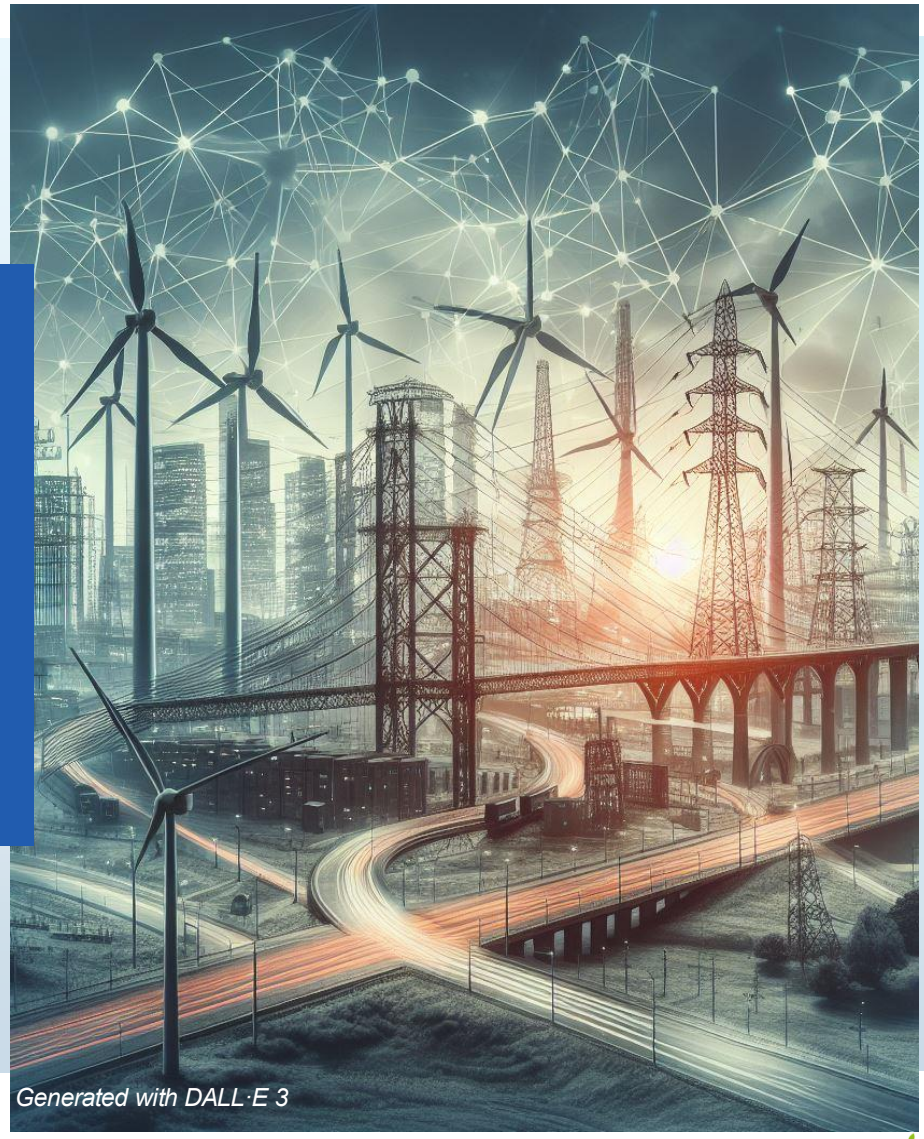
ETH zürich

Chair of Structural
Mechanics & Monitoring

Von Messdaten zu Entscheidungen: Digitale Zwillinge für resiliente Mobilitätsinfrastrukturen

Eleni Chatzi
ETH Zürich



Generated with DALL·E 3

D BAUG

Unsere Infrastruktur steht unter Druck

Alternde Bauwerke, knappe Ressourcen, steigende Anforderungen

Alternde Infrastrukturen
Mehr Unterhalt bei alterndem Bestand

Begrenzte Ressourcen
Priorisierung wird entscheidend

Steigende Anforderungen
Verfügbarkeit, Resilienz & Effizienz zugleich

Daten als Grundlage für intelligente Infrastrukturen

Überwachung von Umwelt- und Belastungseinflüssen

Zustandsüberwachung

kritischer Ereignisse

Inspektion

Kontinuierliche Überwachung

Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)

