

## Einleitung

Erdbeben stellen eine der verheerendsten Formen natürlicher Katastrophen dar, mit gravierenden Folgen für das menschliche Leben, die Infrastruktur und die Wirtschaft. Der United States Geological Survey (USGS) schätzt, dass jährlich etwa 500.000 Erdbeben stattfinden, von denen rund 100.000 von Menschen wahrgenommen werden können und etwa 100 ernsthafte Zerstörungen verursachen [8]. Angesichts dieser Zahlen ist die Bedeutung einer präzisen Erdbebenvorhersage sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus gesellschaftlicher Perspektive immens. Trotz intensiver Forschungsbemühungen bleibt die exakte Vorhersage von Erdbeben eine der größten ungelösten Fragen in der Geophysik. Traditionelle Ansätze, die auf die Analyse von Vorbebenaktivitäten und tektonischen Spannungen basieren, haben sich als informativ erwiesen, weisen jedoch signifikante Einschränkungen auf, insbesondere bei der Vorhersage des genauen Zeitpunkts und Ortes eines bevorstehenden Erdbebens [2].

In diesem Kontext eröffnet Machine Learning (ML) neue Wege für die Erdbebenvorhersage. ML-Algorithmen sind in der Lage, komplexe Muster in seismischen Daten zu erkennen, die für menschliche Beobachter oder herkömmliche Analysemethoden schwer zugänglich sind. Insbesondere Deep-Learning-Algorithmen werden zunehmend für die Erdbebenvorhersage eingesetzt, da sie große Datensätze verarbeiten und aus Fehlern lernen können. Die Anwendung von ML in der Erdbebenvorhersage beinhaltet eine Vielzahl von Datentypen, die Informationen über Plattengrenzen, Bruchzonen und historische Erdbebenaktivitäten in bestimmten Regionen liefern können [5].

Die vorliegende Thesis konzentriert sich auf die Analyse und Anwendung von ML-Techniken zur Erdbebenvorhersage. Die immense Bedeutung einer genauen Erdbebenvorhersage für die öffentliche Sicherheit macht diese Forschungsrichtung hochrelevant. Sie verbindet theoretische und praktische Aspekte und zielt darauf ab, das Verständnis und die Effektivität von ML-gestützten Vorhersagemodellen zu verbessern.

## Forschungsfragen und Methodik

Die folgenden Forschungsfragen werden in dieser Arbeit adressiert:

- Welche ML-Modelle übertreffen traditionelle seismologische Vorhersagemethoden in Bezug auf die Erkennung seismischer Muster und die Vorhersage von Zeitpunkt, Ort und Stärke von Erdbeben?
- Welche ML-Modelle erweisen sich als besonders effektiv für die Vorhersage spezifischer Erdbebenparameter (Zeitpunkt, Ort, Magnitude) und unter welchen Bedingungen?
- Welche spezifischen Datentypen tragen am meisten zur Genauigkeit von ML-Vorhersagen bei?
- Inwieweit lassen sich durch den Einsatz neuer ML-Techniken, wie Deep Learning und Ensemble-Methoden, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Vorhersagemodellen für Erdbeben steigern?

## Forschungsstand: Einsatz von ML in der Erdbebenvorhersage

Eine umfassende Literatursuche wurde in führenden Datenbanken bis Februar 2024 durchgeführt, um aktuelle Forschungen zur Anwendung von ML in der Erdbebenvorhersage zu identifizieren. Die Auswahl basierte auf strengen Kriterien, einschließlich der Verwendung von ML, der Qualität und Aktualität der Forschung sowie der Sprache der Publikation. Untersuchungen wurden kategorisiert in spezifische Algorithmen, vergleichende Analysen und fortgeschrittene Hybrid- und Ensemble-Modelle. Diese Kategorisierung ermöglicht eine gründliche Bewertung der Effizienz und der methodischen Vielfalt von ML in der Seismologie. Die ausgewählten Studien liefern wesentliche Einsichten zur Vorhersagegenauigkeit und den Anwendungsmöglichkeiten von ML-Modellen.

