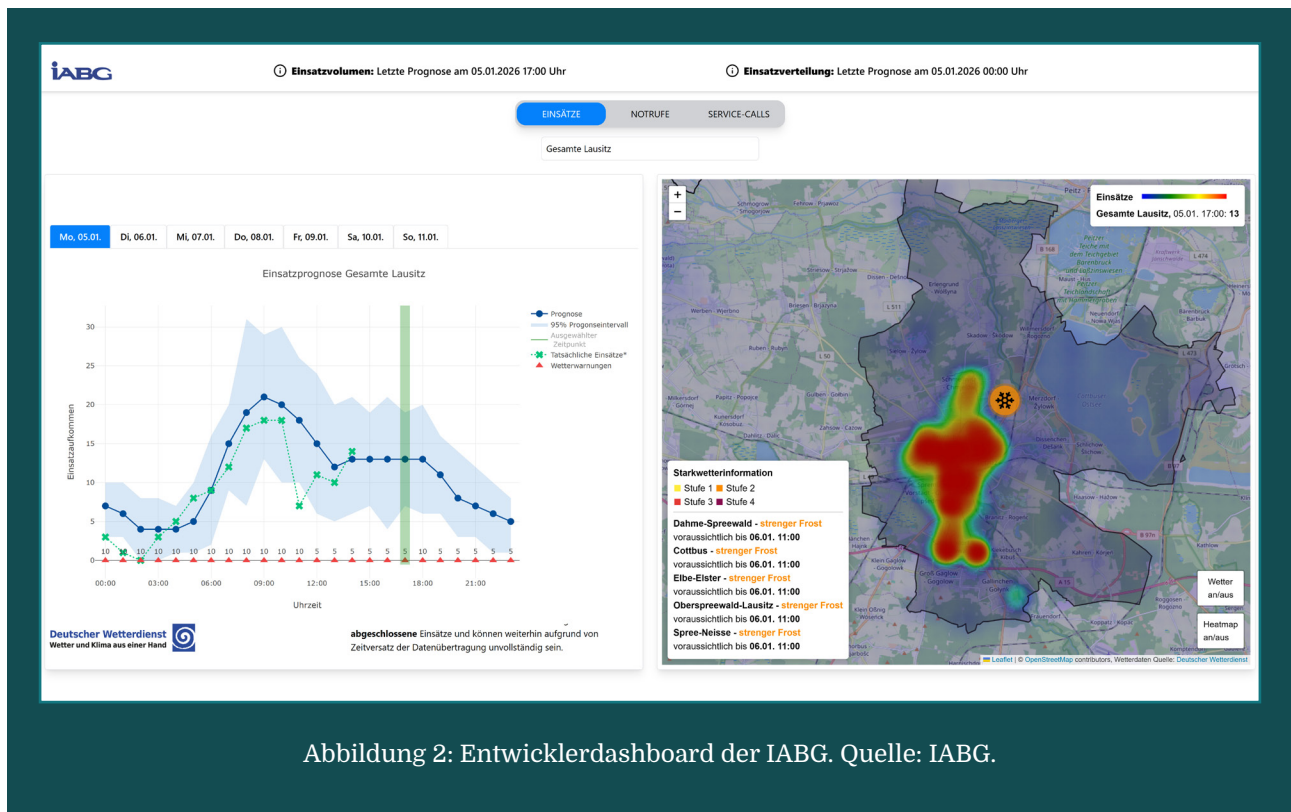


Abbildung 2: Entwicklerdashboard der IABG. Quelle: IABG.

3.2 Datenaufbereitung

Für die Verwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz ist die Akquise und Vorbereitung relevanter Daten notwendig. Für das Projekt AIRCIS wurden Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), sowie Einsatz- und Anrufrdaten von der IRLS Lausitz bezogen. Für die kontinuierliche Beschaffung und Vorbereitung der Daten wurden Skripte entwickelt, welche regelmäßig die Hitzewarnungen, die Wetterparameter und die Wetterwarnungen des DWDs, sowie die Einsatz- und die Anrufrdaten der Leitstelle verarbeiten. Zusätzlich werden anhand des Datums relevante, zeitbezogene Informationen aufbereitet. Die wetterbezogenen Informationen werden des

Weiteren so transformiert, dass die Modelle zu jedem Zeitpunkt aggregierte Wetterinformationen zu vergangenen Stunden, Tagen, und Wochen erhalten, um Verzögerungseffekte abzubilden. Dadurch können die Modelle beispielsweise lernen, wie längere Hitzeperioden sich auf das Einsatz- und Anrufgeschehen auswirken.

Der Datensatz des Einsatzleitsystems (ELS) enthält rund 1,25 Millionen Einsatzfahrten. Für die Vorbereitung der Daten wurde zunächst der Einsatzanfang jeder Fahrt anhand des frühesten Zeitstempels innerhalb der Fahrt definiert. Für die Prognose und die weiteren Analysen

¹¹ Vgl. Deutscher Wetterdienst: <https://opendata.dwd.de/weather/alerts/> [12.01.2026].



wurden alle Krankentransporte ausgenommen. Zusätzlich erfolgte eine stichwortbasierte Filterung der Daten, um Test- und Organisationsfahrten herauszufiltern. Geografisch wurde der Datensatz auf Einsätze innerhalb der Landkreise der Lausitz beschränkt. Abschließend wurden Duplikate eliminiert, wobei pro Einsatznummer nur die Fahrt mit dem frühesten Einsatzanfang erhalten blieb, sodass der Datensatz ausschließlich eindeutige, zeitlich definierte Einsätze aus der Lausitz umfasst. Für das Einsatzvolumenprognosemodell (siehe Kapitel 3.5) wurden die Einsatzdaten geografisch für einzelne Landkreise und das gesamte Untersuchungsgebiet stündlich aggregiert. Dadurch enthält dieser Datensatz die zeitliche und geografische Summe der Einsätze. Diese Anzahl der Einsätze stellt die Zielvariable für das Training des Prognosemodells dar. Für das Modell zur Prognose der Einsatzverteilung (siehe Kapitel 3.7) wurden ausschließlich die Einsatzkoordinaten, der früheste Zeitstempel einer Einsatznummer und der zugehörige Landkreis als Eingabedaten verwendet.

Neben den Einsatzdaten wurden die Daten der Notrufabfrage vorbereitet. Hierfür wurden Anrufrufen in eingehende Serviceanrufe und Notrufe unter Abstimmung mit der Leitstelle separiert. Einträge des internen Digitalfunks wurden explizit exkludiert. Der erste Zeitstempel eines Eintrags stellt den maßgeblichen Zeitstempel für

die weitere Analyse und die Prognosen dar. Nach Entfernen von Duplikaten und von Einträgen ohne zugeordnete Leitung wurden die Anrufe stündlich aggregiert. Fehlende Zeiträume, insbesondere Lücken im ersten Quartal im Jahr 2018 und einzelne Sondertage, wurden identifiziert und mittels kontextbezogener Imputation gefüllt.¹² Hierbei wurde für reguläre Tage der Mittelwert der letzten sechs Monate mit gleichem Wochentag und gleicher Uhrzeit verwendet und für Silvester und Neujahr wurden entsprechende Werte aus bis zu fünf Vorjahren gemittelt.

Nach der Datenaufbereitung der Einsatz- und Anrufrufen stehen für die Modellierung der Einsatzverteilung und die Modellierung der Einsatz- und Anrufvolumina zwei strukturierte und bereinigte Datensätze für das Training und die Optimierung der Modelle bereit. Die Anruf- und Einsatzvolumina wurden geografisch und zeitlich aggregiert, wobei die geografische Aggregation der Anrufe sich lediglich auf das gesamte Untersuchungsgebiet bezieht, da keine konsistenten Standortinformationen zu den Anrufen existieren. Nachfolgend wurden zusätzlich zeitliche Faktoren und externe wetterbezogene Daten analysiert und aufbereitet, um den Trainingsdatensatz der Anruf- und Einsatzvolumina mit relevanten Informationen für das Training der Modelle zu erweitern und relevante Beziehungen mit dem Einsatz- und Anrufaufkommen zu identifizieren.

3.3 Datenanalyse

Zur Identifikation von relevanten externen Daten, die dabei unterstützen können, genaue Einsatz-, Notruf- und Serviceanrufprognosen zu erstellen, werden im Folgenden die Beziehungen bestimmter Faktoren mit den Zielvariablen untersucht. Der Fokus liegt dabei auf zeitlichen Faktoren, Hitze, Niederschlag, amtlichen Wetterwarnungen und ausgewählten Wetterparametern.

3.3.1 Zeitliche Faktoren

Die Tageszeit hat einen großen Einfluss auf das Einsatz- und Anruaufkommen. Vormittags und am späten Nachmittag ist das Volumen deutlich höher, während es in den Nachtstunden stark abnimmt. Die durchschnittliche Anzahl der Einsätze und der Notrufe zwischen 05:00 Uhr und 16:00 Uhr ist an Wochentagen größer als am Wochenende. Im Gegensatz hierzu sind die durchschnittlichen Einsatz- und Notrufzahlen am Wochenende von 21:00 Uhr bis 04:00 Uhr größer als an Wochentagen. Montagmorgen sowie Donnerstagnachmittag verzeichnen die höchsten durchschnittlichen Werte. Servicean-

rufe fallen am Wochenende von 04:00 Uhr bis 20:00 Uhr besonders stark. Saisonale Effekte zeigen sich vor allem bei Notrufen, die im Sommer (insb. Juni) sowie im Frühjahr (insb. Mai) und Herbst (insb. September/Okttober) über dem Jahresdurchschnitt liegen. Bei Einsätzen sind vormittags im Winter (insb. Dezember) und Herbst (insb. November) höhere durchschnittliche Werte zu beobachten, während nachmittags die Sommermonate dominieren. Serviceanrufe zeigen kaum saisonale Unterschiede. Bestimmte Feiertage beeinflussen das Geschehen signifikant. Insbesondere an Neujahr steigt das Volumen aller drei Kategorien zwischen 00:00 und 04:00 Uhr stark an, wobei tagsüber das Serviceanruaufkommen sinkt. An Silvester ist tagsüber das Gesamtvolumen niedriger, doch ab 22:00 Uhr übertrifft das Einsatzvolumen, das Volumen eines regulären Tages. An Christi Himmelfahrt erhöhen sich abends und nachts die Anzahl der Notrufe und der Einsätze. Eine Frequenzanalyse bestätigt einen klaren 24 Stunden Tagesrhythmus für alle Zielgrößen, ergänzt durch weitere Spitzen bei 12 und 8 Stunden, die vermutlich Schichtwechsel oder Stoßzeiten widerspie-

¹² Die Imputation stellt ein Verfahren zur Vervollständigung eines Datensatzes dar, welcher fehlende Werte durch Schätzungen oder plausible Annahmen ergänzt.



geln. Zusätzlich zeigen Notrufe halbjährliche und jährliche Zyklen, während Serviceanrufe einen ausgeprägten Wochenrhythmus und weitere periodische Komponenten (21, 28, 84 Stunden) aufweisen. Diese Ergebnisse implizieren, dass die Stunde des Tages für alle Modelle ein unverzichtbares Merkmal ist. Weiter sind Informationen zu Wochentagen und Wochenenden, sowie saisonale Variablen und Feiertage wichtig für robuste Prognosen.

3.3.2 Radarbasierte Niederschlagsmengen

Um die Beziehung von Starkregenereignissen zum Einsatzvolumen zu untersuchen, wurden initial die Daten der Radar-Online-Aneicherung (RADOLAN)¹³ des Deutschen Wetterdienstes (DWD) herangezogen. Zur Klassifikation dieser feingranularen, radarbasierten Niederschlagsmengen in Starkregenereignisse, wurden die drei DWD Warnstufen für Starkregen herangezogen¹⁴, um auf Basis der stündlichen RADOLAN Daten Starkregenereignisse auf Landkreisebene zu klassifizieren, und daraus eine eigens berechnete Starkregenrate für den Landkreis pro Stunde zu definieren. Die Analyse der täglichen Einsatzzahlen je Landkreis ergab, dass an Tagen mit mindestens einer Warnung die Einsatzverteilungen in den Landkreisen Oberspreewald Lausitz, Spree Neiße und Dahme Spreewald leicht nach oben verschoben waren, während die täglichen Einsatzzahlen für Cottbus und Elbe Elster kaum Veränderungen zeigten. Auch bei einer Stunde zu Stunde Betrachtung in verschiedenen Landkreisen der Lausitz während großer Regenmengen konnten vereinzelt Einsatzspitzen festgestellt werden, jedoch bestand auf Basis der Meldebilder kein Indiz darauf, dass diese Spitzen durch Starkregen verursacht wurden. Insgesamt gibt es keinen eindeutigen Zusammenhang von starken Regenmengen auf Basis der RADOLAN-Daten mit der Anzahl der Einsätze im Untersuchungszeitraum. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass auf Basis der RADOLAN-Daten, seit dem Jahr 2015 in der Lausitz keine extrem heftigen Starkregenereignisse (Stufe 4) und nur wenige Starkregenereignisse im Allgemeinen verzeichnet wurden. Dadurch können keine eindeutigen Zusammenhänge der Anruf- und Einsatzzahlen bei solchen extremen Ereignissen untersucht oder von den Modellen

berücksichtigt werden. Eine langfristige Sammlung von extremen Wetterereignissen, gekoppelt mit Anruf- und Einsatzzahlen ist essenziell, um zukünftig weitere Verbesserungen für die Prognosen unter Extremwetterereignissen zu erzielen. Die kontinuierliche Verarbeitung der RADOLAN-Daten ist darüber hinaus besonders rechen- und speicherintensiv und bietet zum aktuellen Stand nur geringen Mehrwert für die Modellierung. Eine günstigere und durch eine menschliche Instanz geprüfte Alternative zur Integration von Signalen für Starkregenereignisse stellen vom DWD ausgestellte amtliche Wetterwarnungen (siehe Kapitel 3.3.4) dar.

3.3.3 Hitzeindikatoren, Hitzewellen und Hitzewarnungen

Für die Klassifikation von Hitze wurden verschiedene Definitionen herangezogen. Erstens eine Definition von Hitzewellen aus der Literatur¹⁵, zweitens der Hitzeindex¹⁶, drittens die Definition aus einem DWD-Papier zu langen Zeitreihen der Hitzewellen und Kältewellen¹⁷ und viertens eine Definition, die aus einem Expertenworkshop mit dem DWD¹⁸ hervorging. Hitzewellen wurden dabei als binäre Variablen deklariert. Um die Beziehung zum Einsatzaufkommen zu ermitteln, wurde für jede binäre Variable mittels Poisson Regression der p Wert und das Inzidenzratenverhältnis (IRR)¹⁹ ermittelt. Sowohl die Definition des DWD-Papiers als auch die nach Kysely²⁰ weisen eine signifikante positive Beziehung zum täglichen Einsatzaufkommen auf. Die stärkste signifikante Beziehung wird im Landkreis Dahme Spreewald beobachtet. An Hitzetagen war demnach eine erhöhte Einsatzrate von ca. 10 % bzw. ca. 8 % (IRR von ca. 1,1 und 1,08) zu verzeichnen. Auch in Oberspreewald Lausitz weisen beide Definitionen eine signifikant erhöhte Einsatzrate von ca. 5 % (IRR von ca. 1,05) an Hitzetagen auf. Auch der Ansatz aus dem Expertenworkshop mit dem DWD ist signifikant und weist eine erhöhte Einsatzrate von ca. 3 % (IRR von ca. 1,03) auf.

Die Klassifikation nach dem Hitzeindex²¹ zeigt, dass vor allem die Landkreise Dahme Spreewald, Oberspreewald Lausitz und Elbe Elster an Tagen mit höheren Hitzeindex Warnungen eine nach oben verschobene Einsatzverteilung

13 Vgl. Deutscher Wetterdienst: RADOLAN. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html> [08.01.2026].

14 Vgl. Deutscher Wetterdienst: Warnkriterien. https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html [08.01.2026].

15 Nach Kysely (2004) wird eine Hitzewelle festgestellt, sobald an mindestens drei Tagen in Folge die Maximaltemperatur 30°C überschreitet. Die Hitzewelle hält so lange an, wie die mittlere Maximaltemperatur über die gesamte Periode über 30°C bleibt und an keinem Tag eine Maximaltemperatur von 25°C unterschritten wird. Diese Definition gilt nur für Mitteleuropa.

16 Rothfusz (1990).

17 Der Deutscher Wetterdienst (2024) setzt auf eine Methode, welche extreme Hitzewellen auf Basis des 98. Perzentils (eine Schwellenwert von 28°C hat sich

bewährt) identifiziert. Eine Hitzewelle ist demnach aktiv, wenn eine tägliche maximale Temperatur von 28°C für eine Dauer von mindestens drei Tage gemessen wird.

18 Der Temperaturanstieg von Stunde zu Stunde ist größer als 5°C für mindestens eine Stunde an einem Tag.

19 Die Poisson-Regression modelliert die Anzahl der Einsätze als abhängige Variable in Abhängigkeit der binären Hitzevariablen. Der p-Wert zeigt ob der Zusammenhang statistisch signifikant ist. Der IRR gibt an, um wieviel sich die Einsatzrate bei einem Hitzetag im Vergleich zu keinem Hitzetag verändert.

20 Kysely (2004).

21 Vgl. National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://www.noaa.gov/jetstream/synoptic/heat-index> [12.01.2026].



lung aufweisen. Auf Basis der drei anderen Definitionen konnten kaum Unterschiede in der täglichen Verteilung der Einsätze in der kreisfreien Stadt Cottbus zwischen Hitzetagen und Nicht Hitzetagen festgestellt werden. In den restlichen Landkreisen wurde eine Verschiebung der Verteilung nach oben festgestellt, insbesondere in Dahme-Spreewald ist die Verteilung an Hitzetagen deutlich nach oben verschoben im Vergleich zu keinen Hitzetagen.

