

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05M2020 - HYDAMO

Zuwendungsempfänger: Universität Bremen
Projektleitung: Prof. Dr. Peter Maaß
E-Mail: pmaass@math.uni-bremen.de
Förderkennzeichen: 05M20LBC
Förderzeitraum: 01.04.2020 - 30.09.2023
Zuwendung: 281.112,30 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: doertec@uni-bremen.de
Zusätzlicher Name: Dörte Mindermann

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	1		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	4		
Andere Veröffentlichungen:	0		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	0		
Masterarbeiten:	0		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 14.03.2024 14:49 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Universität Bremen, Fachbereich 3, Zentrum für Technomathematik (ZeTeM)
Projektleitung:	Prof. Dr. Peter Maaß
Verbund:	05M2020 - HYDAMO: Hybride datengetriebene und modellbasierte Simulation komplexer Strömungsprobleme in der Fahrzeugindustrie.
Thema:	05M20LBC TP2: Parameteridentifikation komplexer nichtlinearer Abhängigkeiten

Zusammenfassung

Ziel des vorliegenden Verbundvorhabens war es, anhand eines bisher unzureichend verstandenen kontinuumsmechanischen Problems aus der Fahrzeugindustrie datengetriebenes und modellbasiertes Vorgehen beispielhaft zu einer Gesamtlösung zu integrieren und die rechnergestützte Abbildung des zugehörigen Prozesses entscheidend zu verbessern. Als prototypisches Beispiel wurde dazu eine Anwendung mit großer industrieller und gesellschaftlicher Bedeutung betrachtet: die Interaktion eines Fahrzeugs mit komplexen Materialien wie Sand, Schlamm oder Schnee. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden hochparametrische Modelle verwendet, die an einen komplett datengetriebenen Ansatz gekoppelt sind. Aus mathematischer Sicht stand dabei die Entwicklung geeigneter effizienter Algorithmen für die Analyse der Daten, die Parameteridentifikation und die spezielle numerische Behandlung der Gleichungen im Fokus. Im Projekt wurden einerseits die physikalische Modellierung und die Numerik der Kontinuumsgleichungen und andererseits die datengetriebene Modellierung mit Hilfe der von den Industriepartnern zur Verfügung gestellten Videodaten betrachtet. Dabei beschäftigten sich die Teilprojekte einerseits mit numerischen Aspekten der zugrundeliegenden gitterfreien Methoden, der effizienten Approximation granularer Zustandsrelationen mittels einer Modellhierarchie und einem skalenübergreifenden Ansatz. Andererseits wurden die Schnittstellen zur Datenintegration definiert sowie die Parameter der Modellhierarchie beginnend von einfachen Modellen bis zu komplexen nichtlinearen funktionalen Abhängigkeiten basierend auf einem parametrisierten Netzwerk identifiziert. Schlussendlich wurden diese Ansätze in ein bereits vorhandenes und industriell stark genutztes Simulations-Framework integriert.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zur Abbildung komplexer physikalischer Prozesse existieren im Wesentlichen zwei unterschiedliche Vorgehensweisen: klassische physikalische Modellierung mit zugehöriger numerischer Simulation (modellbasiert) und prognostische Verfahren basierend auf der Analyse großer Datenmengen (datengetrieben). In den letzten Jahren ist die effiziente Kombination von datengetriebenen und modellbasierten Ansätzen zu einer eigenen Forschungsthematik geworden. Allerdings ist die Forschung von einer ineinandergreifenden, problemangepassten Anwendung beider Prinzipien weit entfernt. Ziel des vorliegenden Verbundvorhabens war es, anhand eines bisher unzureichend verstandenen kontinuumsmechanischen Problems aus der Fahrzeugindustrie datengetriebenes und modellbasiertes Vorgehen beispielhaft zu einer Gesamtlösung zu integrieren und die rechnergestützte Abbildung des zugehörigen Prozesses entscheidend zu verbessern. Als prototypisches Beispiel wurde dazu eine Anwendung mit großer industrieller und gesellschaftlicher Bedeutung betrachtet: die Interaktion eines Fahrzeugs mit komplexen Materialien wie Sand, Schlamm oder Schnee. Auf solchen Untergründen ist die Fahrzeugstabilität nicht immer gegeben: Kollisionen oder ein Überschlagen des Fahrzeugs sind unter Umständen unvermeidlich. Diese Situationen müssen im Sinne der Insassensicherheit entsprechend gehandhabt werden. Effizient ist diese Problemstellung nur durch eine geeignete rechnerbasierte Abbildung des Prozesses zu lösen. Unsere Anwendungspartner Volkswagen AG und ESI Software Germany GmbH unterstreichen die generelle Relevanz des Vorhabens, die weit über das prototypische Beispiel hinausreicht.