## Erkenntnisse aus dem aktuellen Forschungsstand

Die Analyse der ML-Modelle für Erdbebenvorhersagen zeigt, dass sowohl Deep-Learning-Modelle (wie CNNs und LSTMs) als auch Ensemble-Methoden (wie RF und AdaBoost) in der Lage sind, seismologische Datenmuster mit hoher Genauigkeit zu erkennen und zu interpretieren. Diese Modelle übertreffen traditionelle Methoden signifikant und bieten durch ihre spezialisierten Fähigkeiten zur Dateninterpretation verbesserte Vorhersageleistungen.

### Hauptpunkte:

- LSTM- und CNN-basierte Ansätze zeigen hohe Effizienz bei der Modellierung von zeitabhängigen und räumlichen Mustern in seismischen Daten, mit Erfolgsbeispielen in Studien von Wang et al. [9] und Huang [4].
- Ensemble- und Hybridmodelle, wie die von Saad et al. [7] und Asim et al. [1], nutzen die Stärken mehrerer Ansätze, um die Vorhersagegenauigkeit weiter zu erhöhen.
- Die Optimierung der Datennutzung ist entscheidend für die Effektivität der Modelle, wobei die Integration verschiedener Datenquellen und die sorgfältige Feature-Auswahl (wie von Hajikhodaverdikhan et al. [3] und Rouet-Leduc et al. [6] gezeigt) die Modelleleistung signifikant verbessern.
- Herausforderungen wie die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Trainingsdaten, die Generalisierbarkeit der Modelle über verschiedene geografische Gebiete hinweg, und die Interpretierbarkeit komplexer ML-Modelle bleiben kritische Bereiche, die weitere Forschung und methodische Verbesserungen erfordern.

Diese Erkenntnisse legen nahe, dass die kontinuierliche Entwicklung und Anpassung von ML-Methoden, die Verbesserung der Datenqualität und -diversität, sowie die Etablierung standardisierter Evaluationsmetriken entscheidend für zukünftige Fortschritte in der präzisen und zuverlässigen Erdbebenvorhersage sind.

## Modellentwicklung- und bewertung

Ein spezifisches ML-Modell wurde entwickelt, um die Vorhersagefähigkeit und praktische Anwendbarkeit von ML-Algorithmen für Erdbebenvorhersagen zu evaluieren. Dieses Modell, zugeschnitten auf die seismisch aktive Region Türkei-Syrien, zielt darauf ab, die Magnitude des stärksten Erdbebens innerhalb der nächsten fünf Tage vorherzusagen und die Wahrscheinlichkeit eines signifikanten Erdbebens zu bestimmen.

Der verwendete Datensatz, bereitgestellt durch die USGS, umfasst rund 3,5 Millionen Erdbebenereignisse weltweit und enthält wichtige Informationen wie Ereignisdauer, geografische Lokalisationen und Magnituden. Das Modell wurde durch umfangreiches Preprocessing und das Ableiten neuer Variablen im Feature Engineering entwickelt, die die seismische Aktivität modellieren. Dazu zählen Indikatoren wie die Dauer des Ereignisses und geografische Koordinaten.

Es wurden verschiedene Modelle getestet, darunter lineare Regression, Random Forest, LSTM und Boosting-Ensemble-Modelle, um die Dynamik seismischer Daten effektiv zu erfassen und die Präzision der Erdbebenvorhersage zu erhöhen.

Die Modelloptimierung erfolgte durch eine Mischung aus manuellen Anpassungen und automatisierten Methoden wie Grid-Search, wobei die Modelle kontinuierlich mittels Kreuzvalidierung und Robustheitstests auf ihre Präzision und Zuverlässigkeit überprüft wurden. Eine umfassende Validierung bestätigte die Generalisierbarkeit und Effektivität der Modelle über verschiedene Regionen und Zeiträume. Die endgültigen Modelle zeigten deutliche Verbesserungen gegenüber herkömmlichen Vorhersagemethoden hinsichtlich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Erdbebenvorhersage.