Zusätzlich wurde auch die Beziehung zwischen Hitzewarnungen und den Einsatzzahlen untersucht. Die Hitzewarnungen werden vom DWD auf Landkreisebene herausgegeben und sind unterteilt in starke und extreme Wärmebelastung.²² Für alle Landkreise im Untersuchungsgebiet ist, bei einer ausgesprochenen Warnung mit starker Wärmebelastung, die Verteilung der täglichen Einsatzzahlen leicht nach oben verschoben. Für die Warnstufe „extreme Wärmebelastung“ wurde dies nicht beobachtet. Allerdings wurden seit dem Jahr 2015 nur selten extreme Hitzewarnungen ausgegeben. Die Hinzunahme der Information amtlicher Hitzewarnungen in den Trainingsdaten bietet damit das Potential die Prognosen während starken Wärmebelastungen zu verbessern. Aus der Literatur geht weiter hervor, dass Verzögerungseffekte (bis zu zehn Tage) von Hitze auch eine positive Beziehung mit dem Notrufaufkommen haben können.²³

Die Analyse zeigt, dass verschiedene Hitzewellendefinitionen, der Hitzeindex, Hitzewarnungen des DWD und Verzögerungseffekte von Hitze eine relevante Beziehung mit dem Einsatzaufkommen aufweisen und als weitere hilfreiche Eingangsvariablen für die Prognosemodelle fungieren können.

3.3.4 Amtlichen Wetterwarnungen des DWDs

Neben den Hitzewarnungen stellen die Wetterwarnungen des DWD eine vielversprechende Möglichkeit dar, Wetterextreme in der Modellierung zu berücksichtigen. Dabei ist zu beachten, dass der DWD die Warnungen im Voraus herausgibt, aber nicht auf jede Warnung zwingend ein Ereignis folgt, da sich die Wetterlage kurzfristig ändern kann. Im Untersuchungszeitraum von 2017/2024 wurden in der Lausitz am häufigsten Warnungen für starkes Gewitter, gefolgt von Frost, Windböen und Gewitter, herausgegeben. Auf Basis der aktiven Warnstunden waren Frost, Glätte, Windböen und Bodennebel in dem Zeitraum am meisten vertreten (mehr als 10.000 Stunden an

aktiven Warnungen), während Warnungen vor Schneefall und Schneeverwehung, sowie vor schweren Gewittern kaum vorkamen (unter zehn Stunden). Eine wichtige Erkenntnis ist, dass im gesamten Untersuchungszeitraum keine Warnung für heftigen oder extrem heftigen Starkregen ausgesprochen wurde. Dadurch können Prognosemodelle die Zusammenhänge von diesen Ereignissen und dem Einsatz- und Notrufaufkommen nicht lernen. Zur Analyse der Zusammenhänge wurden die täglichen Summen von Warnungen und Einsatz bzw. Anrufrufen gebildet und der nicht parametrische Spearman Korrelationskoeffizient²⁴ unter der Verwendung der Python-Bibliothek SciPy²⁵ berechnet. Die meisten ermittelten Korrelationen sind zwar schwach, aber statistisch signifikant. Die stärksten positiven Zusammenhänge, mit Korrelationen zwischen 0,15 und 0,25, zeigen sich zwischen den Zielvariablen und der Gesamtzahl aktiver Warnungen, insbesondere denen der Intensitätsstufen eins und zwei, aber auch der Warnungen vor Frost und Glätte, sowie Wind bzw. Sturmböen Warnungen. Auch kombinierte Gewitterwarnungen, welche Starkregen, Hagel oder starke Windböen enthalten, weisen die höchsten positiven Korrelationen auf. Negative signifikante Korrelationen treten nur bei reinen Gewitterwarnungen ohne andere begleitende Warnungen auf. Diese Warnungen beziehen sich jedoch auf weniger als 100 Warnstunden und können daher ein Artefakt kleiner Stichprobengrößen sein.

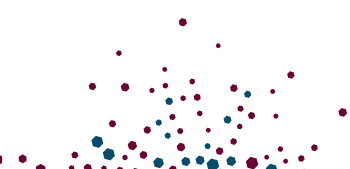
Darüber hinaus wurden Ausreißerraten der Anruf- und Einsatzzahlen während aktiver Wetterwarnungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass für Einsätze und Serviceanrufe, insbesondere bei Warnungen vor Leichterseilschwingungen, eine erhöhte Ausreißerrate zu verzeichnen ist. Die Serviceanrufe notieren zusätzlich für schwere Sturmböen, sowie während aktiven Wetterwarnungen mit Intensitätsstufe drei erhöhte Ausreißerraten. Andere Wetterwarnungen weisen lediglich geringe Ausreißerraten für die Einsätze auf. Bei Notrufen sind die größten Ausreißerraten bei Warnungen mit Intensitätsstufe drei, insbesondere bei der Warnung vor schweren Sturmböen, zu verzeichnen. Leicht geringere, aber weiterhin relevante Ausreißerraten weisen die Notrufe bei Warnungen vor starkem Gewitter und Starkregen auf. Bei den Warnungen vor starkem Gewitter können sowohl schwere Sturmböen als auch Hagel und Starkregen auftreten. Auch die Warnungen vor Gewitter mit Windböen weisen für die Notrufe erhöhte Ausreißerraten auf. Weitere Hitze und unwetterbezogene Warnungen weisen lediglich leicht erhöhte Ausreißerraten auf.

22 Vgl. Deutscher Wetterdienst: <https://www.hitzewarnungen.de/faq.jsp?warnkrit> [08.01.2026].

23 Kysely (2004); Mason et al. (2023).

24 Spearman (1904).

25 Virtanen et al. (2020).



Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass amtliche Warnungen des DWDs insgesamt nur schwache, aber signifikante Hinweise auf das Anruf und Einsatzaufkommen liefern. Die aussagekräftigsten Prädiktoren sind die Gesamtzahl aktiver Wetterwarnungen, vor allem die mit Intensitätsstufe eins und zwei, winterliche Warnungen, sowie kombinierte Gewitter und Windwarnungen. Die Analyse der Ausreißerrate zeigt auch das Potential der amtlichen Warnungen zur Prognose von Ausreißern für Einsätze, Notrufe und Serviceanrufe. Die Hinzunahme von ausgewählten Wetterwarnungen in den Trainingsdaten ist deshalb wichtig für robuste Prognosen unter Extremwetterbedingungen. Bei der Interpretation der Prognosen muss jedoch berücksichtigt werden, dass nicht alle oder nur in geringem Maße Warnungen im Untersuchungszeitraum aufgetreten sind und somit nicht Teil der Trainingsdaten sind, wodurch die Modelle solche Warnungen erst in Zukunft nach dem Auftreten und erneutem Training berücksichtigen können.

3.3.5 Wetterparameter

Der DWD liefert neben Echtzeit Wetterwarnungen historische Wetterparameter und Prognosen dieser Parameter nach dem Model-Output-Statistic-MIX-(MOSMIX) Verfahren.²⁶ Dieses Verfahren liefert Punktvorhersagen, wodurch einzelne Messwerte (z. B. Niederschlag, gemessen an einer Station) unzureichend sind. Stattdessen werden Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte und

Windgeschwindigkeit herangezogen. Aus diesen Parametern können weitere Indizes wie der Hitzeindex²⁷ und der Windchill-Wert²⁸ abgeleitet werden. Die Analyse der stündlichen Korrelationen zwischen Einsatzzahlen (nach Landkreis bzw. Gesamtgebiet) und den Wetterparametern zeigt insgesamt schwache Zusammenhänge. Relative Luftfeuchte und Hitzeindex korrelieren negativ, Windgeschwindigkeit, Temperatur und Windchill leicht positiv. Diese Effekte können teilweise durch den Tagesverlauf (Höchsttemperaturen zur Mittagszeit, bei gleichzeitig höheren Einsatzzahlen) erklärt werden. Auf Tagesbasis sinken die Korrelationswerte. Nur in den Landkreisen Dahme Spreewald und Elbe Elster erreichen einige aggregierte Wetterparameter eine absolute Korrelation größer als 0,1, was auf regionale und saisonale Effekte hindeutet. Serviceanrufe und Notrufe weisen im Vergleich zu den Einsätzen eine höhere Korrelation mit den Wetterparametern auf. Besonders ausgeprägt ist die negative Korrelation der relativen Luftfeuchtigkeit (0,39). Der Hitzeindex weist eine geringe negative Korrelation auf (0,13 bis 0,10). Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windchill zeigen moderate positive Zusammenhänge (0,21 bis 0,30). Unterschiede zwischen stündlicher und täglicher Aggregation verdeutlichen, dass kurzfristige Wetterschwankungen eigenständige Effekte besitzen, die nicht allein durch tägliche Saisonalität erklärt werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Luftfeuchtigkeit, Hitzeindex und Temperatur relevante, wenn auch moderate, Einflussgrößen für die Modellierung darstellen.

26 Vgl. Deutscher Wetterdienst: https://www.dwd.de/DE/leistungen/met_verfahren_mosmix/met_verfahren_mosmix.html [12.01.2026].

27 Rothfusz (1990).

28 Osczevski/Bluestein (2005).



3.4 Überblick der Anwendungsfälle der Prognosemodelle

Im Forschungsprojekt AIRCIS ergaben sich drei thematische Anwendungsfälle für die Prognosen. Der erste Anwendungsfall bezieht sich auf die Prognosen des Anrufaufkommens. Hierbei wird zwischen Service- und Notrufaufkommen unterschieden. Aufgrund fehlender geografischer Zuordnung der Anrufe aus der Notrufabfrage, werden diese Prognosen für die gesamte Lausitz erstellt. Der zweite Anwendungsfall bezieht sich auf die Prognose des Einsatzaufkommens. Die Prognosen werden für die einzelnen Landkreise der Lausitz und für die gesam-

te Lausitz erstellt, da hier eine geografische Zuordnung der Einsätze möglich ist. Die Modelle für die ersten zwei Anwendungsfälle repräsentieren Regressionsmodelle. Der dritte Anwendungsfall bezieht sich auf die Schätzung der zeitlichen und geografischen Einsatzverteilung. Dabei werden geografisch und zeitlich die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Einsätzen geschätzt. Alle Anwendungsfälle erstellen Prognosen für jede Stunde der nächsten sieben Tage.

3.5 Regressionsmodelle zur Prognose des Anruf- und Einsatzvolumens

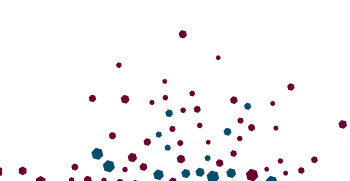
Für die Prognose der Zeitreihen wurden verschiedene Prognosemodelle erprobt, um eine Entscheidung hinsichtlich der Modellauswahl zu treffen. Eine grundlegende Herausforderung für die Modelle ist das geringe Volumen aufgrund der kleinen geografischen und zeitlichen Ebenen. Initiale Tests für ein Training eines rekurrenten neuronalen Netzwerkes zeigten, dass auf Landkreisebene das Modell lediglich konstante Werte prognostiziert und keine nennenswerten Muster lernt. Modelle des Maschinellen Lernens (ML) zeigten auf kleinen geografischen Ebenen ein verbessertes Lernen von zeitlichen Mustern. Unter den Modellen des Maschinellen Lernens erwies sich das Light Gradient Boosting Machine (LightGBM)²⁹ als geeignetes Modell, welches sowohl eine gute Vorhersagegenauigkeit als auch ein effizientes und schnelles Training aufweist. Dies erlaubt schnelle Tests mit verschiedenen Zusammensetzungen von Eingabevariablen. Aus diesen Gründen wurde im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes für die Prognose der Einsatz- und Anrufvolumen der Fokus auf LightGBM gesetzt. Darüber hinaus wurde für die Quantifizierung von Unsicherheiten der Modelle ein Algorithmus der konformen Prognosen verwendet, welcher es erlaubt Prognoseintervalle zu einem ausgewählten Wahrscheinlichkeitswert zu erstellen. Nachfolgend stellen wir die Ergebnisse der Regressionsmodelle vor, evaluieren die Performanz der Modelle, erklären den Einfluss der Eingabevariablen auf die Prognosewerte und geben einen Ausblick zur weiteren Verbesserung der Prognosegenauigkeit.

3.5.1 Visuelle Analyse historischer Notruf- und Einsatzprognosen für die Lausitz bei aktiven Wetterwarnungen

Im Folgenden sind Abbildungen von verschiedenen Wochen zur Prognose von Notrufen und Einsätzen dargestellt. In diesen Abbildungen ist das prognostizierte Aufkommen mit orangenen Kreuzen, das 95 %-Prognoseintervall mit einer orangenen Fläche und das tatsächliche Aufkommen mit blauen Kreuzen gekennzeichnet. Die linke y-Achse bezieht sich auf das Aufkommen. Zusätzlich sind ausgewählte Wetterwarnungen als rote Markierungen im Graphen gekennzeichnet. Die Anzahl der Wetterwarnungen ist durch die rechte y-Achse gegeben.

Abbildung 3 (Seite 24) zeigt den Testdatensatz für die Prognose und das tatsächliche Notrufaufkommen für die Woche vom 04.07.2024 bis zum 11.07.2024 während aktiver Gewitterwarnungen. Am 06.07.2024 war ein extremes Notrufaufkommen von knapp 100 und 120 eingehenden Notrufen in zwei aufeinanderfolgenden Stunden präsent. Während diesem extremen Notrufaufkommen waren mehrere Warnungen vor starken Gewittern mit Starkregen in der Lausitz aktiv. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass am Anfang und am Ende der Woche mehrere Gewitterwarnungen und starke Gewitterwarnungen aktiv waren. In diesem Beispiel kann das Modell während extremer Wetterwarnungen die Ausreißer nicht exakt vorhersagen, trotzdem hat das Modell auf diese Ausreißer reagiert. Das allgemeine Notrufaufkommen kann gut prognostiziert werden, da das tatsächliche und das prognostizierte Notrufaufkommen sich in weitgehend ähneln.

²⁹ Ke et al. (2017).



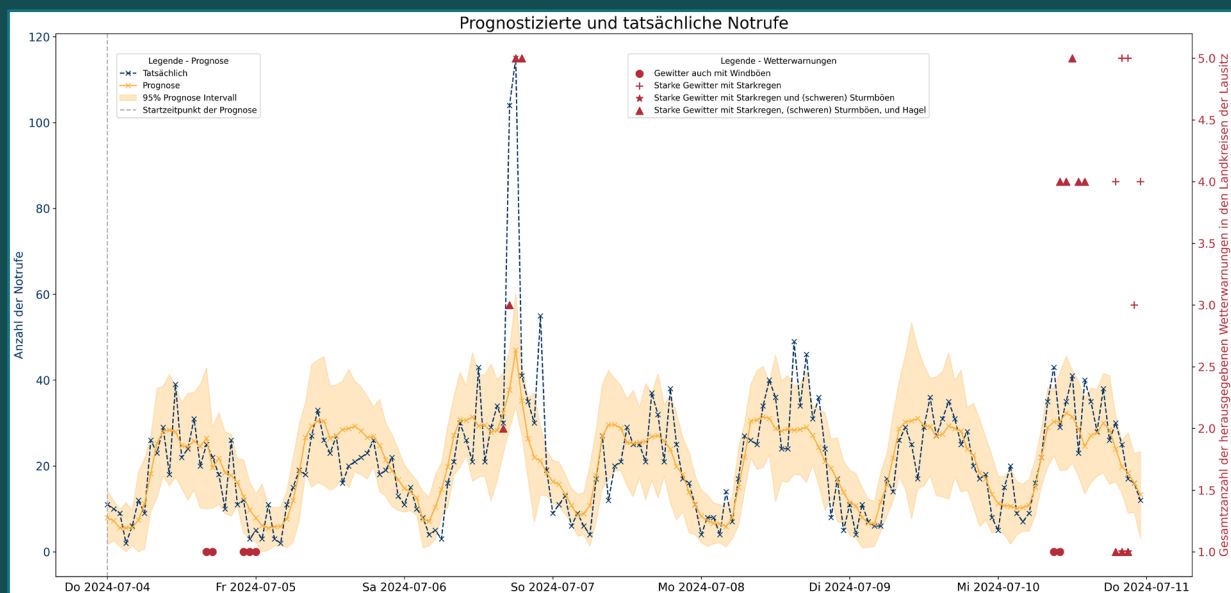


Abbildung 3: Prognose des Notrufaufkommens während starken Gewitterwarnungen. Quelle: IABG.

In Abbildung 4 sind die prognostizierten und tatsächlichen Einsätze in der Lausitz vom 29.08.2024 bis zum 05.09.2024 visualisiert. An mehreren Tagen der Woche wurden Hitzewarnungen der Stufe 1 gemeldet. Am 29.08.2024 sowie am 04.09.2024 und 05.09.2024 wurden Hitzewarnungen für alle Landkreise der Lausitz herausgegeben. Am 30.08.2024 wurden Hitzewarnungen in drei Landkreisen der Lausitz gemeldet. Gegen Ende der Wo-

che waren zudem Warnmeldungen vor Gewittern und starken Gewittern mit Starkregen in einigen Landkreisen aktiv. Aus Abbildung 4 ist erkennbar, dass das Prognosemodell das allgemeine Einsatzaufkommen der gesamten Lausitz gut prognostizieren kann. Bei untypischen Verläufen des täglichen Einsatzaufkommens scheinen jedoch nicht ausreichend externe Signale vorhanden zu sein, um diese mit hoher Präzision zu prognostizieren.