Generell besteht Kontinuumsmechanik im Kern aus Erhaltungsgleichungen (Masse, Impuls, Energie), die neben der stets notwendigen Spezifikation der Prozessbedingungen durch phänomenologische Materialmodelle ergänzt werden. Letztere sind ein idealisiertes Abbild des spezifischen Materialverhaltens, welches experimentell, empirisch und durch eine Fülle an Expertenwissen begründet wird. Je komplexer das Material ist, desto schwieriger ist die Kalibrierung. Diese Situation bildet in natürlicher Weise den Ausgangspunkt für den hybriden datengetriebenen und modellbasierten Lösungsansatz im vorliegenden Vorhaben. Die Erhaltungsgleichungen – also die physikalisch bekannte und gut verstandene Modellbasis – bleiben unangetastet, während das Materialmodell – also der phänomenologische, mit großen Unsicherheiten behaftete Modellanteil – durch einen datengetriebenen Ansatz ersetzt wird, den wir unter dem Begriff generisches Materialmodell fassen. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden für Simulationen dieses Typus insbesondere hochparametrische Modelle verwendet, die an einen komplett datengetriebenen Ansatz gekoppelt sind. Durch die Verbindung von effizienten Methoden der Analyse großer Datenmengen und ausgereiften Methoden der numerischen Simulation wird eine neue Qualität der mathematischen Modellbildung erreicht. Aus mathematischer Sicht standen dabei die Entwicklung geeigneter effizienter Algorithmen für die Analyse der Daten, die Parameteridentifikation und die spezielle numerische Behandlung der Gleichungen im Fokus. Aus Sicht der Anwendungspartner handelte es sich im Wesentlichen um die Erarbeitung eines automatisch und effizient kalibrierten Prognosewerkzeugs für einen schwer modellierbaren Prozess.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Interaktion von Fahrzeugen mit Sand wird aktuell in der Automobilindustrie intensiv experimentell untersucht. Trotz der guten Datenlage ist zur digitalen Abbildung dieser Prozesse ein rein datengetriebenes Vorgehen aufgrund der physikalischen Restriktionen (Erhaltungsgleichungen der Kontinuumsmechanik) wenig zielführend. Um die Physik korrekt abbilden zu können, ist stattdessen ein hybrider datengetriebener und modellbasierter Ansatz notwendig. Dabei sollten in HYDAMO Parameteridentifikationskonzepte basierend auf Methoden des Maschinellen Lernens (Deep Learning) sowie gitterfreie numerische Methoden eingesetzt werden, die sich optimal ergänzen. Innovative Big Data Methoden zur Parameteridentifikation für partielle Differentialgleichungen aus Videodaten sollten hierbei die klassischen Konzepte ersetzen. In den letzten Jahren wurden bereits erfolgreich Konzepte zur Verbindung von analytisch modellgestützten mit datengetriebenen Ansätzen untersucht. Die mathematische Analyse dieser hybriden Ansätze steckt allerdings noch in den Anfängen. Außerdem führt die Parameteridentifikation für Systeme partieller Differentialgleichungen typischerweise auf hochgradig schlecht gestellte Inverse Probleme, die von Ansätzen des Maschinellen Lernens und hier insbesondere dem Einsatz von Deep Learning Methoden profitieren. Experimentelle Ergebnisse belegen eindrucksvoll das Potenzial dieser Ansätze für zahlreiche Anwendungsfelder.

Im Teilprojekt 2 werden die mathematisch-physikalischen Modelle aus TP1 (PDE, Kontinuumsmechanik) zu Grunde gelegt. In TP2 sollen dann die freien Parameter dieser Modelle für Materialien wie z.B. Sand oder Kies bestimmt werden. Hierzu wird ein datengetriebener Ansatz verwendet, um die komplexen nichtlinearen funktionalen Abhängigkeiten basierend auf einem parametrisierten Netzwerk zu identifizieren. Als Daten werden dabei die Simulationsergebnisse von Meshfree verwendet.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

In den Teilprojekten TP 1 (AGTM/Klar) und TP 2 (ZeTeM/Maaß) wurden einerseits die physikalische Modellierung und die Numerik der Kontinuumsgleichungen und andererseits die datengetriebene Modellierung mit Hilfe der von VW zur Verfügung gestellten Videodaten betrachtet. Dabei beschäftigte sich TP 1 mit numerischen Aspekten der zugrundeliegenden gitterfreien Methoden, der effizienten Approximation granularer Zustandsrelationen mittels einer Modellhierarchie und einem skalenübergreifenden Ansatz. In TP 2 wurden die Schnittstellen zur Datenintegration definiert sowie die Parameter der Modellhierarchie beginnend von einfachen Modellen bis zu komplexen nichtlinearen funktionalen Abhängigkeiten basierend auf einem parametrisierten Netzwerk identifiziert. TP 3 (ITWM/Kuhnert) arbeitete an der effizienten Integration des hybriden Ansatzes aus TP 1 und TP 2 in das MESHFREE-Framework. Dabei fokussiert es auf ein generisches Materialmodell und koppelt dies mit der entwickelten Parameteridentifikationsstrategie. Darüber hinaus werden der skalenübergreifende Ansatz aus TP 1 sowie die dort als geeignet identifizierten Optionen zur Effizienzsteigerung eingebunden. Anhand der experimentellen Daten wird der entstehende Prototyp validiert. Die industriellen Partner VW und ESI waren durch die Zurverfügungstellung der Daten (VW) sowie der Bereitstellung und Adaption der Schnittstelle zur Software VPS zur Vollsimulation des Fahrzeugs (ESI) direkt in die Arbeiten eingebunden.

