

ZEBBRA

Eventbasierte **Z**ustandserfassung und -bewertung
von **B**rücken basierend auf **R**adar-Sensorik in
Kombination mit intelligenten **A**lgorithmen





Abschlussbericht

ZEBBRA

Eventbasierte **Z**ustandserfassung und -bewertung von **B**rücken basierend auf **R**adar-Sensorik in Kombination mit intelligenten **A**lgorithmen

Förderkennzeichen: 13N14710
Laufzeit: 01.08.2018 - 31.12.2021

Kurzzusammenfassung

Das ZEBBRA-Verbundvorhaben zielt darauf ab, einen berührungslosen, mobilen und innovativen Mess- und Methodenansatz zur Überwachung und Analyse von Brückenbauwerken zu erreichen. Dieser innovative Messansatz umfasst u. a. den Einsatz von Ground-Based Interferometric Radar (GBR). Während Fahrzeuge die Brücke befahren, kann mit dem vorgeschlagenen Messansatz das Verhalten der Brücke unter Belastung erfasst werden. Konventionelle Sensoren dienen als Vergleich zu den GBR-Messungen. Basierend auf den berührungslos gewonnenen Daten wird eine zuverlässige Einschätzung des Brückenzustandes bezüglich z. B. eines individuellen Lastverformungsverhaltens gegeben. Verfahren des maschinellen Lernens werden genutzt, um aus den transformierten GBR-Daten Informationen zum Brückenzustand sowie der Belastung auf der Brücke durch eine automatische Fahrzeugerkennung und -detektion zu extrahieren. Mit den in diesem Vorhaben gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich erste Schritte hin zu einer berührungslosen Überwachung der strukturellen Integrität einer Brücke während des Betriebs und einer gleichzeitigen Detektion hinsichtlich des sich verändernden Brückenverhaltens unter Fahrzeugbelastung über einen längeren Zeitraum.

Koordinatorin:

Sina Keller

Autoren:

Matthias Arnold, Mareike Hoyer und André Dittrich

Schlüsselwörter:

Brücke; Brückenüberwachung; Non-invasives, mobiles Infrastruktur-Monitoring; Gb-InSAR; Dehnungssensoren; neuronale Netze; Deep Learning; Maschinelles Lernen; Datenmanagement; Zustandsbewertung; Tragsicherheit; Standsicherheit; Langlebigkeit; Brückenerhaltung; Schadensdedikation; Dimensionsreduzierte Analyse; Eventerkennung; Kritische Infrastrukturen; Lasttest.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren/-innen.

Projektteilnehmende - FKZ

Karlsruher Institut of Technology (KIT) - 13N14708
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF)
Prof. Dr. Stefan Hinz
Dr. Sina Keller
Chris Michel

Karlsruher Institut of Technology (KIT) - 13N14709
Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI)
Dr. Hubert B. Keller
apl. Prof. Dr. Jörg Matthes
Dr. Markus Vogelbacher
Andreas Döring

ci-tec GmbH - 13N14710
Dr. André Dittrich
Dr. Mareike Hoyer
Matthias Arnold

Büro für Strukturmechanik (BFSM) - 13N14711
Dr. Jacob Müller
Oliver Schneider

Assoziierter Partner

Staatliches Bauamt Bamberg

Danksagung

Für die Unterstützung des Verbundprojekts und die Bereitstellung der Fördermittel danken wir dem Bundesministerium für Bildung und Wirtschaft (BMBWF) sowie dem Projektträger VDI Technologiezentrum (VDI TZ). Weiterhin danken wir dem Staatlichen Bauamt Bamberg und dem Tiefbauamt Karlsruhe für die Kooperation und ihre Technologieoffenheit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	x
Abkürzungsverzeichnis	xi
I. Kurze Darstellung des ZEBBRA-Verbundprojektes	1
1. Aufgabenstellung und Zielsetzung	2
2. Voraussetzungen, Stand der Technik und Wissenschaft	4
2.1. Voraussetzungen an den ausgewählten Brückenbauwerken	4
2.2. Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.2.1. Brückenüberwachung mit konventioneller Sensorik	7
2.2.2. Brückenüberwachung mit bodengestützter Radarsensorik	8
2.2.3. Merkmale zur Zustandsbewertung basierend auf dem Verschiebungssignal von Einzelüberfahrten	10
3. Verbundpartner	13
4. Planung und Ablauf	15
5. Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse	18
6. Veröffentlichungen im ZEBBRA-Verbundvorhaben	24
7. Literatur Teil I	29
II. Eingehende Darstellung	30
8. Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem ZEBBRA-Verbundprojekt	31
8.1. AP 5 - Sensorschnittstellen	31
8.1.1. AP 5.1 - Integration der neuen Radarsensoren in die Sensorplattform	31
8.1.2. AP 5.2 - Integration der Daten einer meteorologischen Messstation	32
8.2. AP 6 - Erarbeitung des Demonstrators	34
8.2.1. AP 6.1 - Erarbeitung des wissensbasierten Softwaresystems	34
8.2.2. AP 6.2 -Erarbeitung und Entwurf einer Benutzerschnittstelle zur Visualisierung	38
8.3. AP 9 - Fertigstellung & Validierung	44

8.4.	Voraussichtliche Nutzung der ZEBBRA-Ergebnisse	47
8.5.	Umgang mit den im ZEBBRA-Verbundvorhaben aufgenommenen Forschungsdaten	48
9.	Literatur Teil II	49

Abbildungsverzeichnis

2.1. Mödlitz aus Sicht des Unmanned Aerial Vehicle (UAV) (links) und des GBR (rechts).	5
2.2. Dietersdorf aus Sicht des UAV (links) und des GBR (rechts).	6
2.3. Pulverhausstraße in der Übersicht (links) und aus Sicht des GBR (rechts).	6
2.4. Callenberger Straße in der Übersicht (links) und von unten (rechts).	7
2.5. GBR-Messprinzip zur Bestimmung des dreidimensionalen Verschiebungsvektors ΔP_T aus den Messungen in Blickrichtung Δd	10
5.1. Schema des Querschnitts BW 5733 591 in Mödlitz mit überwachten Messstellen.	19
5.2. Finite-Element-Methode (FEM)-Modell der Brücke an der Callenberger Straße	20
5.3. FEM-Modell der Dietersdorfer Brücke.	20
5.4. Übersicht zur Verteilung der Fahrzeuge für die numerische Simulation.	21
5.5. Ablauf der Prozessierung von GBR-Daten. Die Verschiebung in Line Of Sight (LOS) wird über mehrere Schritte zur Verschiebung im kartesischen Koordinatensystem (3D) verarbeitet.	21
5.6. Ablauf der datengetriebenen Eventdetektion bzw. -klassifikation basierend auf GBR-Daten.	22
5.7. Visualisierungswerkzeug zur Vor-Ort-Analyse von vergangenen und aktuellen GBR-Messungen.	23
8.1. Struktur des Image by Interferometric Survey (IBIS)-Systems. Die Integration der Radardaten beginnt bei den *.gbd-Dateien.	32
8.2. Module der implementierten Wetterstation	33
8.3. Messergebnisse der Wetterstation von der ersten UAV-gestützten Messkampagne in Dietersdorf.	34
8.4. Übersicht zu den Datenbanken und den daraus entwickelten Algorithmen.	35
8.5. Beispielevent extrahiert aus der Datenbank.	36
8.6. Ergebnisse der Event-Erkennung	38
8.7. Mehrfachevent in Dietersdorf und die dazugehörigen GBR-Verschiebungsdaten	39
8.8. Grundlegender Aufbau des Demonstrators.	40
8.9. Übersicht und Abfolge der im Backend des Demonstrators genutzten Auswertungsalgorithmen.	40
8.10. Project -Tab des Demonstrators.	41
8.11. Radar 2 -Tab des Demonstrators.	42
8.12. Overview -Tab des Demonstrators.	43
8.13. Evaluation -Tab des Demonstrators.	44
8.14. Histogramm über die maximale Durchbiegung	45

8.15. Visualisierung des Verhältnissen zwischen der maximalen Verschiebung einer Überfahrt und dem Fahrzeuggewicht.	46
8.16. Vergleich der extrahierten Verschiebung mit KBA-Daten	47

Tabellenverzeichnis

2.1. Überblick zu den ausgewählten Brücken im ZEBBRA-Verbundvorhaben. . .	5
4.1. Übersicht Arbeitspakete ZEBBRA	15
4.2. Übersicht zu den detaillierten Ergebnissen im Teil II des jeweiligen Verbundpartners.	17
5.1. Übersicht der Messdauer des GBR pro Brücke.	19
8.1. Übersicht über die erstellten Referenzdatensätze	35

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket	15
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Wirtschaft	v
BFSM	Büro für Strukturmechanik	13
CDIL	Differenz der Einflusslinie	11
CCDIL	Differenz der zweimalig abgeleiteten Einflusslinie	11
CRDIL	Differenz der einmalig abgeleiteten Einflusslinie	11
ci-tec	ci-tec GmbH	13
CNN	Convolutional Neural Network	37
DMS	Dehnungsmessstreifen	2
DL	Deep Learning	20
FastGBSAR	Fast Ground-based Synthetic Aperture Radar	8
FBG	Fiber Bragg Grating	11
FEM	Finite-Element-Methode	11
FFT	Fast Fouriertransformation	
GBR	Ground-Based Interferometric Radar	2
GUI	Graphical User Interface	32
IBIS	Image by Interferometric Survey	8
IDS	Ingegneria Dei Sistemi	31
IMIL	Integral der Dehnungseinflusslinie an unterschiedlichen Referenzpunkten entlang des Balkens	11
KBA	Kraftfahrbundesamt	44
KDE	Kernel Density Estimation	45
KIT-IAI	Institut für Automation und angewandte Informatik am Karlsruher Institut für Technologie	13
KIT-IPF	Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung am Karlsruher Institut für Technologie	13
LOS	Line Of Sight	21
ML	Machine Learning	20
MIE	Maximum der Dehnungseinflusslinie an mehreren Referenzpunkten entlang des Balkens	11
OMA	Operational Modal Analysis	10
PKW	Personenkraftwagen	35
RF	Random Forest	37
RPi	Raspberry Pi	32
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis	20
SODM	Zweite Ableitung der Dehnungseinflusslinie an unterschiedlichen Referenzpunkten entlang des Balkens	11
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol	
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	2

VDI TZ	VDI Technologiezentrum	v
ZEBBRA	Eventbasierte Zustandserfassung und -bewertung von Brücken basierend auf Radar-Sensorik in Kombination mit intelligenten Algorithmen .	15

Teil I.

Kurze Darstellung des ZEBBRA-Verbundprojektes*

*Teil I ist für den Bericht jedes Verbundpartners einheitlich.

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das ZEBBRA-Verbundvorhaben fand im Rahmen des Programms „Forschung für die zivile Sicherheit 2012 bis 2017“ im Themenfeld „Zivile Sicherheit – Verkehrsinfrastruktur“ statt. Im Fokus des Vorhabens standen Brückenbauwerke als neuralgische Bestandteile der Verkehrsinfrastruktur. Sie sind systemkritisch und relevant für die Aufrechterhaltung und Funktionsfähigkeit von Gesellschaft und Wirtschaft (siehe z. B. [4]). Zudem spielen Brücken als vulnerable Knoten des Straßennetzwerkes eine große Rolle im Kontext von Logistik und Individualverkehr.

Die circa 25 700 deutschen Bahnbrücken weisen ein Durchschnittsalter von 75 Jahren und die 39 700 Brücken im deutschen Bundesfernstraßennetzwerk ein Durchschnittsalter von 40 Jahren auf. Die Hälfte aller Bahnbrücken ist älter als 100 Jahre. Das zunehmende Alter der Brückenbauwerke wird von einem erheblichen Sanierungsrückstau begleitet. Hinzu kommt eine massive Zunahme des Schwerlastverkehrs auf der Straße. Diese Kombination führt zu einer Zustandsdegradation der Brückenbauwerke, die in einem frühen Stadium nur schwer detektiert und deren Ausmaß kaum abgeschätzt werden kann. Dieser Aspekt verringert die Sicherheit der Bauwerke sowie die Integrität der entsprechenden Verkehrsnetze.

Die ZEBBRA-Verbundpartner haben es sich zur Aufgabe gemacht, die Herausforderung der frühen Detektion der Standsicherheit von Brückenbauwerken mit einem neuen Ansatz basierend auf berührungslosen Messsensoren und intelligenten Algorithmen zu adressieren. Das Verbundvorhaben zielte darauf ab, einen berührungslosen, mobilen und innovativen Mess- und Methodenansatz zu erarbeiten, der den Brückenzustand während des laufenden Betriebs erfasst, analysiert und bewertet. Dieser innovative Messansatz umfasst u. a. den Einsatz von bodenbasierter Radarinterferometrie bzw. Ground-Based Interferometric Radar (GBR). Während verschiedene Fahrzeuge die überwachten Brücken überquerten, wurden mit den GBR-Geräten Verschiebungen mehrerer Brückenpunkte gemessen. Dies bedeutet, dass alle Messungen während des normalen Verkehrs stattfanden. Gleichzeitig wurden konventionelle Sensoren wie z. B. Dehnungsmessstreifen (DMS) verbaut, die als Vergleichssensoren dienten. Basierend auf den GBR-Daten sollte später eine zuverlässige Einschätzung des Brückenzustandes in Bezug auf u. a. ein entsprechendes und individuelles Lastverformungsverhalten des Brückenbauwerks erfolgen. Des Weiteren dienten die gewonnenen Daten als Eingangsdaten für Verfahren des maschinellen Lernens zur automatischen Fahrzeugerkennung und -klassifikation. Dies bedeutet, dass mit berührungslos gewonnenen GBR-Daten ohne weitere Zusatzinformationen auf unterschiedliche Belastungen durch diverse Fahrzeugtypen geschlossen werden kann. Um dieses Ziel erreichen zu können, fanden hierzu während einiger Messungen Befliegungen mit einem unbemannten Luftfahrzeug bzw. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) an den Brücken statt. Die aufgenommenen, hochauflösenden Videosequenzen dienten nach entsprechender Verarbeitung als

Referenzdaten, wann sich Fahrzeuge auf der Brücke befanden und um was für Fahrzeuge es sich handelte.

Die im ZEBBRA-Verbundvorhaben gewonnenen Erkenntnisse und das erarbeitete Konzept wurden in einem Demonstrator umgesetzt. Somit ergibt sich die Möglichkeit, berührungslos die Funktionsfähigkeit der Brücken während des Betriebs vor Ort zu überwachen und mögliche Veränderungen im Brückenverhalten zu detektieren.

2. Voraussetzungen, Stand der Technik und Wissenschaft

2.1. Voraussetzungen an den ausgewählten Brückenbauwerken

Die Voraussetzungen zur Überwachung und Bemessung der Brückenbauwerke im ZEBBRA-Verbundvorhaben umfassten u. a. Herausforderungen durch Messungen während des laufenden Betriebs oder an verschiedenen Bauwerken unter unterschiedlichen Gegebenheiten. Zudem sollten die Bauwerke sich insbesondere durch ihre Eigenschaften und die Umgebung der Standorte unterscheiden. Ziel war es, eine ausreichend große Anzahl von Brückenbauwerken in situ in Augenschein zu nehmen und zu evaluieren. Neben dem Einsatz konventioneller Sensorik sollte das Bauwerk den Ansprüchen eines GBR-Einsatzes genügen. Vom assoziierten Partner Staatliches Bauamt Bamberg wurden Brücken mit verschiedenen Bauarten (Stahlbeton, Spannbeton) und Spannweiten als Auswahl zur Verfügung gestellt. Zur Bewertung der Eignung für GBR-Messungen sind die verschiedenen, nachfolgenden Kriterien und Randbedingungen aufgestellt worden:

- Gesamtlänge: 25 m bis 100 m
- Höhe des Lichtraums: 4 m bis 20 m
- Anzahl Felder: 1 bis 3
- „übliche“ Stahl- oder Spannbetonkonstruktion / repräsentativ
- gute Zugänglichkeit / Infrastruktur, falls möglich, vorhanden
- Schadenshistorie bzw. Brückenalter von untergeordnetem Interesse

Als Ergebnis fasst Tabelle 2.1 die für die Überwachung im Rahmen des Verbundprojektes ausgewählten Brücken und ihre wesentlichen Eigenschaften zusammen.

Mödlitz bei Coburg Das einfeldrige Brückenbauwerk der Bundesstraße 303 über die Kreisstraße 29 in Mödlitz ist als längs vorgespannter zweistegiger Plattenbalkenquerschnitt errichtet und stammt aus dem Jahr 2005. Der vertikale Lastabtrag in die Unterbauten erfolgt über Elastomerlager. Das Bauwerk hat eine Gesamtlänge von 26,36 m, eine Breite von 11,69 m und eine Brückenfläche von 308 m². Der Kreuzungswinkel des schiefwinkligen Brückenbauwerks beträgt 59,70 gon.

Dieses Bauwerk ist z. B. Bestandteil der Beispielsammlung, da diese zweistegige, schiefwinklige, auf Elastomerlagern gestützte Brücke hinreichende Überschneidungsmerkmale

Tabelle 2.1.: Überblick zu den ausgewählten Brücken im ZEBBRA-Verbundvorhaben.
 * kennzeichnet die Brücken, an denen GBR-Messungen stattfanden. Folgende Abkürzungen wurden verwendet: KA – Karlsruhe (BW) und CO – Coburg (Bayern).

Brücke	Typ	Felder	Länge in m	Breite in m	Spuren	Eigenfrequenz in Hz
Pulverhaus* (KA)	Spannbeton	4	116,62	14,65	3	3,42
Mödlitz* (CO)	Spannbeton	1	26,36	11,69	2	3,75
Dietersdorf* (CO)	Spannbeton	2	57,00	13,60	2	3,66
Callenberger (CO)	Spannbeton	3	100,00	9,48	2	2,01



Abbildung 2.1.: Mödlitz aus Sicht des UAV (links) und des GBR (rechts).

mit zahlreichen anderen Bauwerken bietet. Das wird durch die ausgeprägte Schiefwinkligkeit unterstrichen. Das Bauwerk ist in einem guten Zustand (Zustandsnote 2,0) und hinsichtlich einer etwaigen Übertragung der Monitoringkonzeption auf eher kleinere Brücken repräsentativ.