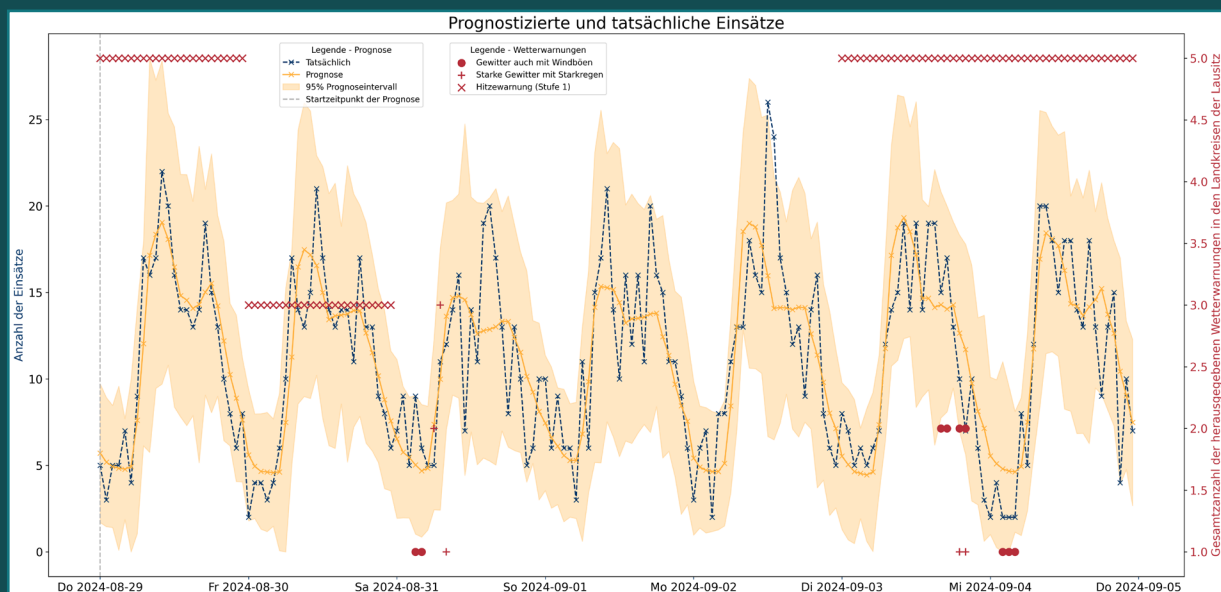


Abbildung 4: Prognose des Einsatzaufkommens.

Für die gesamte Lausitz in einer Woche mit aktiven Hitzewarnstufen und Warnungen vor starken Gewittern mit Starkregen. Quelle: IABG.



3.5.2 Evaluation und Erklärbarkeit

Die angewandten Vorhersagemodelle liefern bereits nützliche Hinweise, lassen aber auch Raum für Verbesserungen. Insbesondere, wenn außergewöhnliche Ereignisse auftreten, welche bisher nur in geringem Maße in den Trainingsdaten enthalten sind, bleibt eine exakte Prognose herausfordernd. Auch der breite Prognoseintervall weist auf eine gewisse Unsicherheit der Modelle hin. Für die Vorhersage von Notrufen und Service-anrufen liegt die durchschnittliche Abweichung bei etwa fünf Anrufen pro Stunde. Das bedeutet, dass die einzelnen Vorhersagen im Schnitt um fünf Anrufe von den tatsächlich eingehenden Anrufen abweichen. Bei den Prognosen für Einsätze in der Lausitz ist die Abweichung kleiner. Im Durchschnitt wird die tatsächliche Zahl um etwa drei Einsätze verfehlt. Ein wichtiger Hinweis für die Interpretation dieser Zahlen ist, dass die Prognosefehler stark abhängig von der Uhrzeit sind und das Einsatzvolumen generell kleiner ist als das Serviceanruf- oder Notrufaufkommen. Der sogenannte Bestimmtheitsgrad (R^2) der Modelle liegt für den Testdatensatz zwischen 45 % und 55 %. Das bedeutet, dass rund die Hälfte der Schwankungen in den realen Daten bereits durch das Modell erklärt werden kann. Der Rest wird von Faktoren beeinflusst, die die Modelle aktuell nicht erfassen, wie zum Beispiel nicht berücksichtigte Veranstaltungen oder zusätzliche Wetterdaten.

Wird das Prognosemodell für einzelne Landkreise betrachtet, ist die Vorhersagegenauigkeit insgesamt niedriger. In Cottbus liegt die typische Abweichung der Prognose von dem tatsächlichen Wert bei etwa einem Einsatz pro Stunde, in den anderen Landkreisen ist sie vergleichbar. Der R^2 liegt hier jedoch nur zwischen 17 % und 33 % für die verschiedenen Landkreise. Das bedeutet, dass das Modell einen kleineren Teil der tatsächlichen Schwankungen erfassen kann. Ein Grund für die bessere Leistung in den Landkreisen Dahme Spreewald und Oberspreewald Lausitz stellt zum einen das größere stündliche Einsatzvolumen dar und zum anderen, dass die Einsatzzahlen größere Korrelationen in diesen Landkreisen mit den Eingangsvariablen zeigen. In allen Kreisen gibt es jedoch noch deutliches Verbesserungspotenzial. Insbesondere könnte eine Aggregation der Daten auf größere Zeiträume und die Hinzunahme weiterer Einflussfaktoren die Vorhersagegenauigkeit verbessern.

Für die Erklärung der Modelle wurde analysiert, welche Eingangsvariablen die Vorhersagegenauigkeit der Notruf-, Service- und Einsatzprognosen bestimmen. Dabei wurde die Split Importance und die Gain Importance untersucht.³⁰ Ergänzend wurden SHapley Additive exPlanations (SHAP)³¹ Werte berechnet, um für jede Vorhersage

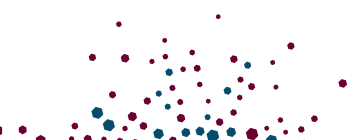
den quantitativen Beitrag einzelner Variablen, sowohl die Richtung (positiv/negativ) als auch die Stärke, zu identifizieren. Zeitliche Eingangsvariablen (Stunde, zyklische Transformationen der Stunde, Wochentage, Feiertage, etc.) sind über alle Modelle hinweg die dominantesten Treiber der Prognosen. Aggregationen der relativen Luftfeuchtigkeit und Temperaturen sind weitere wichtige Einflüsse für die Prognosewerte, insbesondere für die Service- und Notrufmodelle. Wetterwarnungen, insbesondere kombinierte Warnungen vor Gewitter und Starkregen, sowie Warnungen vor Sturmböen, haben einen klaren, meist positiven Einfluss auf die Prognosewerte, verstärkt durch die Interaktionen mit Temperatur. Die regionale Kennzeichnung ist im Einsatzmodell ausschlaggebend. Hitzewarnungen zeigen meist nur einen moderaten Einfluss auf die Prognosen.

3.5.3 Ausblick zur Verbesserung der Prognosegenauigkeit

Für die weitere Verbesserung der Prognoseperformance der Regressionsmodelle gibt es vier zentrale Handlungsfelder. Erstens kann die Datenbasis erweitert und in die Modelle integriert werden. Hierzu zählt zum Beispiel die Integration von Veranstaltungsdaten oder weiterer relevante Faktoren wie Hochwasserwarnungen. Zweitens können für die Prognose von Einsätzen auf Landkreisebene die Daten zeitlich größer aggregiert werden. Anstelle einer rein stündlichen Aggregation könnten Zeitfenster von zwei, drei oder mehr Stunden verwendet werden, um schwankungsbedingte Rauscheffekte zu reduzieren und robustere Vorhersagen zu ermöglichen. Drittens kann es sinnvoll sein, aus den bereits vorhandenen Daten zusätzliche Informationen zu gewinnen. Wetterwarnungen führen häufig nicht zu einem erhöhten Einsatz oder Anrufaufkommen, daher sollten historische Fälle manuell markiert werden, in denen eine Warnung tatsächlich zu einer erhöhten Belastung geführt hat. Diese Markierungen können dann bei aktiven Warnungen genutzt werden, um Prognosen für den Worst Case zu erzeugen. Zusätzlich kann die Integration der Anrufe als Eingangsvariable in das Einsatzmodell die Genauigkeit der Prognose weiter steigern. Viertens sollten langfristig systematisch mehr Daten zu Extremereignissen und den dazugehörigen resultierenden Einsatz- und Anruhzahlen erhoben und gespeichert werden. Auf diese Weise können die Modelle die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Extremwittersituationen und dem operativen Bedarf besser lernen und somit auch bei seltenen, aber kritischen Ereignissen zuverlässigere Prognosen liefern.

³⁰ Die „Importance“ spiegelt wider, wie oft eine Variable bei Entscheidungen verwendet wird (Split) und inwieweit sie das Modell verbessert, wenn sie verwendet wird (Gain). Für eine technische Erklärung vgl. Ke et al. (2017).

³¹ Lundberg/Lee (2017).



3.6 Test zur Prognose von Ausreißern für die Notrufe

In einem weiteren Ansatz wurde erprobt, ob sich Ausreißer mit einem Klassifikationsverfahren prognostizieren lassen. Dafür wurden die Daten in eine Ausreißer-Klasse und eine Nicht-Ausreißer-Klasse kategorisiert. Anschließend wurde ein Modell des Maschinellen Lernens trainiert, welches in der Lage war, vier extreme Ausreißer korrekt zu identifizieren. Gleichzeitig blieb ein Teil der weniger extremen Ausreißer unentdeckt. Die Hinzunahme weiterer, aufschlussreicherer Eingabevariablen könnte die Prognose dieser Ausreißer weiter verbessern. Dieser

Ansatz bietet großes Potenzial, um neben den Regressionsmodellen zusätzlich Klassifikationsmodelle zu verwenden, mit denen präventiv ein extremes Einsatz und Anruferkommen identifiziert werden kann. Diese Zusatzinformation hilft dabei, die Unsicherheiten der Regressionsmodelle zu adressieren. Darüber hinaus bietet dieser Ansatz eine ergänzende und einfach zu interpretierende Entscheidungsunterstützung für die Leitstelle während extremer Wetterlagen.

3.7 Verteilungsmodell

Für die Prognose der stündlichen geografischen Einsatzverteilung für die nächsten sieben Tage wurden zwei verschiedene Modelle getestet. Zuerst wurde das Convolutional Long Term Short Memory (ConvLSTM)³² Modell erprobt. Lange Trainingszeiten und die geringe Anzahl von Einsätzen im geografischen und zeitlichen Raum stellen bei der Modellierung die größte Herausforderung für das ConvLSTM dar. Nach initialen Tests für die Prognose der Einsatzverteilung für den nächsten Tag, wurde die Nutzung des ConvLSTM aufgrund zu langer Trainingszeiten verworfen. Als Alternative wurde eine Erweiterung des Kerndichteschätzer herangezogen, das Spatio-Temporal Kernel Density Estimation (STKDE)³³, welches mit geringen Datenmengen deutlich effektiver arbeitet im Vergleich zum ConvLSTM. Für die Auswertung

der Schätzung des STKDE Modells wurde eine Metrik entwickelt, welche die tatsächlich angefallenen Einsätze mit den Wahrscheinlichkeiten kombiniert. Dafür erhält jedes Raster im Landkreis eine Wahrscheinlichkeit. Diese Wahrscheinlichkeit wird verknüpft mit der Information wie viele Einsätze im jeweiligen Raster stattgefunden haben. Als Benchmark Modell wurde die einfache historische Verteilung der aufgetretenen Einsätze verwendet. Die historische Verteilung zeigte insgesamt eine bessere Performance für die Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung gemessen an tatsächlich aufgetretenen Einsätzen innerhalb eines jeden Landkreises als das STKDE Modell. Für manche Stunden weist das STKDE jedoch eine bessere Performance auf als die historische Verteilung.

3.8 Simulationsmodell

Im Projekt Aircis wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches die Rettungskette innerhalb der Versorgungsbereiche IRLS Lausitz computergestützt abbildet, mit besonderem Fokus auf den boden- und luftgebundenen Rettungsdienst sowie der Anruferverarbeitung innerhalb der Leitstelle. Das Modell ermöglicht eine datengetriebene und KI-gestützte Ressourcenplanung bzw. -optimierung für die Leitstelle und den Rettungsdienst, sowohl im Regelbetrieb als auch in Ausnahmelagen, etwa ausgelöst durch Extremwetterereignisse, und wird im Folgenden detailliert beschrieben. Technische und mathematische Details des Simulationsmodells, die den Rahmen hier übersteigen, werden in einer separaten wissenschaftlichen Publikation zusammengefasst.³⁴

3.8.1 Methoden

Innerhalb des Simulationsmodells werden die Methoden der Agentenbasierten Modellierung (ABM)³⁵ und der ereignisorientierten Simulation (Discrete-Event Simulation (DES)³⁶) kombiniert. ABM beschreibt Systeme als Interaktion autonomer Agenten (z. B. Patienten, Disponenten oder Rettungsmittel), die nach definierten Regeln handeln und miteinander interagieren. Diese Interaktionen führen zu komplexen, oft unvorhersehbaren Phänomenen (Emergenz) auf Systemebene, etwa Verzögerungen oder Lastspitzen im Rettungsdienst. DES modelliert Systeme als eine Abfolge diskreter Ereignisse in der Zeit (z. B. Notrufeingang, Disposition, Ausrücken, Eintreffen am

³² Shi et al. (2015).

³³ Zhou/Matteson (2015).

³⁴ Publikation ausstehend.

³⁵ Andrae/Pobuda (2021); Salgado/Gilbert (2013).

³⁶ Rubinstein/Kroese (2016).



Einsatzort), wobei sich der Systemzustand nur während solcher Ereignisse ändert. Dies erlaubt eine präzise Analyse von Prozessen, Warteschlangen und der Ressourcennutzung. Die Kombination beider Ansätze ist besonders geeignet für die Modellierung der Rettungskette, da das individuelle, situationsabhängige Verhalten der beteiligten Akteure (via ABM) mit den klar strukturierten, zeitkritischen Prozessabläufen in Leitstelle und Rettungsdienst (via DES) verknüpft wird. So lassen sich Wechselwirkungen zwischen Entscheidungen einzelner Akteure und der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems realistisch untersuchen.

Das Simulationsmodell ist modular aufgebaut, sodass bei Bedarf Teilmodelle (z. B. bodengebundener oder luftgebundener Rettungsdienst; Leitstelle) einzeln ausgeführt werden können, etwa bei der Betrachtung von Teilproblemen oder der Limitation von Rechenzeiten. Darüber hinaus integriert das Modell Verfahren des überwachten Maschinellen Lernens, auch Supervised Learning genannt, mit deren Hilfe aus unterschiedlichen Eingabedaten relevante Kenngrößen geschätzt werden, etwa die zu erwartende Fahrtzeit von Einsatzmitteln auf Grundlage der zurückzulegenden Distanz, der aktuellen Tageszeit und des eingesetzten Fahrzeugtyps.

Als Letztes werden auch Methoden aus der mathematischen Optimierung angewendet, um Handlungsvorschläge wie die Anzahl an Rettungsmitteln oder Mitarbeitern

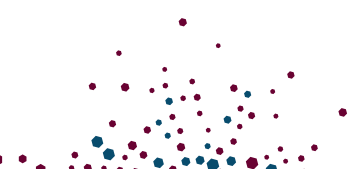
zu erzeugen. Hierzu werden vor allem sogenannte genetische Algorithmen angewendet, deren Funktionsweise an die der Evolution angelehnt ist. Dabei werden Lösungen generiert, getestet und wiederum neue Lösungen erzeugt. Dieser Prozess soll – wie die Fortpflanzung in der Natur – Rekombinationen und Mutationen bilden und somit durch viele Iterationen möglichst gute Lösungen liefern.

3.8.2 Software

Die eingesetzte Software für die Implementierung des Simulationsmodells ist AnyLogic, eine spezielle Simulationssoftware, state-of-the-art auf dem Gebiet der Simulation, welche es ermöglicht, verschiedene Simulationsansätze (z.B. ABM und DES) miteinander zu kombinieren, sowie verschiedene Experimente (z.B. Parametervariation, Optimierung mittels Simulation, Monte-Carlo Simulation (MCS)³⁷) durchzuführen. AnyLogic ist Java-basiert und bietet neben internen Funktionen die Möglichkeit, Java- und Python-Code zu integrieren.

Darüber hinaus wurde Python eingesetzt, insbesondere für die Datenaufbereitung des Modellinputs und für das Anlernen von ML-Modellen, welche im Simulationsmodell Verwendung finden. Sowohl Python als auch AnyLogic bestechen durch ihre große Community und der Vielzahl an Möglichkeiten bzw. Bibliotheken, die einen flexiblen Einsatz ermöglichen.

37 Eine Monte-Carlo-Simulation führt eine Simulation mit Zufallsanteil viele Male hintereinander aus, um so einen zu erwartenden Ausgang zu aggregieren. Zum Beispiel wird dieses Verfahren in der Physik zur Modellierung komplexer Systeme mit vielen Freiheitsgraden verwendet.

