

# Schlussbericht P-BIM

"Predictive Bridge Information Deep Learning Modell zur Anomalieerkennung"

Projektausführung: Dr. Melanie Schaller

Projektleitung: Prof. Dr. Andreas Hotho

## Inhalt

Schlussbericht P-BIM.....	1
I. Zusammenfassende Darstellung.....	1
1 Aufgabenstellung.....	1
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	1
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	3
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
II. Eingehende Darstellung.....	6
Literaturverzeichnis.....	12

## I. Zusammenfassende Darstellung

### 1 Aufgabenstellung

Ziel von P-BIM war es, durch spezifisch für Sensornetzwerkdaten angepasste tiefe neuronale Netzwerk-Architekturen lokale, schadensbedingte Änderungen, also Anomalien am Schwingungsverhalten zu erkennen und dadurch zur Weiterentwicklung der Strukturüberwachung beizutragen. Angestrebt wurde ein datenbasiertes Entscheidungssystem zur Beurteilung von lokalen Anomalien und Schadensklassen, das zur Steigerung der Investitionseffizienz die Weiterverwertung bestehender Daten des mFunds, im Speziellen der Daten der intelligenten Brücke, eingeplant wurde. Es wurden daher im Projekt die Daten der intelligenten Brücke und deren simulierter Schädigungen in die Auswertungen einbezogen. Es sollte in einer Machbarkeitsstudie (Engl.: Proof of Concept (POC)) ein Anomalie-Erkennungs-Modell entwickelt werden, das zwischen Normalschwingungsverhalten und anormalem Schwingungsverhalten von Sensordaten diskriminiert.

### 2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Um die Aufgabe der Strukturüberwachung und -validierung erfolgreich zu lösen, wird idealerweise eine Vielzahl von Daten benötigt, die es ermöglicht, ein genaues Bild vom Zustand der Brücke zu erhalten. Um diese Datenbasis zu schaffen, wurde auf mehrere Datensätze zurückgegriffen. Bisher wurde das Problem der Strukturüberwachung und -validierung von Brücken durch traditionelle Ansätze wie visuelle Inspektionen, manuelle Messungen und begrenzte Sensortechnologien gelöst. Um jedoch die Ziele des Projektes zu erreichen und innovative Lösungen zu entwickeln, die über diese herkömmlichen Methoden hinausgehen, wurden spezifische Daten wie kontinuierliche Überwachungsdaten von Sensoren, hochauflösende Messungen zur Erfassung subtiler Strukturveränderungen und umfassende Echtzeitdaten zur Analyse des strukturellen Verhaltens mit Labels von Schadensklassen benötigt. (1) Im digitalen Testfeld Autobahn der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Projekt der intelligenten Brücke wurden erstmals seit Neubau

Sensordaten aufgezeichnet, um später im Falle der Strukturüberwachung Kenntnis zum initialen Messzustand zu haben. Dafür wurde beim Neubau der Brücke im Kreuz Nürnberg ein Bauwerk mit externer Vorspannung mit einem sensorischen Messkonzept ausgestattet. Da aufgrund der Neuwertigkeit des Bauwerks echte Schädigungen bis dato ausgeblieben sind, verwendete P-BIM (2) die Daten des Unterprojektes der intelligenten Brücke mit simulierten Schädigungen durch eine Finite-Elemente-Simulation. Dieses Finite-Elemente-Modell wurde anhand der sensorisch erfassten Messdaten der intelligenten Brücke kalibriert. (3) Um das im P-BIM Projekt entwickelte ModeConv Modell neben den simulierten Schädigungen zusätzlich noch auf realen Schädigungen auszutesten, konnte im Zuge des Projektes eine Partnerschaft mit der Universität Luxemburg eingegangen werden, die echte Schädigungsdaten einer Brücke zur Verfügung stellten. Dabei handelte es sich um ein Bauwerk aus Mertert, das beim Neubau in großen Stücken abtransportiert und auf einem Gelände unweit der Universität Luxemburg wieder aufgebaut wurde. In das reale Bauwerk wurden dann schrittweise Schäden induziert und mit Sensoren gemessen. Zur Anregung des Bauwerks wurden dabei Shaker verwendet. (4) Zudem wurde als zusätzlicher dritter Datensatz der Open Source Datensatz QUGS von der Universität Qatar zur weiteren Überprüfung der Modellqualität verwendet. Dabei handelt es sich um Sensordaten, die an einem Gitterkonstrukt erfasst wurden. Die Beschädigung der Struktur wurde durch das Lockern der Verschraubungen eingetragen. Die Veränderungen der Struktur in Form des Sensorsignals konnte im Datensatz durch die externe Anregung mit einem Shaker erfasst werden.

Zusätzlich zu den Datensätzen konnte zudem auf wissenschaftliche Vorarbeiten aus dem Bauingenieurwesen und der KI-Forschung aufgesetzt werden. Zu den Details der verwendeten Literatur siehe Punkt 4.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Entwicklung eines speziell auf die Erfassung des Schwingungsverhaltens von Brücken ausgelegten neuronalen Netzes wurden folgende Schritte geplant und durchgeführt:

Zunächst wurden die Daten der Dehnmessstreifen (DMS) im Falle der intelligenten Brücke und die Daten der Beschleunigungsaufnehmer im Falle des Luxemburg Datensatzes beschafft und in je ein Trainings- und ein Testset aufgeteilt. Das Training erfolgte in Anomalie-Erkennungs-Manier auf den Normaldaten im unbeschädigten Zustand, um die vorhergesagten Anomalien zu verifizieren. Aufbauend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche wurde ein spezieller ModeConv Layer entwickelt, der durch einen zweidimensionalen Convolutional Filter die Eigenmoden der Brücke automatisch lernt und schadensbedingte Änderungen an den Eigenmoden als Anomalie erkennt. Dadurch integriert das ModeConv Modell die physikalischen Grundlagen der Bewegungsgleichung der Struktur dynamik sowie Vorwissen aus dem Bereich der Signalverarbeitung und erzielt im Vergleich zu anderen Benchmarking-Modellen eine höhere Genauigkeit.