Eine besondere Herausforderung im Vergleich zu den anderen untersuchten Brücken bildete der Auto- und LKW-Verkehr auf der darunter liegenden Kreisstraße, da es zu kurzzeitigen Störungen während der Messung mit dem GBR kam (siehe hierzu Abbildung 2.5). Diese Störungen mussten erkannt und die Messdaten entsprechend bereinigt werden. Die Beschreibung zur Herangehensweise bei der Störungsentfernung findet sich im Detail in den Ergebnissen des Projektpartners KIT-IPF. Weiter wurde eine ausreichende Signalreflexion für das GBR nur mittels zusätzlicher Reflektoren erreicht, die in direkter Nähe zur konventionellen Sensorik installiert wurden. Der Flug mittels UAV war bei Einhaltung eines rechtlich vorgegebenen Mindestabstands möglich.

Dietersdorf bei Coburg Die zweifeldrige Spannbetonkonstruktion hat eine Gesamtlänge von 57 m und eine Spur pro Fahrtrichtung (siehe Abbildung 2.2). Als Teil der Bundesstraße 303 überspannt die Brücke einen Wirtschaftsweg. Die Strukturen an der Unterseite der Brücke eignen sich zur Reflexion des GBR-Signals, jedoch wurden auch hier zusätzlich Reflektoren installiert. Dadurch wurde ein Messaufbau ermöglicht, der In-



Abbildung 2.2.: Dietersdorf aus Sicht des UAV (links) und des GBR (rechts).



Abbildung 2.3.: Pulverhausstraße in der Übersicht (links) und aus Sicht des GBR (rechts).

terferenzen zwischen den GBR verhindert. Der Flug mittels UAV war bei Einhaltung des Mindestabstands möglich.

Pulverhausstraße in Karlsruhe Die Brücke in Karlsruhe hat vier Felder mit einer Gesamtlänge von 116 m und drei Spuren mit gleicher Fahrtrichtung, wobei eine Abbiegespur enthalten ist (siehe Abbildung 2.3). Das Verkehrsaufkommen ist wesentlich höher als bei den Brücken in Coburg, da die Brücke als Teil der Landstraße 605 die Autobahn 5 mit der Innenstadt und der Bundesstraße 10 verbindet. Im Fokus standen hier einerseits Testmessungen des GBR zu weiterentwickelten Messaufbauten und -verfahren. Andererseits wurden auch Messungen zur Bestimmung von Eigenmoden vorgenommen, für die mehrere Reflektoren installiert wurden. Da Befliegungen mittels UAV rechtlich nicht möglich sind, wurde während der Messung eine mobile Kamera benutzt, um den Verkehr auf der Brücke zu beobachten.

Callenberger Straße in Coburg Die Brücke über die Callenberger Straße und die Lauter in Coburg (BW 5731 534) ist eine innerstädtische, circa 100 m lange Brücke, die aus drei voneinander getrennten Teilbauwerken besteht (Überbau Ost, Überbau West



Abbildung 2.4.: Callenberger Straße in der Übersicht (links) und von unten (rechts).

und Auffahrtsrampe, siehe Abbildung 2.4). Der Überbau besteht aus einem zweifeldrigen Durchlaufträger, der längs und teilweise quer vorgespannt ist.

Es wurde auf GBR-Messungen verzichtet, da die Brücke sehr viele Ähnlichkeiten hinsichtlich Bauweise und Verkehrsaufkommen zur Brücke in der Pulverhausstraße besitzt. Gleichzeitig schränken die viel befahrene Straße unter der Brücke und der Fluss die möglichen Messaufbauten ein. UAV-Befliegungen waren wegen rechtlicher Einschränkungen ebenfalls nicht möglich. Für GBR-Messungen wurde deshalb der Fokus auf die Brücke in der Pulverhausstraße gelegt, um möglichst viele unterschiedliche Messaufbauten testen zu können.

2.2. Stand der Wissenschaft und Technik

2.2.1. Brückenüberwachung mit konventioneller Sensorik

Für die Brückenüberwachung mit konventioneller Sensorik werden an ausgewählten und geeigneten Tragwerken z. B. DMS und Beschleunigungssensoren direkt angebracht [14]. Weiterhin werden diese Signale mit Messergebnissen der Umgebung (Temperatur, Video, etc.) ergänzt. In Messkampagnen werden mit diesen Sensoren unter Hinzunahme von entsprechenden Signalverstärkern und Datenrekordern Daten aufgezeichnet. Diese Daten dienen als Kalibrierung für Berechnungsmodelle hinsichtlich des Schwingungs- und Verformungsverhaltens sowie als Benchmark der GBR-Messungen.

Entscheidende Voraussetzung ist, dass die Dehnungen an den Stahlbetonbrücken im Messbereich von $0,1 \mu\text{Strain}$ bis $30 \mu\text{Strain}$ ausreichend genau, wiederholbar und sicher gemessen werden können. Für die Erfassung dieser vergleichsweise kleinen Dehnungsgrößen werden hohe Anforderungen an die Messtechnik im Hinblick auf Präzision und geringes Rauschverhalten gestellt und der Einsatz spezieller Schaltungen und Datenlogger erforderlich. Die an der Brücke erfassten Messdaten müssen dann in verschiedene Zustandsgrößen umgerechnet werden. So können beispielsweise Beschleunigungsgrößen in Schwing-

geschwindigkeiten umgerechnet werden, um somit – in Grenzen – Bauteilverformungen abzuleiten. Schließlich werden Kenngrößen erarbeitet, die dann u. a. zur Zustandserfassung der Brücke herangezogen werden können (siehe auch Abschnitt 2.2.3) [37].

Für einfache Tragsysteme sind die Umrechnungen vergleichsweise einfach zu bewerkstelligen. An Brückenbauwerken ist dies jedoch äußerst komplex und von zahlreichen teilweise arbiträren Randbedingungen geprägt. Unter Berücksichtigung der erwartbaren Messgenauigkeit muss es als Herausforderung verstanden werden, hinreichende Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu erreichen. Systematische und zufällige Messungenauigkeiten sind nicht vermeidbar und treten in der Messkette aufgrund verschiedener Ursachen auf. Ursächlich hierfür können das Rauschen in der Signalkette, ein so genannter „Drift“ oder die Temperaturempfindlichkeit der Sensoren sowie die Verkabelung sein. Diese Effekte müssen entsprechend erfasst und kompensiert werden oder aus den Zeitreihendaten herausgefiltert werden.

Der Einsatz der konventionellen Sensorik hat sich im Bauwesen bislang außerhalb des Laborbetriebes aufgrund der hohen Robustheitsanforderungen für dauerhaft installierte Sensoren und der damit verbundenen Kosten nicht durchsetzen können. Weiterhin führen systemimmanente Tragwerksreserven bis zu einem Faktor von circa 4 zu sehr „sicheren“ aber, zumindest teilweise, überdimensionierten Bauwerken. Investitionen in Messtechnik sind daher eher selten. Frühere Anwendungen zeigen, dass die Sensoren nur mit höherem Aufwand vor den bauwerksüblichen Außenumweltbedingungen geschützt werden können. Zudem ist der Ausfall von Sensoren und Komponenten nicht ausgeschlossen.

Als Referenz für die GBR-Messungen ist die Installation konventioneller Sensoren am Bauwerk dennoch geeignet, um detaillierte und orts aufgelöste Vergleichsinformationen über das Schwingungsverhalten der Brücken zu liefern (siehe Abschnitt 2.2.2). Für den GBR-Einsatz entfallen die kostenintensive und verkehrsstörende Zugangstechnik, welche für die Montage der konventionellen Sensoren oder auch für deren Austausch und Wartung erforderlich wird.

2.2.2. Brückenüberwachung mit bodengestützter Radarsensorik

Die Überwachung von Bauwerken wird bereits seit Anfang der 2000er Jahre mit GBR durchgeführt. Erste Testmessungen umfassen sowohl statische Belastungstests [31, 33] als auch dynamische Schwingungsmessungen an Brücken [12, 30]. Neben der Brückenüberwachung eignet sich das GBR ebenfalls zur Überwachung anderer Bauwerke, wie beispielsweise Windenergieanlagen [32], Häuser [1] oder Türme [28]. Die zunächst verwendeten Prototypen wurden weiterentwickelt zum kommerziellen Messsystem Image by Interferometric Survey (IBIS) (IDS Pisa, Italien). Metasensing (Niederlande) entwickelte ein weiteres kommerzielles System, Fast Ground-based Synthetic Aperture Radar (FastGBSAR), welches vergleichbare Messeigenschaften besitzt.

Beide Systeme funktionieren nach dem gleichem Messprinzip: Es wird eine elektromagnetische Welle mit einer Frequenz von 17,2 GHz ausgesendet, die an Strukturen der Brückenunterseite reflektiert wird. Über die Signallaufzeit können verschiedene Rückstreuer an der

Brücke unterschieden werden. Die minimale Entfernung zwischen zwei Rückstreuern ist abhängig von der Bandbreite der Frequenzmodulation, wobei mit den angegebenen Messsystemen eine Entfernungsauflösung von 0,75 m bei einer Bandbreite von 200 MHz erreicht werden. Die Verschiebung der Rückstreuer wird innerhalb einer Entfernungszelle durch differentielle Messung der Phase bestimmt. Da die Phasenänderung sehr genau bestimmbar ist, wird in der Regel eine Präzision der Verschiebungsmessung kleiner als 0,1 mm erreicht. Durch Wiederholung der Frequenzmodulation ist eine maximale Abtastrate von 200 Hz (IBIS) bzw. 4000 Hz (FastGBSAR) möglich [13, 34].

Eine gleichzeitige Messung von Verschiebungen an mehreren Rückstreuern einer Brücke wird über den in Abbildung 2.5 gezeigten Messaufbau erreicht. Das GBR misst hierbei die Verschiebungen Δd immer nur in Blickrichtung, d.h. zur Bestimmung der vertikalen Verschiebung ist eine Projektion notwendig. Der Einfluss der beiden anderen Komponenten des dreidimensionalen Vektors ΔP_T ist im regulären Messaufbau nicht bestimmbar und wurde bisher meist als vernachlässigbar angesehen. Diesen Nachteil beheben theoretische [18] und experimentelle Untersuchungen [25], die darauf abzielen, mehr als eine Komponente zu bestimmen. Mehrere Studien zeigen die erfolgreiche Anwendung des vorgeschlagenen Prinzips an unterschiedlichen Brücken. Beispielsweise benutzen Miccinesi, Beni und Pieraccini [21] mehrere Sende-/Empfangsantennen, um zusätzliche Messungen aus unterschiedlichen Positionen zu generieren. Ein ähnliches Prinzip verfolgen Olaszek, Świercz und Boscagli [29] mit zwei separaten Messgeräten an unterschiedlichen Positionen. Neben der Projektion sind weitere Einflüsse auf die Messung zu beachten. Störungen durch Fahrzeuge oder Personen im Signalweg können beispielsweise die weitere Prozessierung erschweren oder verfälschen, weswegen eine Detektion und Entfernung dieser Störungen notwendig ist. Neben den dynamischen Störungen können auch statische Rückstreuer die Messung beeinflussen. Diese Einflüsse sind aus den komplexwertigen Messdaten schätzbar [35]. Weiter werden atmosphärenbedingte Effekte bei der Messung mit Referenzpunkten oder empirischen Gleichungen aus gemessenen Atmosphärenwerten entfernt [19]. In mehreren Studien wurde gezeigt, dass GBR eine Alternative zur konventionellen Sensorik bildet. Beispielsweise können Eigenfrequenzen und Eigenmoden aus den Verschiebungsmessungen bestimmt werden [20]. Vergleiche zu Beschleunigungssensoren oder fernerkundlicher Sensorik bestätigen die Validität der Messungen [10, 27].

Im Projekt ZEBBRA wurden sowohl das Messsystem IBIS als auch FastGBSAR eingesetzt. Die gleichzeitige Messung mit zwei Geräten war mit IBIS allerdings nur bei bestimmten Messaufbauten möglich, da Interferenzen zwischen den Sensoren auftraten. Aus diesem Grund wurde eine modifizierte Version von FastGBSAR verwendet, dessen Sensoren zeitlich synchronisiert sind, wodurch keine Interferenzen auftreten. Durch die Modifikation ist die Bestimmung von zwei Komponenten des Verschiebungsvektors mit wesentlich flexibleren Messaufbauten möglich. Neben der zweidimensionalen Messung wurde insbesondere auch die Prozessierung der Daten und die Entfernung von äußeren Einflüssen weiter entwickelt. Beispielsweise wurde eine höhere Genauigkeit bei der Schätzung des statischen Einflusses von Rückstreuern erreicht. Auch die generelle Angabe von Unsicherheiten für Messungen sowie für Prozessierungsschritte wurde entwickelt. Weitergehende Betrachtungen sind dem KIT-IPF Teilvorhaben detailliert zu entnehmen.

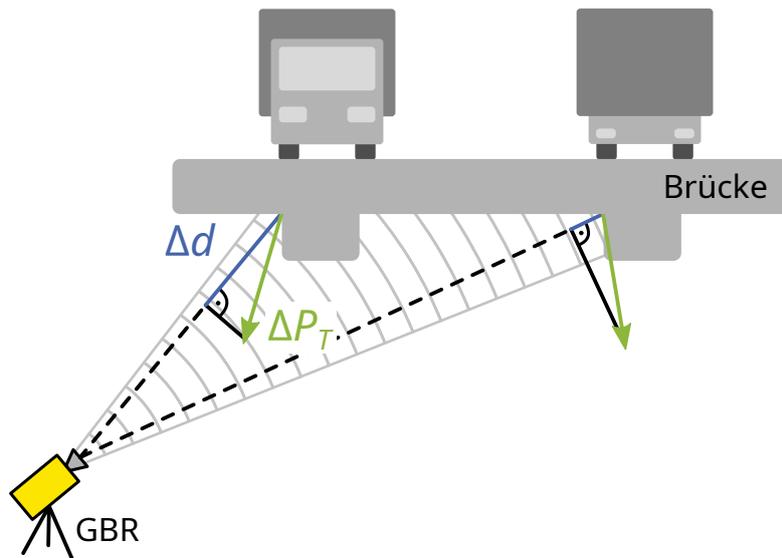


Abbildung 2.5.: GBR-Messprinzip zur Bestimmung des dreidimensionalen Verschiebungsvektors ΔP_T aus den Messungen in Blickrichtung Δd .

2.2.3. Merkmale zur Zustandsbewertung basierend auf dem Verschiebungssignal von Einzelüberfahrten

Zur Untersuchung des Brückenzustandes wird bisher in der Literatur nicht auf GBR-Daten zurückgegriffen. Die Datengrundlagen bilden in diesem Kontext vielmehr Messungen mit konventioneller Sensorik wie DMS, Beschleunigungssensoren oder faseroptische Sensoren. Aus dem gewonnenen Signal der genannten Sensoren werden vorwiegend Merkmale basierend auf den modalen Parametern untersucht [11]. Die modalen Parameter beschreiben das charakteristische Schwingungsverhalten eines Bauwerks [5]. Wenn sich die Eigenschaften des Bauwerks ändern, z. B. durch einen Schaden, dann ändert sich das charakteristische Schwingungsverhalten des Bauwerks und somit die modalen Parameter, die das Bauwerk beschreiben. Zu den modalen Parametern zählen die Eigenfrequenz f , die Eigenform ϕ (Verschiebung) und die Krümmung der Eigenform (Krümmungseigenform) ϕ'' sowie die Dämpfung. Bei Brücken wird meist die Operational Modal Analysis (OMA) verwendet, um die modalen Parameter zu berechnen. Dazu wird in der Regel nicht eine Überfahrt eines Einzelfahrzeugs betrachtet, sondern ein Zeitfenster in dem mehrere Fahrzeuge die Brücke überqueren. Bei der OMA ist die Anregung (z. B. durch Wind, Wasser, Fußgänger, Autos) unbekannt und die modalen Parameter werden aus der Betriebslast bestimmt. Die Nachteile der modalen Parameter sind eine Anfälligkeit gegenüber Umwelteinflüssen und eine geringe Schadenssensitivität. Außerdem ist für die Bestimmung der Eigenformen ein sehr dichtes Sensornetz erforderlich. Die Krümmungseigenform wird durch zweimalige Ableitung der Eigenform (Verschiebung) in Längsrichtung berechnet. Allerdings wird durch die Ableitung das Rauschen deutlich verstärkt. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Sensoren in der Regel fest installiert werden müssen (siehe hierzu Abschnitt 2.2.1).

Im Gegensatz zu den modalen Parametern als Merkmale für die Zustandsbewertung, die auf Mehrfachevents basieren, können Merkmale zur Zustandsbewertung basierend auf Überfahrten einzelner Fahrzeuge entnommen werden. Beispielsweise werden in jüngerer Zeit vermehrt Merkmale basierend auf der Einflusslinie untersucht, für die im Folgen-

den eine Übersicht gegeben wird. Die Einflusslinie ist die charakteristische Dehnung oder Verschiebung an einem festen Sensorort, die sich für eine über das Bauwerk fahrende Einzellast ergibt. Das gemessene Dehnungssignal bzw. Verschiebungssignal an einem festen Sensorort setzt sich für eine Überfahrt eines Fahrzeugs mit mehreren Achsen aus mehreren verschobenen superpositionierten Einflusslinien zusammen. Es werden so viele Einflusslinien benötigt, wie das Fahrzeug Achsen besitzt. Dabei wird die Amplitude der einzelnen Einflusslinien der Achslast angepasst. Normalerweise werden die Einflusslinien für einzelne Bauwerke mithilfe des analytischen Biegebalkens auf der Grundlage der Euler-Bernoulli-Theorie bestimmt [26]. Merkmale basierend auf der Krümmungseinflusslinie oder Dehnungseinflusslinie sind zum Beispiel Merkmale, die die Einflusslinie beschreiben [40]: *Änderung des Lagerungsverhältnisses*, *Girder Distribution Factor* und *Dynamic Amplification Factor*. Die drei genannten Merkmale werden im ungeschädigten Zustand (Referenzzustand) bestimmt und die Änderung der Merkmale über die Zeit dient zur Schadenserkennung. Jedoch sind die Nachteile dieser Merkmale, dass zunächst die richtige Einflusslinie aufwändig für die zu untersuchende Brücke berechnet werden muss, sowie dass diese Merkmale stark von der Temperatur, von den Fahrzeugparametern (Achslast, Achsenanzahl, Federsteifigkeit) und der Fahrspurabweichung abhängen.