Von Messdaten zu Entscheidungen

Erfassen

Daten

Sensorik

Verstehen

Physik

Simulation

micro

macro

Dynamik

Entscheiden

Ursachenanalyse

Bewertung auf Systemebene

Vorhersagen

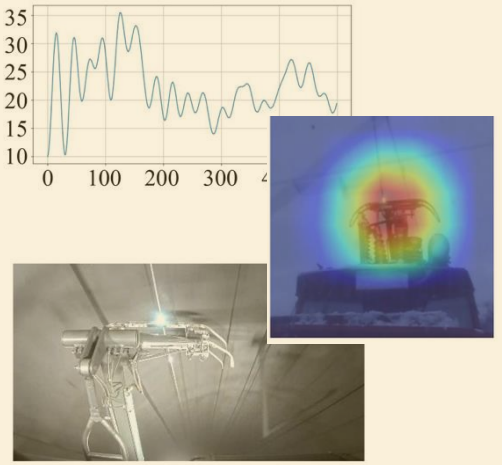
Time Series Analysis

Performance Indicators

Wie digitale Zwillinge den Betrieb und Unterhalt unserer Verkehrsinfrastruktur unterstützen

Eine Messmethode allein reicht nicht aus

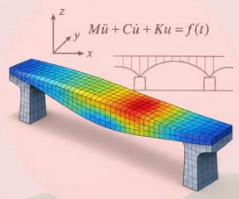
Praxisbeispiel (Dong, Chatzi, Fink) | Multimodale Lichtbogenerkennung am Stromabnehmer



Die Herausforderung liegt nicht nur in der Datenerfassung, sondern in der intelligenten Verknüpfung unterschiedlicher Messmethoden und Informationsquellen.

SENTINEL: In-service diagnostics of the catenary / pantograph and wheelset axle systems, Chatzi, Fink, Tiso

Daten allein reichen nicht aus



Reine Simulation

Physik-basierte

Hybridmodelle

- Verbinden Daten und Physik
- Robustere Prognosen
- Erklärbar / Interpretierbar

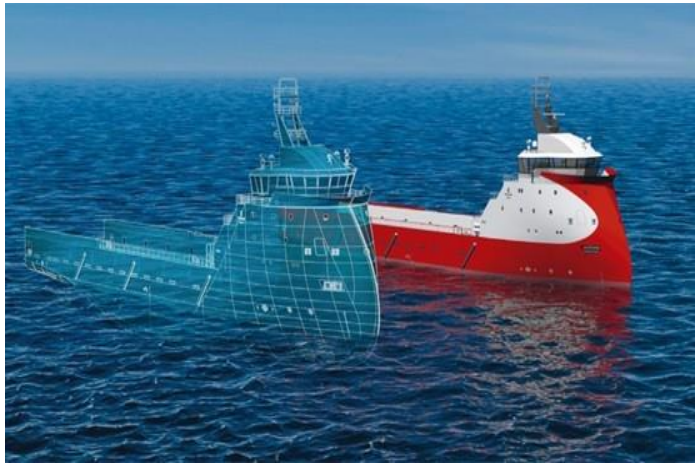
DTs mit Rückkopplung

Daten-getrieben

Diagnose

Hybrid

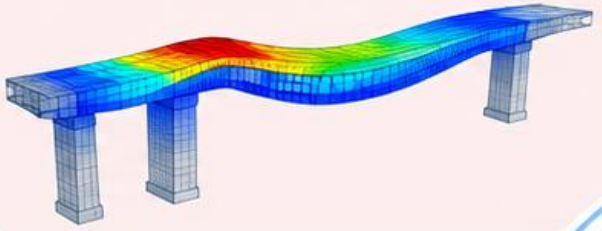
Simulationsansätze



Vom Simulationsmodell zum digitalen Zwilling

Bestehende Modelle mit Messdaten verbinden – auch im laufenden Betrieb.

Komplexes Strukturverhalten



Wechselnde Umwelt- und Betriebsbedingungen

Schnelle, reduzierte Modelle

Verteilte und unbekannte Belastungen

Kopplung von Teilmodellen

Laufende Aktualisierung durch Messdaten

Was bedeutet das für Betreiber?