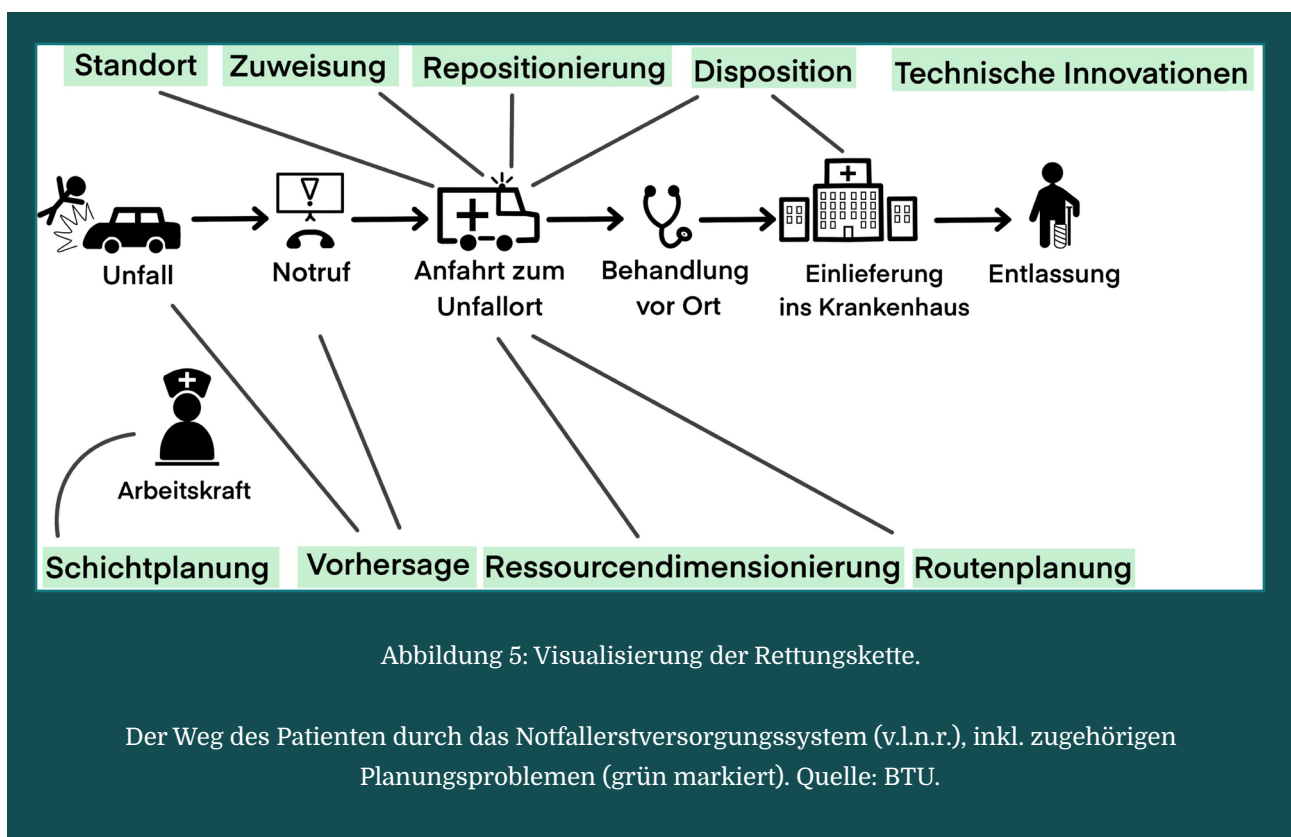


3.8.3 Modell (Prozesse, Agenten, Ereignisse, Eingabe- und Ausgabedaten, Validierung und Verifikation)

Die Rettungskette, also der Weg des Patienten durch die Notfallerstversorgung, und darüber hinaus die Anrufverarbeitung innerhalb einer Leitstelle, kann als Prozess aufgefasst und per DES abgebildet werden. In Abbildung 5 ist die Rettungskette mit den dazugehörigen Planungsproblemen dargestellt.

Die Notrufverarbeitung in der Leitstelle erfolgt nach Erhalt eines Notrufs oder Serviceanrufs und wird von den Disponenten durchgeführt. Diese führen die Notrufannahme und Meldebilderarbeitung durch, disponieren

ggf. geeignete Rettungsmittel und kümmern sich um die telefonische Einsatzbegleitung bzw. -unterstützung und Dokumentation. Im Falle von Serviceanrufen wird letztlich nur das Servicegespräch modelliert. Die jeweiligen Dauern dieser Tätigkeiten sind über stochastische Verteilungen modelliert, ermittelt aus historischen Anrufrdaten der IRLS Lausitz. Darüber hinaus kann die Führungsorganisation innerhalb der Leitstelle umgestellt werden: von Allgemeiner Führungsorganisation (AFO) im Normalbetrieb zu Besonderer Führungsorganisation (BFO) im Ausnahmezustand, wobei sich die Rollenverteilung ändert und zusätzliches Personal (in Form sogenannter Calltaker) eingesetzt wird. Dies wurde als Prozess modelliert und ist in Abbildung 6 visualisiert.



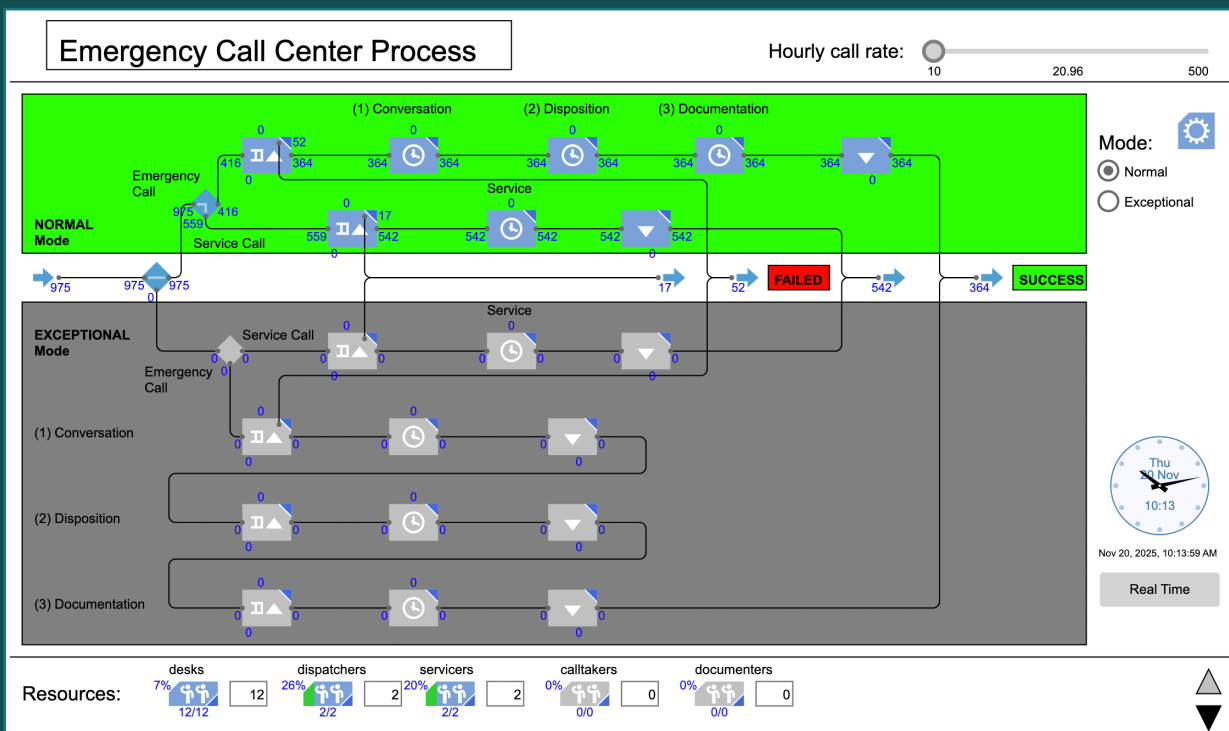


Abbildung 6: Visualisierung der Anrufverarbeitung innerhalb einer Leitstelle.

Mit aktiver AFO (Normal Mode, in grün) und inaktiver BFO (Exceptional Mode, in grau) unter Einsatz der Ressourcen Arbeitsplätze (desks), Disponenten (dispatchers), Service-Disponenten (servicers), Calltakern (calltakers) und Einsatzbegleitern (documenters). Dabei werden die Aufgaben der Notrufannahme und Meldebilderarbeitung (Conversation), Disposition und Alarmierung (Disposition) und Einsatzbegleitung und Dokumentation (Support and Documentation) sowie die Durchführung von Service-Arbeiten (Service) simuliert. Die erkennbaren Zahlen (in blau) stehen für die Anzahl an Anrufern, die das jeweilige Element des Prozesses gerade durchlaufen (darüber) bzw. bereits durchlaufen haben (seitlich). Quelle: BTU.

Auslöser dieses Prozesses ist in der Praxis ein abgeschetzter Notruf bzw. Serviceanruf. Dieser wird als diskretes Ereignis modelliert. Das Auftreten dieser Ereignisse erfolgt zufällig und wird als Poisson-Prozess mit variabler Rate modelliert, wobei diese stündlich variierende Rate via Prognosemodell (siehe Kapitel 3.5) bestimmt wird.

Der wichtigste Bestandteil eines agentenbasierten Modells sind die Agenten, welche in einer Umgebung leben und miteinander und mit der Umgebung interagieren und kommunizieren. In unserem Fall handelt es sich bei der Umgebung um ein (zweidimensionales) Geoinformationssystem (GIS). In der Umgebung leben viele Agenten: Dynamische Agenten, die sich in der Umge-

bung bewegen können, wie verschiedene Rettungsmittel (Rettungswagen (RTW), Notarzteinsetzfahrzeug (NEF), Rettungshubschrauber), oder auch Personen (Patienten, Notärzte, Disponenten), sowie statische Agenten (Leitstellen, Krankenhäuser, Rettungswachen), aber auch abstrakte Agenten (Rettungs-, Service- und Sprechwunschanfragen). Die am komplexesten modellierten Agenten sind hierbei die Rettungsmittel, da dort der gesamte Missionsablauf von Abfahrt an der Rettungswache über Behandlung am Unfallort und Transport in die Rettungsstelle bis zur Einfahrt in die Rettungswache via Zustandsdiagramm modelliert ist. Ein solches Zustandsdiagramm ist im Folgenden in Abbildung 7 exemplarisch für den Agenten RTW visualisiert und beschrieben.

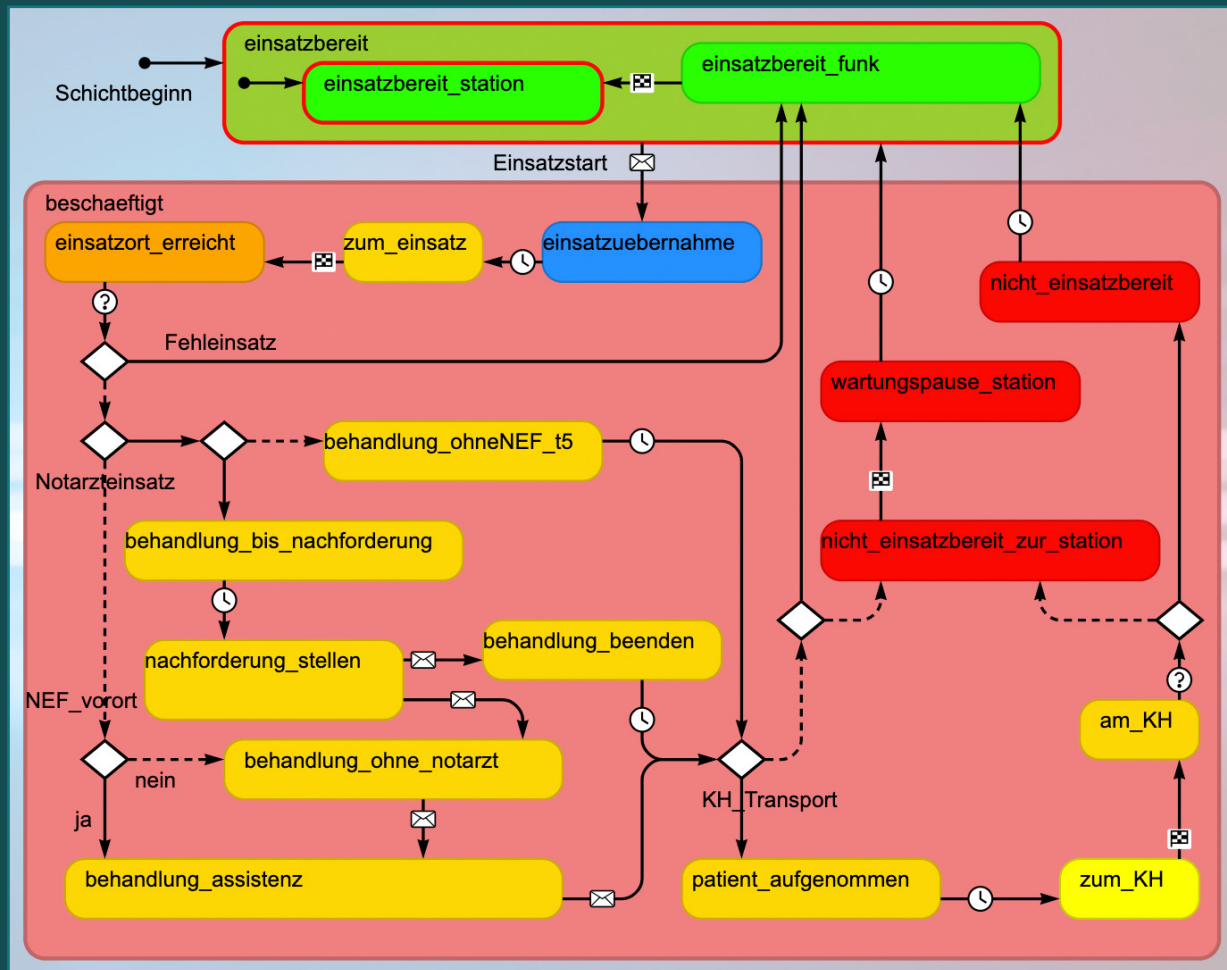


Abbildung 7: Das Zustandsdiagramm des Agenten RTW

Farbig hinterlegte ovale Elemente stellen die jeweiligen Zustände dar, die Pfeile dazwischen die Übergänge und die weißen Rauten die Verzweigungen. Bei Schichtbeginn meldet das Fahrzeug Einsatzbereitschaft („einsatzbereit“). Dadurch kann es disponiert werden („Einsatzstart“) und meldet die Einsatzübernahme („einsatzuebernahme“). Es fährt zum Einsatzort („zum_einsatz“), erreicht diesen („einsatzort_erreicht“) und beginnt die Behandlung je nachdem, ob ein NEF mitdisponiert wurde und schon vor Ort ist („behandlung_assistenz“) oder nicht („behandlung_ohneNEF“). Bei Bedarf kann ein NEF nachgefordert werden („nachforderung_stellen“). Danach entscheidet sich, ob der Patient in die Rettungsstelle transportiert werden muss („KH_Transport“). In dem Fall wird der Patient aufgenommen („patient_aufgenommen“), das Krankenhaus angefahren („zum_KH“), die Übergabe an das Krankenhaus vorgenommen („am_KH“) und schließlich die erneute Einsatzbereitschaft zurückgemeldet („einsatzbereit_funk“). Alternativ wird erst eine Wartungspause eingelegt „wartungspause_station“ und danach die erneute Einsatzbereitschaft („einsatzbereit_station“) gemeldet. Der aktuelle Zustand des RTW wird mit einer roten Umrandung gekennzeichnet (Hier aktuell: „einsatzbereit_station“). Quelle: BTU.

Ein wichtiger Bestandteil der Modellierung dynamischer Agenten ist die Fahrzeit- bzw. Geschwindigkeitsschätzung. Die Geschwindigkeit lässt sich aus den zugrundeliegenden Daten mittels ML-Modellen gut konstruieren.

Hierzu werden die Daten vorsichtig gefiltert, um Fehler, Ausreißer und Anomalien auszusortieren. Weiterhin bestehen die Fahrdaten lediglich aus GPS-Koordinaten von Start- und Endpunkt des Einsatzes, sodass die tat-



sächlich gefahrenen Strecken mit Hilfe von Kartensystemen und kürzeste Wege Algorithmen rekonstruiert werden müssen. Es wurden verschiedene ML-Verfahren getestet, wobei sich für die Schätzung der Bodenfahrzeuge und der Helikopter jeweils unterschiedliche Methoden empfehlen. Durch Phänomene wie Stau und Straßensperrungen sind die Daten für Bodenfahrzeuge durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die in der

Schätzung berücksichtigt werden müssen, um realistische Ergebnisse zu produzieren. Daher werden für die Bodenfahrzeuge das XGBoost Verfahren³⁸ angewandt, das viele Ähnlichkeiten zu dem in Kapitel 3.5 erwähnten LightGBM Verfahren besitzt. Für die Helikopter hingegen liefert ein klassisches lineares Regressionsverfahren die besten Ergebnisse.

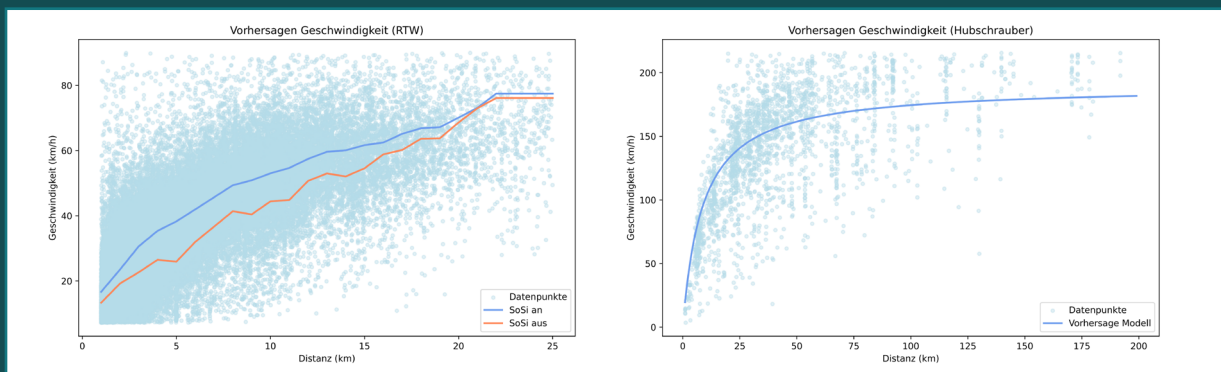


Abbildung 8: Darstellung der Geschwindigkeitsschätzung in Abhängigkeit der Fahrdistanz.