Die auf der Dehnungseinflusslinie basierenden Merkmale *Maximum der Dehnungseinflusslinie an mehreren Referenzpunkten entlang des Balkens (MIE)*, *Integral der Dehnungseinflusslinie an unterschiedlichen Referenzpunkten entlang des Balkens (IMIL)* und *Zweite Ableitung der Dehnungseinflusslinie an unterschiedlichen Referenzpunkten entlang des Balkens (SODM)* werden über *long-gauge Fiber Bragg Grating (FBG)* Sensoren berechnet [6]. Dieser Sensortyp kann die Dehnungen der Brücke in Längsrichtung an mehreren Stellen wiedergeben. Dabei ist ein Schaden als Unstetigkeit im Merkmal ersichtlich. Die genannten Merkmale haben den Nachteil, dass diese ein sehr dichtes Sensornetz benötigen und die Anwendung bisher an Dehnungen aus einfachen Biegebalken-Simulationen mittels der Finite-Element-Methode (FEM) untersucht wurde [6]. Aufgrund des erforderlichen dichten Sensornetzes in [6] ist dieses Merkmal im Projekt ZEBBRA nicht umsetzbar.

Zwei weitere Merkmale basierend auf der Dehnung von überfahrenden Fahrzeugen sind das Max/Min-Verhältnis bzw. das Verhältnis der positiven Fläche zur negativen Fläche innerhalb eines Signals [39]. Diese Merkmale sind jedoch auf Zweifeldbrücken mit Durchlaufträger begrenzt.

Es gibt wenige untersuchte Merkmale, die auf der Verschiebungseinflusslinie basieren. Die Merkmale *Differenz der Einflusslinie (CDIL)*, *Differenz der einmalig abgeleiteten Einflusslinie (CRDIL)* sowie die *Differenz der zweimalig abgeleiteten Einflusslinie (CCDIL)* vergleichen die Einflusslinie zwischen dem zu untersuchenden Zustand und dem Referenzzustand [15]. Unstetigkeiten in der Differenz über die Überfahrdauer deuten auf Schäden hin. CDIL ist nicht schadenssensitiv und CRDIL/CCDIL verwenden Ableitungen, welche beim Auftreten von Dynamik oder Rauschen unbrauchbar werden. Außerdem sind die Untersuchungen der Merkmale bisher auf FEM-Biegebalken-Simulationen und Labormessungen beschränkt. Die Merkmale haben den Nachteil, dass diese genau das gleiche Fahrzeug benötigen für den Referenzzustand und den später zu untersuchenden Zustand. Somit sind die Merkmale CDIL, CRDIL und CCDIL ebenfalls nicht im Projekt ZEBBRA anwendbar, da sich hier die überquerenden Fahrzeuge unterscheiden. Es

besteht Forschungsbedarf an Merkmalen basierend auf der Einflusslinie und vor allem an Merkmalen, die auf der Verschiebungseinflusslinie basieren.

3. Verbundpartner

Im ZEBBRA-Verbundvorhaben waren vier Partner eingebunden und arbeiteten eng zusammen: Das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT-IPF), das Institut für Automation und angewandte Informatik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT-IAI), die Firma ci-tec GmbH (ci-tec) sowie die Firma Büro für Strukturmechanik (BFSM). Die Projektkoordination übernahm das KIT-IPF. Das Staatliche Bauamt Bamberg war als assoziierter Partner im Umfeld der Straßeninfrastruktur eingebunden. Zudem stellte das Tiefbauamt Karlsruhe ein weiteres Brückenbauwerk für Messungen zur Verfügung.

KIT-IPF Das KIT-IPF besitzt umfassende wissenschaftliche Expertise in der automatischen Objekterkennung und -charakterisierung von Straßen, Fahrzeugen und Personen in verschiedensten Satellitendaten sowie UAV-Bildern. Der Forschungsschwerpunkt liegt u. a. auf datengetriebenen Analysen von Bildern, robotikorientierten Themen der Fernerkundung sowie dreidimensionaler Selbstlokalisierung von Multi-Sensorplattformen. Im Rahmen des Verbundvorhabens übernahm das KIT-IPF die automatische Fahrzeugdetektion in den Videosequenzen der UAV-Daten, um die Fahrzeuge auf der Brücke zu verfolgen und Referenzdaten für die GBR-Messungen zu generieren. In Bezug auf die Auswertung der GBR-Daten wurde ein Ansatz zur Bestimmung von zweidimensionalen Bewegungen der Brücken unter Fahrzeugbelastung erarbeitet. Der Fokus lag hierbei auf der Weiterentwicklung der Datenprozessierung und -auswertung. Durch Bestimmung von äußeren Einflüssen und Effekten während der Messung wurde eine umfassende Bewertung der Sensor- und Datenqualität erreicht.

KIT-IAI Die Arbeitsgruppe „AMIP – Moderne automatisierungstechnische Methoden für industrielle Prozesse“ des KIT-IAI beschäftigt sich u. a. mit der Entwicklung neuer Verfahren und Algorithmen zur Optimierung von energetischen und verfahrenstechnischen Prozessen auf der Basis intelligenter und bildgebender Sensorik. Die Umsetzung der Algorithmen in echtzeitfähige, zuverlässige und sichere Softwaresysteme und -werkzeuge mit dem angestrebten Transfer in die industrielle Anwendung sind weitere Ziele der Arbeiten. Expertise im Bereich der Brückenüberwachung erarbeitete sich KIT-IAI im BMBF-Projekt i.Bridge in Kooperation mit ci-tec und BFSM. Im ZEBBRA-Verbundvorhaben beschäftigte sich das KIT-IAI mit der Erarbeitung von intelligenten Verfahren zur Zustandserkennung der Brückenbauwerke basierend auf GBR-Daten und Dehnungsmessungen. Ein Fokus lag insbesondere auf Merkmalen basierend auf Einzelüberfahrten.

ci-tec Die Firma ci-tec entwickelt robuste Datenanalyse-Softwarelösungen für den industriellen Einsatz und verfügt über langjährige Erfahrung in der Anbindung verschiedener Sensoren sowie der Auswertung heterogener Bild- und Zeitreihendaten. Der Fokus liegt dabei auf dem Einsatz innovativer berührungslöser Sensorik auch bei herausfordernden Umgebungsbedingungen. Das robuste Software-System inspect wird dabei in Zusammenarbeit mit Anwendern und im Rahmen von Forschungsprojekten stetig weiterentwickelt. Die Expertise bei ci-tec umfasste die Datenerhebung über aufwendige Messkampagnen, die (Vor-)Verarbeitung und Auswertung der Daten u. a. mit Verfahren der Künstlichen Intelligenz und des Maschinellen Lernens genauso wie die Implementierung von benutzerfreundlichen und echtzeitfähigen Softwarelösungen.

BFSM Die BFSM GmbH wurde 2004 als Ingenieurbüro mit dem Schwerpunkt Tragwerksplanung gegründet. Mit den zehn Mitarbeitenden werden verschiedene Leistungen, wie beispielsweise Tragwerksplanung, numerische Analyse komplexer Strukturen (Strukturmechanik, Strukturmechanik, Bodendynamik und Erdbeben, Schwingungsangeregte Bauteile), Prüfung von Brückenbauten gemäß DIN1076, Gutachtenerstellung, Terminplanung und Claimmanagement, FuE, etc. erbracht. BFSM verfügt durch die langjährige Berufserfahrung der Mitarbeitenden auf dem Gebiet der Tragwerksplanung des Brückenbaus und der Brückenprüfung, sowie der strukturdynamischen Berechnung über entsprechendes theoretisches und praktisches Know-how. In diesem Zusammenhang existiert ferner umfangreiches Wissen in der Signalanalyse wie auch der Generierung künstlicher Erdbebenzeitverläufe und damit ebenfalls in der Programmierung und Datenverarbeitung. Für Spezialanwendungen und Entwicklungen stehen hauseigene Programme und Programmentwicklungen im Bereich der Finiten-Elemente-Methode oder der Signalanalyse und Auswertung zur Verfügung. Darüber hinaus steht eine vollständige, neuwertige, messtechnische Ausrüstung zur Erfassung und Bewertung von Bauwerksbeschleunigungen und Verformungen anwendungsbereit.

4. Planung und Ablauf

Die einzelnen Arbeitsschritte innerhalb des ZEBBRA-Verbundvorhabens wurden für die jeweiligen Teilbereiche in Arbeitspakete (APe) strukturiert.

Diese umfassten die Aufgaben der Verbundpartner KIT-IPF, KIT-IAI, ci-tec sowie BFSM. Die folgende Tabelle 4.1 visualisiert die zeitliche Abfolge der APe im ZEBBRA-Verbundprojekt.

Im Anschluss werden die Hauptaufgabenbestandteile der einzelnen APe kurz erläutert. Eine detaillierte Darstellung der Arbeiten inklusive der Ergebnisse aus den jeweiligen Teilvorhaben erfolgt in Teil II des jeweiligen Verbundpartners (siehe auch Tabelle 4.2).

Tabelle 4.1.: Übersicht der Arbeitspakete (APe) im ZEBBRA-Verbundprojekt.

AP	Titel	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 1	Brückenauswahl	■	■										
AP 2	Modellierung und Simulation		■	■	■	■	■	■	■	■			
AP 3	Eventerkennung		■	■	■								
AP 4	Algorithmen zur Zustands-erkennung		■	■	■	■	■	■	■	■			
AP 5	Sensorschnittstellen	■	■	■									
AP 6	Erarbeitung des Demonstrators	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 7	Messkampagnen	■	■	■									
AP 8	Non-invasive Radarsensorik		■	■	■	■	■	■	■	■			
AP 9	Fertigstellung & Validierung											■	■

In *AP 1* wurden von BFSM und KIT-IPF 5 Brücken ausgewählt, die im Rahmen des Projekts messtechnisch untersucht sowie numerisch modelliert werden sollten. Für zwei dieser Brücken fanden Referenzmessungen mit konventioneller Messtechnik statt, um einen Vergleich zum GBR zu ermöglichen (siehe hierzu *AP 7*).

Ziel von *AP 2* war eine numerische Modellierung der ausgewählten Brücken, um Algorithmen zur Schädigungsdetektion in einem späteren Schritt entwickeln zu können. Dazu

wurden von BFSM in die Simulationen verschiedene Schäden eingebracht und eine große Anzahl an Überfahrten mit variablen Fahrzeugen berechnet.

AP 3 beinhaltete die Entwicklung eines Algorithmus zur Eventerkennung, das heißt zur Erkennung von Überfahrten von Fahrzeugen über die überwachte Brücke aus dem GBR-Signal. Die Umsetzung dieser automatischen Erkennung wurde von KIT-IAI und ci-tec gemeinsam erarbeitet. Zudem sollten die erkannten Events automatisiert nach Anzahl und Art der Fahrzeuge klassifiziert werden.

AP 4 umfasste die Erforschung von intelligenten Auswertelgorithmen zur radarbasierten Zustandsbewertung durch das KIT-IAI. Verschiedene datengetriebene sowie statistische Verfahren sollten entworfen und validiert werden. Alle Algorithmen zur Zustandsschätzung sollten in einer modularen Bibliothek zusammengefasst werden.

In *AP 5* definierte und setzte ci-tec die Sensorankopplung des GBR über Schnittstellen und eine benutzerfreundliche Oberfläche um. Zusätzlich wurde basierend auf einem Raspberry Pi eine meteorologische Station entworfen, die Witterungsparameter an den Brücken während der Messungen mit dem GBR aufnehmen kann.

Im *AP 6* wurde von ci-tec ein Demonstrator implementiert, der eine Datenanalyse mithilfe von entwickelten und validierten Algorithmen (siehe hierzu *AP 3* und *AP 4*) ermöglicht. Dazu wurde eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche mit den in *AP 4* entwickelten Algorithmen erarbeitet und entworfen.

AP 7 umfasste die Vorbereitung und Durchführung mehrerer Messkampagnen an den ausgewählten Brückenbauwerken durch KIT-IPF und BFSM. Zur Vorbereitung gehörten die ausführliche Planung optimaler Reflektor- und Sensorpositionen, sowie die Berücksichtigung von rechtlichen und technischen Aspekten der Befliegungen mittels UAV. Bei den Messungen sollten verschiedene Umwelteinflüsse, die über den Jahresverlauf auf das Bauwerk wirken, aufgenommen werden. Zudem wurden neue Messprinzipien mit dem GBR wie Messungen ohne Reflektoren sowie Messungen mit zwei GBR gleichzeitig mit variierenden Positionen erarbeitet und untersucht. Die UAV-Aufnahmen dienten der Bereitstellung von Referenzdaten für die Eventerkennung.

In *AP 8* verarbeitete und filterte das KIT-IPF die aufgenommenen GBR-Daten. Bei der Untersuchung der erhaltenen Ergebnisse wurde insbesondere auf Genauigkeit und Sicherheit der Abbildung des zweidimensionalen Schwingungsverhaltens der Brücke geachtet. Ein Vergleich zur konventionellen Sensorik erlaubte die Validierung und Qualitätsanalyse der erhaltenen Ergebnisse. Hierbei wurde auf extrahierte modale Parameter zurückgegriffen.

Mit *AP 9* wurde federführend durch ci-tec der erarbeitete ZEBBRA-Demonstrator evaluiert und anhand von realen Messdaten validiert.

Die wesentlichen Ergebnisse der genannten APe finden sich als Überblick im nachfolgenden Kapitel 5. Darüber hinaus werden in den entsprechenden Teilen der Verbundpartner diese Ergebnisse im Detail beschrieben (siehe hierzu auch Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2.: Übersicht zu den detaillierten Ergebnissen im Teil II des jeweiligen Verbundpartners.

Verbundpartner	Detaillierte Ergebnisse:
KIT-IPF	Messungen an den ausgewählten Brücken mit GBR und Prozessierung der unterschiedlich aufgenommenen GBR-Daten
KIT-IAI	Eventdetektion und -klassifikation basierend auf konventionellen Sensordaten und auf GBR-Daten sowie Zustandserkennung basierend auf der Einflusslinie von Einzelevents
ci-tec	Eventdetektion und -klassifikation basierend auf GBR-Daten, Sensoransteuerung und ZEBBRA-Demonstrator
BFSM	Brückenauswahl, Messungen an den Brücken mit konventioneller Sensorik sowie numerische Modellierung

5. Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Vorgehensweise bei der Brückenauswahl Die ausgewählten Brückenbauwerke (siehe Abschnitt 2.1) wurden zu Beginn des ZEBBRA-Verbundvorhabens in Kooperation mit dem assoziierten Partner Staatliches Bauamt Bamberg anhand von definierten Kriterien bestimmt. Zudem fand eine in situ Begutachtung der Bauwerke statt. Entscheidend war u. a., dass die Bauwerke sowohl mit konventioneller Sensorik wie auch mit dem GBR überwacht werden konnten. Zudem sollte es möglich sein, dass numerische Simulationen der Bauwerke angefertigt werden konnten. Im Laufe des Projekts kam neben den Brücken in Bayern noch eine Brücke in Karlsruhe hinzu.

Messungen mit konventioneller Sensorik an den Brücken Messungen erfolgten mit elektronischen Sensoren (DMS, Beschleunigungssensoren, Temperatursensoren) sowie faseroptischen Sensoren. Eine mögliche Eventerkennung bezüglich des Verkehrs wurde teilweise über Magnetfeldsensoren sowie die Auswertung der UAV-Befliegungen erreicht. Darüber hinaus konnte z. B. die Brücke in Mödlitz während einer Belagserneuerung mit konventioneller Sensorik überwacht werden. Hierdurch wurden Messwerte unter veränderten Umgebungsbedingungen, mit und ohne Asphalt erfasst und verschiedene Lastfahrzeugüberfahrten aufgenommen. Als Beispiel zeigt Abbildung 5.1 schematisch die überwachten Messstellen mit konventioneller Sensorik. Dieses Brückenbauwerk wurde mit insgesamt 17 Kanälen instrumentiert (6x DMS Beton, 2x FBG Beton, 2x Beschleunigung, 4x Eventerkennung, 3x Temperatur). Dehnungen und Beschleunigungen wurden in Feldmitte aufgenommen, weitere Dehnungen in den Viertelpunkten sowie die Magnetfeldveränderung am Brückende. Die Temperatur wurde an der Luft, im Beton und im Asphalt abgegriffen.

Die Brücke in der Callenberger Straße ist neben der Pulverhausstraße in Karlsruhe eine stark befahrene Brücke. In Bezug auf die konventionelle Sensorik wurde hier ein Dauermonitoringsystem instrumentiert. Dieses System umfasste z. B. mehr als 60 Kanäle, darunter 12 DMS und 12 FBG Sensoren zur Messung von Betondehnungen, 5 Beschleunigungssensoren, 12 FBG und 4 DMS zur Messung von Betonstahldehnungen, 11 Magnetfeldsensoren zur Verkehrscharakterisierung und 4 Sensoren zur Temperaturerkennung.

GBR-Messungen an den Brücken Nach ausführlicher Planung konnten mehrere Messkampagnen erfolgreich an den ausgewählten Brücken durchgeführt werden. Die Positionen der GBR und der Reflektoren wurden so gewählt, dass das zweidimensionale Schwingungsverhalten der Brücken jeweils optimal aufgenommen werden konnte. Zudem

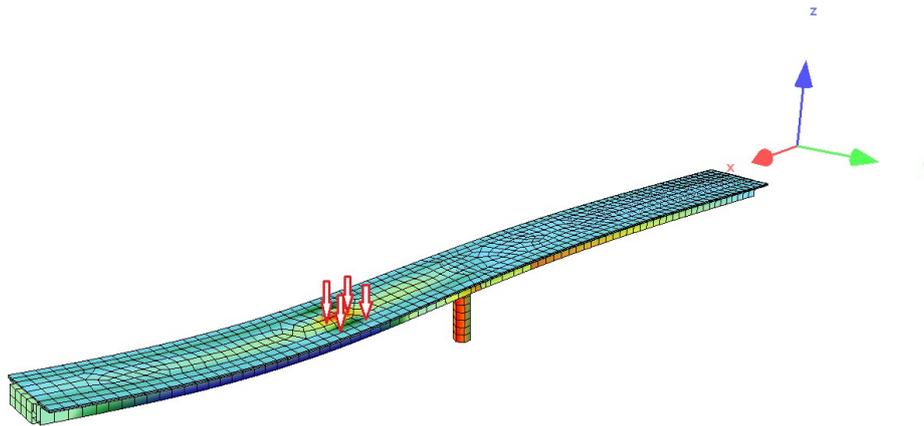


Abbildung 5.2.: FEM-Modell der Brücke an der Callenberger Straße sowie eine simulierte Last durch eine Fahrzeugüberfahrt.