Bestehende Modelle nutzen
Brücken-, Strassen- und Verkehrsmodelle

Modelle aktuell halten
Messdaten und Betriebsbedingungen integrieren

Schnell und zuverlässig rechnen
Prognosen trotz Unsicherheiten ermöglichen

Entscheidungen unterstützen
Zustand, Belastbarkeit und Unterhalt bewerten

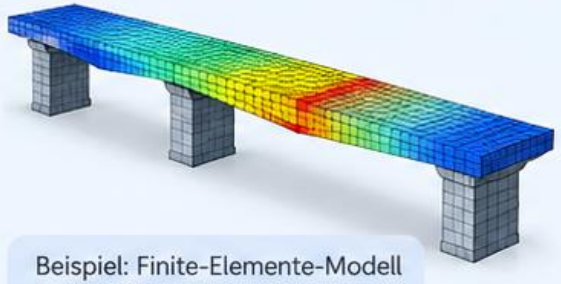
Modelle & Daten sinnvoll verbinden

Je nach Datenlage und Vorwissen eignen sich unterschiedliche Ansätze

Mehr Physik / weniger Daten → Mehr Daten / weniger Physik

1 Physikalische Modelle

z. B. Brücken-, Baugrund- oder Fahrzeugmodelle

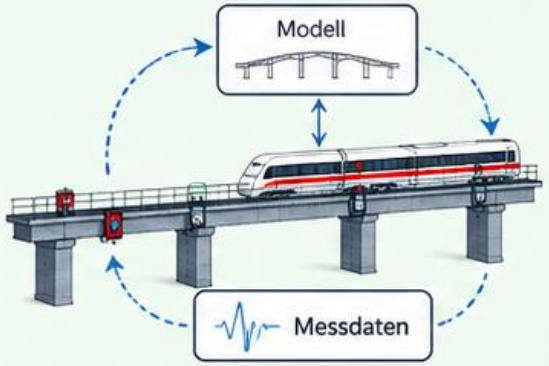


Beispiel: Finite-Elemente-Modell einer Brücke

- nutzen Ingenieurwissen
- gut interpretierbar
- benötigen Annahmen und Vereinfachungen

2 Modelle + Messdaten

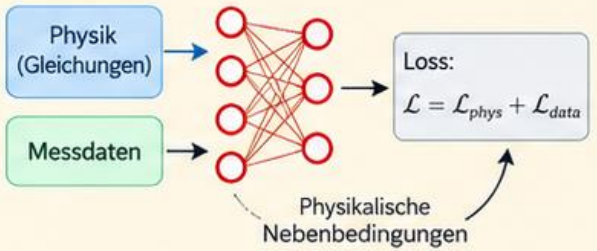
z. B. Kalman-Filter, Datenassimilation



- verbinden Modell und Beobachtung
- aktualisieren Zustände laufend
- geeignet für Monitoring im Betrieb

3 Physik-informierte Lernverfahren

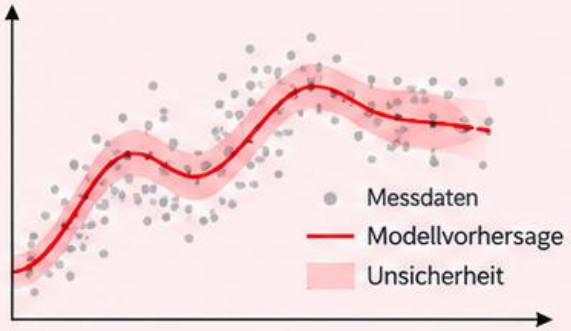
z. B. PINNs, eingeschränkte neuronale Netze



- nutzen Daten effizienter
- robuster und besser generalisierbar
- hilfreich bei begrenzter Datenlage

4 Stark datengetriebene Ansätze

z. B. Deep Learning, Gaussian Prozesse



- sehr flexibel
- leistungsfähig bei grossen Datenmengen
- oft weniger gut interpretierbar

Zum Beitrag

Zum Code

Durch die Kombination von physikalischem Wissen und Daten entstehen zuverlässige, robuste und interpretierbare Modelle für den realen Einsatz

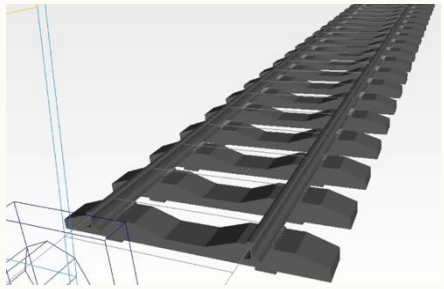
Hybridmodelle für den automatisierten Zugbetrieb

ESTRA: Efficient Safe Train Dynamics
Chatzi, Tiso, Corman, Frazzoli

CSFM

Schnelle Prognosen durch die Verbindung von Physik und Messdaten für eine adaptive Fahr- und Bremssteuerung.