Links die Schätzung für ein RTW mit und ohne Sondersignal (SoSi), rechts für einen Helikopter. Die historischen Daten sind als hellblaue Punkte hinterlegt. Durch die verschiedenen Algorithmen hat der Helikopter (lineare Regression) eine glattere Kurve als der RTW (XGBoost). Quelle: BTU.

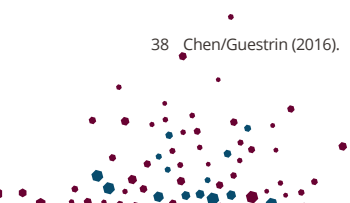
Die Eingabedaten des Simulationsmodells werden im Folgenden in Tabelle 1 zusammengefasst und erklärt.

Diese können über das Interface vom Nutzer spezifiziert werden.

NAME	BESCHREIBUNG
Simulationszeitraum	Die Zeitspanne der Simulation von Anfangs- bis Enddatum.
Gebiet	Das Einsatzgebiet des Rettungsdiensts (auswählbar auf Landkreisebene).
Szenario	Das zu simulierende Szenario, etwa der Regelbetrieb, Ausnahmezustand (BFO), Starkregen oder Hitzewelle.
Nachfrageerzeugungsmodus	Das Verfahren, mit welchem die Nachfrage (Notrufe, Serviceanrufe) zeitlich und räumlich erzeugt wird, entweder über die Prognosemodelle (vgl. Abschnitt 4.3) oder über ZENSUS-Daten und historische Anrufrufen.
Fahrzeugkonfiguration	Die eingesetzte Einsatzfahrzeugflotte inkl. Fahrzeugtyp, Schichtplan und Standort.
Personalkonfiguration	Die eingesetzte Personalkonfiguration inkl. Schichtplan und Tätigkeit (Disponent, Call-Taker, etc.).

Tabelle 1: Die Eingabedaten des Simulationsmodells

38 Chen/Guestrin (2016).



Die Simulation ermöglicht es, Statistiken zu erheben und verschiedene, wichtige Kennzahlen zu schätzen, die zur Bewertung der Performance des Rettungsdienstsystems genutzt werden können. Die Ausgabedaten, die dadurch entstehen, sind sehr umfangreich und nur die wichtigsten werden dem Nutzer im Interface

zusammengefasst. Für die Ableitung von Handlungsempfehlungen aus der Simulation und weitere wissenschaftliche Zwecke werden allerdings noch weitere, aussagekräftige Statistiken erhoben und ausgewertet. Diese sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

NAME	BESCHREIBUNG
Durchschnittliche Wartezeiten	Die durchschnittliche Wartezeit bei einem Anruf in der Leitstelle, jeweils für Notrufe und Serviceanrufe.
Reaktionszeits-Erfolgsrate	Die Erfolgsrate (in %) für eine Reaktionszeit von < 15 Minuten vom Erhalt des Notrufs bis zum Erreichen des Patienten am Einsatzort.
Handlungsempfehlungen	Abgeleitete Handlungsempfehlungen für Leitstelle und Rettungsdienst.
Warnungen	Abgeleitete Warnungen an Leitstelle und Rettungsdienst.
Wartezeiten	Die Wartezeiten für jeden Notruf bzw. Serviceanruf.
Anrufzahl	Die Anzahl an wartenden und laufenden Notrufen bzw. Serviceanrufen über die Zeit.
Anrufannahmedauern	Die Anrufannahmedauer, jeweils für Notrufe und Serviceanrufe über die Zeit.
Reaktionszeiten	Die Reaktionszeiten pro Fahrzeug über die Zeit.
Dispositionszeiten	Die Dispositionszeiten (vom Notrufeingang bis zur Disposition des Rettungsmittels) über die Zeit.
Prähospitalzeiten	Die Prähospitalzeiten (vom Notrufeingang bis zur Einlieferung in die Rettungsstelle) über die Zeit.
Gesamteinsatzzeiten	Die Gesamteinsatzzeiten (Dauer eines kompletten Einsatzes) pro Fahrzeug über die Zeit.
Arbeitsauslastung	Die Arbeitsauslastung des Personals über die Zeit.
Nutzungsraten	Die Nutzungsrate von Einsatzfahrzeugen über die Zeit.
Distanzen	Die zurückgelegten Distanzen pro Einsatzfahrzeug.

Tabelle 2: Die Ausgabedaten des Simulationsmodells.

Die Werte oberhalb der gestrichelten Trennlinie werden in der Benutzeroberfläche dargestellt, die Werte unterhalb werden erhoben und für die Generierung von Warnungen und Handlungsempfehlungen genutzt.



Zur Qualitätssicherung des Simulationsmodells wurden verschiedene Maßnahmen zur Verifikation und Validierung durchgeführt. Beide Prozesse sind iterativ und begleiteten den gesamten Modellierungsprozess. Bei der Verifikation wird geprüft, ob das Modell korrekt programmiert und logisch konsistent ist. Dazu wurden umfangreiche manuelle Code- und Modellprüfungen (Code Reviews) vorgenommen, insbesondere im Zusammenhang mit der Rechenzeitanalyse und -optimierung, sowie Debugging und Testläufe inklusive Grenz- und Extremwerttests, d.h. Tests mit extremen Parametern und Überprüfung auf erwartungsgemäßes Verhalten des Modells. Bei der Validierung wurde untersucht, ob das Modell das reale System ausreichend genau beschreibt. Hier wurde vor allem durch den engen Austausch mit den Leitstellen innerhalb des Projektes die Expertenvalidierung angewandt, wobei Modellstruktur und Ergebnisse von Domänenexperten auf Plausibilität geprüft, und wenn nötig an bestimmten Stellen das Modell nachgeschärft bzw. angepasst wurde. In diesem Zuge wurde außerdem eine Verhaltensvalidierung durchgeführt, welche prüft, ob das Modell dasselbe systemische Verhalten zeigt wie im Realsystem, insbesondere bzgl. der Warteschlangen, Fahrzeugverfügbarkeit und -zeiten. Darüber hinaus bot sich aufgrund der umfangreichen Datenlage die datenbasierte bzw. historische Validierung an, welche Simulationsergebnisse mit Realergebnissen vergleicht.

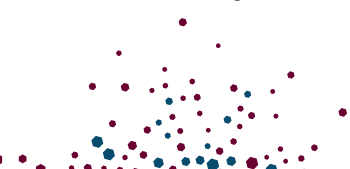
3.8.4 Extremwetterereignisse

Das Simulationsmodell ermöglicht auch die Untersuchung der Einflüsse von Extremwetterereignissen, wie Starkregen und Hitzewellen. Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, werden die stündlichen Notrufe und daraus entstehenden Rettungseinsätze über Prognosemodelle geschätzt. Der wissenschaftliche Zusammenhang zwischen Hitzewellen und einer steigenden Anzahl an Notrufen ist bislang nicht klar belegt (siehe Kapitel 2.3.1) und ließ sich nur zu einem gewissen Grad aus den Daten der Prognosemodelle erfassen (siehe Kapitel 3.5.1). Dennoch wurde die Erzeugung künstlicher Hitzewellen im Simulationsmodell bzw. allgemein die Erzeugung von temporär erhöhtem Notrufaufkommen ermöglicht. Hierfür lässt sich für einen definierten Zeitraum ein temporär gesteigertes Notrufaufkommen (z. B. 5 % erhöht) erzeugen. Dieser vom Nutzer festgelegte Prozentsatz wird mit der Rate des Poisson-Prozesses zur Erzeugung von Notrufen (siehe Kapitel 3.5) verrechnet.

Die Auswirkung von Starkregen auf das Rettungsdienstsystem beschränkt sich auf das Anrufaufkommen, welches durch das Prognosemodell gedeckt wird, sowie der eingeschränkten Befahrbarkeit des Straßennetzes durch bodengebundene Rettungsmittel. Um Letzteres zu integrieren, wurden innerhalb eines Unterauftrags von Okeanos³⁹ Senkenanalysen und hydrodynamische Simulationen in Stadtgebieten (Cottbus und Guben) durchgeführt (siehe Abbildung 9) und daraus die Befahrbarkeit einzelner Straßenabschnitte in Abhängigkeit des Wasserstands und der Fließgeschwindigkeit ermittelt. Ein großes Problem stellten die fehlenden Informationen zur Befahrbarkeit durch die eingesetzten Einsatzfahrzeuge dar, weshalb unterschiedliche Werte angesetzt und getestet wurden. Für die Modellierung von Starkregen im gesamten Versorgungsgebiet wurden Daten der Hinweiskarte Starkregengefahren des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG)⁴⁰ eingesetzt. In Abbildung 10 ist solch eine Befahrbarkeitssanalyse exemplarisch für das Stadtgebiet Cottbus dargestellt.

39 Okeanos Smart Data Solutions GmbH. <https://www.okeanos.ai/> [08.01.2026].

40 Vgl. <https://www.bkg.bund.de/DE/Themen/Umwelt-und-Klimawandel/Starkregen/starkregen.html> [08.01.2026].



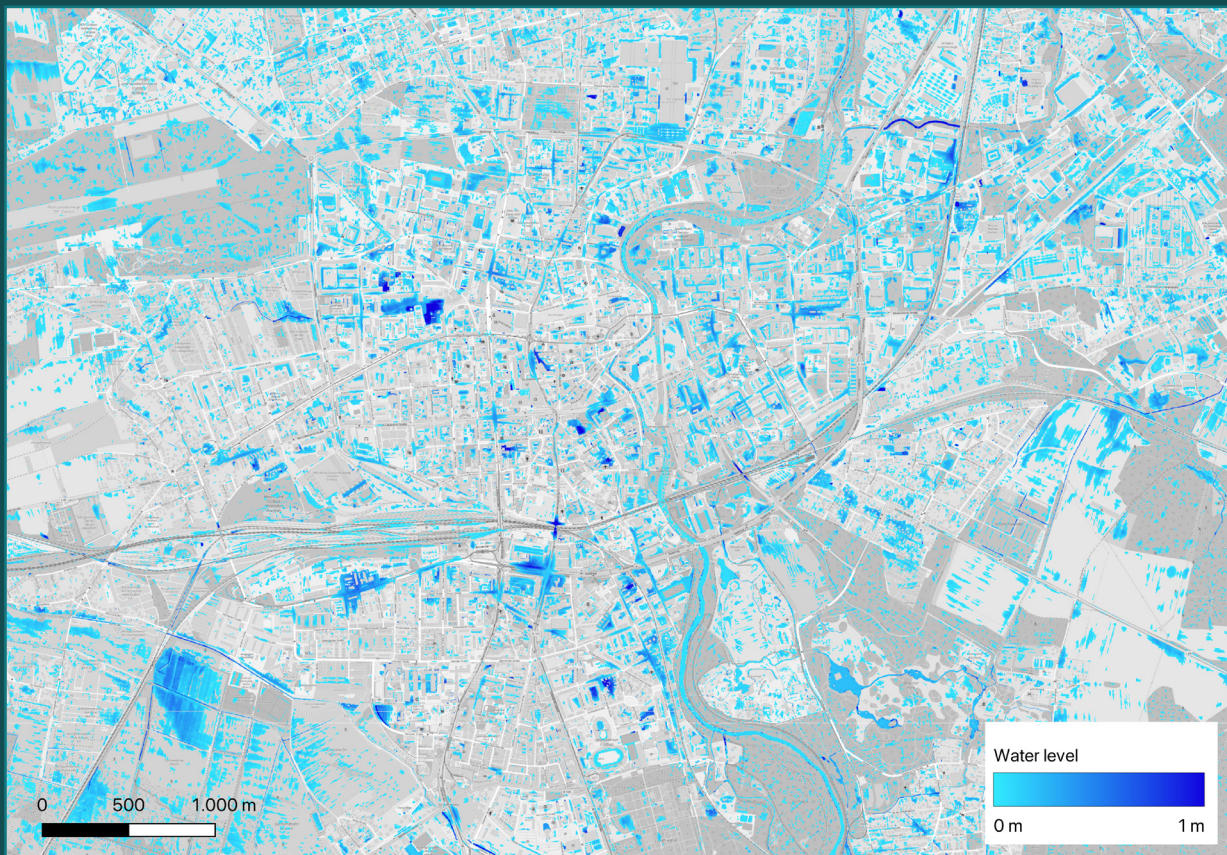


Abbildung 9: Ausschnitt der Wasserstände im Stadtgebiet Cottbus nach einem simulierten 100-jährigen Starkregenereignis.

Ermittelt per Senkenanalyse. Quelle: BTU/Okeanos

3.8.5 Einordnung und Nutzung der Simulationsergebnisse

Das Simulationsmodell befähigt den Anwender, individuelle Szenarien in einer gesicherten Umgebung zu analysieren, zu testen und eine modellgestützte Ressourcenplanung zu betreiben. Außerdem kann durch die Analyse wichtiger Kennzahlen die Performance des aktuellen Ressourcen- und Personalansatzes ausgewertet werden und die Versorgungsqualität bewertet werden. Das Modell dient als datengetriebene Entscheidungsunterstützung sowohl auf strategischer als auch auf operativer Planungsebene: Langfristig lassen sich Neuinvestitionen wie die Erweiterung der Fahrzeugflot-

te, Neueinstellung von Personal oder Eröffnung und Schließung von Rettungsstellen und Rettungswachen bewerten. Kurzfristig lassen sich Auswirkungen von (z. B. krankheitsbedingten) Ausfällen und temporären Änderungen der Nachfrage analysieren, um schon frühzeitig Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Durch die vom Modell generierten Handlungsvorschläge als Unterstützung für Entscheidungsträger lassen sich konkrete Lösungsansätze für auftretende Probleme ableiten. Darüber hinaus ermöglicht das Simulationstool die vergleichende Bewertung unterschiedlicher Einsatzstrategien, etwa hinsichtlich einer Priorisierung nach Dringlichkeit oder von Strategien zur (Re-)Disposition von Rettungsmitteln.

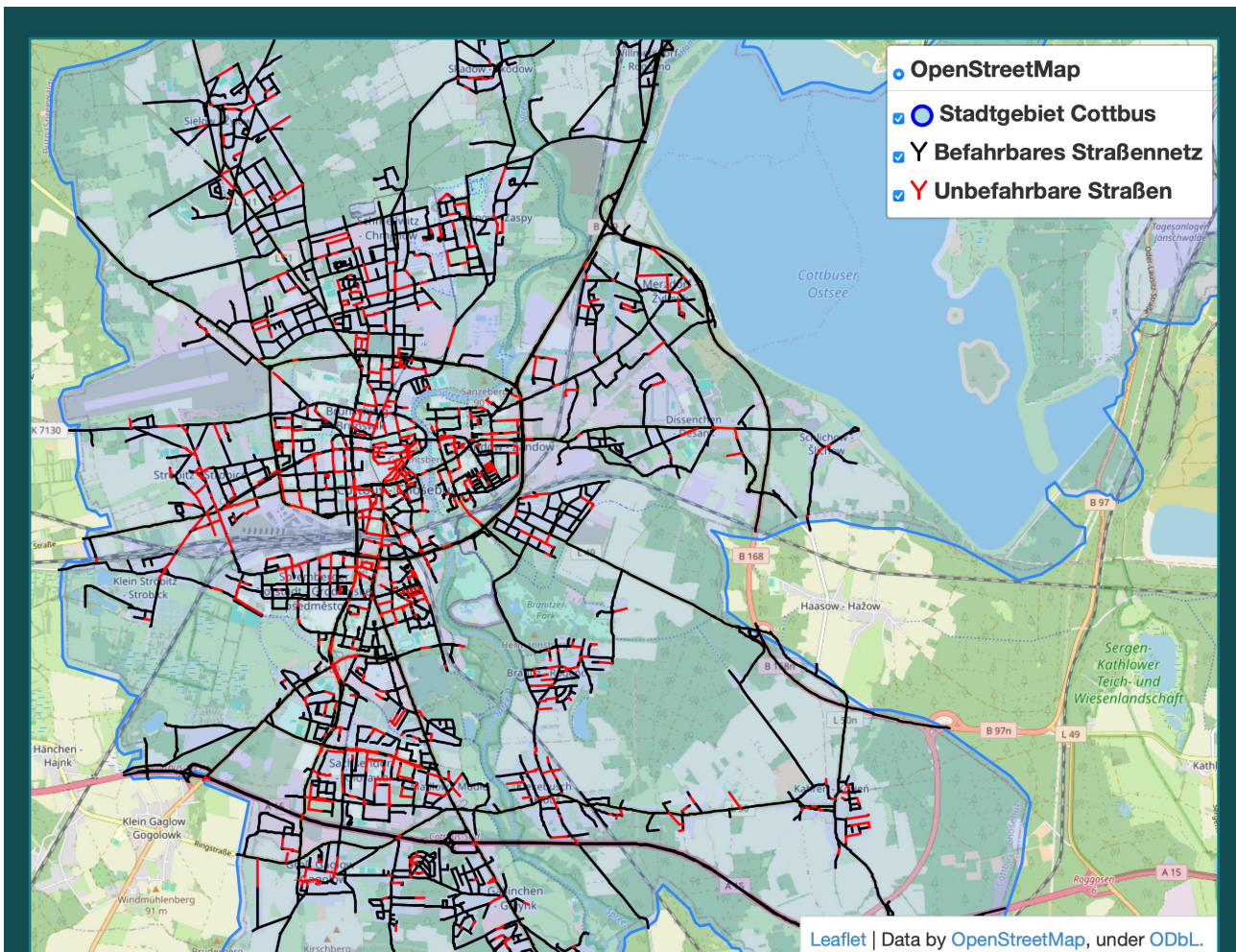


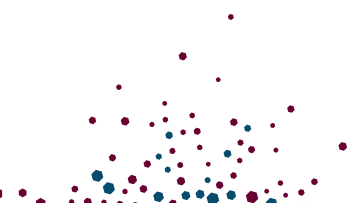
Abbildung 10: Das Straßennetz von Cottbus bei einem 100-jährigen Starkregenereignis (HQ100).