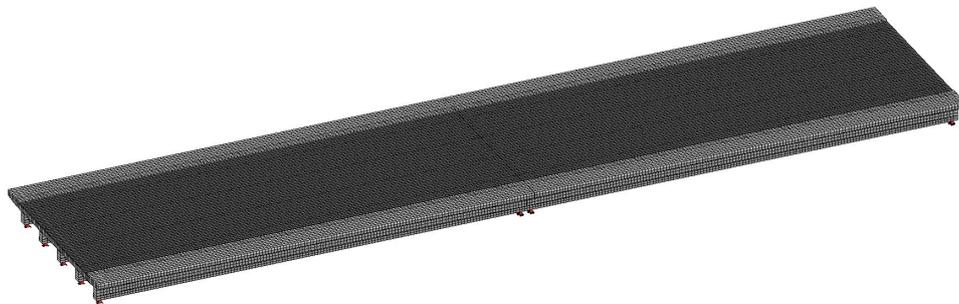


Abbildung 5.3.: FEM-Modell der Dietersdorfer Brücke.

so genannte *Fahrzeugarten* überführt, in welchen sich mittels verschiedener Variablen als Laufvariablen eine hohe Anzahl von numerischen Simulationen erzeugen lassen.

Untersuchung der aufgenommenen GBR-Daten Die aufgenommenen GBR-Daten mussten zunächst mehreren Verarbeitungsschritten unterzogen werden, bevor weitergehende Analysen durchgeführt werden konnten. Mittels unterschiedlicher Filterungsschritte wurden Störungen und externe Einflüsse aus den Daten entfernt (siehe Abbildung 5.5). Eine dreidimensionale Projektion transformierte die Messungen aus den jeweiligen Blickrichtungen der GBR in ein kartesisches Koordinatensystem, wodurch zwei Komponenten des dreidimensionalen Verschiebungsvektors bestimmt werden konnten. Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und dessen Auswertung ermöglicht eine Bewertung der Datenqualität für die einzelnen Verarbeitungsschritte, sowie für das projizierte Ergebnis der Verschiebungen. Über die Bestimmung modaler Parameter konnte einerseits die Veränderung der Brücken mit der Temperatur untersucht werden. Andererseits lieferten die Parameter auch eine Möglichkeit zur Validierung des GBR mit der konventionellen Sensorik.

GBR-basierte Eventerkennung mit Machine Learning (ML) bzw. Deep Learning (DL) Verfahren Ein Event bezeichnet den Zeitraum einer Fahrzeugüberfahrt

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
FZ-Typ / Klasse		FZ-TYP	Haeufigk.	Anzahl	Gesamtgewicht		Achsen		Achs-Lastverhaeltnisse											
					Mittelw.	STD	Anzahl	Mittelw.	STD	Mittelw.	STD	Mittelw.	STD	Mittelw.	STD	Mittelw.	STD	Mittelw.	STD	
			n/n_FZ	n	μ_1	σ_1		μ_1	σ_1	μ_1	σ_1	μ_1	σ_1	μ_1	σ_1	μ_1	σ_1	μ_1	σ_1	
	a	FZ_TYP_8	5%	5	5.96	1.46	2	44.9%	5.0%	55.1%	5.0%									
	b	FZ_TYP_8	6%	6	9.17	4.4	2	44.9%	5.0%	55.1%	5.0%									
	a	FZ_TYP_33	1%	1	19.03	2.32	4	25.8%	5.0%	37.2%	5.0%	18.9%	5.0%	18.1%	5.0%					
	b	FZ_TYP_33	4%	4	20.84	7.39	4	25.8%	5.0%	37.2%	5.0%	18.9%	5.0%	18.1%	5.0%					
	a	FZ_TYP_41	12%	12	27.68	5.95	5	20.9%	5.0%	25.8%	5.0%	16.1%	5.0%	19.5%	5.0%	17.7%	5.0%			
	b	FZ_TYP_41	5%	5	41.45	3.25	5	20.9%	5.0%	25.8%	5.0%	16.1%	5.0%	19.5%	5.0%	17.7%	5.0%			
	a	FZ_TYP_97	3%	3	15.67	1.88	4	30.6%	5.0%	30.9%	5.0%	19.1%	5.0%	19.4%	5.0%					
	b	FZ_TYP_97	5%	5	21.14	5.28	4	30.6%	5.0%	30.9%	5.0%	19.1%	5.0%	19.4%	5.0%					
	a	FZ_TYP_98	37%	37	25.96	9.2	5	20.8%	5.0%	28.1%	5.0%	17.0%	5.0%	17.0%	5.0%	17.1%	5.0%			
	b	FZ_TYP_98	22%	22	40.53	2.48	5	20.8%	5.0%	28.1%	5.0%	17.0%	5.0%	17.0%	5.0%	17.1%	5.0%			

Abbildung 5.4.: Übersicht zur Verteilung der Fahrzeuge für die numerische Simulation.

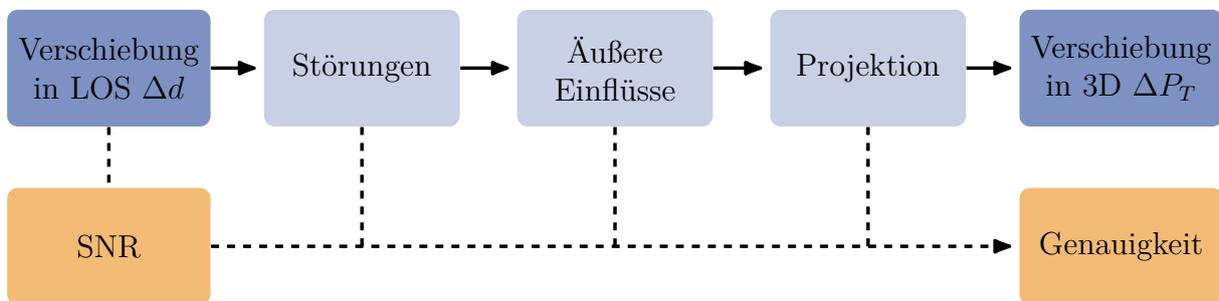


Abbildung 5.5.: Ablauf der Prozessierung von GBR-Daten. Die Verschiebung in Line Of Sight (LOS) wird über mehrere Schritte zur Verschiebung im kartesischen Koordinatensystem (3D) verarbeitet.

auf dem überwachten Brückenfeld. Aus der radarbasierten Verschiebung konnten Einzelereignisse über einen Eventerkennungsalgorithmus erkannt und extrahiert werden. Eine Übersicht der Verarbeitungsschritte und der genutzten Methodik ist in Abbildung 5.6 zu sehen. Der Algorithmus setzt sich aus verschiedenen datengetriebenen ML- und DL-Verfahren zusammen. Mithilfe von merkmalsbasierten und DL-Methoden war es möglich, Start- und Endzeitpunkte von Überfahrten sowie Ausschwingvorgänge nach Überfahrten zu erkennen. Weiterhin wurden im Zuge einer Masterarbeit die Überfahrten datengetrieben in Einzel- und Mehrfachevents klassifiziert, das heißt, es konnte erkannt werden, ob sich während eines Events nur ein oder mehrere Fahrzeuge gleichzeitig auf der Brücke befanden.

Zustandsbewertung basierend auf Einzelereignissen Anhand des extrahierten Signals der Einzelüberfahrten wurden neue fahrzeuggewichts- und fahrzeuggeometrieunabhängige Merkmale für eine Zustandsbewertung entwickelt und erweitert. Die Merkmale wurden für die Dehnung und Verschiebung aus den Messdaten und der Simulation berechnet. Für die Messdaten kann lediglich ein Referenzzustand bestimmt werden, dessen Robustheit gegenüber Temperaturschwankungen untersucht werden kann. Mit den Simulationsdaten konnte die Performanz der Zustandsbewertung für unterschiedliche Schäden untersucht

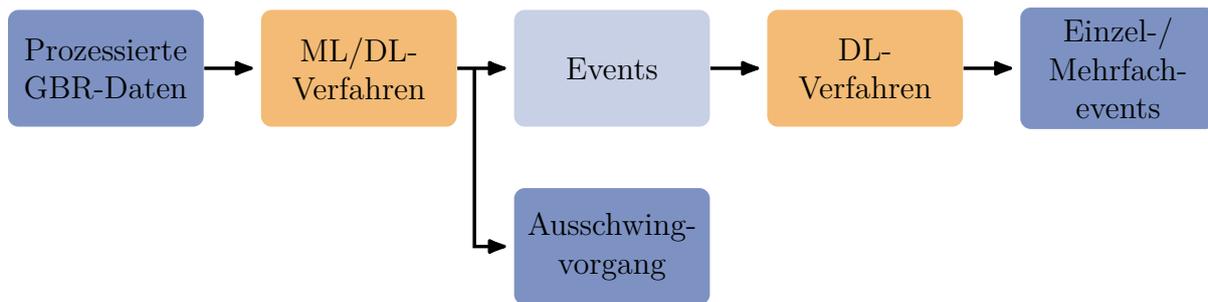


Abbildung 5.6.: Ablauf der datengetriebenen Eventdetektion bzw. -klassifikation basierend auf GBR-Daten.

werden. Die vorgestellten verhältnisbasierten Merkmale sind unter bestimmten Bedingungen unabhängig von der Temperatur und der Fahrspur des überquerenden Fahrzeugs. Die Geometrie der Fahrzeuge, zu der die Anzahl der Achsen sowie die Achslast und die Achsabstände zählen, kann im Signal über die Bildung des Verhältnisses eliminiert werden. Dies gilt für Merkmale basierend auf dem Maximum/Minimum bzw. für das Integral des Signals von Einzelüberfahrten. Es konnten Merkmale von der Dehnung auf die radarbasierte Verschiebung übertragen werden. Bei den FEM-Simulationen können mithilfe der neuen Merkmale Schäden auseinandergehalten und darüber hinaus die Höhe des Schadens und der Schadensort zugeordnet werden.

Zusammenführung aller Ergebnisse im ZEBBRA-Demonstrator Um Brückenprüfungen zu vereinfachen, wurden die im Projekt entwickelten Verfahren in einer grafische Benutzeroberfläche implementiert. Dieses Interface umfasst Verfahren zur Verarbeitung und Analyse der GBR-Daten, der auf diesen Daten basierenden Eventerkennung mit ML-Verfahren sowie eine brückenspezifische Darstellung aller GBR-Messungen. Dies ermöglicht einen Vor-Ort-Einsatz direkt nach den GBR-Messungen an den Brücken. Die Ergebnisse der Analyse können mit verschiedenen Abbildungen interaktiv visualisiert werden. Alle aufgenommenen Daten können über den ZEBBRA-Demonstrator in einer Datenbank verwaltet werden. Somit kann eine Untersuchung des Brückenzustandes auch im Vergleich zu vergangenen Messungen erfolgen und Veränderungen im Brückenzustand erkannt werden. Abbildung 5.7 zeigt die Auswertung von 4 Messkampagnen in Dietersdorf. So sind z. B. in dem linken Diagramm (siehe Abbildung 5.7) die automatisch extrahierten Eigenfrequenzen dargestellt. Das rechte Diagramm zeigt die maximale Durchbiegung während Fahrzeugüberfahrten in Abhängigkeit von der aktuellen Umgebungstemperatur.

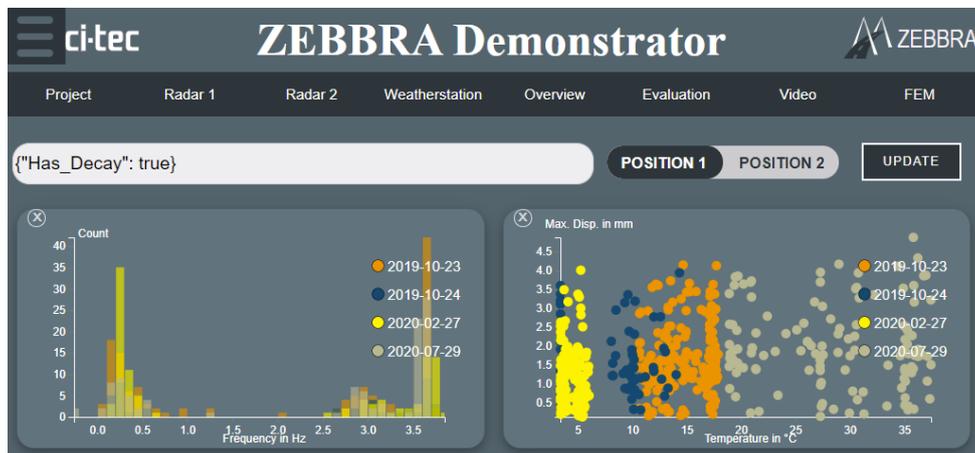


Abbildung 5.7.: Visualisierungswerkzeug zur Vor-Ort-Analyse von vergangenen und aktuellen GBR-Messungen.

6. Veröffentlichungen im ZEBBRA-Verbundvorhaben

Journalbeiträge

Chris Michel und Sina Keller. „Determining and Investigating the Variability of Bridges’ Natural Frequencies with Ground-Based Radar“. In: *Applied Sciences* 12.11 (Mai 2022), S. 5354. DOI: 10.3390/app12115354

Chris Michel und Sina Keller. „Advancing Ground-Based Radar Processing for Bridge Infrastructure Monitoring“. In: *Sensors* 21.6 (März 2021), S. 2172. DOI: 10.3390/s21062172

Sina Keller et al. „Überwachung von Brückeninfrastrukturen: Neuer Ansatz von konventionellen und berührungslosen Sensoren“. In: *Brückenbau* 3 (2020). 34.15.01; LK 01, S. 22–29. ISSN: 1867-643X

Konferenzbeiträge

Andreas Döring et al. „Ratio-Based Features for Bridge Damage Detection Based on Displacement Influence Line and Curvature Influence Line“. Englisch. In: *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations*. 11th Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations. IABMAS 2022 (11.–15. Juli 2022). 2022

Matthias Arnold, Mareike Hoyer und Sina Keller. „Convolutional Neural Networks For Detecting Bridge Crossing Events With Ground-Based Interferometric Radar Data“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* V-1-2021 (Juni 2021), S. 31–38. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2021-31-2021

Andreas Döring et al. „Ratio-Based Features for Data-Driven Bridge Monitoring and Damage Detection“. In: *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations*. CRC Press, Apr. 2021, S. 2532–2541. DOI: 10.1201/9780429279119-346

Chris Michel und Sina Keller. „Introducing a Non-Invasive Monitoring Approach for Bridge Infrastructure with Ground-Based Interferometric Radar“. In: *EUSAR 2021; 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. VDE, 2021

Matthias Arnold und Sina Keller. „Detection And Classification Of Bridge Crossing Events With Ground-Based Interferometric Radar Data And Machine Learning Approaches“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences V-1-2020* (Aug. 2020), S. 109–116. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2020-109-2020

Code

Andreas Döring. *Stepped-Euler-Bernoulli-Beam for Matlab*. en. 2022. DOI: 10.5281/ZENODO.6675982

Bachelor- und Masterarbeiten

Ian Steegmayer. „Deep Learning for Event Classification with Ground-Based Interferometric Radar Data“. Unveröffentlicht. Masterarbeit. Juni 2022

Anatol Günthner. „Analyse der Temperatur- und Atmosphären effekte bei bodenbasierten Radar-Interferometrie-Messungen“. Unveröffentlicht. Bachelorarbeit. Okt. 2021

Vahid Sadeghbin. „Detektion und Klassifikation von Fahrzeugen auf Brücken mit Deep Learning und Computer Vision“. Unveröffentlicht. Masterarbeit. Okt. 2021

7. Literatur Teil I

- [1] Rodrigo E. Alva et al. „Dynamic Monitoring of a Mid-Rise Building by Real-Aperture Radar Interferometer: Advantages and Limitations“. In: *Remote Sensing* 12.6 (2020). DOI: 10.3390/rs12061025.
- [2] Matthias Arnold, Mareike Hoyer und Sina Keller. „Convolutional Neural Networks For Detecting Bridge Crossing Events With Ground-Based Interferometric Radar Data“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* V-1-2021 (Juni 2021), S. 31–38. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2021-31-2021.
- [3] Matthias Arnold und Sina Keller. „Detection And Classification Of Bridge Crossing Events With Ground-Based Interferometric Radar Data And Machine Learning Approaches“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* V-1-2020 (Aug. 2020), S. 109–116. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2020-109-2020.
- [4] Andreas Atzl und Sina Keller. „A Systemic Approach for the Analysis of Infrastructure - Specific Social Vulnerability“. In: *From Social Vulnerability to Resilience, Cutter, Corendea (Hg.) 2013* (2013). ISBN: 978-3-939923-98-5, S. 27–43.
- [5] Peter Cawley. „Structural Health Monitoring: Closing the Gap Between Research and Industrial Deployment“. In: *Structural Health Monitoring* 17.5 (Jan. 2018), S. 1225–1244. DOI: 10.1177/1475921717750047. URL: <https://doi.org/10.1177/1475921717750047>.
- [6] Shi-Zhi Chen, De-Cheng Feng und Wan-Shui Han. „Comparative Study of Damage Detection Methods Based on Long-Gauge FBG for Highway Bridges“. In: *Sensors* 20.13 (Juni 2020), S. 3623. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20133623. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/13/3623>.
- [7] Andreas Döring. *Stepped-Euler-Bernoulli-Beam for Matlab*. en. 2022. DOI: 10.5281/ZENODO.6675982.
- [8] Andreas Döring et al. „Ratio-Based Features for Bridge Damage Detection Based on Displacement Influence Line and Curvature Influence Line“. Englisch. In: *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations*. 11th Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations. IABMAS 2022 (11.–15. Juli 2022). 2022.
- [9] Andreas Döring et al. „Ratio-Based Features for Data-Driven Bridge Monitoring and Damage Detection“. In: *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations*. CRC Press, Apr. 2021, S. 2532–2541. DOI: 10.1201/9780429279119-346.
- [10] Ján Erdélyi, Alojz Kopáčik und Peter Kyrinovič. „Spatial Data Analysis for Deformation Monitoring of Bridge Structures“. In: *Applied Sciences* 10.23 (Dez. 2020), S. 8731. DOI: 10.3390/app10238731.
- [11] Wei Fan und Pizhong Qiao. „Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study“. In: *Structural Health Monitoring* 10.1 (2011), S. 83–111. DOI: 10.1177/1475921710365419. URL: <https://doi.org/10.1177/1475921710365419>.