Die Planung des Projektes umfasste zudem die Auswahl von Baseline-Modellen wie MLP, LSTM und Variational Autoencoder sowie spezifischer Ansätze wie räumlich und zeitlich aufgelöste Graph Neural Networks (GNN) und Point Cloud Ansätze. Diese wurden ausgewählt, um ihre Effektivität und Effizienz zu vergleichen. Zusätzlich zu den intelligenten Brückendaten wurden simulierte Schädigungs-Datensätze und Echtzeitschädigungen der Universität Luxemburg einbezogen. Anschließend wurden Metadaten wie Temperatur,

Neigung und Beschleunigung in die Modelle integriert, und eine Hyperparameter-Optimierung mit optuna wurde durchgeführt.

Die Entwicklung der ModeConv-Methode zielte darauf ab, die Eigenmoden der Brücke automatisiert zu lernen und Anomalien zuverlässig zu erkennen. Der ModeConv Layer wurde für Graph Neuronale Netze entwickelt, da sich Graphen insbesondere dazu eignen die irregulären Netzwerkstrukturen der Signalaufnehmer zu repräsentieren. Graphen können die geometrische Struktur der zugrunde liegenden Datendomäne des Sensornetzes erfassen. Dabei bildet jeder Sensor einen Knoten auf dem Graphen ab. Der ModeConv Layer kann dabei in jeder beliebigen GNN-Architektur verwendet werden. So können Ende-zu-Ende Eigenmoden von Bauwerken gelernt und Abweichungen an den Modenformen als Anomalien erkannt werden. Die ModeConv besteht aus drei Hauptbausteinen:

1) Signal-Block: Im Signalbaustein werden die Daten des Sensornetzwerks so verarbeitet, dass sie in die Modalform überführt werden. Diese Modalform bezieht sich auf freie Schwingungen der Struktur. Die Verarbeitung der Daten umfasst die Berechnung von Kovarianz, Kreuzkorrelation und Leistungsdichtespektrum (PSD) der Sensordaten. Die PSD liefert Informationen über die Leistungsverteilung über Frequenzen, während Kovarianz und Kreuzkorrelation Beziehungen zwischen verschiedenen Signalen aufzeigen. Die Analyse dieser Metriken hilft dabei, Veränderungen oder Anomalien in der Strukturantwort zu erkennen (siehe Abb. 1).

2) PDE-Block: Die Bewegungsgleichung der Struktur dynamik wird im PDE-Block als ein System partieller Differentialgleichungen modelliert und errechnet die physikalischen Biege- oder Eigenformen der Struktur numerisch. Ähnlich wie eine Stimmgabel mit einer bestimmten Frequenz schwingt, wenn sie angeschlagen wird, können Objekte allgemein in ihre Eigenschwingungen versetzt werden. Die hierbei in Bauwerken und Strukturen angeregten Eigenschwingungsgrößen stellen globale Systemeigenschaften dar, die über das numerische Modell der Bewegungsgleichung beschrieben werden. Ihre Kenntnis ermöglicht eine einfache Beschreibung und Berechnung des dynamischen Systemverhaltens. Der PDE-Baustein berücksichtigt dabei Faktoren wie Masse, Steifigkeit und Dämpfung durch die gleichnamigen Matrizen. Durch die Umwandlung der Gleichung in ihre modale Form werden die natürlichen Frequenzen und Modenformen des Systems ermittelt. Dies ermöglicht die Berechnung von Modalmasse-, modalen Steifigkeits- und modalen Dämpfungsmatrizen und erleichtert die Analyse in einem koordinatenfreundlichen Rahmen (siehe Abb. 1).

3) Conv-Block: Im Faltungsbaustein wird die gewichtete PSD-Matrix aus dem Signalbaustein mit den Daten zur Frequenzantwort aus dem PDE-Baustein kombiniert. Dies umfasst die elementweise Multiplikation und die Singulärwertzerlegung (SVD), um ein Ausgangssignal zu erhalten. Diese Faltungsberechnung hilft bei der Analyse der Strukturantwort im Frequenzbereich. Durch den Faltungsfilter werden die Eigenmoden automatisch gelernt (siehe Abb. 1).