Die befahrbaren Straßen sind in schwarz und die unbefahrbaren Straßen in rot dargestellt, unter Annahme von einer Befahrbarkeit von Straßen bei einem Wasserstand unter 35cm oder einer Fließgeschwindigkeit von unter 1 m/s. Quelle: BTU

3.8.6 Ausblick und Weiterentwicklungsmöglichkeiten

Es bleibt anzumerken, dass das aktuelle Simulationsmodell Potential zur modularen Erweiterung bietet. So können etwa Themen wie die krankenhausseitige Auslastung, Einsatz von Innovationen (ehrenamtliche Ersthelfer, Drohneneinsatz für die Defibrillatorenzubringung, Telenotarzt, App-Notrufe) oder qualifizierte Krankentransporte mit ein wenig Mehraufwand integriert und analysiert werden.

Zur Überführung der im Projekt entwickelten Modelle und Analysen in die Praxis wurde ein Dashboard konzipiert, das Leitstellen und Planungsverantwortliche bei der operationalen Nutzung unterstützt. Ziel ist eine verständliche, lageorientierte Aufbereitung von Prognosen, Simulationsergebnissen und Handlungshinweisen, so dass Erkenntnisse nicht nur wissenschaftlich verfügbar sind, sondern im Arbeitsalltag als Entscheidungsgrundlage genutzt werden können. Das Dashboard dient somit als „Übersetzer“ zwischen Daten/KI und operativen Fragestellungen, etwa zur Ressourcenplanung, zur Vorbereitung besonderer Lagen und zur transparenten Bewertung von Maßnahmen.



3.9 Dashboard für die praktische Nutzung

3.9.1 Methodik / Workshopergebnisse

Die fachliche Ausgestaltung des Dashboards basiert auf den im Projekt AIRCIS durchgeführten Workshops und der systematischen Ableitung von Nutzerbedarfen entlang definierter Rollen (z. B. Disposition, Lagedienstführung, Leitstellenleitung/Planung). In den Workshops wurden zentrale Informationsbedarfe, typische Entscheidungslogiken, relevante Kennzahlen sowie bevorzugte Visualisierungsformen erhoben und iterativ verdichtet. Diese Ergebnisse wurden in priorisierte Use Cases und User Stories überführt (siehe Kapitel 2.5) und bilden die Grundlage für die Struktur des Dashboards, die Auswahl der Auswertungen und die Gestaltung der Interaktion, mit dem Anspruch, Praxisnähe, Nachvollziehbarkeit und Akzeptanz sicherzustellen.

3.9.2 Funktionsweise und GUI

Das Dashboard stellt Ergebnisse aus Simulation und Prognostik rollen- und aufgabengerecht bereit und ermöglicht die Exploration von Szenarien über klar definierte Parameter (z. B. Ressourcenverfügbarkeit, Einsatzdichte, Wetterlage, Zeiträume, räumliche Schwerpunkte). Die grafische Oberfläche fokussiert auf eine schnelle Lageeinschätzung mittels Karten-/Zeitreihen- und KPI-Ansichten sowie auf Drilldowns, um Ursachen, Engpässe und Wirkzusammenhänge nachvollziehbar zu machen. Ergänzend unterstützt die grafische Oberfläche (Graphical User Interface (GUI)) den Vergleich alternativer Maßnahmen (z. B. Vorhaltung/Verlagerung von Ressourcen) und stellt Annahmen, Datenbasis und Unsicherheiten transparent dar, um die Ergebnisse als belastbare Entscheidungsgrundlage nutzbar zu machen.

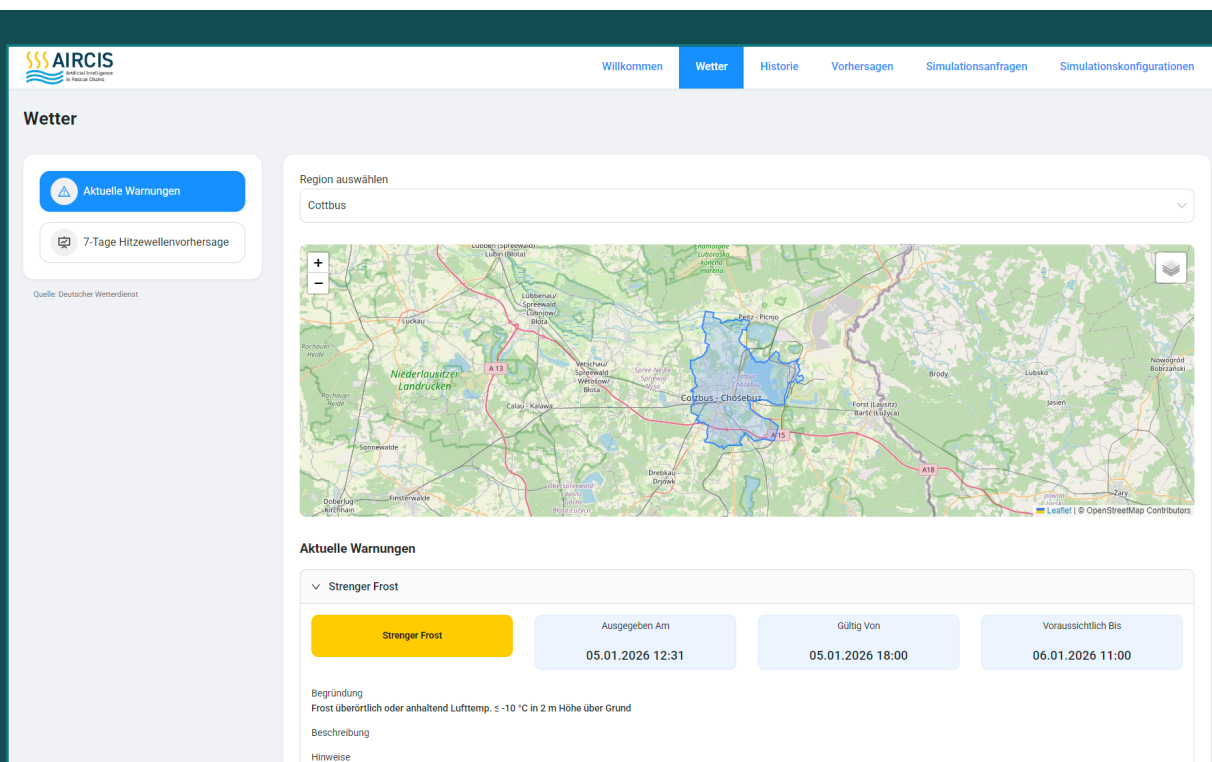


Abbildung 11: Anzeige der Wetterwarnungen in der GUI.

Abgebildet sind Wetterwarnungen vor strengem Frost und Glätte für Cottbus sowie die Zeiträume, in denen diese aktiv sind. Quelle: MOXI.

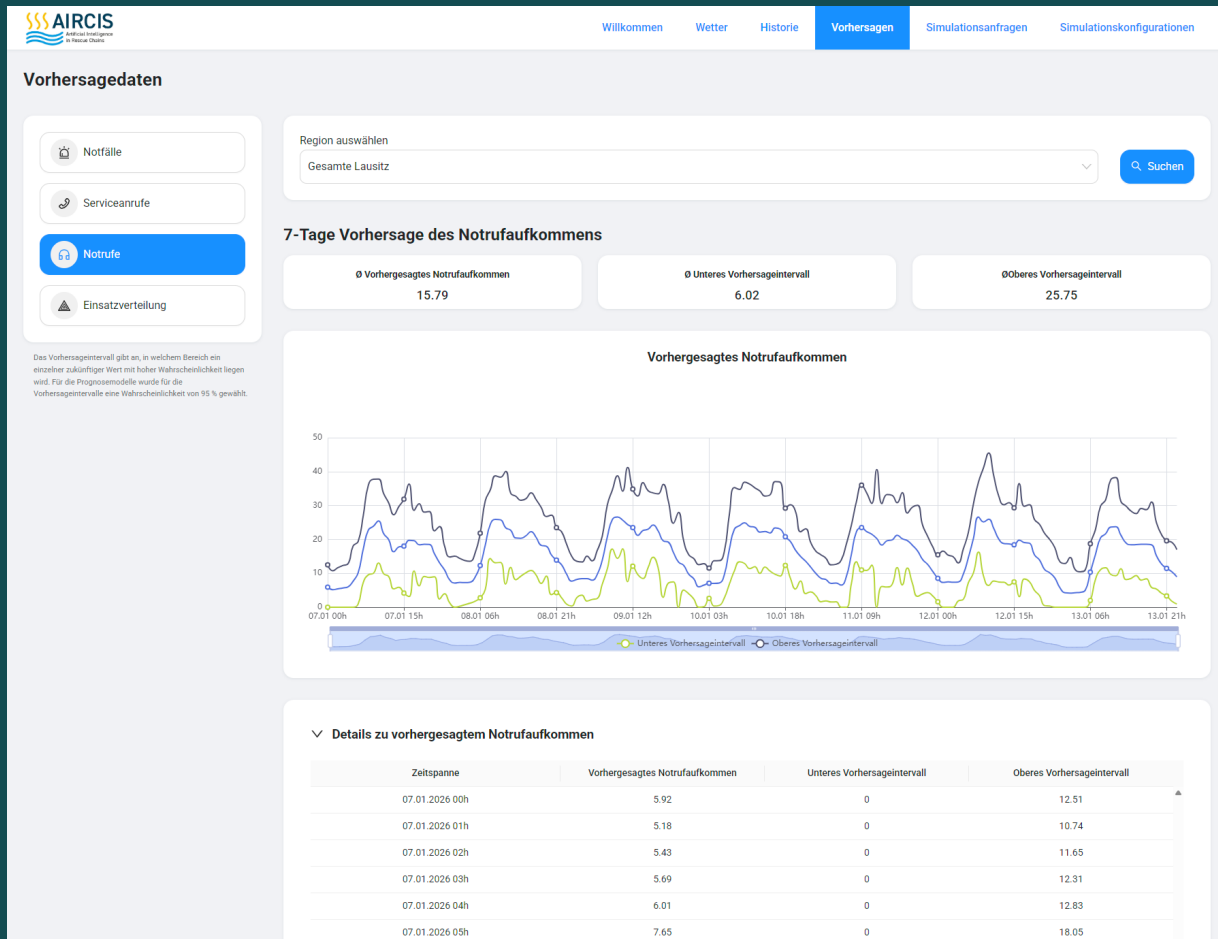


Abbildung 12: Vorhersage der Notrufe in der GUI.

Im oberen Graphen wird das stündliche Aufkommen als Zeitreihe über sieben Tage dargestellt, in der unteren Tabelle lassen sich die genauen stündlichen Werte ablesen. Quelle MOXI

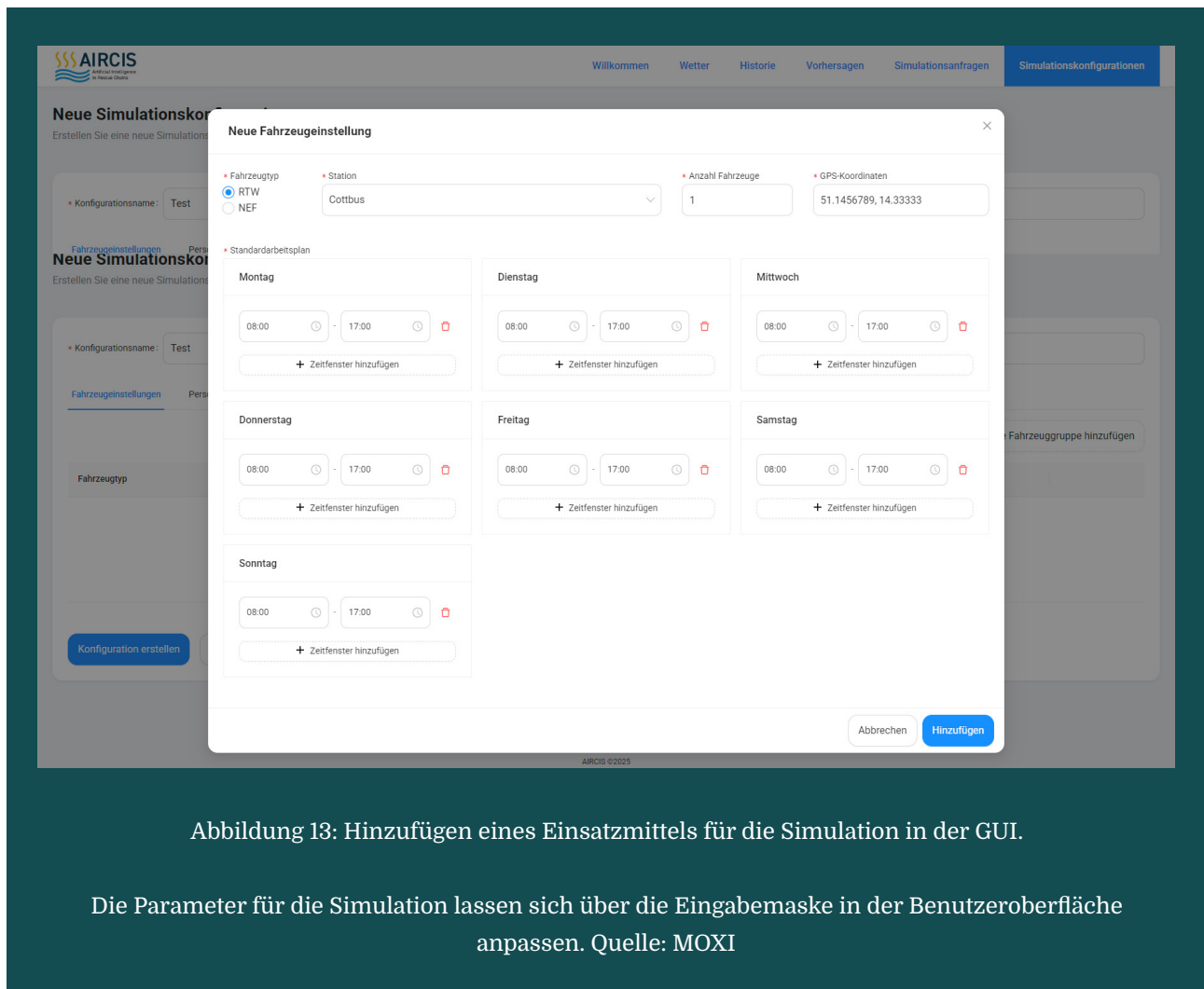


Abbildung 13: Hinzufügen eines Einsatzmittels für die Simulation in der GUI.

Die Parameter für die Simulation lassen sich über die Eingabemaske in der Benutzeroberfläche anpassen. Quelle: MOXI

3.9.3 Berücksichtigung weiterer Extrem(wetter)lagen

Neben den im Projekt betrachteten Wetterlagen ist das Dashboard so ausgelegt, dass weitere Extremereignisse und kombinierte Störlagen schrittweise integrierbar sind (z. B. Überflutungen, Sturm, Waldbrand, Schnee/Glatteis, Infrastrukturausfälle). Dies umfasst sowohl

die Erweiterung der Datenquellen und Schwellenwerte als auch die Abbildung lageabhängiger Auswirkungen auf Erreichbarkeiten, Einsatzaufkommen und Ressourcenbindung. Damit kann Extremwetter perspektivisch als regulärer Planungsparameter behandelt werden, einschließlich Frühwarnindikatoren, Lagebildern und simulationsgestützter Vorbereitung, um die Resilienz der Rettungskette nachhaltig zu stärken.



4 AUSBLICK

Die im Projekt AIRCIS entwickelten Anwendungsfälle, methodischen Ansätze und Analysen verdeutlichen das erhebliche Potenzial daten- und KI-gestützter Entscheidungsunterstützung für das Rettungswesen. Gleichzeitig zeigen die Projektergebnisse, dass technologische Innovationen allein nicht ausreichen, um die identifizierten Herausforderungen nachhaltig zu adressieren. Vielmehr bedarf es eines integrierten Ansatzes, der technische, organisatorische und regulatorische Aspekte gleichermaßen berücksichtigt.

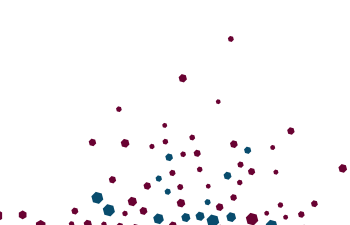
Aus technischer Sicht wird empfohlen, die im Projekt entwickelten Demonstratoren konsequent weiterzuentwickeln und in Richtung eines skalierbaren, modularen Systems zu überführen. Die simulations- und prognosebasierten Verfahren können einen signifikanten Mehrwert für Leitstellen darstellen. Für eine Überführung in den Regelbetrieb sind jedoch stabile Datenstandards, klar definierte Schnittstellen sowie belastbare Betriebs- und Wartungskonzepte erforderlich. Cloud-basierte Architekturen bieten hierbei die Möglichkeit, Rechen- und Analysekapazitäten flexibel bereitzustellen und eine überregionale Skalierung zu ermöglichen.

Organisatorisch wird deutlich, dass der Nutzen solcher Systeme maßgeblich von ihrer Einbettung in bestehende Leitstellenprozesse abhängt. Die im Projekt verfolgte rollenbasierte Ausgestaltung hat sich als zielführend erwiesen, um operative Abläufe nicht zu beeinträchtigen und gleichzeitig strategische und planerische Funktionen zu stärken. Für die weitere Umsetzung wird empfohlen, Leitstellen frühzeitig in die Weiterentwicklung

einzubinden und begleitende Change-Management- und Qualifizierungsmaßnahmen vorzusehen.