-
- [12] Charles Farrar et al. „Microwave Interferometers for Non-Contact Vibration Measurements on Large Structures“. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 13.2 (März 1999), S. 241–253. ISSN: 0888-3270. DOI: 10.1006/mssp.1998.1216.
- [13] Carmelo Gentile und Giulia Bernardini. „An Interferometric Radar for Non-Contact Measurement of Deflections on Civil Engineering Structures: Laboratory and Full-Scale Tests“. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 6.5 (Juli 2009), S. 521–534. ISSN: 1573-2479. DOI: 10.1080/15732470903068557.
- [14] Vertrieb Gesellschaft Entwicklung Konstruktion. „Baudynamik: 3. VDI-Fachtagung, Kassel, 14. und 15. Mai 2009. VDI-Berichte: 2063, CD-ROM“. In: (2009).
- [15] Ivana Štimac Grandić, Davor Grandic und Adriana Bjelanović. „Comparison of Techniques for Damage Identification Based on Influence Line Approach“. In: Bd. 7. 2011, S. 53–57.
- [16] Anatol Günthner. „Analyse der Temperatur- und Atmosphäreneffekte bei bodenbasierten Radar-Interferometrie-Messungen“. Unveröffentlicht. Bachelorarbeit. Okt. 2021.
- [17] Sina Keller et al. „Überwachung von Brückeninfrastrukturen: Neuer Ansatz von konventionellen und berührungslosen Sensoren“. In: *Brückenbau* 3 (2020). 34.15.01; LK 01, S. 22–29. ISSN: 1867-643X.
- [18] Cunlong Li et al. „A Noncontact FMCW Radar Sensor for Displacement Measurement in Structural Health Monitoring“. In: *Sensors* 15.4 (März 2015), S. 7412–7433. DOI: 10.3390/s150407412.
- [19] G. Luzi et al. „Ground-Based Radar Interferometry for Landslides Monitoring: Atmospheric and Instrumental Decorrelation Sources on Experimental Data“. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42.11 (Nov. 2004), S. 2454–2466. ISSN: 0196-2892. DOI: 10.1109/tgrs.2004.836792.
- [20] Guido Luzi, Michele Crosetto und Enric Fernández. „Radar Interferometry for Monitoring the Vibration Characteristics of Buildings and Civil Structures: Recent Case Studies in Spain“. In: *Sensors* 17.4 (März 2017), S. 669. DOI: 10.3390/s17040669.
- [21] Lapo Miccinesi, Alessandra Beni und Massimiliano Pieraccini. „Multi-Monostatic Interferometric Radar for Bridge Monitoring“. In: *Electronics* 10.3 (Jan. 2021), S. 247. DOI: 10.3390/electronics10030247.
- [22] Chris Michel und Sina Keller. „Advancing Ground-Based Radar Processing for Bridge Infrastructure Monitoring“. In: *Sensors* 21.6 (März 2021), S. 2172. DOI: 10.3390/s21062172.
- [23] Chris Michel und Sina Keller. „Determining and Investigating the Variability of Bridges’ Natural Frequencies with Ground-Based Radar“. In: *Applied Sciences* 12.11 (Mai 2022), S. 5354. DOI: 10.3390/app12115354.
- [24] Chris Michel und Sina Keller. „Introducing a Non-Invasive Monitoring Approach for Bridge Infrastructure with Ground-Based Interferometric Radar“. In: *EUSAR 2021; 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. VDE, 2021.
- [25] Andrea Monti-Guarnieri et al. „3D Vibration Estimation from Ground-Based Radar“. In: *Remote Sensing* 10.11 (Okt. 2018), S. 1670. ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs10111670.

- [26] Fred Moses. „Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges“. In: *Transportation Engineering Journal of ASCE* 105.3 (1979), S. 233–249.
- [27] Frank Neitzel et al. „Investigation of Low-Cost Accelerometer, Terrestrial Laser Scanner and Ground-Based Radar Interferometer for Vibration Monitoring of Bridges“. In: *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring 2012*. Bd. 1. 2012, S. 542–551.
- [28] Giovanni Nico et al. „Dynamic Modal Identification of Telecommunication Towers Using Ground Based Radar Interferometry“. In: *Remote Sensing* 12.7 (2020). ISSN: 2072-4292. DOI: doi:10.3390/rs12071211.
- [29] Piotr Olaszek, Andrzej Świercz und Francesco Boscagli. „The Integration of Two Interferometric Radars for Measuring Dynamic Displacement of Bridges“. In: *Remote Sensing* 13.18 (Sep. 2021), S. 3668. DOI: 10.3390/rs13183668.
- [30] M. Pieraccini et al. „Dynamic Monitoring of Bridges Using a High-Speed Coherent Radar“. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44.11 (Nov. 2006), S. 3284–3288. ISSN: 0196-2892. DOI: 10.1109/tgrs.2006.879112.
- [31] M. Pieraccini et al. „Structural Static Testing by Interferometric Synthetic Radar“. In: *NDT & E International* 33 (2000).
- [32] Massimiliano Pieraccini et al. „In-Service Testing of Wind Turbine Towers Using a Microwave Sensor“. In: *Renewable Energy* 33.1 (Jan. 2008), S. 13–21. DOI: 10.1016/j.renene.2007.02.001.
- [33] Massimiliano Pieraccini et al. „Static and Dynamic Testing of Bridges Through Microwave Interferometry“. In: *NDT & E International* 40.3 (Apr. 2007), S. 208–214. ISSN: 0963-8695. DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.10.007.
- [34] Sabine Rödelsperger und Adriano Meta. „MetaSensing’s FastGBSAR: Ground Based Radar for Deformation Monitoring“. In: *SPIE Proceedings*. Hrsg. von Claudia Notarnicola, Simonetta Paloscia und Nazzareno Pierdicca. SPIE, Okt. 2014. DOI: 10.1117/12.2067243.
- [35] Sabine Rödelsperger et al. „Monitoring of Displacements With Ground-Based Microwave Interferometry: IBIS-S and IBIS-L“. In: *Journal of Applied Geodesy* 4.1 (Jan. 2010). ISSN: 1862-9016. DOI: 10.1515/jag.2010.005.
- [36] Vahid Sadeghbin. „Detektion und Klassifikation von Fahrzeugen auf Brücken mit Deep Learning und Computer Vision“. Unveröffentlicht. Masterarbeit. Okt. 2021.
- [37] Jacob Schneider Oliver und Müller. „Eine frühzeitige Schadenserkennung ist die Grundlage für einen sicheren Betrieb von Infrastrukturbauwerken mit hohem Risiko- und Schadenspotential wie beispielsweise Brücken“. In: (2016).
- [38] Ian Steegmayer. „Deep Learning for Event Classification with Ground-Based Interferometric Radar Data“. Unveröffentlicht. Masterarbeit. Juni 2022.
- [39] P. Waibel et al. „A Strain Sensor Based Monitoring and Damage Detection System for a Two-Span Beam Bridge“. Englisch. In: *Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges: Proceedings of the 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2018), Melbourne, AUS, July 9-13, 2018*. Ed.: N. Powers. 34.14.01; LK 01. CRC Press, Boca Raton, FL, 2018, S. 1627–1634. ISBN: 978-1-138-73045-8.

- [40] Aleš Žnidarič und Jan Kalin. „Using Bridge Weigh-In-Motion Systems to Monitor Single-Span Bridge Influence Lines“. In: *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 10.5 (Juli 2020), S. 743–756. DOI: 10.1007/s13349-020-00407-2.

Teil II.

Eingehende Darstellung

8. Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem ZEBBRA-Verbundprojekt

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von ci-tec im ZEBBRA-Verbundprojekt ausgeführt. Die Gliederung folgt den APen, in denen ci-tec federführend war. Anschließend wird die *voraussichtliche Nutzung* der gesamten Ergebnisse dargelegt (vgl. Abschnitt 8.4). In Abschnitt 8.5 wird kurz auf die Vorhaltung der aufgenommenen Daten eingegangen. Der Messaufbau zur Aufnahme der GBR-Daten mit zwei Radargeräten zur Ermittlung der zweidimensionalen Verschiebung der Brücken wird kurz in Abschnitt 2.2.2 und ausführlich in Teil II des ZEBBRA-Teilprojekts des KIT-IPF erläutert.

8.1. AP 5 - Sensorschnittstellen

Ziel ist es, die Radarsensorik sowie eine meteorologische, mobile Messstation in eine Sensorplattform zu integrieren. Beide zusammen ergeben dann eine vollumfängliche Information über die an der Brücke vorherrschenden (Umgebungs-)Verhältnisse. In Abschnitt 8.1.1 wird die Integration der Radarsensorik, in Abschnitt 8.1.2 der Aufbau sowie die Integration der Wetterstation erläutert.

8.1.1. AP 5.1 - Integration der neuen Radarsensoren in die Sensorplattform

In der Konzeption des ZEBBRA-Verbundprojekts war die Nutzung von zwei IBIS-S-Radargeräten des Herstellers Ingegneria Dei Sistemi (IDS) vorgesehen. Aufgrund von Interferenzproblemen wurde das Projekt erweitert um Messungen mit den FastGBSAR-Geräten von Metasensing (siehe hierzu Teil II von KIT-IPF). Da der größte Anteil der GBR-Daten mit den IBIS-Geräten aufgenommen worden ist, liegt das Augenmerk in diesem Kapitel auf diesem Typ. Die generelle Struktur des IBIS-Systems ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Die Ansteuerung erfolgt über das von IDS bereitgestellte Software-Tool *Surveyor*. Der *Surveyor* wandelt gemessene Radardaten um und speichert sie nach Erreichen einer gewissen Datenmenge in binären *.gbd-Dateien.



Abbildung 8.1.: Struktur des IBIS-Systems. Die Integration der Radardaten beginnt bei den *.gbd-Dateien.

Aufgrund von Lizenzschutzrechten und betriebsinternem Wissen der Firma IDS erfolgt die Integration der GBR-Daten über einen Umweg. Die Auswertung der Daten und Ansteuerung der GBR-Geräte findet zeitversetzt statt und nicht in Echtzeit. Die weitere Beschreibung bezieht sich daher alternativ auf die Integration und Auswertung nach der Datenaufnahme. Die Integration beginnt mit dem Einlesen der *.gbd-Dateien in den Demonstrator bzw. die Datenbank, die zugrundeliegt. Details hierzu finden sich in Abschnitt 8.2.

8.1.2. AP 5.2 - Integration der Daten einer meteorologischen Messstation

Als zu überwachende Umweltparameter wurden die Umgebungstemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit sowie der Umgebungsdruck ausgemacht, da diese drei für die GBR-Messungen relevante Parameter darstellen [5]. Die erworbenen BME280-Sensoren der Firma BOSCH erfüllen die Anforderungen, diese drei Größen zu messen. Zur mobilen Ansteuerung der beiden Sensoren wurde ein Raspberry Pi (RPi) genutzt. Als Spannungsquelle dient eine Powerbank, mit der die Wetterstation über 20 Stunden am Stück betrieben werden kann. Die Daten werden lokal auf einer SD-Karte gespeichert und können zum Ende der Messung via TCP/IP abgerufen werden. Um Messungen zu starten bzw. stoppen, wurde eine Platine auf dem RPi angebracht, in die ein Taster integriert ist. Als simpler Indikator bei der Benutzung dient eine LED, die je nach aktuellem Zustand, in welchem sich das Programm befindet (Ruhezustand, Sensorik suchend, messend) Lichtsignale zurück gibt. So weist beispielsweise kurzes Blinken alle fünf Sekunden auf eine ordnungsgemäß laufende Messung hin.

Abbildung 8.2 zeigt den genutzten RPi mit aufgesetzter Schaltung sowie die beiden eingesetzten BME280-Sensoren. An allen Modulen wurden vierpolige Steckerbuchsen angebracht, so dass eine Verbindungen via Kabel möglich ist. Dadurch können die Sensoren an unterschiedlichen Stellen platziert werden (beispielsweise in der Sonne oder im Schatten).

Um allen Verbundpartnern einen einfachen Zugang zu den Messdaten der Wetterstation zu ermöglichen, existiert eine Dokumentation über die Metainformationen im Header einer Messdatei und den Aufbau der gespeicherten Binärdaten. So enthält der Header beispielsweise die Start- und Endzeit sowie die Abtastrate. Zusätzlich wurde ein Python-Skript bereitgestellt, welches die Binärdateien ausliest.

Abbildung 8.3 zeigt exemplarisch die Ergebnisse einer Messkampagne vom 23. Oktober 2019 an der Brücke in Dietersdorf bei Coburg in der erstellten Graphical User Inter-

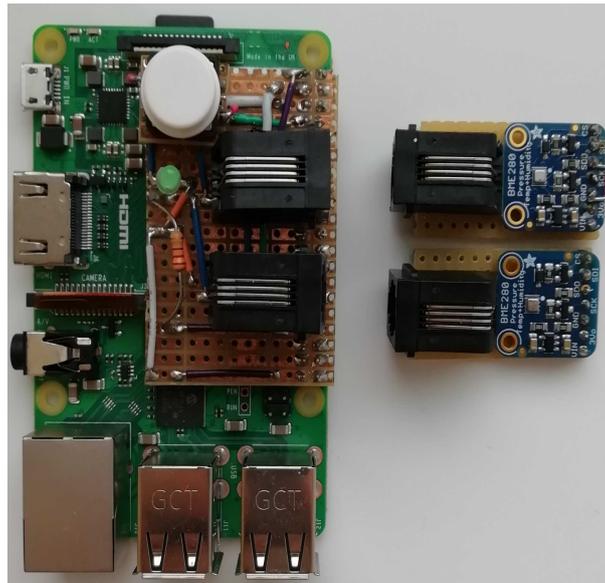


Abbildung 8.2.: Module der implementierten Wetterstation

face (GUI) zur Visualisierung des Demonstrators. Links ist die von Sensor 1 gemessene Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit, rechts der von Sensor 2 gemessene Druck zu sehen.

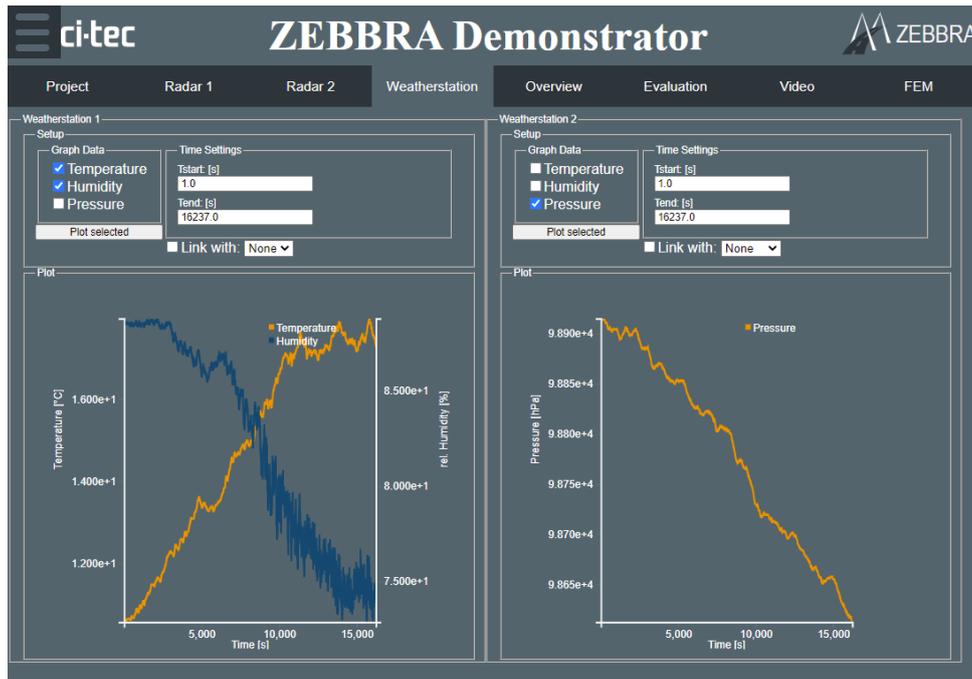


Abbildung 8.3.: Messergebnisse der Wetterstation von der ersten UAV-gestützten Messkampagne in Dietersdorf.

8.2. AP 6 - Erarbeitung des Demonstrators

Zur Verarbeitung und Visualisierung der GBR- und Witterungs-Messdaten sollte im ZEBBRA-Verbundprojekt ein wissensbasiertes Softwaresystem entworfen und umgesetzt werden. Dieser Demonstrator arbeitet auf den Ausgangsdaten der GBR-Geräte sowie auf den vom KIT-IPF prozessierten Daten. Die aus diesen Daten erstellten Datensätze und nachfolgend entwickelten Algorithmen und Modelle werden in Abschnitt 8.2.1 beschrieben. Insbesondere wird die Datenbank vorgestellt, die – basierend auf den GBR-Ergebnissen des KIT-IPFs – allen Projektpartnern als Grundlage zur Datenauswertung zur Verfügung gestellt wurde. In Abschnitt 8.2.2 wird zum einen das Frontend, das heißt die Benutzerschnittstelle, des Demonstrators beschrieben und zum anderen wird gezeigt, wie die entwickelten Algorithmen im Backend zusammenspielen.

8.2.1. AP 6.1 - Erarbeitung des wissensbasierten Softwaresystems

Im Zuge des ZEBBRA-Verbundprojekts kommen verschiedene Typen von Messdaten, zusätzlich zu den GBR-Daten, zusammen. So werden Referenzsensoren wie DMS oder Beschleunigungssensoren eingesetzt, um die Radarmethodik zu verifizieren. Weiterhin werden zur Bestimmung von Umwelteinflüssen verschiedene Umgebungsparameter gemessen. Und zu guter Letzt wird eine UAV eingesetzt, um die Charakteristika der Fahrzeuge auf der Brücke aufzunehmen. Diese Daten werden in verschiedenen Datensätzen bzw. -banken organisiert, die eine einfachere Algorithmenentwicklung ermöglichen (siehe Abbil-

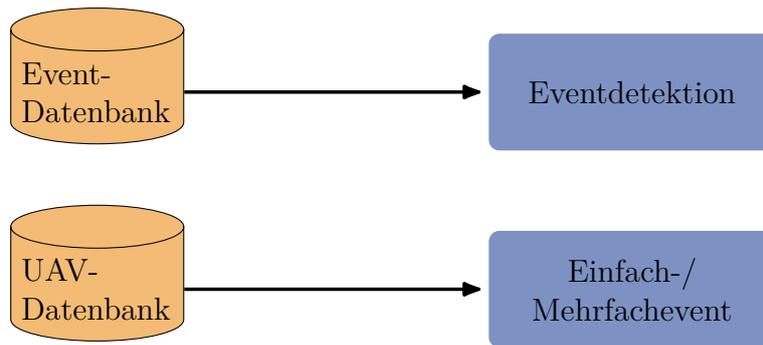


Abbildung 8.4.: Übersicht zu den Datenbanken und den daraus entwickelten Algorithmen.