1 Hochaufgelöste Simulation



Physikalisches Modell von Zug und Infrastruktur

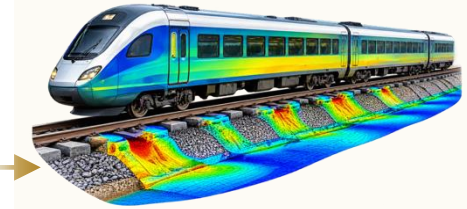
2 Szenarien untersuchen

Geschwindigkeit, Bremsung und Streckenzustand

3 Modelle vereinfachen

Wesentliche Dynamik erhalten, Rechenzeit reduzieren

5 Schnell vorhersagen



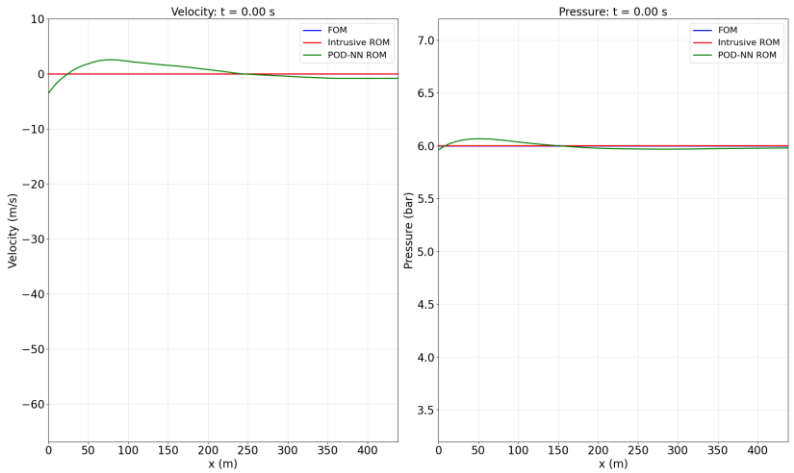
forces

displ.

stresses

Bremsverhalten und relevante Belastungen

$\mathbf{p} \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$



Paper

Von mobilen Messdaten zu Zustandsindikatoren durch hybride Modelle

Zustandsbewertung von Eisenbahnbrücken mit fahrzeugbasierten Messungen

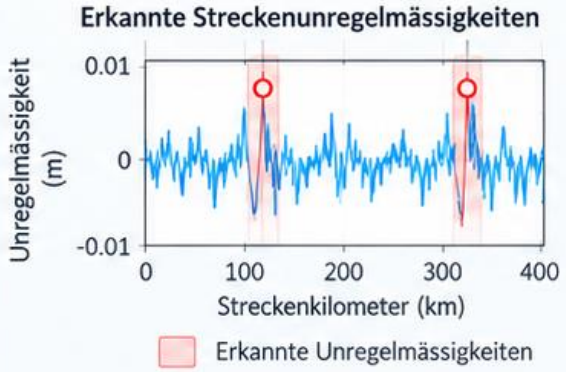
Mobile Messdaten ermöglichen eine indirekte Bewertung des Infrastrukturzustands.

1 Messdaten auf dem Zug

Sensoren am Zug messen Schwingungen während des Fahrbetriebs.

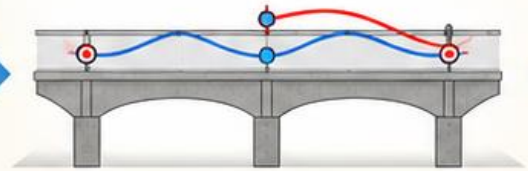
2 Unregelmässigkeiten der Strecke erkennen

Mit einem physikgestützten Modell werden Anomalien auf der Strecke identifiziert.

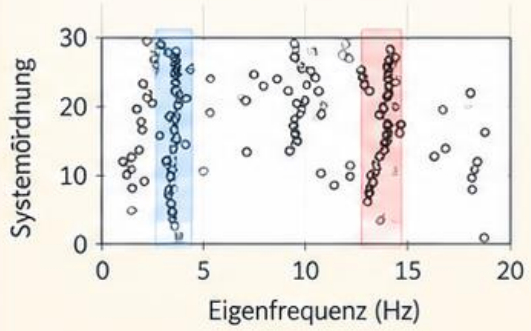


3 Eigenschaften der Brücke identifizieren

Aus den gemessenen Reaktionen werden die dynamischen Eigenschaften der Brücke bestimmt.