Im Bereich Extremwetter zeigt AIRCIS exemplarisch, dass die systematische Integration meteorologischer Daten in die Leitstellenarbeit einen wesentlichen Beitrag zur Resilienz der Daseinsvorsorge leisten kann. Für die Zukunft wird empfohlen, Extremwetter nicht als Sonderfall, sondern als regulären Planungsparameter zu behandeln. Dies umfasst sowohl die Weiterentwicklung von Frühwarn- und Prognosemodellen als auch die Berücksichtigung klimatischer Veränderungen bei der langfristigen Flotten-, Infrastruktur- und Personalplanung.

Auf politischer und regulatorischer Ebene unterstreichen die Projektergebnisse die Notwendigkeit einheitlicher Rahmenbedingungen. Unterschiedliche landesrechtliche Regelungen, heterogene Datenformate und fehlende Standards erschweren derzeit eine überregionale Nutzung und Skalierung innovativer Lösungen. Es wird empfohlen, nationale Mindeststandards für Leitstellendaten, Qualitätsmanagement und IT-Architekturen zu definieren und gezielt Förderprogramme für Konsolidierung, Skalierung und den Übergang vom Projekt- in den Regelbetrieb aufzusetzen. Insgesamt zeigt AIRCIS, dass die Kombination aus wissenschaftlicher Methodik, praxisnaher Anwendungsfallentwicklung und interdisziplinärer Zusammenarbeit einen tragfähigen Weg darstellt, um das Rettungswesen zukunftsfähig, resilient und effizient weiterzuentwickeln.



5 WIRTSCHAFTLICHE MACHBARKEIT

Die Übertragbarkeit des AIRCIS Systems auf andere Leitstellen und zusätzliche Anwendungsfälle ist eng mit der Frage nach der wirtschaftlichen Machbarkeit verknüpft. Neben technischen Aspekten wie Datenverfügbarkeit, Datenqualität und der Integration in bestehende Leitstellenprozesse müssen Aufwand und Nutzen in einem angemessenen Verhältnis stehen. Da sich die organisatorischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen und

die genutzte Software zwischen Leitstellen teils erheblich unterscheiden, ist eine vollständige Standardisierung nur begrenzt möglich. Vor diesem Hintergrund wurde das AIRCIS System von Beginn an mit dem Ziel entwickelt, eine modulare und anpassungsfähige Systemarchitektur bereitzustellen, die eine nutzerfreundliche Übertragung ermöglicht.

5.1 Kostenbetrachtung

Ein zentraler Faktor in der wirtschaftlichen Betrachtung ist die erstmalige Bereitstellung der für Prognose und Simulation notwendigen Daten. Die Prognosemodelle in AIRCIS basieren auf historischen Anruf- und Einsatzdaten, deren Umfang und Struktur je nach Region variieren. Um belastbare Vorhersagen zu ermöglichen, ist eine ausreichende Datenhistorie erforderlich. Im Projekt AIRCIS wurden Daten über einen Zeitraum von 10 Jahren genutzt, um saisonale Effekte, langfristige Trends und besondere Ereignisse abbilden zu können. Die Bereitstellung der Daten muss innerhalb der Leitstelle organisiert und ausgeführt werden. Der Aufwand ist unter anderem abhängig von den technischen Systemen, die in der Leitstelle eingesetzt werden und der jeweiligen Datenvorhaltung.

Neben den Anruf- und Einsatzdaten müssen weitere Informationen von der Leitstelle für die Simulation bereitgestellt werden. Dazu zählen organisatorische Abläufe, Vorhaltungen von Personal und Einsatzmitteln sowie deren räumliche Zuordnung und auch Begriffsdefinitionen. Diese Informationen sind für die simulationsbasierte Berechnung des Personal- und Ressourcenbedarfs notwendig. Dieser wirtschaftliche Aufwand entsteht vor allem durch die interne Aufbereitung und Bereitstellung der Daten seitens der Leitstelle. Diese Kosten fallen in der Regel einmalig an und hängen stark von der Datenqualität und den internen Prozessen der Leitstelle ab.

Ergänzend werden geografische Daten zu den Einsatzgebieten, u.a. zum Straßennetz, Standorten von relevanten Einrichtungen und Fahrzeiten benötigt. Diese stehen zum Teil öffentlich zur Verfügung, zum Teil müssen sie erst berechnet werden (bspw. die Fahrzeiten, siehe Kapitel 3.8.3). Abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall und der Region können zusätzliche Datenquellen erforderlich sein, beispielsweise historische und aktuelle Wetterdaten, Starkregengefahrenkarten, Hochwasserinformationen oder Hinweise zu regelmäßig stattfindenden Großveranstaltungen.

Je nach Datenverfügbarkeit entstehen somit weitere einmalige Kosten bei der Datenbeschaffung.

Die bereitgestellten Daten müssen in das AIRCIS System integriert und für das Training der Modelle aufbereitet werden. Hierdurch entstehen einmalige Kosten, die im Wesentlichen den Arbeitsaufwand für Datenintegration, Modellanpassung und initiales Training widerspiegeln. Je heterogener die Datenstrukturen und je spezieller die regionalen Anforderungen, desto höher ist der Anpassungsaufwand. Der Umfang der notwendigen Anpassungen hängt ebenfalls vom Anwendungsfall ab. Für vergleichsweise standardisierte Fragestellungen, etwa die Berücksichtigung von Temperatureffekten auf das Einsatzaufkommen, können öffentlich verfügbare Wetterdaten genutzt werden, was den Integrationsaufwand begrenzt. Komplexere Szenarien wie Starkregen oder Hochwasser erfordern hingegen die Einbindung detaillierter Gefahrenkarten und lokaler Risikodaten, sofern diese in geeigneter Form vorliegen. Entsprechend steigen hier die Kosten für Anpassung und Validierung der Modelle.

Neben den einmaligen Kosten entstehen laufende Aufwände für den Betrieb des Systems. Dazu zählen insbesondere Kosten für die Bereitstellung und den Betrieb einer Serverinfrastruktur, über die aktuelle oder nahezu in Echtzeit vorliegende Daten aus der Leitstelle verarbeitet werden können. Je nach technischer Ausgestaltung kann dies entweder lokal oder in einer gesicherten externen Umgebung erfolgen. Hinzu kommen laufende Kosten für Wartung, Weiterentwicklung und fachliche Betreuung des Systems. Diese umfassen unter anderem die Aktualisierung der Modelle, die Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen sowie den technischen Support. Aus wirtschaftlicher Sicht ist hierbei zu berücksichtigen, dass ein stabiler und kontinuierlich betreuter Betrieb Voraussetzung für den nachhaltigen Nutzen des Systems ist.



5.2 Nutzenbetrachtung

Der Nutzen von AIRCIS lässt sich nur eingeschränkt monetär quantifizieren, da viele Effekte qualitativer Natur sind. Zentrale Mehrwerte liegen in einer erhöhten Handlungssicherheit, einer verbesserten Planungsgrundlage und einer schnelleren Reaktionsfähigkeit in dynamischen Einsatzlagen. Durch belastbare Prognosen und simulationsgestützte Szenarien können Personal und Ressourcen bedarfsgerechter eingesetzt werden, was zu einer Entlastung der Leitstellenmitarbeitenden beiträgt und die Arbeitszufriedenheit sowie die Personalbindung unterstützen kann. Darüber hinaus trägt das System zur Qua-

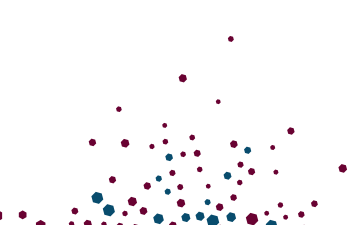
litätssicherung bei, indem Entscheidungen transparenter und nachvollziehbarer werden. Für die Bevölkerung ergibt sich ein indirekter Nutzen durch eine verbesserte Verfügbarkeit von Rettungsmitteln und eine insgesamt stabilere Versorgung, insbesondere in Ausnahmesituationen. Langfristig kann AIRCIS auch Investitionsentscheidungen unterstützen, etwa bei der Beschaffung neuer Einsatzmittel oder der Anpassung von Vorhaltestrukturen. Fehlkalkulationen und ineffiziente Ressourcenbindungen lassen sich dadurch reduzieren, was mittelbar auch wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt.

5.3 Finanzierungsmöglichkeiten

Die primären Kostenträger des Systems sind die Träger der Leitstellen. Um die wirtschaftliche Belastung zu begrenzen, bieten sich kooperative Modelle an. Die Entwicklung und Integration zusätzlicher Anwendungsfälle kann auf regionaler Ebene oder auf Ebene eines Bundeslandes gebündelt werden, sodass mehrere Leitstellen von gemeinsamen Anpassungen profitieren und die Kosten verteilt werden können. Darüber hinaus ist der Einsatz des Systems nicht auf integrierte Rettungsleitstellen beschränkt. Auch Verwaltungsstäbe und weitere Akteure des Katastrophenschutzes oder, mit entsprechenden Anpassungen, Polizeileitstellen können von den Funktionen profitieren. Eine solche Mehrfachnutzung erhöht die Wirtschaftlichkeit, da einmal entwickelte Module in un-

terschiedlichen organisatorischen Kontexten eingesetzt werden können.

Ergänzend ist eine Förderung aus Bundes- oder Landesmitteln sinnvoll, insbesondere für die Weiterentwicklung des Systems und die Integration neuer Anwendungsfälle. Förderprogramme können dazu beitragen, Innovationskosten abzufedern und den Zugang zu datenbasierten Planungsinstrumenten auch für kleinere oder strukturschwächere Träger zu ermöglichen. Insgesamt zeigt sich, dass die wirtschaftliche Machbarkeit von AIRCIS weniger von einzelnen Kostenpositionen als vielmehr von der Skalierbarkeit und der kooperativen Nutzung des Systems abhängt.



6 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

6.1 Empfehlungen an die Träger der Leitstellen

Die im Projekt AIRCIS gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen, dass Leitstellen als zentrale Knotenpunkte der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr künftig stärker als datengetriebene, skalierbare und vernetzte Systeme verstanden werden müssen. Um den steigenden Anforderungen durch demografische Entwicklungen, zunehmende Einsatzkomplexität und Extrem(wetter)ereignisse gerecht zu werden, ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

Konsolidierung von Strukturen und Ressourcen

Leitstellen-Träger sollten bestehende Organisations- und Betriebsstrukturen überprüfen und perspektivisch konsolidieren. Eine stärkere Bündelung von Leitstellenfunktionen – organisatorisch, technisch und datenbezogen – erhöht die Ausfallsicherheit, reduziert Redundanzen und schafft die Voraussetzung für überregionale Auswertungen, Prognosen und Lagebilder. Als Positivbeispiel kann an dieser Stelle die Struktur der Leitstellen in Brandenburg genannt werden, die organisatorisch und technisch gleich aufgebaut sind. Insbesondere KI-gestützte Anwendungen, wie sie im AIRCIS-Projekt erprobt wurden, entfalten ihren Mehrwert erst bei ausreichender Datenbasis und struktureller Vergleichbarkeit.

Skalierbare IT-Architekturen und Cloud-Nutzung

Die Transformation von lokal betriebenen Insellösungen hin zu modularen, skalierbaren IT-Architekturen ist essenziell. Cloud-basierte Ansätze ermöglichen es, Rechen- und Analysekapazitäten bedarfsgerecht zu skalieren, Spitzenlasten abzufedern und neue Funktionen (z. B. Prognose- oder Simulationsmodelle) effizient auszurollen. Leitstellen-Träger sollten Cloud-Technologien strategisch prüfen und – unter Berücksichtigung von Sicherheits- und Datenschutzanforderungen – schrittweise in ihre IT-Landschaft integrieren.

Standardisierung von Daten und Schnittstellen

AIRCIS hat gezeigt, dass vorhandene Leitstellendaten in ihrer Struktur, Qualität und Semantik stark variieren. Leitstellen-Träger sollten aktiv auf die Einführung einheitlicher Datenmodelle, standardisierter Schnittstellen und klar definierter Ereignis- und Einsatzkategorien hinwirken. Nur eine langfristige (mindestens 3 Jahre) Datenvorhaltung und Datenverfügbarkeit ermöglicht den Einsatz innovativer Systeme, die auf diesen Daten basieren. Dies ist eine zentrale Voraussetzung für interoperable Systeme, herstellerübergreifende Lösungen und den produktiven Einsatz von KI-basierten Entscheidungsunterstützungen.

Systematisches Qualitätsmanagement etablieren

Ein professionelles, kontinuierliches Qualitätsmanagement sollte als Kernaufgabe der Leitstellen verankert werden. Neben klassischen Kennzahlen (z. B. Annahmezeiten, Dispositionszeiten) sind auch Datenqualität, Prozessstabilität und Ergebnisqualität systematisch zu erfassen. In Kombination mit datenanalytischen Verfahren können daraus belastbare Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet und die operative Leistungsfähigkeit nachhaltig gesteigert werden.

Übergang von prototypischen Demonstratoren in den Regelbetrieb stärker adressieren

Neben der technischen Machbarkeit ist ein belastbares Betriebs- und Verantwortungsmodell erforderlich, das Zuständigkeiten für Datenqualität, Modellpflege, Systembetrieb und Entscheidungsfreigaben klar regelt. Ebenso sollten Leitstellen-Träger frühzeitig Prozesse für Updates, Tests und Rückfalloptionen etablieren, um die kontinuierliche Weiterentwicklung daten- und KI-gestützter Module ohne Beeinträchtigung des laufenden Betriebs zu ermöglichen.

6.2 Empfehlungen an die Politik / Regulierer

Die Ergebnisse des AIRCIS-Projektes machen deutlich, dass viele der notwendigen Weiterentwicklungen nicht allein auf Ebene einzelner Leitstellen realisierbar sind. Es bedarf klarer politischer und regulatorischer Rahmenbedingungen, um Skalierung, Standardisierung und Innovation systematisch zu ermöglichen.

Schaffung einheitlicher rechtlicher Rahmenbedingungen

Politik und Regulierer sollten bundesweit harmonisierte Vorgaben für Leitstellen-IT, Datenverarbeitung und Datennutzung schaffen. Unterschiedliche landesrechtliche



Regelungen erschweren derzeit Konsolidierung, Datenaustausch und den Einsatz moderner Technologien. Einheitliche Mindeststandards würden die Interoperabilität fördern und Investitionssicherheit schaffen. Hierzu gehören zwingend auch Experimentierklauseln.

Förderung von Konsolidierung und Skalierung

Gezielte Förderprogramme sollten nicht nur einzelne Pilotanwendungen, sondern explizit auch strukturelle Konsolidierungs- und Skalierungsmaßnahmen adressieren. Dazu zählen der Zusammenschluss von Leitstellen, der Aufbau gemeinsamer IT-Plattformen sowie die Einführung cloudbasierter Dienste. Förderlogiken sollten den Übergang von Projekt- zu Regelbetrieb unterstützen.

Standardisierung von Daten und Qualitätsanforderungen auf nationaler Ebene

Es wird empfohlen, nationale Standards für Leitstellendaten, Schnittstellen und Qualitätskennzahlen zu definieren und verbindlich einzuführen. Dies umfasst sowohl technische Datenstandards als auch Vorgaben zum Qualitätsmanagement. Solche Standards sind Voraussetzung für belastbare KI-Anwendungen, nationale Lagebilder und evidenzbasierte Steuerungsentscheidungen.

Regulatorische Leitplanken für Cloud und KI im sicherheitskritischen Bereich

Politik und Regulierer sollten klare, praxisnahe Leitlinien für den Einsatz von Cloud- und KI-Technologien für Rettungsdienst, Feuerwehr und Katastrophenschutz formulieren. Diese müssen Datenschutz, IT-Sicherheit und Resilienz berücksichtigen, zugleich aber Innovation nicht behindern. Insbesondere der Rahmen zur Nutzung von KI als Entscheidungsgrundlage für Maßnahmen in Ausnahmesituationen muss klar geregelt werden, damit die Systeme tatsächlich einen Mehrwert erbringen können. Insbesondere muss hierbei die rechtskonforme Implementierung von KI-Technologien berücksichtigt werden. Der EU AI Act schafft einen unumgänglichen und verbindlichen Rahmen für den Einsatz von KI. Der Betreiber einer KI-Lösung trägt zukünftig die Verantwortung für den sicheren und rechtskonformen Einsatz der Anwendung. Dabei ist die Einstufung der Anwendung zu berücksichtigen, als auch die Pflichten die mit der Anwendung verbunden sind. Neben der Anwendung nach Gebrauchsanweisung muss eine wirksame menschliche

Aufsicht, Datenqualität, Protokollierung, Überwachung, Informationspflicht und Meldepflicht von den Behörden als Betreiber sichergestellt werden. Diese Mindestanforderungen an die Modellgovernance und Nachvollziehbarkeit von Systemen sollten nicht nur EU-weit, sondern auch rechtlich für die Leitstellenbetreiber verankert sein. Rechtssicherheit ist eine zentrale Voraussetzung dafür, dass Leitstellen-Träger neue Technologien verantwortungsvoll einsetzen können.

Qualifizierung und Change-Management unterstützen

Die digitale Transformation von Leitstellen erfordert neue Kompetenzen. Bund und Länder sollten Programme zur Aus- und Weiterbildung von Leitstellenpersonal sowie zur organisatorischen Begleitung von Transformationsprozessen fördern. Nur so kann sichergestellt werden, dass technologische Innovationen dauerhaft wirksam in den Betrieb integriert werden.