Die Evaluation der verschiedenen ML-Modelle ergab signifikante Unterschiede in ihrer Leistungsfähigkeit bei der Vorhersage der Erdbebenmagnitude und der Wahrscheinlichkeit starker Erdbebenereignisse.

Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen dargestellt:

Table 1. Evaluationsergebnisse für die Vorhersage der Erdbebenmagnitude

Metrik	LR	RF	ANN	LSTM	Ensemble
MAE	0.6867	0.8181	0.7265	0.6679	0.8575
MSE	1.5077	1.6796	1.4639	1.2887	1.6332

Table 2. Evaluationsergebnisse für die Vorhersage des Auftretens starker Erdbebenereignisse

Metrik	LR	RF	ANN	LSTM	Ensemble
Sensitivität	0.7006	0.7628	0.6731	0.8830	0.6248
Genauigkeit	0.6510	0.5683	0.8200	0.3882	0.8731
Präzision	0.1377	0.2158	0.4204	0.1758	0.5496

Das LSTM-Modell war besonders effektiv bei der Vorhersage der Erdbebenmagnitude, während das Ensemble-Modell beim Erkennen starker Erdbeben überzeugte. Diese Ergebnisse betonen die Wichtigkeit der gezielten Modellauswahl und sorgfältigen Auswahl und Aufbereitung der Features, abhängig von den spezifischen Vorhersagezielen in der Erdbebenvorhersage.

## Fazit und Ausblick

Die Untersuchung von ML-Modellen zur Erdbebenvorhersage hat deutlich gemacht, dass insbesondere Ensemble- und Deep Learning-Methoden traditionellen Ansätzen überlegen sind, sowohl in der Genauigkeit der Vorhersagen als auch in der Fähigkeit, komplexe seismische Muster effektiv zu interpretieren. Trotz der beeindruckenden Fortschritte bestehen Herausforderungen wie die Generalisierbarkeit der Modelle über verschiedene Regionen und die Interpretierbarkeit tief lernender Algorithmen. Zukünftige Forschungen sollten sich daher auf die Verbesserung der Datenqualität, die Erweiterung der Modelltests auf verschiedene geographische Bedingungen und die Entwicklung transparenterer Modelle konzentrieren, um die Zuverlässigkeit und praktische Anwendbarkeit von ML in der Erdbebenvorhersage weiter zu erhöhen. Darüber hinaus könnte die Integration neuer Datenquellen wie Satellitenbilder und die Standardisierung von Evaluationsmetriken die Vorhersagegenauigkeit weiter verbessern und die Grundlage für robustere Katastrophenmanagement-Strategien schaffen.

## Referenzen

- K. M. Asim, A. Idris, T. Iqbal, and F. Martínez-Álvarez. Seismic indicators based earthquake predictor system using genetic programming and adaboost classification. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018.
- Robert J. Geller. Earthquake prediction: A critical review. *Geophysical Journal International*, 1997.
- Peyman Hajikhodaverdikhan, Mohammad Nazari, Mehrdad Mohsenizadeh, Shahaboddin Shamsirband, and Kwok-Wing Chau. Earthquake prediction with meteorological data by particle filter-based support vector regression. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2018.
- J. Huang, X. Wang, Y. Zhao, X. Chen, and X. Han. Large earthquake magnitude prediction in taiwan based on deep learning neural network. *Neural Network World*, 2018.
- M. A. Meier et al. Machine learning in seismology: Turning data into insights. *Seismological Research Letters*, 2017.
- Bertrand Rouet-Leduc, Claudia Hulbert, Nicholas Lubbers, Kévin Barros, Colin J. Humphreys, and Paul A. Johnson. Machine learning predicts laboratory earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 44(18):9276–9282, 2017.
- O. M. Saad et al. Machine learning for fast and reliable source-location estimation in earthquake early warning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022.
- United States Geological Survey. United States Geological Survey, 2023.
- Qian Wang, Yu Guo, Lei Yu, and Lei Pan. Earthquake prediction based on spatio-temporal data mining: An lstm network approach. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2020.