Tabelle 8.1.: Übersicht über die erstellten Referenzdatensätze, abgewandelt aus [1]. Während die Dauer angibt, welcher Zeitraum gelabelt wurde, umfasst der Temperaturbereich die minimale und maximale Temperatur des entsprechenden Zeitraums.

Nummer	Brücke	Dauer	Anzahl an Events	Temperaturbereich
1	Dietersdorf	4h30min	1007	11,20 °C bis 12,35 °C
2	Dietersdorf	1h45min	395	8,90 °C bis 10,0 °C
3	Dietersdorf	30min	119	8,10 °C bis 8,90 °C
4	Mödlitz	3h30min	1482	14,70 °C bis 15,50 °C
5	Dietersdorf	1h20min	236	18,10 °C bis 19,40 °C

Abbildung 8.4). Die Datensätze und die daraus entwickelten Algorithmen werden im Folgenden beschrieben.

Event-Datensatz Da ein Ziel des ZEBBRA-Verbundprojekts die Erkennung von (Einzel-)Fahrzeugüberfahrten (bezeichnet als *Events*) ist, wurde ein Datensatz zusammengestellt, der Zeitstempel von Events sowie Ausschwingvorgängen im Anschluss an einige Events enthält. Dazu wurde eine GUI in Python implementiert, mit welcher komfortabel GBR-Zeitreihen gelabelt werden können. Expert:innen markierten dazu über mehrere Messkampagnen hinweg die Start- und Endzeitpunkte von Events. Tabelle 8.1 gibt einen Überblick über die gelabelten Messreihen. Für zwei Brücken wurden somit circa 11,5 Stunden an GBR-Daten bzw. 3339 Events gelabelt.

UAV-Datensatz Angeschlossen an die Erkennung (Detektion) der Events aus den GBR-Zeitreihen folgt im ZEBBRA-Verbundvorhaben eine Klassifikation dieser Events. Ein erster Schritt ist dabei die Unterscheidung von Einfach- und Mehrfachevents, das heißt die Information, ob sich ein oder mehrere Fahrzeuge (unabhängig von Fahrspur und Fahrtrichtung) auf der Brücke befinden. Dies kann aber nur anhand von Referenzdaten bestimmt werden, die in Form von UAV-Videodaten aufgezeichnet wurden. Für alle Events, die mit dem UAV aufgezeichnet wurden, wurden die entsprechenden Zeitreihen sämtlicher eingesetzter Sensorik in eine Datenbank geschrieben. Zwar können dadurch die Lasten der Fahrzeuge nicht bestimmt werden, aber Metadaten wie die Fahrtrichtung oder Fahrzeugtyp (Personenkraftwagen (PKW)/Schwerlastverkehr) können dokumentiert werden. Diese

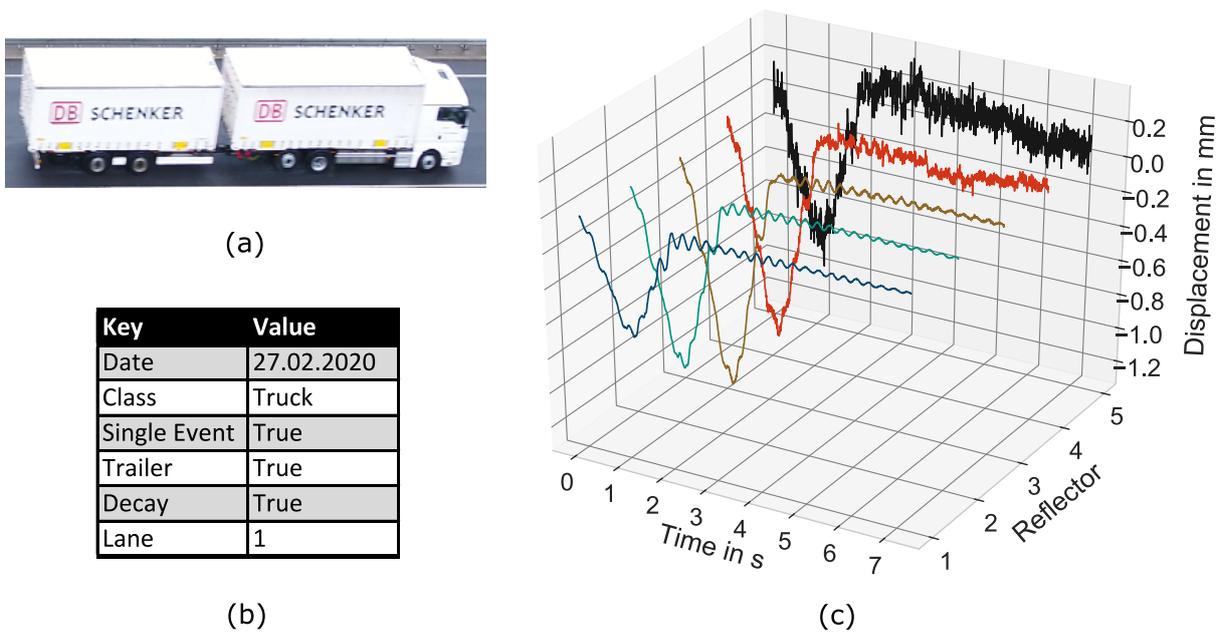


Abbildung 8.5.: Beispiellevent extrahiert aus der Datenbank. (a) Das zugehörige mit dem UAV aufgenommene Fahrzeug, (b) die verwendeten Abfragefilter für die Datenbank sowie (c) die Zeitreihen für die 5 Reflektoren sind dargestellt.

Metadaten bilden die Grundlage des UAV-Datensatzes. Auch hierzu wurde eine GUI in Python implementiert, welche es Expert:innen ermöglichte, Metadaten einfach und schnell zu erfassen.

Gekennzeichnet wurden die Events unter anderem anhand folgender Spezifikationen:

- Fahrzeugtyp
- Einzelevent
- Anhänger
- Ausschwingvorgang
- Fahrspur
- Fahrtrichtung
- Überholvorgang

Somit bietet die Datenbank eine schnelle und flexible Lösung für die Entwicklung der Eventklassifikation. Beispielhaft ist in Abbildung 8.5 das Ergebnis einer Datenbankabfrage entsprechend den Filtern in Abbildung 8.5(b) dargestellt. Abbildung 8.5(a) zeigt die UAV-Aufnahme des entsprechenden Fahrzeugs, Abbildung 8.5(c) weist für ein Radargerät die Verschiebung aller Reflektoren inklusive des Ausschwingvorgangs aus. Für Dietersdorf wurden Messkampagnen an 5 verschiedenen Tagen in die Datenbank eingefügt, für Mödlitz 3 Tage. Dadurch beläuft sich die Anzahl an Events auf 964 in Dietersdorf und auf 1049 in Mödlitz.

Eventdetektion Ein Ziel des ZEBBRA-Verbundprojekts ist es, automatisiert Fahrzeugüberfahrten bzw. Events im Radarsignal zu erkennen, um eine Belastungssituation durch Verkehr an Brücken frühzeitig zu bestimmen. Methodisch wurde ein datengetriebener Ansatz gewählt, um eine hohe Übertragbarkeit auf andere Brücken zu erreichen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Eventdetektion ([2] und [1]) wurden als Konferenzbeiträge auf ISPRS-Kongressen veröffentlicht.

Arnold und Keller [2] untersuchten den Einsatz von merkmalsbasierten Verfahren, sogenannten Shallow Learnern. Arnold, Hoyer und Keller [1] setzten DL in Form eines Convolutional Neural Network (CNN) ein und vergleichen die Ergebnisse mit einem Random Forest (RF), der als einer der besten Shallow Learner als Baseline dient. Mit den über 10 Stunden an Referenzdaten konnte eine Erkennungsrate von 94,7% für das CNN bzw. 92,7% für das merkmalsbasierte Referenzmodell erreicht werden.

Abbildung 8.6 zeigt die Klassifikationsergebnisse für beide Verfahren. Sie erreichen sehr vielversprechende Ergebnisse, allerdings zeigt eine genauere Analyse, dass der merkmalsbasierte Ansatz ebenfalls die Ausschwingvorgänge als Events erkennt. Eine Kombination beider Verfahren erlaubt somit eine direkt detaillierte Klassifikation von Brückenverschiebungszeitreihen basierend auf GBR-Messungen. Die Vorgehensweise des kombinierten Ansatzes gestaltet sich wie folgt:

- (i) Klassifizieren beide Verfahren einen Zeitausschnitt als entweder **Event** oder **No Event**, so wird das Ergebnis übernommen.
- (ii) Gibt das merkmalsbasierte Verfahren ein **Event** aus, dass CNN allerdings **No Event**, so handelt es sich um einen Ausschwingvorgang (**Decay**).

Eine Anwendung als Kombination wird in Abbildung 8.6 im unteren Ausschnitt dargestellt. Dies ist dahingehend ein Vorteil, dass Ausschwingvorgänge sich hervorragend eignen, um Modalparameter der Brücke zu extrahieren, wie zum Beispiel die Eigenfrequenz. Solche Modalparameter stehen oft im Mittelpunkt von Untersuchungen zur Schädigungsdetektion, die in Part II von KIT-IPF genauer beschrieben werden. Damit besteht im ZEBBRA-Verbundvorhaben die Möglichkeit zur Schädigungserkennung sowohl (a) basierend auf den Überfahrten als auch (b) auf den Ausschwingvorgängen.

Einfach-/Mehrfachevent Die bisher beschriebenen Verfahren erkennen anhand der GBR-Daten erfolgreich, ob sich ein Fahrzeug auf der Brücke befindet. Jedoch können sie nicht unterscheiden, wie viele Fahrzeuge sich gleichzeitig auf der Brücke befinden. So sind in Abbildung 8.6 bei Sekunde 50 zwei ineinander übergehende, durch zwei PKW-Überfahrten verursachte, Durchbiegevorgänge zu sehen, die jedoch von der Eventdetektion als ein einzelnes Event erkannt werden. Abbildung 8.7 zeigt ein Mehrfachevent mit zwei PKWs, die gleichzeitig und in verschiedene Fahrtrichtungen die Brücke in Dietersdorf überqueren. Da es für die Bestimmung der Belastungssituation notwendig ist zu wissen, wie viele und welche Fahrzeuge auf einer Brücke sind, muss zunächst eine Klassifikation in dieser Hinsicht erfolgen. Auch für die Analyse von Einzelevents ist es unabdingbar, dass nur solche Events untersucht werden, die in die entsprechende Kategorie fallen.

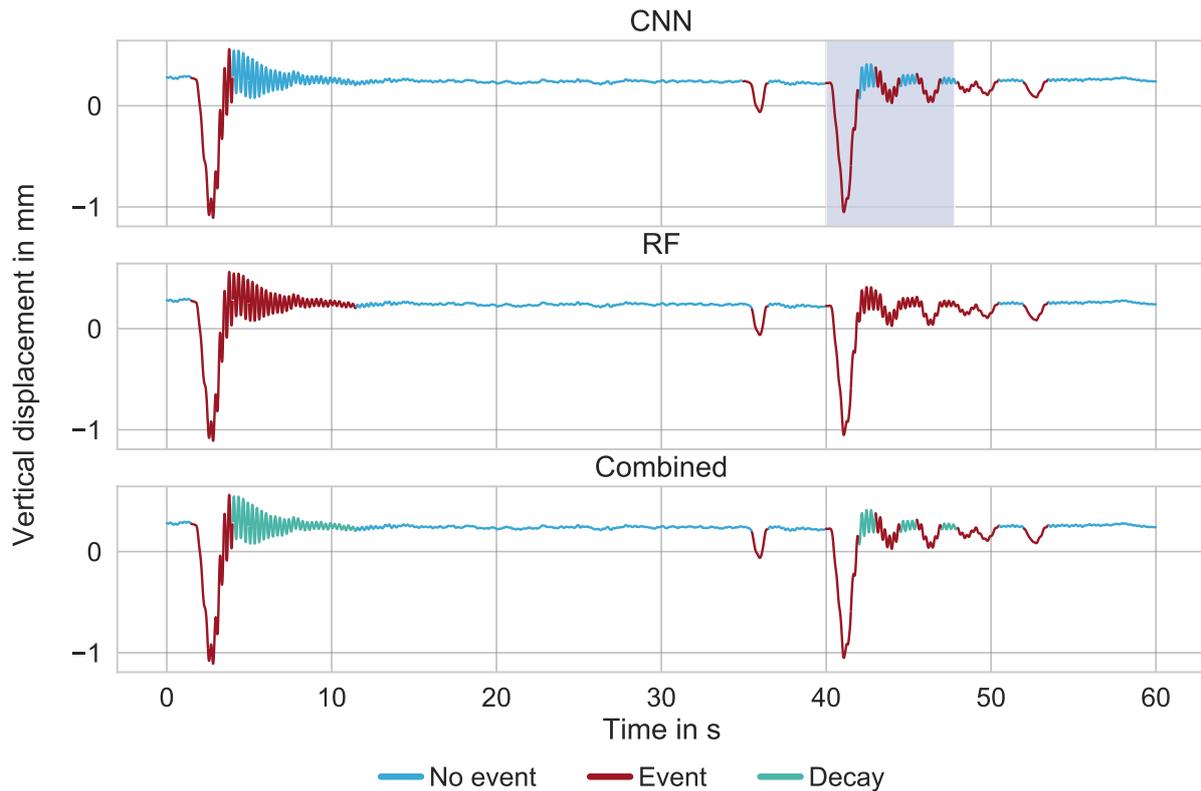


Abbildung 8.6.: Ergebnisse der Event-Erkennung basierend auf den entwickelten datengetriebenen Ansätzen für ein etwa 60s langes GBR-Signal. Oben: Deep Learning (CNN). Mitte: Merkmalsbasiert (RF). Unten: Kombination beider Ansätze (Combined).

Daher wurde im Rahmen von ZEBBRA eine Studie in Form einer Masterarbeit [6] zur Erforschung eines datengetriebenen Ansatzes zur Klassifikation von Events in Einzel- und Mehrfachevents durchgeführt. Die Ergebnisse sind sehr vielversprechend. Es wurden Methoden entwickelt, die die komplexe Situation aus Abbildung 8.7 erfolgreich als Mehrfachevent klassifizieren. Insbesondere zeigt sich, dass sich DL in diesem Kontext mit Data Augmentation kombinieren lässt, um die für das Training von DL-Modellen relativ kleinen Datensätze zu erweitern. Damit können komplexe Systeme trainiert werden, auch wenn der UAV-Datensatz aus nur einer geringeren Anzahl an Einträgen besteht.

8.2.2. AP 6.2 -Erarbeitung und Entwurf einer Benutzerschnittstelle zur Visualisierung

Als flexible und innovative Lösung wurde für die Benutzerschnittstelle das Electron-Framework [3] gewählt, das für eine Vielzahl an beliebigen Applikationen genutzt wird. Es ermöglicht eine einfache, plattformunabhängige Entwicklung und bietet durch das Webdesign eine ansprechende Benutzeroberfläche. Im Folgenden werden sowohl Front- als auch Backendfunktionalitäten beschrieben.

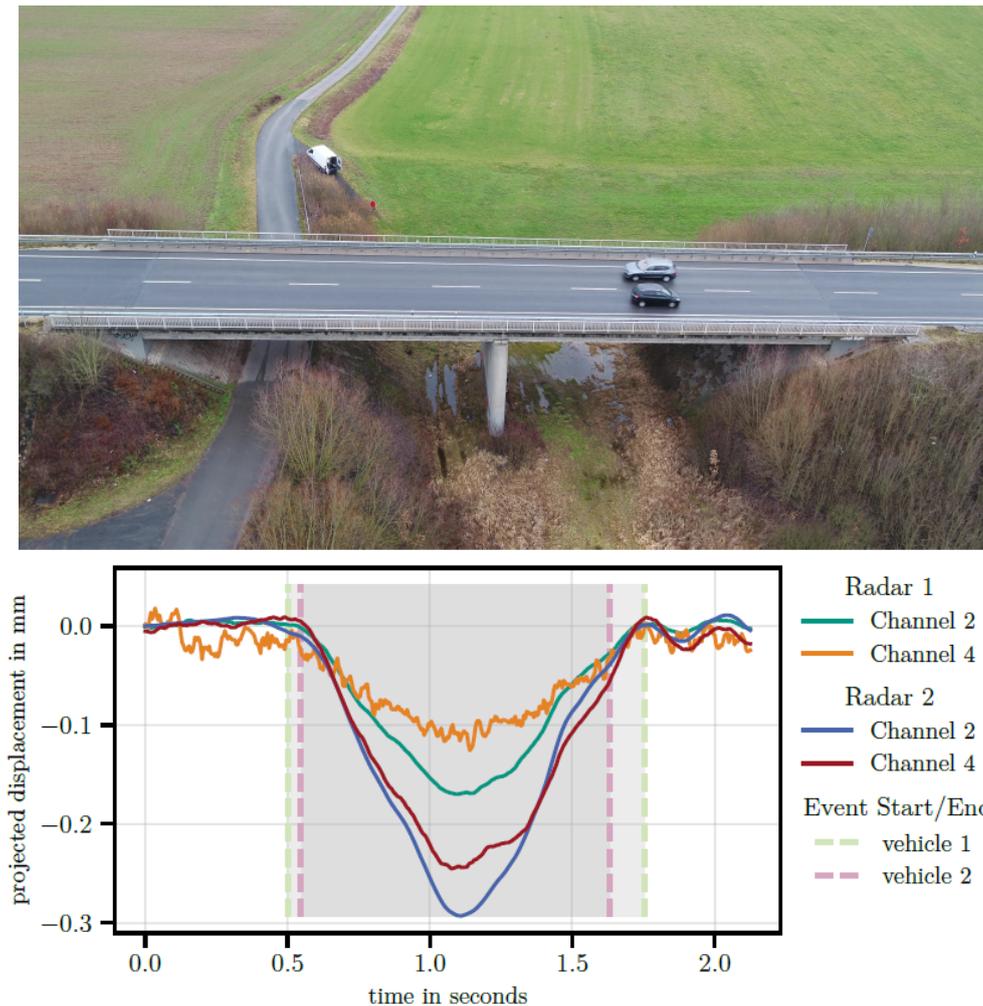


Abbildung 8.7.: Exemplarisches Mehrfachevent aus Dietersdorf (oben) und die zugehörigen Zeitreihen (unten) für zwei Reflektoren (Channel) von beiden GBRs sowie die Start- und Endzeitpunkte der jeweiligen Überfahrten. Aus den Radardaten ist rein visuell nicht zu erkennen, dass sich mehr als ein PKW auf der Brücke befindet. Entnommen aus und verändert nach Steegmayer [6].