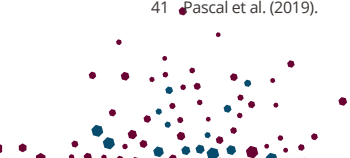
Schaffung einer bundesweiten Datengrundlage zu Extremwetterauswirkungen auf Morbidität und Mortalität

Eine bundesweite Zusammenstellung und Auswertung von Diagnosedaten aus Notaufnahmen ermöglicht das Monitoring von Extremwetterauswirkungen. Als Best Practice Beispiel dient Frankreich, dort werden Daten aus fast 90 % der Notaufnahmen tagesaktuell ausgewertet und mit Wetterdaten kombiniert, so dass es möglich ist, den Einfluss von Hitzewellen nachzuvollziehen⁴¹. Für Deutschland existieren bisher nur regionale Versuche, diese Zahlen zu erfassen.

Förderung anwendungsorientierter Forschungsprojekte und Überführung in die Praxis

Die Ergebnisse aus Forschungsvorhaben wie AIRCIS sollten in weiteren Projekten erweitert und geschärft werden. Dies kann durch ergänzende anwendungsorientierte Forschungsprojekte mit Fokus auf Überführung in die Praxis erfolgen. Ein besonderer Fokus sollte dabei auf der Vernetzung kompatibler Vorhaben gesetzt werden, damit vielversprechende Ansätze nicht verloren gehen. Durch Ergänzungen in den Rettungsdienstgesetzen der Länder, können diese Werkzeuge zu einem Standard definiert werden und die Versorgungssicherheit der Bevölkerung gewährleisten.

41 Pascal et al. (2019).



7 LITERATUR

Andrae, Silvio/Pobuda, Patrick (2021). Agentenbasierte Modellierung. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Chen, Tianqi/Guestrin, Carlos (2016): XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>

Deutscher Wetterdienst (2024): Lange Zeitreihen der Hitze- und Kältewellen (Blasendiagramm). RCC Node-CM Produktbeschreibung. https://www.dwd.de/DE/leistungen/rcccm/int/descriptions/hkw/pds_hkwlr_de.pdf [18.12.2025].

Deutscher Wetterdienst/Extremwetterkongress (2025): Was wir über das Extremwetter in Deutschland wissen. Offenbach am Main, Deutschland.

Ghada, Wael /Estrella, Nicole/Pfoerringer, Dominik/Kanz, Karl-Georg /Bogner-Flatz, Viktoria /Ankerst, Donna P./Menzel, Annette (2021): Effects of weather, air pollution and Oktoberfest on ambulance-transported emergency department admissions in Munich, Germany. *Science of The Total Environment*, 755(2). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143772> [05.01.2026].

an der Heiden, Matthias/Buchholz, Udo/Uphoff, Helmut (2019): Schätzung der Zahl hitzebedingter Sterbefälle und Betrachtung der Exzess-Mortalität. *Epidemiologisches Bulletin*, 23/2019. Robert Koch-Institut. Berlin und Hessen.

Ke, Guolin/Meng, Qi/Finley, Thomas/Wang, Taifeng/Chen, Wei/Ma, Weidong/Ye, Qiwei/Liu, Tie-Yan (2017): LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. In: Proceedings of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3815895> [07.01.2026].

Kyselý, Jan (2004): Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. *International Journal of Biometeorology*, 49(2), 91–97. <https://doi.org/10.1007/s00484-004-0218-2> [07.01.2026].

Kyselý, Jan/Kříž, Bohumír (2008): Decreased impacts of the 2003 heat waves on mortality in the Czech Republic: an improved response? *International Journal of Biometeorology*, 52(8), 733–745. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0166-3> [07.01.2026].

Landtag Rheinland-Pfalz (2024): Untersuchungsausschuss 18/1 „Flutkatastrophe“. 02.08.2024. Drucksache 18/10000.

Lundberg, Scott/Lee, Su-In (2017): A unified approach to interpreting model predictions. In Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. 4768–4777. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3295222.3295230> [07.01.2026].

Lass, Wiebke/Reusswig, Fritz/Walther, Carsten/Niebuhr, Dea/Schürheck, Theresa/Grewe, Henny A. (2022): Hitzeaktionsplan für das Land Brandenburg (HAP BB). Gutachten. Potsdam.

Mason, Hannah M./King, Jemma C./Peden, Amy E./Watt, Kerrianne/Bosley, Emma/Fitzgerald, Gerard/Nairn, John/Miller, Lauren/Mandalios, Nicole/Franklin, Richard C. (2023): Determining the impact of heatwaves on emer-

gency ambulance calls in Queensland: A Retrospective Population-Based Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(6), 4875. <https://doi.org/10.3390/ijerph20064875> [07.01.2026].

Osczevski, Randall/Bluestein, Maurice (2005): THE NEW WIND CHILL EQUIVALENT TEMPERATURE CHART. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(10), 1453–1458. <https://doi.org/10.1175/bams-86-10-1453> [12.01.2026].

Pascal, Mathilde/Laaidi, Karine/Lagarigue, Robin/Le Tetre, Alain (2019): Le système d'alerte canicule et santé. *Actualité et dossier en santé publique (adsp)*, 106. <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/adsp?clef=168> [09.01.2026].

Rothfus, Lans P. (1990): The Heat Index “Equation” (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index). NWS Southern Region Headquarters. Technical Attachment SR 90-23. https://www.weather.gov/media/ffc/ta_ht-indx.PDF [16.09.2024].

Rubinstein, Reuven Y./Kroese, Dirk P. (2016): Simulation and the Monte Carlo method. John Wiley & Sons.

Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen (2023): Resilienz im Gesundheitswesen: Wege zur Bewältigung künftiger Krisen. Gutachten 2023. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft. Berlin.

Salgado, Mauricio/Gilbert, Nigel (2013): Agent based modelling. In: Teo, Timothy (Hrsg.) *Handbook of quantitative methods for educational research*. Rotterdam: SensePublishers. S.247–265.

Shi, Xingjian /Chen, Zhouong /Wang, Hao/Yeung, Dit-Yan/Wong, Wai-kin/Woo, Wang-chun (2015): Convolutional LSTM Network: a machine learning approach for precipitation nowcasting. In Proceedings of the 29th International Conference on Neural Information Processing Systems. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2969239.2969329> [07.01.2026].

Spearman (1904): The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159> [12.01.2026].

Virtanen, Paul/ Gommers, Ralf/Oliphant, Travis E./et al. (2020): SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods* 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2> [12.01.2026].

Wang, Junyu/Nikolaou, Nikolaos/an der Heiden, Matthias/Irrgang, Christopher (2024): High-resolution modeling and projection of heat-related mortality in Germany under climate change. *Commun Med* 4, 206. <https://doi.org/10.1038/s43856-024-00643-3> [05.01.2026].

Winklmayr, Claudia/Muthers, Stefan/Niemann, Hildegard/Mücke, Hans-Guido/ an der Heiden, Matthias (2022): Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. *Dtsch Arztebl Int*, 119. <https://di.aerzteblatt.de/int/archive/article/225956> [05.01.2026].

Zhou, Zhengyi/Matteson, David S. (2015): Predicting Ambulance Demand: a Spatio-Temporal Kernel Approach. In KDD '15: Proceedings of the 21th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2297–2303. <https://doi.org/10.1145/2783258.2788570> [07.01.2026].

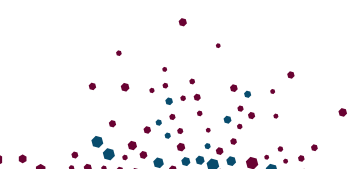


8 AUTORENVERZEICHNIS

Joachim von Beesten	Geschäftsführer Björn Steiger Stiftung
Dr. Nahid Akhtar	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet für Ingenieurmathematik und Numerik der Optimierung, BTU Cottbus-Senftenberg
Dr. Jesse Beisegel	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Ingenieurmathematik und Numerik der Optimierung, BTU Cottbus-Senftenberg
Hanna Denecke	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Brandenburgischen Institut für Gesellschaft und Sicherheit
Felix Dohmeier	Gründer und Geschäftsführer MOXI
Prof. Dr. Armin Fügenschuh	Leiter des Fachgebietes Ingenieurmathematik und Numerik der Optimierung, BTU Cottbus-Senftenberg
Sai Jithendra Gangireddy	Consultant Data Science bei der Industrianlagen-Betriebsgesellschaft mbH
Thorsten Hansler	Programmanager Künstliche Intelligenz in der Leitstelle bei der Industrianlagen-Betriebsgesellschaft mbH
Franz Kroll	SB Systemtechnik/ Detektion u. Reaktion, IRLS Lausitz/Stadt Cottbus
Mario Müller	Leiter IT-Strategie & Informationssicherheit, IRLS Lausitz/Stadt Cottbus
Prof. Dr. Tim Stuchtey	Geschäftsführender Direktor Brandenburgisches Institut für Gesellschaft und Sicherheit
Sascha Zell	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Ingenieurmathematik und Numerik der Optimierung, BTU Cottbus-Senftenberg
Ingolf Zellmann	SBL Leitstelle/Rettungsdienst/Kat.-Schutz, IRLS Lausitz/Stadt Cottbus

9 ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Systemarchitektur für eine Realisierung im Live-Betrieb.	17
Abbildung 2:	Entwicklerdashboard der IABG.	18
Abbildung 3:	Prognose des Notrufaufkommens während starken Gewitterwarnungen.	24
Abbildung 4:	Prognose des Einsatzaufkommens.	24
Abbildung 5:	Visualisierung der Rettungskette.	28
Abbildung 6:	Visualisierung der Anrufverarbeitung innerhalb einer Leitstelle.	29
Abbildung 7:	Das Zustandsdiagramm des Agenten RTW.	30
Abbildung 8:	Darstellung der Geschwindigkeitsschätzung in Abhängigkeit der Fahrdistanz.	31
Abbildung 9:	Ausschnitt der Wasserstände im Stadtgebiet Cottbus nach einem simulierten 100-jährigen Starkregenereignis.	34
Abbildung 10:	Das Straßennetz von Cottbus bei einem 100-jährigen Starkregenereignis (HQ100).	35
Abbildung 11:	Anzeige der Wetterwarnungen in der GUI.	36
Abbildung 12:	Vorhersage der Notrufe in der GUI.	37
Abbildung 13:	Hinzufügen eines Einsatzmittels für die Simulation in der GUI.	38
Tabelle 1:	Die Eingabedaten des Simulationsmodells.	31
Tabelle 2:	Die Ausgabedaten des Simulationsmodells.	32



10 VERBUNDPARTNER DES AIRCIS PROJEKTES

10.1 Björn Steiger Stiftung



Die Björn Steiger Stiftung bR (BSS) aus Winnenden setzt sich mehr als 55 Jahren für die Verbesserung des Rettungswesens und der Notfallhilfe ein. Meilensteine sind die Einführung der 110/112, der Aufbau der zivilen Luftrettung sowie eine bundesweite, mit allen Leitstellen vernetzte Notfall-App. Die BSS übernahm im Projekt die Rolle des Konsortialführers und brachte ihre ausgewiesene Domänenexpertise im Bereich Rettungswesen, Notfallmedizin sowie Katastrophenschutz ein.

Ein weiterer Schwerpunkt der aktuellen Stiftungsarbeit ist die weitergehende Digitalisierung des Rettungswesens in Deutschland sowie die Beteiligung an nationalen und internationalen innovativen Entwicklungen zur Verbesserung des Rettungs- und Notfallwesens. Die Stiftung fungiert als Think Tank, um innovative Ideen und Lösungen für Herausforderungen im Gesundheitssystem zu realisieren und mit Hilfe von Netzwerken zu skalieren.

10.2 BIGS



Das Brandenburgische Institut für Gesellschaft und Sicherheit gGmbH (BIGS) ist ein unabhängiges, überparteiliches und nicht-gewinnorientiertes Institut in Potsdam, das zu ökonomischen und gesellschaftswissenschaftlichen Fragestellungen rund um das Thema zivile Sicherheit arbeitet. Insbesondere geht es darum, Politikstrategien zu entwickeln, mit deren Hilfe der Konflikt in dem Beziehungsdreieck zwischen Freiheit, Sicherheit und sozialer Gerechtigkeit überwunden werden kann.

Das BIGS sieht seinem Selbstverständnis entsprechend seine Aufgaben im Bereich der Forschung, Lehre und dem Wissenstransfer im Bereich der zivilen Sicherheitsforschung. In der Forschung wird dies über einzelne Forschungsprojekte verwirklicht, so hat das BIGS unter anderem an den beiden mFund-Machbarkeitsstudien AI-Rescue und Power2-Rescue sowie an dem Forschungsprojekt RescueFly mitgewirkt.

10.3 BTU Cottbus-Senftenberg



Das Fachgebiet für Ingenieurmathematik und Numerik der Optimierung an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) wurde 2017 mit der Berufung von Prof. Dr. Armin Fügenschuh eingerichtet. Das Fachgebiet beschäftigt sich mit der Lösung praxisnaher Optimierungsprobleme unter Einsatz von mathematischen Optimierungsmethoden, hauptsächlich im Bereich der gemischt-ganzzahligen und nicht-linearen numerischen Optimierung sowie durch Simulationsmethoden, und hat durch Forschungsprojekte und Kooperationen mit Partnern aus Wissenschaft, Industrie und Wirtschaft Erfahrung im Umgang mit anspruchsvollen Fragestellungen aus unterschiedlichen Branchen (u.a. Gesundheit, Logistik, Unbemannte Luftfahrtsysteme, Additive Fertigung). Im Verbund übernahm die BTU die wissenschaftliche Konzeption und Umsetzung einer Simulationsumgebung unter Einsatz von state-of-the-art Verfahren der Simulation, KI und Optimierung sowie datengetriebenen Verfahren für die computergestützte Abbildung eines Rettungsdienstsystems bzw. Emergency Medical Service (EMS) Systems.



10.4 IABG



Die Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG) mit Stammsitz in Ottobrunn ist ein führendes europäisches Technologie-Unternehmen mit Kernkompetenzen in den Bereichen Analyse, Simulation & Test und Anlagenbetrieb. Der Bereich InfoKom bietet seit vielen Jahren unabhängige und produktneutrale Beratung sowie technisch-wissenschaftliche Dienstleistungen im Bereich Leitstellen & Lagezentren an und unterstützt Leitstellenbetreiber bei der Planung, Weiterentwicklung und Optimierung von Leitstellen und deren Systemen. Im Rahmen der Beratung werden auch neue, zukunftsorientierte Technologien, wie z.B. künstliche Intelligenz berücksichtigt und der Einsatz für Leitstellen und Lagezentren evaluiert. Die IABG ist Projektpartner in zahlreichen Sicherheitsforschungsprojekten auf nationaler und europäischer Ebene.

10.5 MOXI



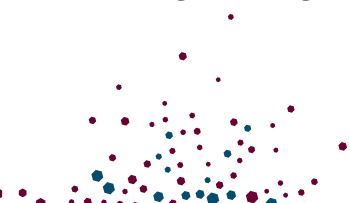
MOXI bringt in das Verbundprojekt AIRCIS die Perspektive eines praxiserprobten, digitalen Systems für die Koordination von Transport- und Einsatzprozessen im Gesundheitswesen ein. Als Technologiepartner liegt der Schwerpunkt von MOXI auf der Übersetzung operativer Anforderungen in skalierbare, produktionsnahe Softwarekomponenten sowie auf der nutzerzentrierten Gestaltung von Anwendungen, die im Leitstellenumfeld und in angrenzenden Organisationen tatsächlich einsetzbar sind. Im Projektkontext umfasst dies insbesondere die Mitwirkung an der Anforderungsdefinition (Use Cases, User Stories, Lastenheft), die Konzeption eines Dashboards für die praktische Nutzung sowie die Einordnung von Daten- und Schnittstellenanforderungen, damit Ergebnisse aus Prognose und Simulation verständlich, nachvollziehbar und handlungsleitend in den Arbeitsalltag überführt werden können.

Darüber hinaus adressiert MOXI die Voraussetzungen für eine spätere Überführung der Projektergebnisse in den Regelbetrieb: Interoperabilität über standardisierte Schnittstellen, konsistente Datenmodelle und klare Rollen- und Rechtekonzepte, verbunden mit Anforderungen an Datenschutz, IT-Sicherheit und resiliente Betriebsmodelle. Mit dieser Kombination aus Domänenverständnis, Produktentwicklung und Implementierungserfahrung leistet MOXI einen Beitrag dazu, dass die im Projekt entwickelten Konzepte nicht nur wissenschaftlich fundiert sind, sondern als robuste, skalierbare Bausteine zur Stärkung der Rettungskette – auch unter Extremwetterbedingungen – weiterentwickelt und perspektivisch in realen Einsatzumgebungen genutzt werden können.

10.6 IRLS Lausitz



Die Stadt Cottbus mit der Integrierten Regionallageleitstelle Lausitz (IRLS Lausitz) versorgt die Landkreise Dahme-Spreewald, Elbe-Elster, Oberspreewald-Lausitz, Spree-Neiße und die kreisfreie Stadt Cottbus mit der Notrufnummer 112 und koordiniert Rettungs- und Feuerwehr- sowie Katastropheneinsätze. Die IRLS Lausitz unterstützt Projekte zur Digitalisierung im Rettungswesen und Brandbekämpfung.





BRANDENBURGISCHES INSTITUT
für GESELLSCHAFT und SICHERHEIT

Das Brandenburgische Institut für Gesellschaft und Sicherheit ist ein unabhängiges, überparteiliches und nicht-gewinnorientiertes Institut in Potsdam mit der Mission, Brücken zwischen Theorie und Praxis zu bauen, um durch seinen multi- und interdisziplinären Ansatz einen Beitrag zur Stärkung der zivilen Sicherheit zu leisten.

Located in Potsdam, the Brandenburg Institute for Society and Security is an independent, non-partisan, non-profit organization with an inter- and multidisciplinary approach with a mission to close the gap between academia and practice in civil security.