Zusätzlich erfolgte eine Berechnung der Modellkomplexität, um die Rechengeschwindigkeit der ModeConv mit herkömmlichen Ansätzen zu vergleichen und die Zeitersparnis in der Rechenzeit durch ModeConv zu begründen. Eine genaue Dokumentation der Methode ist dem ModeConv Aufsatz zu entnehmen<sup>1</sup>. Die inhärenten physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die sich ModeConv zu Nutze macht, werden darin ausführlich erklärt. Die Ergebnisse des Projektes wurden in Form eines Forschungsartikels veröffentlicht und die entwickelten Algorithmen wurden der Öffentlichkeit über die offen zugängliche Source-Code-

---

1 <https://arxiv.org/abs/2407.00140>

Management-Plattform Github zur Verfügung gestellt. Im Zuge der Öffentlichkeitsarbeit erfolgten mehrere Konferenzteilnahmen, Teilnahmen an den mFund Netzwerkveranstaltungen, regelmäßige Netzwerktreffen mit dem KMU Ingenieurbüro Freundt, der BASt und der Autobahngesellschaft des Bundes sowie die Teilnahme an Veranstaltungen über die Emmett-Plattform (für Details siehe Punkt 5).

Der Ablauf des Projektes umfasste zudem die Implementierung von insgesamt 18 neuronalen Netzen auf verschiedenen Datensätzen. Dazu gehörten GNN-Modelle wie TCNAE, TGCN, und STGCN sowie Point Cloud Ansätze wie Point-Net LSTM, Point Transformer und Point-TCN. Zudem wurde auch Integrated Gradients auf dem ModeConv Netz gerechnet, um die Entscheidungen des Modells besser sichtbar zu machen. Das Modell fokussiert sich dabei auf die Knoten mit dem höchsten Anomaliescore und die umliegenden Knoten mit der höchsten Korrelation. Zudem wurde die für die Berechnung der Rechenzeit im Vergleich zur ChebConv die O-Notation gerechnet, um die Zeiteinsparung zu quantifizieren.

Die Integration des Projektes in die Lehre erfolgte durch ein Praktikum und die Betreuung einer Masterthesis, die sich auf GNNs und Point Cloud Ansätze für Anomalieerkennung in Zeitreihen konzentrierte. Eine Studie zu Samplingstrategien wurde durchgeführt, um die Auswirkungen der Datenmenge auf die Modellleistung zu untersuchen.

#### 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Technische Fortschritte in der Messgenauigkeit hochauflösender Sensornetze führen zusammen mit der Weiterentwicklung von tiefen neuronalen Netzen zum quantitativen und qualitativen Wachstum von datenintensiven, cyber-physikalischen Anwendungen. Engmaschige Sensorgrids liefern dabei messtechnische Informationen als Grundlage der Entscheidungsfindung innerhalb von Prozessen unterschiedlicher Arten von Anwendungen z.B. zur Überwachung von kritischer Infrastruktur. Diese Abhängigkeit der Entscheidungen von Sensordaten macht wiederum eine Eliminierung aller Schwachstellen der Messkette (z.B. Sensordrift, Messrauschen, digitales Rauschen, Sensorausfall etc.) der darauf fußenden Anwendungen dringend erforderlich. Um der Anfälligkeit für Fehler und Fehlfunktionen und der Überlagerung von Sensorsignalen entgegenzuwirken und hierdurch Störgrößen von Kenngrößen zu separieren, wurden die Auswertungsverfahren der Bauingenieure zur Stochastic Subspace Identification<sup>2</sup> sowie zur enhanced Frequency Domain Decomposition<sup>3</sup> gesichtet und interdisziplinär in die ModeConv integriert. Hierbei wurde auch auf Vorarbeiten zu physikbasierten Modellen (Physics Informed Neural Networks<sup>4</sup>) zurückgegriffen. Physikbasierte Modelle verwenden dabei parametrisierte Formen von Näherungen zur Darstellung komplexer physikalischer Prozesse. In der ModeConv äußert sich das in der Verwendung der partiellen Differentialgleichung (Engl.: Partial Differential Equation (PDE)<sup>5</sup>) der Bewegungsgleichung für Strukturdynamik<sup>6</sup> über den PDE-Baustein (siehe Abbildung 1).

---

2 BRINCKER, Rune; ANDERSEN, Palle. Understanding stochastic subspace identification. In: Conference Proceedings: IMAC-XXIV: A Conference & Exposition on Structural Dynamics. Society for Experimental Mechanics, 2006.

3 JACOBSEN, Niels-Jørgen; ANDERSEN, Palle; BRINCKER, Rune. Using enhanced frequency domain decomposition as a robust technique to harmonic excitation in operational modal analysis. In: Proceedings of ISMA2006: international conference on noise & vibration engineering. Katholieke Universiteit, 2006.

4 CUOMO, Salvatore, et al. Scientific machine learning through physics-informed neural networks: Where we are and what's next. Journal of Scientific Computing, 2022, 92. Jg., Nr. 3, S. 88.

5 RENARDY, Michael; ROGERS, Robert C. An introduction to partial differential equations. Springer Science & Business Media, 2006.