Prinzipieller Aufbau Abbildung 8.8 zeigt den grundlegenden Aufbau des ZEBBRA-Demonstrators. Das User-Interface wurde webbasiert implementiert und modular umgesetzt. Je nach Bedarf kamen Python (aufgrund der großen Auswahl an Bibliotheken besonders geeignet für die Machine-Learning-Klassifikationen) und C sowie Ada (besonders geeignet für rechenintensive Auswerteprozesse) zum Einsatz. Die Vorverarbeitungsschritte basieren auf den von KIT-IPF entwickelten Verfahren. Die eingesetzten ML-Verfahren werden in Abschnitt 8.2.1 beschrieben. Zusätzlich startet der Demonstrator eine eigene Instanz einer Datenbank, in welcher die erkannten und klassifizierten Events für eine schnelle und flexible Analyse vorgehalten werden.

Abbildung 8.9 stellt die Verarbeitungsschritte im Backend des Demonstrators dar. Wird eine neue Messkampagne angelegt, werden zunächst Events und Ausschwingvorgänge klassifiziert. Anhand dieser werden die Messreihen der beiden Radargeräte synchronisiert. Die Events werden extrahiert und klassifiziert und die Ergebnisse in die Datenbank geschrieben.

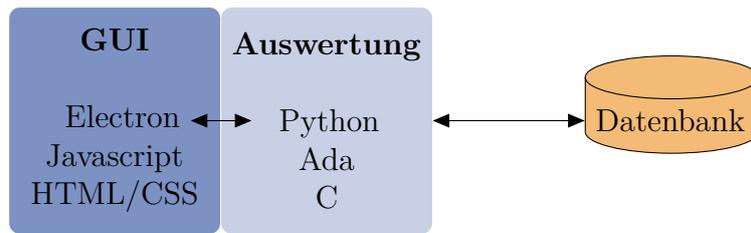


Abbildung 8.8.: Grundlegender Aufbau des Demonstrators.

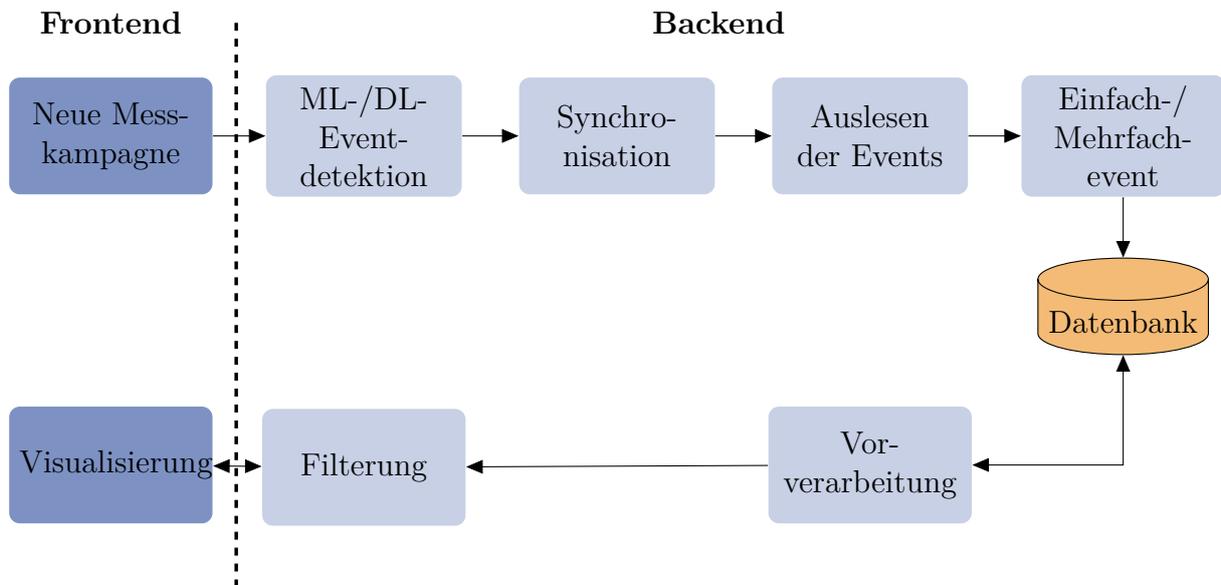


Abbildung 8.9.: Übersicht und Abfolge der im Backend des Demonstrators genutzten Auswertungsalgorithmen.

ben. Für die Visualisierung der Daten können im User-Interface verschiedene Optionen gewählt werden. Dies wird später detaillierter beschrieben. Da das Ziel ein Vor-Ort-Einsatz des Demonstrators ist, kann lokal, also ohne Internetzugang, gearbeitet werden. Das Projektformat ist so konzipiert, dass die im Demonstrator erstellten Projekte flexibel und problemlos zwischen verschiedenen Geräten ausgetauscht werden können.

Im Folgenden werden die wesentlichen Funktionen des Demonstrators zusammenfassend vorgestellt. Es werden dabei nacheinander die einzelnen Tabs bzw. Reiter beschrieben, mit denen zwischen verschiedenen Funktionalitäten des Demonstrators gewechselt werden kann. Die Tabs sind beispielsweise in Abbildung 8.10 zu sehen, wobei nur auf **Project**, **Radar 2**, **Weatherstation**, **Overview** und **Evaluation** eingegangen wird.

Project-Tab Der **Project-Tab**, dargestellt in Abbildung 8.10 stellt den Startbildschirm der ZEBBRA-App dar. Besteht bereits ein Projekt für eine Brücke oder muss ein neues Projekt erstellt werden, kann dies über das Menü links oben geöffnet bzw. erzeugt werden. Anschließend werden die Metadaten sowie die bereits vorhandenen Messkampagnen angezeigt. Über **Add...** unterhalb der aufgelisteten Messkampagnen können neue Kampagnen angelegt werden. Die hinzugefügten GBR-Daten werden sofort ausgewertet und in die Datenbank geschrieben.

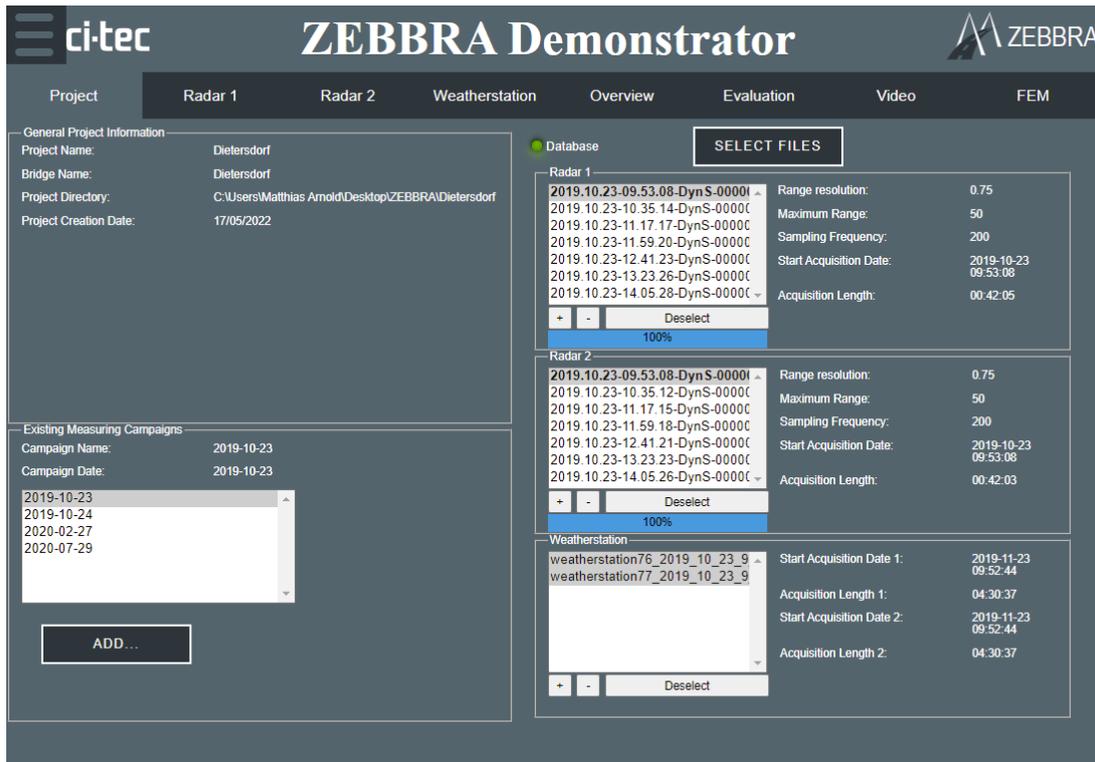


Abbildung 8.10.: Project-Tab des Demonstrators.

Wird eine Kampagne zur näheren Analyse der Radardaten ausgewählt, werden rechts für beide Radargeräte die vorhandenen *.gbd-Dateien gelistet. Diese Dateien werden dann für die Visualisierung prozessiert und können in den Tabs Radar 1 und Radar 2 betrachtet werden. Selbiges gilt für die Daten der Wetterstation und den entsprechenden Tab Weatherstation. Schließlich zeigt ein Indikator an, ob die Datenbank verbunden und nutzbar ist.

Radar 2-Tab Die Tabs Radar 1 und Radar 2 sind deckungsgleich und dienen der Visualisierung und ersten Bewertung von Messungen. Ein Beispiel ist in Abbildung 8.11 zu sehen. Links unten sind die SNRs für alle Messpunkte zu sehen und dienen als Orientierung, welche Range Bins (Brückenpunkte bzw. Reflektorpositionen) sich für eine Visualisierung eignen.

In diesem Beispiel wurde die projizierte Verschiebung des Range Bins 11 ausgewählt. Es besteht jedoch, wie im oberen Bereich zu sehen ist, eine große Auswahl an Signalarten, die dargestellt werden können. Zu genaueren Analyse besteht die Möglichkeit, in interessante Zeitabschnitte zu zoomen und von diesen das Frequenzspektrum angezeigt zu bekommen, was eine schnelle Bestimmung der Eigenfrequenz der Brücke ermöglicht. Auch die Klassifikatoren aus Arnold und Keller [2] können über Tools eingesetzt werden, um zum Beispiel Zeitausschnitte nach Fahrzeugtyp zu klassifizieren.

Weatherstation-Tab Der Weatherstation-Tab ist bereits in Abbildung 8.3 dargestellt. Für beide Sensoren können die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der

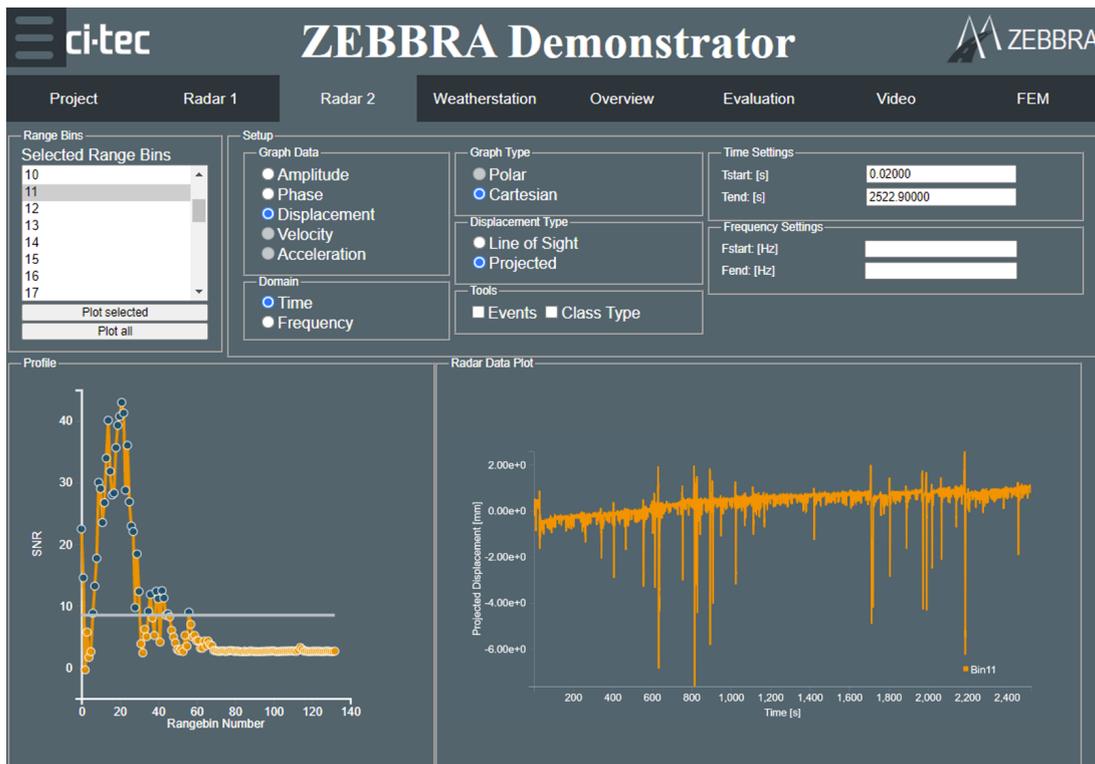


Abbildung 8.11.: Radar 2-Tab des Demonstrators.

Druck angezeigt werden. Auch hier besteht die Möglichkeit, in interessante Zeitabschnitte zu zoomen.

Overview-Tab Der **Overview-Tab**, dargestellt in Abbildung 8.12, bietet zur Orientierung eine graphische Darstellung des Messaufbaus. Dadurch soll es erleichtert werden, vergangene GBR-Messkonfigurationen zu rekonstruieren, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Dazu werden zwei seitliche Ansichten, eine pro GBR, und eine Ansicht aus der Vogelperspektive dargestellt. Zusätzlich können dem Projekt Bilder oder Dokumente hinzugefügt und bei späteren Messungen wieder abgerufen werden, wie beispielsweise Bilder von Messaufbauten oder Brückenbücher.

Evaluation-Tab Schließlich bietet der **Evaluation-Tab** noch die Möglichkeit der Analyse der Ergebnisse der in Abschnitt 8.2.1 beschriebenen Verfahren. Es können Analysen für erkannte Events und Ausschwingvorgänge mithilfe von Histogrammen und zweidimensionalen Abbildungen vorgenommen werden.

Beispielhaft wurden in Abbildung 8.13 die Events danach gefiltert, ob sie einen erkennbaren Ausschwingvorgang nach sich ziehen (`Has_Decay: true`). Für Events, für die das der Fall ist, wurde ein Histogramm über die aus den Ausschwingvorgängen extrahierte erste Eigenfrequenz erstellt. Es findet eine farbliche Unterscheidung nach Datum der Messkampagne statt. Ein großer Peak findet sich bei ca. 3,0 Hz, was der vom KIT-IPF bestimmten ersten Eigenfrequenz entspricht. Der Peak bei circa 0,3 Hz entsteht durch falsch detektierte Ausschwingvorgänge. Schließlich existiert ein dritter Peak bei 3,6 Hz. Die hohe Varianz



Abbildung 8.12.: Overview-Tab des Demonstrators.

kommt unter anderem dadurch zustande, dass gestörte Ausschwingvorgänge nicht gefiltert wurden, das heißt, auch wenn im Ausschwingvorgang ein Fahrzeug die Brücke überquert, wird die FFT berechnet. Das kann zu Differenzen führen.

Zusätzlich werden zukünftig anspruchsvollere Verfahren zur Frequenzbestimmung eingesetzt. Es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den Messkampagnen gering ausfallen. Dies ist überraschend, da die Umgebungstemperatur stark variierte, wie sich anhand der x-Achse der rechten zweidimensionalen Grafik zeigt. Auf der y-Achse sind die maximalen Durchbiegungen für erkannte Events in Millimetern aufgetragen. Es zeigt sich ein sehr geringer Trend zu größeren Durchbiegungen bei steigender Temperatur. Neben diesen Parametern stehen noch weitere zur Verfügung, wie zum Beispiel die Eventdauer. Zukünftig sollen noch weitere automatisierte Auswertungen und Klassifikationen durchgeführt werden, um eine breitbandigere Brückenanalyse zu ermöglichen. Auch sollen zusätzliche Typen von Abbildungen, die bei einer Auswertung hilfreich sein können, hinzugefügt werden, wie zum Beispiel Boxplots. Beide Erweiterungsarten sind durch die Modularität des Demonstrators einfach umzusetzen.

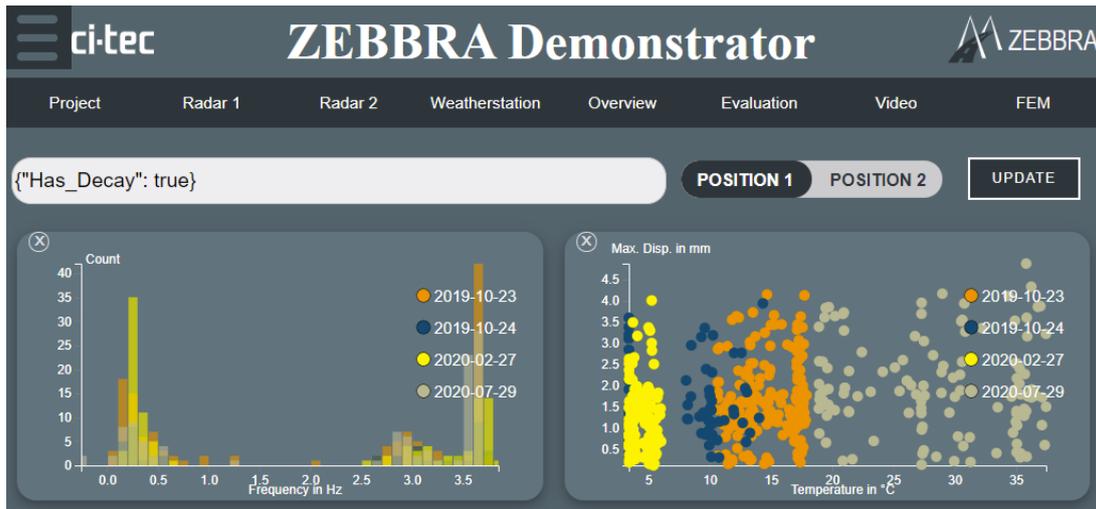


Abbildung 8.13.: Evaluation-Tab des Demonstrators.