Identifizierte Schwingungsformen und Eigenfrequenzen



4 Zustandsbewertung der Brückeninfrastruktur

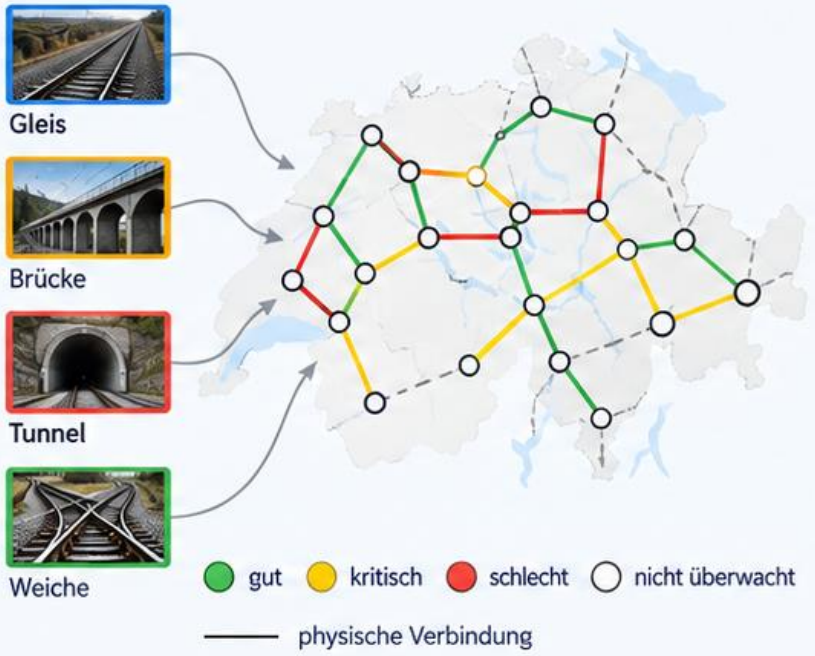
Die identifizierten Eigenschaften werden zur Bewertung des Brückenzustands und zur Priorisierung von Inspektionen genutzt.

Modellierung auf Netzwerk- und Systemebene

Graphbasierte Modelle und hybride, RL-gestützte Entscheidungsunterstützung für die Instandhaltung im Bahnnetz

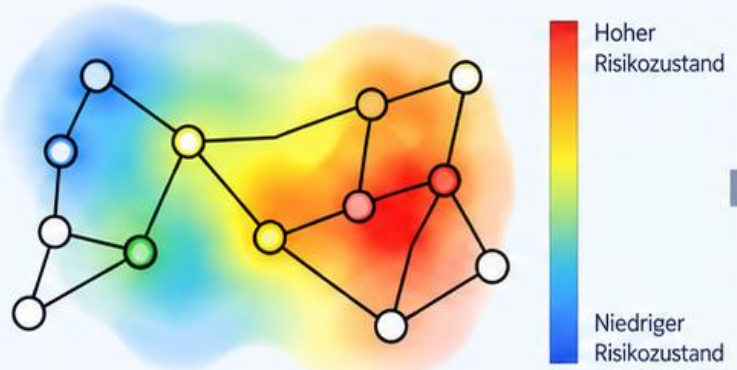
1 Netzwerk als Graph

Infrastrukturkomponenten als Knoten, Verbindungen als Kanten



2 Graphbasierte Inferenz

Räumlich korrelierte Zustände im Netz ableiten

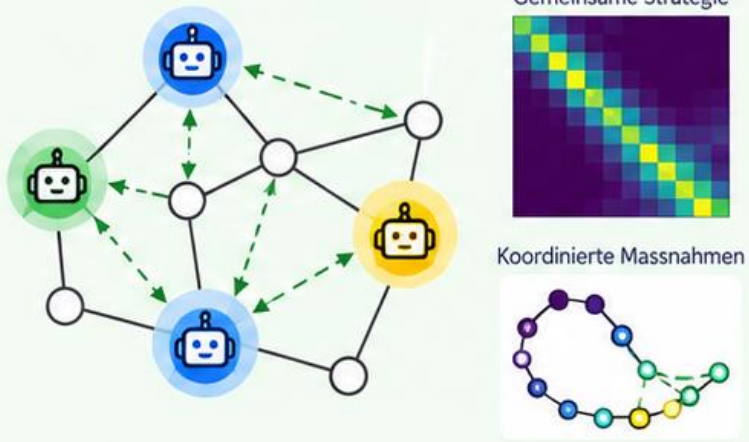


$$K_{graph} = \Phi(\Delta)$$

Abhängigkeiten entlang des Netzes

3 Multi-Agenten-Lernen

Komponenten lernen kooperative Instandhaltungsstrategien



SBB CFF FFS

Innosuisse

omenic

Erweiterte digitale Zwillinge für resiliente Verkehrsinfrastrukturen

Von Messdaten und physikalischen Modellen über Expertenwissen bis zur Netzwerkebene