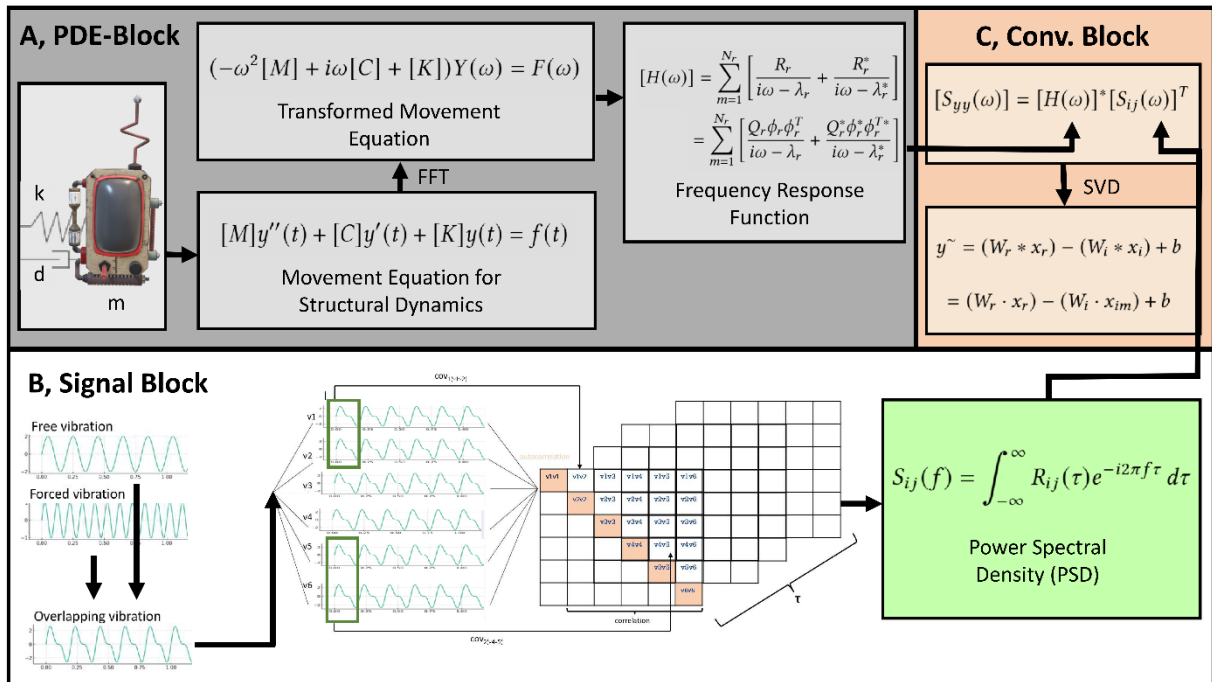


Abbildung 1: Überblick über die Bausteine der ModeConv mit A, dem PDE-Block, B, dem Signal-Block und C, dem Conv-Block mit dem Faltungsfiler.

Zudem wurde auf Vorarbeiten der Spectral Graph Convolution<sup>7</sup>, insbesondere der ChebConv<sup>8</sup>, aufgesetzt und statt der Fourier Transformation<sup>9</sup> die Verarbeitungslogik auf die Modaltransformation umgeschrieben.

Im weitesten Sinne kann die ModeConv zudem in eine Gruppe von Vorarbeiten der neu aufkeimenden neuronalen Form der Zustandsraummodelle (State Space Modelle<sup>10</sup> (SSM)), die auf andere Weise in Modellarchitekturen wie S4<sup>11</sup>, Hippo<sup>12</sup>, Mamba<sup>13</sup> oder Graph-Mamba<sup>14</sup> verwendet werden, eingruppiert werden.

6 GASCH, Robert; KNOTHE, Klaus; LIEBICH, Robert. Strukturdynamik: Diskrete Systeme und Kontinua. Springer-Verlag, 2012.

7 MA, Yi, et al. Spectral-based graph convolutional network for directed graphs. arXiv preprint arXiv:1907.08990, 2019.

8 DEFFERRARD, Michaël; BRESSON, Xavier; VANDERGHEYNST, Pierre. Convolutional neural networks on graphs with fast localized spectral filtering. Advances in neural information processing systems, 2016, 29. Jg.

9 BRACEWELL, Ronald N. The fourier transform. Scientific American, 1989, 260. Jg., Nr. 6, S. 86-95.

10 HAMILTON, James D. State-space models. Handbook of econometrics, 1994, 4. Jg., S. 3039-3080.

11 GU, Albert; GOEL, Karan; RÉ, Christopher. Efficiently modeling long sequences with structured state spaces. arXiv preprint arXiv:2111.00396, 2021.

12 GU, Albert, et al. Hippo: Recurrent memory with optimal polynomial projections. Advances in neural information processing systems, 2020, 33. Jg., S. 1474-1487.

13 GU, Albert; DAO, Tri. Mamba: Linear-time sequence modeling with selective state spaces. arXiv preprint arXiv:2312.00752, 2023.

14 WANG, Chloe, et al. Graph-mamba: Towards long-range graph sequence modeling with selective state spaces. arXiv preprint arXiv:2402.00789, 2024.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des P-BIM Projektes wurde die Zusammenarbeit mit den anderen KI-Projekten des mFund ebenso vorangetrieben wie die interne Vernetzung mit den assoziierten Netzwerkpartnern des Antrags. Um dies zu gewährleisten wurden mehrere Vorträge auf Konferenzen und im Rahmen der mFund Begleitforschung gehalten:

- 24.11.2022: Vortrag und Vorstellung des P-BIM-Projektes beim Workshop „Digitale Instandhaltung von Brückenbauwerken“ an der RWTH Aachen
- 28.11.2022: Teilnahme am Vortrag über die ASB ING und das neue SIB-Tool für bayerische Behörden durch das Tiefbauamt der Stadt Kempten
- 9.02.2023: Erstes P-BIM-Konsortialtreffen mit Beteiligung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Ingenieurbüro Freundt und der Autobahngesellschaft des Bundes
- 15.03.2023: Besprechung mit Yasser Al-Qassem von der BASt zum Wissensaustausch im Bereich der Modellierung der Daten der intelligenten Brücke.
- 26.04.2023: Vortrag bei der mFUND-Begleitforschung zum Thema Experimentierfelder für die Mobilität der Zukunft [mFUND-Fachaustausch „Experimentierfelder für die Mobilität der Zukunft - Beispiele aus der Praxis“ \(pretix.eu\)](https://pretix.eu/mfund-fachaustausch-experimentierfelder-fur-die-mobilitat-der-zukunft-beispiele-aus-der-praxis/)
- 05.05.2023: Konferenzvortrag bei der Kollaborationkonferenz der Universität Luxemburg, der Bundesanstalt für Materialforschung und der Université de Liege mit dem Titel: „Damage Detection, Localization and Quantification of Concrete Bridges: Existing and Emerging Trends“
- 11.08.2023: Zweites P-BIM-Konsortialtreffen mit Beteiligung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Ingenieurbüro Freundt und der Autobahngesellschaft des Bundes
- 09.10.2023: Präsentation der Ergebnisse des P-BIM-Projektes beim mFund Netzwerktreffen 2023 an der RWTH Aachen, Poster des P-BIM-Projektes in der Ausstellungshalle [mFund Netzwerkveranstaltung 2023 - Infrastruktur der Zukunft: Intelligent und nachhaltig \(eveeno.com\)](https://eveeno.com/mfund-netzwerkveranstaltung-2023-infrastruktur-der-zukunft-intelligent-und-nachhaltig/)
- 27-30.11.2023: Teilnahme an der Learning on Graphs Konferenz

## II. Eingehende Darstellung

Um die vorgegebenen Ziele des Projektes mit der tatsächlichen Verwendung der Zuwendung zu vergleichen, folgt die folgende Tabelle 1. In der Tabelle wird unter der Spalte zu den vorgegebenen Zielen der Wortlaut aus dem Antrag verwendet und dann der tatsächlichen Verwendung der Zuwendung im Soll-Ist-Vergleich gegenübergestellt. Unter der Spalte Ergebnis wird das erreichte Ergebnis als Resultat des Soll-Ist-Vergleichs quantifiziert:

### 1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

Vorgegebene Ziele	Verwendung der Zuwendung	Ergebnis
Es erfolgt ein dauerhaftes Monitoring des Projektes und der Meilensteine.	Im ersten Monat wurde ein SCRUM-Board zum Tracken der Meilensteine und Projektziele erstellt und dieses im Verlauf des Projektes bis hin zum Projektabschluss regelmäßig überwacht und aktualisiert. Die Meilensteine und Unterziele des Projektes wurden eingehalten.	erreicht

<p>Adaption des Problems der Schwingungsdarstellung in <b>ein</b> standardmäßiges künstliches neuronales Netz, das die Daten der Verformung in der räumlichen zeitlichen Dimension darstellt.</p>	<p>Es wurden drei Baseline-Modelle als Benchmark gerechnet, um die Effektivität und Effizienz der räumlich und zeitlich aufgelösten Graph Neuronalen Netze (GNN) und Point Cloud Ansätze zu vergleichen. Zu den Baseline-Modellen zählen MLP, LSTM und der Variational Autoencoder. Hinzu kommen die spezifisch auf die Abbildung des räumlichen wie zeitlichen Verhaltens entwickelten GNN Modelle. Darunter wurden auf den Datensätzen TCNAE, TGCN, STGCN, MtGNN, AGCRN, ChebConv-GNN, MTGODE und der GraphCON Wrapper implementiert. Hinzu kommen noch die Point Cloud Ansätze der Masterthesis von Johannes Kohlmann: das Point-Net LSTM, der Point Transformer, das Point-TCNAE und das Point-TCN. Dabei stellt das Point-TCN eine selbst entwickelten Methode dar. Dazu wurden eigens zur Anomalieerkennung die ModeConv Methode in der schnellen und in der Laplace-Variante entwickelt. Insgesamt wurden damit 18 neuronale Netze auf den Datensätzen implementiert.</p>	<p>übertroffen</p>
<p>Dazu wird der bestehende Datensatz der intelligenten Brücke in je ein Trainings- und ein Testset aufgeteilt.</p>	<p>Statt nur den Datensatz der intelligenten Brücke zu benutzen, wurde im Projekt noch der simulierte Schädigungs-Datensatz der intelligenten Brücke sowie ein Datensatz mit Echtzeitschädigungen der Universität Luxemburg einbezogen. Um mit den Daten der intelligenten Brücke arbeiten zu können wurden künstliche Anomalien in die Daten eingefügt. Zudem wurde der State-of-the-Art Datensatz im Brückenbau Z24 evaluiert, aber aufgrund von Messfehlern im Datensatz exkludiert. Im Zuge der Masterthesis von Johannes Kohlmann wurde zudem der QUGS-Datensatz zur zusätzlichen Validierung der Ergebnisse mit einbezogen. Damit wurden insgesamt vier Datensätze verwendet.</p>	<p>übertroffen</p>
<p>Weiterhin wird die Netzwerkarchitektur bezüglich der Aufgabenstellung so optimiert, dass geeignete</p>	<p>Bei allen Modellen wurden die Metadaten zu Temperatur, Neigung, Ausdehnung und Beschleunigung als zusätzliche Features den, den Querschnitten zugeordneten Sensorknoten mitgegeben. Die</p>	<p>übertroffen</p>