8.3. AP 9 - Fertigstellung & Validierung

Da eine Vor-Ort-Validierung des gesamtheitlichen ZEBBRA-Demonstrators ohne Ansteuerungsmöglichkeit für die Radargeräte nicht realisierbar ist (siehe Abschnitt 8.1), fand eine Evaluierung der Einzelkomponenten wie z. B. der entwickelten Algorithmen (siehe Abschnitt 8.2.1) anhand eines weiteren, unbekanntes Datensatzes statt. Die Nutzbarkeit des Demonstrators bzw. der erarbeiteten Verfahren und Prozesse wird eher auf öffentlich einsehbare Daten des Kraftfahrtbundesamt (KBA) bezogen und weniger auf quantifizierte Größen wie die Genauigkeit der Klassifikationsperfomanz (hierfür sei auf [2] und [1] verwiesen). Zunächst wird hierzu eine Messkampagne, die nicht zur Erarbeitung der Verfahren verwendet wurde, mittels der finalisierten Verfahren klassifiziert und mit von Expert:innen händisch gekennzeichneten Events verglichen. Anschließend werden die Ergebnisse mithilfe der Simulationsdaten zu Fahrzeuglasten (siehe Teil II von BFSM) transformiert und deren Plausibilität anhand von vom KBA veröffentlichten Daten verifiziert.

Maximale Durchbiegung Am 29. Juli 2020 erfolgte eine weitere Messkampagne, deren Daten nicht für die Methodenentwicklung genutzt wurde. Alle aufgenommen GBR-Daten wurde durch Expert:innen gemäß den Klassen Event/Ausschwingvorgang/Nicht-Event klassifiziert. Zusätzlich wurde die in Abschnitt 8.2 beschriebene Eventdetektion auf die Zeitreihe angewendet und die Ergebnisse in die ZEBBRA-Datenbank geschrieben. Diese Datenbank ermöglicht eine einfache Analyse der Ergebnisse. Eine solche Analyse erfolgt nun exemplarisch anhand der maximalen Durchbiegung von Events. Die maximale Durchbiegung beschreibt die größte Verschiebung in Millimetern während einer Fahrzeugüberfahrt. So beträgt beispielsweise in Abbildung 8.6 die maximale Durchbiegung für das erste Event circa 1 mm.

Abbildung 8.14 zeigt die Ergebnisse der Klassifikation als Histogramm, wobei der Bereich auf PKWs beschränkt ist. Für jedes erkannte Event wird die maximale Durchbiegung aus den Zeitreihen extrahiert. Wie sich zeigt, erkennt die entwickelte Eventdetektion zwar einige Events nicht, aber insgesamt besteht eine systematische Ähnlichkeit. Insbesondere

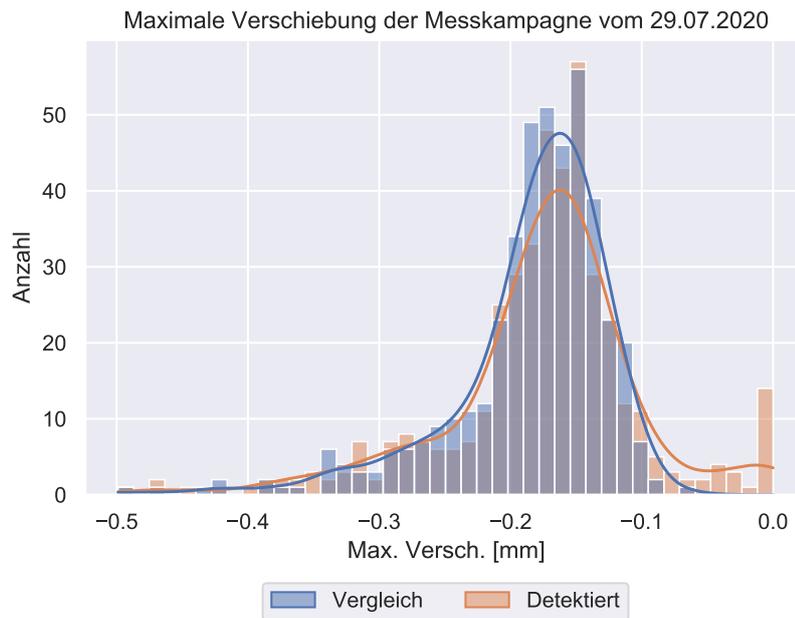


Abbildung 8.14.: Histogramm über die maximale Durchbiegung der gelabelten Events (Vergleich), sowie die von der entwickelten Eventdetektion erkannten Events (Detektiert). Zusätzlich werden für beide Histogramme die Ergebnisse einer Kernel Density Estimation (KDE) dargestellt. Das Intervall der maximalen Durchbiegung wurde zur besseren Übersichtlichkeit auf $-0,5$ mm bis $0,0$ mm begrenzt, das heißt es werden nur PKWs dargestellt.

das Maximum der Kernel Density Estimation (KDE) liegt an der gleichen Position auf der x-Achse. Dies soll genutzt werden, um anhand der Simulationsdaten die Fahrzeuggewichte zu bestimmen.

Simulationsdaten Die Simulationsmodelle, entwickelt vom Projektpartner BFSM gemäß AP 2, können genutzt werden, um den Zusammenhang zwischen der maximalen Durchbiegung und der Last eines Fahrzeugs zu untersuchen. Hierzu sind Fahrzeuge mit verschiedenen Gewichten simuliert worden. Für einen Messpunkt in der Mitte der Brücke wurde nun die resultierende LOS-Verschiebung für ein GBR bestimmt. In Abbildung 8.15 sind die beiden Größen, maximale Verschiebung und Gewicht, gegeneinander aufgetragen. Zusätzlich ist eine lineare Regression durchgeführt worden, um eine Abbildungsfunktion zu erhalten. Mit Hilfe dieser Funktion ist es nun möglich, aus den Ergebnissen in Abbildung 8.14 die Gewichte der PKWs und damit die Last auf der Brücke zu berechnen.

Lastschätzung Letztendlich zeigt Abbildung 8.16 die Messdaten zur teilweisen Validierung der Ergebnisse des ZEBBRA-Verbundprojekts, die mithilfe von Simulationsdaten in die Last auf der Brücke umgerechnet worden sind. Der Mittelwert aller Fahrzeuge würde damit circa 2090 kg betragen. Als Vergleichswert sind Daten des KBA mit aufgetragen. Diese Daten stellen die Anzahl an zugelassenen Fahrzeugen in Deutschland dar und zwar

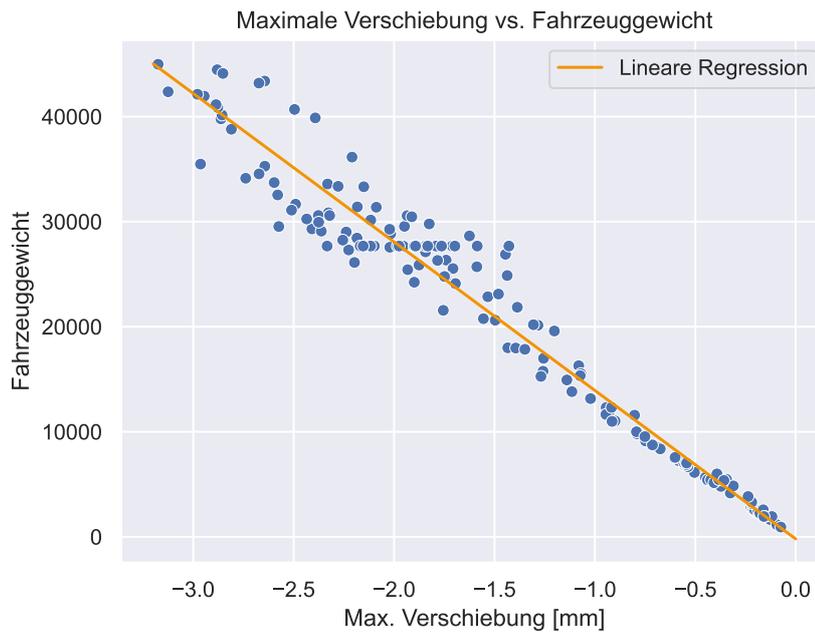


Abbildung 8.15.: Visualisierung des Verhältnissen zwischen der maximalen Verschiebung einer Überfahrt und dem Fahrzeuggewicht.

für variierende zulässige Gesamtmassen. Da die Intervalle für die Lasten in der KBA-Statistik unterschiedlich breit sind, wurde jeweils der Mittelpunkt des Gewichtsintervalls genommen. So liegt das Maximum der KBA-Statistik in dem Intervall 1701 kg bis 2000 kg und ist bei 1850 kg eingezeichnet. Diese Kurve hat eine hohe Korrelation mit der KDE der gemessenen bzw. berechneten Lasten. Das Maximum der beiden Kurven weist eine leichte Abweichung auf, die sich jedoch durch die Fahrzeugbeladung sowie die großen, variierenden Intervalle der KBA-Statistik mindestens teilweise erklären lässt. Auch wird hier noch nicht zwischen Einzel- und Mehrfachevents unterschieden, was zu einer Überschätzung der Last von einzelnen Events führen kann. Grundsätzlich zeigt sich jedoch, dass sowohl die GBR-Messdaten, als auch die Simulationsdaten zu plausiblen Ergebnissen führen. In Zukunft kann auf solchen Resultaten aufgebaut werden, um die Verkehrssituation auf Brücken zu schätzen. Dies kann helfen, die Standsicherheit von Brücken zu überprüfen, da sie gegebenenfalls durch die Zunahme des (Schwerlast-)Verkehrs einer Belastung ausgesetzt sein könnten, für die sie nicht ausgelegt sind.

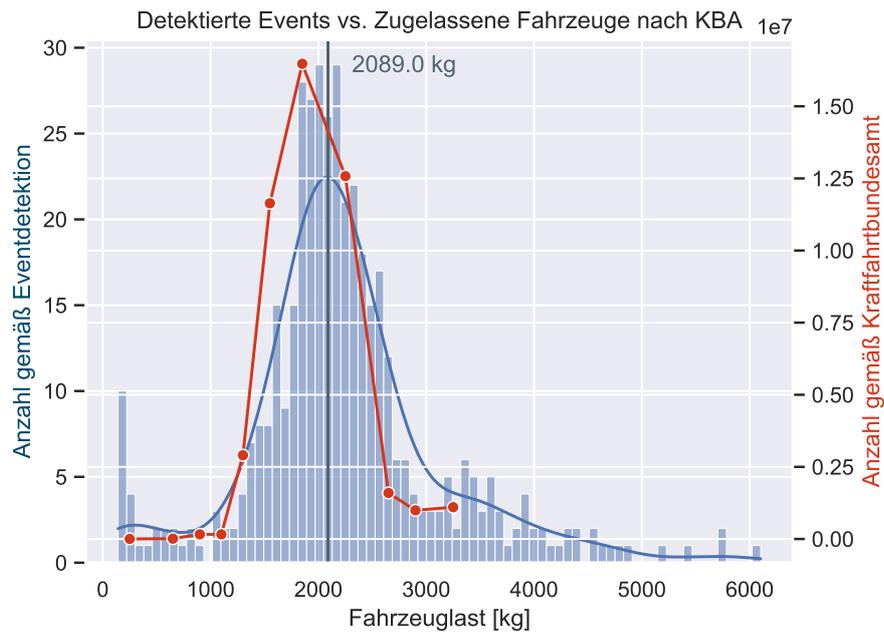


Abbildung 8.16.: Die maximale Verschiebung aus Abbildung 8.14 wurde mit der Regressionsfunktion aus Abbildung 8.15 in die Fahrzeuglast umgerechnet. Der Maximumpunkt der KDE ist mit Grau mit der entsprechenden Last von 2089,0 kg beschriftet. Zusätzlich ist als Vergleichswerte eine Statistik des KBAs [4] zum Bestand an Kraftfahrzeugen am 1. Januar 2021 nach zulässiger Gesamtmasse eingezeichnet.

8.4. Voraussichtliche Nutzung der ZEBBRA-Ergebnisse

Die Ergebnisse der ZEBBRA-Verbundprojekts konnten in Demonstrationsanwendungen bereits teilweise mit neu gewonnenen Partnern eingesetzt werden. So wird in Zusammenarbeit mit dem durch ci-tec gewonnenen Tiefbauamt Karlsruhe die Pulverhausbrücke bemessen und die entwickelten Methoden und Verfahren evaluiert und verbessert. Aufgrund der Komplexität von Brücken ist eine Übertragbarkeit einiger Verfahren und Algorithmen, wie die von ci-tec erarbeitet und implementierte Eventdetektion, zwar möglich, andere jedoch, wie eine Zustandsbewertung, benötigen weitergehende Untersuchungen. Im Folgenden soll kurz beschrieben werden, wie die erarbeiteten Algorithmen weiterhin genutzt und verbessert werden sollen. Hier bietet die gewonnene Partnerschaft mit dem Tiefbauamt Karlsruhe eine große Chance, die entwickelten Lösungen weiter in eine anwendungsorientierte, generalisierbare Richtung zu vertiefen.

Messkampagnen Das Wissen, das ci-tec in Zusammenarbeit mit dem KIT-IPF beim Planen und Durchführen von GBR- Messkampagnen gesammelt hat, ermöglicht es ci-tec, auch nach Ende des ZEBBRA-Verbundvorhabens weitere Brückenbauwerke mittels GBR zu bemessen, wobei Standortanforderungen und eine Bestückung mit Reflektoren besser beurteilt werden können. Die Vorteile und Genauigkeit der GBR-Messungen sind beim

Verbundpartner KIT-IPF im Teil II verdeutlicht. Neben einer größer werdenden Datenbasis, die zur (Weiter-)Entwicklung der bestehenden Verfahren sowie der Erarbeitung von komplexeren Algorithmen dient, kann ci-tec über zusätzliche Brücken weiteres Fachwissen sammeln, was Bauämter zur Bewertung der Brücken benötigen. Entscheidend ist hierbei die Erkenntnis bei den zuständigen Behörden, dass GBR-Messungen zur Überwachung der Brückendynamik als wertvolle Alternative zu der bisherigen konventionellen Überwachung eingesetzt werden können.

Eventdetektion Für ein- bis zweifeldrige Brücken kann die Eventdetektion bereits erfolgreich eingesetzt und genutzt werden. Diese Ergebnisse können in Kombination mit Simulationsmodellen bereits zur Lastschätzung genutzt werden und bieten somit die Möglichkeit, Verkehrsbelastungsspitzen auf Brücken einzuschätzen. Solche Daten helfen bei der Evaluation, ob eine Brücke für den gemessenen Verkehr ausgelegt ist oder ob Sperrungen bzw. Nacharbeiten an der Brücke notwendig sind. Weitere Untersuchungen zur Eventklassifikation nach der Einzel- und Mehrfachklassifikation sowie Analysen von Brücken mit mehr als zwei Feldern sind notwendig, um zum einen detailliertere Ergebnisse zu erhalten und gleichzeitig eine höhere Generalisierbarkeit zu erreichen.

Demonstrator Der Demonstrator kann in seiner jetzigen Form als Grundlage für Brückenbewertungen dienen und soll zukünftig (Zeithorizont von 2-3 Jahren) modular erweitert werden. Neu entwickelte Algorithmen können schnell und einfach dem Softwaresystem hinzugefügt werden. So kann der Demonstrator flexibel an die Bedürfnisse von Bauämtern und auch Anforderungen von Brücken angepasst werden. Diese individuelle Anpassung kann auch in der graphischen Benutzeroberfläche erfolgen.

8.5. Umgang mit den im ZEBBRA-Verbundvorhaben aufgenommenen Forschungsdaten

Alle erhobenen Daten bilden eine wesentliche Grundlage für das wissenschaftliche und technische Arbeiten. Sie enthalten die GBR- sowie Referenzdaten, die UAV-Videos und die Simulationsdaten. Zusätzlich zu den Daten bilden die erarbeiteten Verfahren und Modelle, in Form von Python-/Matlabscripts, etc., die Ergebnisse des gesamten Verbundvorhabens. Die Skripte und der von ci-tec erarbeitete Code für den Softwaredemonstrator unterliegen einer regelmäßigen Sicherung.

Um eine langfristige Sicherung und Bereitstellung der Forschungsdaten sicherzustellen und somit Anschlussmöglichkeiten für die weitere Forschung zu bilden, wurden die erhobenen Daten zusammen mit den erarbeiteten Verfahren, Modellen und Daten archiviert. Teile der Daten sind bei ci-tec vorgehalten und mit entsprechenden Metadaten versehen. Zusätzlich fand eine mehrfache Sicherung der Ergebnisse durch das Anlegen von Kopien statt.

9. Literatur Part II

- [1] Matthias Arnold, Mareike Hoyer und Sina Keller. „Convolutional Neural Networks For Detecting Bridge Crossing Events With Ground-Based Interferometric Radar Data“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences V-1-2021* (Juni 2021), S. 31–38. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2021-31-2021.
- [2] Matthias Arnold und Sina Keller. „Detection And Classification Of Bridge Crossing Events With Ground-Based Interferometric Radar Data And Machine Learning Approaches“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences V-1-2020* (Aug. 2020), S. 109–116. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2020-109-2020.
- [3] *Electron*. <https://www.electronjs.org/>. Accessed: 2022-05-17.
- [4] Kraftfahrt-Bundesamt. *Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) 1. Januar 2021*. https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ25/fz25_2021_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=5. Accessed: 2022-05-23.
- [5] Sabine Rödelsperger et al. „Monitoring of Displacements With Ground-Based Microwave Interferometry: IBIS-S and IBIS-L“. In: *Journal of Applied Geodesy* 4.1 (Jan. 2010). ISSN: 1862-9016. DOI: 10.1515/jag.2010.005.
- [6] Ian Steegmayer. „Deep Learning for Event Classification with Ground-Based Interferometric Radar Data“. Unveröffentlicht. Masterarbeit. Juni 2022.