<p>Repräsentationen für Normalverhalten und Anomalien im Schwingungsverhalten gelernt werden können.</p>	<p>Verformungsmessungen oder Beschleunigungsmessungen wurden je nach Datensatz für die Vorhersage herangezogen. Alle verwendeten Modelle des Projektes wurden zudem zusätzlich mit optuna optimiert um unfaire Vergleiche auszuschließen. In der nachfolgenden Tabelle 2 werden die Rechenzeiten sowie die Anzahl der auf Basis unterschiedlicher Hyperparameter gerechneten Modelle genauer aufgeschlüsselt.</p>	
<p>Überdies wird Vorwissen zu physikalischen Grundlagen der intelligenten Brücke als Information in das Netz integriert.</p>	<p>Die ModeConv integriert das Vorwissen zur Bewegungsgleichung der Strukturodynamik in den Netzwerkaufbau und kann über einen eigens entwickelten Convolutional Filter die Eigenmoden der Brücke automatisiert lernen sowie Anomalien in den Datensätzen zuverlässig und mit weniger Rechenzeit erkennen. Für detaillierte Informationen zum Aufbau und der Funktionsweise der ModeConv siehe arxiv<sup>15</sup>.</p>	erreicht
<p>Um die Effekte dieser Maßnahmen sichtbar zu machen, wird zuletzt ein XAI (explainable artificial intelligence) Modul entwickelt, das die Ergebnisse des Netzes erklärbar machen soll, um hierüber weitere Anpassungen des Netzes ausführen zu können und ein tieferes Verständnis der Vorgänge innerhalb des Netzes zu erhalten.</p>	<p>Es wurden integrated gradients als Standard-XAI Verfahren für das ModeConv Modell gerechnet, um den Fokus des Modells erkennbar zu machen. Das Modell fokussiert sich dabei auf die Knoten mit dem höchsten Anomaliescore und die umliegenden Knoten mit der höchsten Korrelation.</p>	erreicht
<p>Weiterhin werden alle Ergebnisse des Projektes in Form von Forschungsartikeln veröffentlicht.</p>	<p>Der im Projekt entwickelte ModeConv Ansatz wurde beim ACM Journal TOSN eingereicht (TOSN (ACM TRANSACTIONS ON SENSOR NETWORKS)) und ist derzeit in Begutachtung. Zudem ist er als Preprint über arxiv<sup>15</sup> verfügbar. Zudem ist derzeit noch zum Point-TCNAE eine Veröffentlichung von Johannes Kohlmann, Andrzej Dulny, Andreas Hotho und Melanie Schaller in Bearbeitung.</p>	erreicht

15 <https://arxiv.org/abs/2407.00140>

	Diese wird ebenfalls in naher Zukunft noch öffentlich zugänglich gemacht.	
Die entwickelten Algorithmen werden der Öffentlichkeit über offen zugängliche Source-Code-Management-Plattformen wie Github zur Verfügung gestellt.	<p>Es gibt ein Repository zur entwickelten ModeConv mit vortrainierten Modellen auf jeweils 5% der Daten zum simulierten Smart Bridge Datensatz und zum Luxemburg Datensatz im csv-Format, die als Open Source Datensätze genutzt werden können. Diese findet man unter dem ModeConv Repository bei Github<sup>16</sup>.</p> <p>Die Standard-Modelle der Masterthesis von Johannes Kohlmann findet man unter dem Treemage Github Repository<sup>17</sup>. Zudem ist derzeit noch zum Point-TCNAE eine Veröffentlichung in Bearbeitung, zu der auch das Point-TCNAE über ein eigenes Git Repository öffentlich zugänglich sein wird<sup>18</sup>.</p>	erreicht
Es erfolgt eine Unterrichtseinheit mit Bezug auf das Projekt, über die Studenten Zugang zur Themenstellung bekommen.	<p>Zur Integration des Projektes in die Lehre wurden zwei Maßnahmen ergriffen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Im Sommersemester 2023 wurde ein Praktikum mit den Daten der intelligenten Brücke und dem Datensatz der Universität Luxemburg durchgeführt. Die Studenten entwickelten eigene Ideen und Ansätze oder implementierten vorgeschlagene Methoden aus der Kick-Off-Veranstaltung des Seminars und testeten diese auf den Daten.</li> <li>- Zudem wurde die Masterthesis von Johannes Kohlmann sowohl auf dem simulierten Datensatz der intelligenten Brücke als auch auf dem Luxemburg Datensatz betreut. Hinzu kam der QUGS-Datensatz der Universität Qatar. Er erprobte verschiedene Ansätze von GNNs und Point Clouds und entwarf auch eigene Point-Cloud Ansätze für Anomalieerkennung in Zeitreihen.</li> </ul>	übertroffen

16 [GitHub - MilanShao/ModeConv: Official repository to the paper "ModeConv: A novel convolution for distinguishing anomalous and normal structural behavior"](#)

17 <https://gitlab2.informatik.uni-wuerzburg.de/dmir/modeconv-and-p-bim-models/-/tree/main/P-BIM%20Preprocessor>

18 [https://gitlab2.informatik.uni-wuerzburg.de/dmir/modeconv-and-p-bim-models/-/tree/main/P\\_BIM\\_models](https://gitlab2.informatik.uni-wuerzburg.de/dmir/modeconv-and-p-bim-models/-/tree/main/P_BIM_models)

-	Es wurde zusätzlich in der Masterthesis von Johannis Kohlmann eine Studie zu Samplingstrategien durchgeführt mit dem Fazit, dass man die Größe der Daten nicht reduzieren kann, ohne die Modelle nachhaltig zu verschlechtern. Dies war der enorm großen Menge der Daten geschuldet.	übertrifft, ursprünglich nicht vorgesehen
---	--	---

*Tabelle 1: Soll-Ist-Vergleich der im Antrag genannten Arbeitspakete versus realer Umsetzung*

Die Entwicklung und Optimierung von künstlichen neuronalen Netzwerken erfordert einen beträchtlichen Aufwand an Trainingsressourcen und Zeit. Nachfolgend werden die Zeiten des Modelltrainings quantifiziert. Über einen Zeitraum von mehreren Monaten wurden insgesamt 58.421 Modelle trainiert, wobei ein enormes Gesamtvolumen von 34.567 Trainingsstunden aufgewendet wurde. Dieser umfangreiche Prozess ermöglichte die Identifikation optimierter Modelle. Während dieser Zeit wurden 83 Sweeps durchgeführt, um eine breite Variation von Parametern und Architekturen zu erforschen. Diese intensiven Bemühungen spiegeln das Engagement wider, die Leistungsfähigkeit der neuronalen Netzwerke durch Hyperparametersuche zu optimieren. Die folgende Tabelle zeigt die Zusammenfassung der Zeiten bei der Optimierung der künstlichen neuronalen Netzwerke:

<b>ANZAHL TRAINIERTER MODELLE</b>	<b>58.421</b>
<b>TRAININGSSTUNDEN GESAMT</b>	34.567 Stunden
<b>LÄNGSTER TRAININGSRUN</b>	2196 Stunden
<b>AUSGEFÜHRT WURDEN</b>	83 Sweeps

*Tabelle 2: Übersicht Modelltraining (erfasst mit Weights and Biases)*

### 3. Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit:

Die durchgeführte Arbeit adressierte eine Vielzahl von Herausforderungen im Bereich der Strukturüberwachung und -analyse von Brücken unter Verwendung von neuronalen Netzwerken, insbesondere Graph Neuronale Netze. Diese Projektarbeit war aus folgenden Gründen angemessen und notwendig:

- Moderne Brückenüberwachung erfordert nicht nur eine Erfassung von Daten, sondern auch deren Analyse und die Verwendung von Modellen und Algorithmen auf dem aktuellen Stand der Forschung, um bezüglich Rechenzeit und Performance effektiv zu sein.
- Die Einbeziehung verschiedener Datensätze, einschließlich simulierter Schädigungsdaten, Echtzeitschädigungen und etablierter Datensätze wie Z24 und QUGS, verdeutlicht die Vielfalt der Datenquellen und Szenarien, mit denen die Modelle in realen Anwendungsfeldern im Bereich der Strukturüberwachung konfrontiert sind. Ein wesentliches Argument für den Einsatz neuronaler Netze im Bauingenieurwesen ist die Generalisierbarkeit der Modelle. In der Praxis wird noch immer bei der Überwachung jedes neuen Bauwerks ein neues Vorgehen auf Basis der Daten erarbeitet. Durch neuronale Netze könnte dies künftig automatisiert werden. P-BIM diene dabei als Wegbereiter in Richtung Standardisierung der Prozesse.

- Die Forschung verglich nicht nur verschiedene neuronale Netzwerkarchitekturen der Graph Neuronalen Netze miteinander, sondern bezog auch etablierte Baseline-Modelle wie LSTM oder MLP mit ein. Dieser Vergleich ist entscheidend, um die Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Ansätze zu validieren und ihren Mehrwert zu demonstrieren. Die Einordnung der Ergebnisse unter gleichen Bedingungen war für das Projekt essentiell. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Modelle über Hyperparametersuche optimiert wurden und für alle Modelle die gleichen Auswertungsmetriken verwendet wurden. Nur dadurch kann ein realistischer Vergleich sichergestellt werden.
- Die Integration des Projekts in die Lehre durch die Durchführung von Praktika und die Betreuung einer Masterthesis zum Thema zeigt die praktische Anwendbarkeit und Relevanz der Forschungsergebnisse für zukünftige Wissenschaftler. Dies fördert nicht nur das Verständnis der Studierenden, sondern trägt auch zur Weiterentwicklung des Fachgebiets und zur Anregung des interdisziplinären Austauschs bei.

#### 4. Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans:

Die erzielten Ergebnisse und die entwickelten Modelle bieten einen erheblichen potenziellen Nutzen für die Brückenüberwachung und Strukturanalyse. Folgende Punkte sollten demnach in den fortgeschriebenen Verwertungsplan integriert werden:

- Die entwickelten Modelle, insbesondere der ModeConv-Ansatz, haben das Potenzial, Anomalien und potenzielle Schäden in Brückenstrukturen präziser und effizienter zu erkennen als herkömmliche Methoden. Dies kann dazu beitragen, frühzeitig auf Probleme zu reagieren und potenzielle Unfälle zu vermeiden und damit Schaden von der Bevölkerung abzuwenden.
- Das automatisierte Vorgehen der ModeConv sollte in künftigen Studien an anderen Bauwerken getestet werden, um die Generalisierbarkeit des Modells auf weiteren Datensätzen zu beobachten.
- Die verbesserte Rechenzeit der ModeConv im Vergleich zu den anderen Modellen kann die Hürde in der Echtzeitüberwachung reduzieren, da man das Modell im vortrainierten Zustand auch vor Ort in Brückenüberwachungssystemen installieren könnte und hierüber eine Vorverarbeitung der Daten bekommen würde, die auch die Speicherhaltung reduzieren könnte.
- Die Integration des Projekts in die Lehre ermöglicht es, die erzielten Erkenntnisse und Modelle an zukünftige Generationen von Ingenieuren und Wissenschaftlern weiterzugeben. Dies trägt zur kontinuierlichen Weiterentwicklung des Fachgebiets und zur Ausbildung qualifizierter Fachkräfte bei. Eine weiterführende Idee bestünde darin in künftigen Lehrveranstaltungen gezielt Ingenieure und Informatiker gleichzeitig zu adressieren, um den interdisziplinären Austausch auch im Unterricht zu fördern.
- Die generierten Datensätze im csv-Format lassen sich von anderen Forschern leichter einlesen als die ursprünglichen Sensordaten, da csv ein Standardformat ist, während die Formate von National Instruments Industrieformate darstellen, mit denen man den Umgang aufgrund der Spezifität erst erlernen muss. Durch die Bereitstellung der Daten im csv Format über das github Repository sowie die freie Verfügbarkeit des Parsers des P-BIM Projektes ebenfalls über github werden die Hürden der Weiterverwertung der Datensätze nachhaltig reduziert.
- Die ModeConv kann Anomalien erkennen und lokalisieren, da der Anomaliescore auf Knotenebene ausgegeben werden kann. Hierüber wird ersichtlich an welchem Sensor eine Abweichung vom Normalverhalten konstatiert wurde. Für künftige Arbeiten sollte darauf aufgesetzt werden und eine Verbindung zu anderen verfügbaren Daten hergestellt

werden, um die Anomalie mit geeigneten Maßnahmevorschlägen zu verbinden. Hierzu wäre ein multipler Datenansatz wünschenswert, der neben den Zeitreihendaten auch die Bilddaten und Daten zur Geometrie des Bauwerks sowie zu den DIN-Normen und Bewertungen der Bauteile anhand der Statik berücksichtigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die geleistete Arbeit nicht nur technologische und wissenschaftliche Fortschritte in der Brückenüberwachung ermöglicht, sondern auch zur Ausbildung und Entwicklung zukünftiger Fachkräfte auf diesem Gebiet beiträgt.

#### 5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Fortschritte von anderen Stellen im Kernbereich des Projekts bekannt geworden.

#### 6. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Der im Projekt entwickelte ModeConv Ansatz wurde beim ACM Journal TOSN eingereicht (ACM TRANSACTIONS ON SENSOR NETWORKS) und ist derzeit in Begutachtung.

Zudem ist derzeit noch zum Point-TCNAE eine Veröffentlichung von Johannes Kohlmann, Andrzej Dulny, Andreas Hotho und Melanie Schaller in Bearbeitung. Diese wird ebenfalls in naher Zukunft noch öffentlich zugänglich gemacht.

### Literaturverzeichnis

BRACEWELL, Ronald N. The fourier transform. *Scientific American*, 1989, 260. Jg., Nr. 6, S. 86-95.

BRINCKER, Rune; ANDERSEN, Palle. Understanding stochastic subspace identification. In: *Conference Proceedings: IMAC-XXIV: A Conference & Exposition on Structural Dynamics*. Society for Experimental Mechanics, 2006.

CUOMO, Salvatore, et al. Scientific machine learning through physics-informed neural networks: Where we are and what's next. *Journal of Scientific Computing*, 2022, 92. Jg., Nr. 3, S. 88.

DEFFERRARD, Michaël; BRESSON, Xavier; VANDERGHEYNST, Pierre. Convolutional neural networks on graphs with fast localized spectral filtering. *Advances in neural information processing systems*, 2016, 29. Jg.

GASCH, Robert; KNOTHE, Klaus; LIEBICH, Robert. *Strukturdynamik: Diskrete Systeme und Kontinua*. Springer-Verlag, 2012.

GU, Albert; GOEL, Karan; RÉ, Christopher. Efficiently modeling long sequences with structured state spaces. *arXiv preprint arXiv:2111.00396*, 2021.

GU, Albert; DAO, Tri. Mamba: Linear-time sequence modeling with selective state spaces. *arXiv preprint arXiv:2312.00752*, 2023.

GU, Albert, et al. Hippo: Recurrent memory with optimal polynomial projections. *Advances in neural information processing systems*, 2020, 33. Jg., S. 1474-1487.

HAMILTON, James D. State-space models. *Handbook of econometrics*, 1994, 4. Jg., S. 3039-3080.

JACOBSEN, Niels-Jørgen; ANDERSEN, Palle; BRINCKER, Rune. Using enhanced frequency domain decomposition as a robust technique to harmonic excitation in operational modal analysis. In: *Proceedings of ISMA2006: international conference on noise & vibration engineering*. Katholieke Universiteit, 2006.

MA, Yi, et al. Spectral-based graph convolutional network for directed graphs. *arXiv preprint arXiv:1907.08990*, 2019.

RENARDY, Michael; ROGERS, Robert C. *An introduction to partial differential equations*. Springer Science & Business Media, 2006.

WANG, Chloe, et al. Graph-mamba: Towards long-range graph sequence modeling with selective state spaces. *arXiv preprint arXiv:2402.00789*, 2024.