4 **Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)**

Der weitaus größte und wichtigste Anteil der Zuwendung besteht aus den Personalmitteln für eine(n) wissenschaftliche(n) Mitarbeiter*in.

Für den gesamten Bewilligungszeitraum des Projektes (01.04.2020-31.03.2023) wurden 36 Vollzeit-äquivalente TVL E13 geplant und beantragt.

Von den insgesamt für das Projekt bewilligten Mitteln von 234.260,25 € wurden 222.278,54 € zur Deckung der Personalkosten genutzt. Diese Kosten verteilen sich auf 3 Mitarbeiter mit unterschiedlichen Stellenanteilen.

5 **Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele**

In dem Teilprojekt, das unter Federführung der Universität Bremen bearbeitet wurde, sollten daten-getriebene Methoden (Neuronale Netze) entwickelt werden, um eine effiziente Parameteridentifikation der PDE-Modelle der Projektpartner zu unterstützen. Insgesamt sind hierzu 5 Publikationen entstanden.

Hervorzuheben sind hierbei die Pub. 1, in der eine umfangreiche Vergleichsstudie zu existierenden KI-Ansätzen vorgenommen wurde. Hierauf aufbauend wurden dann für die speziellen Anwendungen des HYDAMO-Projektes Konzepte entwickelt und theoretisch untersucht (Pub 3 + 4).

Die Projektergebnisse wurden auf mehreren nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt.

Im Folgenden sind einige wesentliche Ergebnisse der Teilprojekte aufgeführt.

Die Arbeiten im Teilprojekt TP2 waren in 4 Arbeitspakete eingeteilt:

AP 2.1 – Daten-Schnittstellen

Das generelle Vorgehen zu unserem Teilprojekt ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein zentrales Problem war hierbei die Kopplung der MESHFREE Software mit den KI-Methoden.

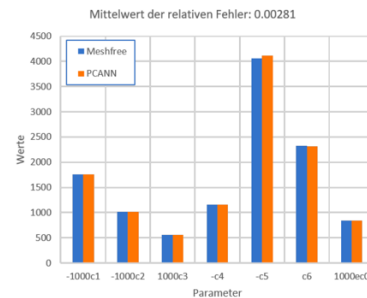
In diesem ersten Arbeitspaket wurden deshalb die Ein- und Ausgaberoutinen des MESHFREE-Frameworks in Zusammenarbeit mit dem ITWM analysiert. Darauf aufbauend wurden Schnittstellen zur automatisierten Erzeugung von Daten zum Training der neuronalen Netze implementiert. Bei der Integration von Videodaten erfolgte die Abstimmung der grundlegenden Vorgehensweise mit den Projektpartnern insbesondere im Hinblick auf AP 3.1.

Alle nötigen Daten-Schnittstellen wurden implementiert und getestet.

AP 2.2 – Maschinelles Lernen

Die Ergebnisse von AP 2.2 sind die Grundlage für die Publikation Pub 1, die – obwohl erst 2023 erschienen - inzwischen bereits erfreulich oft zitiert wurde (Google Scholar). In dieser Arbeit wurden neuronale Netze für PDE-Löser (Vorwärtsproblem) mit Strategien zur Parameteridentifikation (inverses Problem) gekoppelt. Die dort entwickelten Ansätze zu Tikhonov-Regularisierung bzw. zur direkten Invertierung wurden analytisch und numerisch untersucht (Publ. 1).

Mit der TU Kaiserslautern (TP 1) und dem ITWM (TP 3) wurden dann das für dieses Projekt grundlegende Problem der Kontinuumsmechanik analysiert. Darauf aufbauend wurde dann ein neuronales Netz zur Parameteridentifikation dieses PDE-Modells (Kontinuumsmechanik) trainiert. Die Ergebnisse wurden an die Projektpartner von TP1 und TP3 weitergeleitet.



Weitere Details findet man in der eingereichten Publikation [4].

AP 2.3 – Theoretische Analyse

Der Schwerpunkt der Arbeiten zu diesem Arbeitspunkt lag auf der Entwicklung von Vergleichsmetriken für Ansätze partielle Differentialgleichungen mittels Deep Learning näherungsweise zu lösen. Hier gilt es insbesondere Aufwand und Genauigkeit für verschiedene Ansätze vergleichend zu bewerten, um geeignete Verfahren für die jeweilige Anwendung auswählen zu können. Darüber hinaus wurde der Vergleich auch auf den Einsatz von Neuronalen Netzen bei der Lösung von Inversen Problemen erweitert. Die Publikation der erzielten Ergebnisse erfolgte in [1].

Diese Ansätze wurden dann auf spezielle PDE-Modelle adaptiert und ebenfalls sowohl theoretisch als auch numerisch analysiert (Publ 3 + 4)

AP 2.4 – Implementierung, Testrechnungen und Evaluation

Aufbauend auf den Ergebnissen von AP 2.2 wurden die optimierten Netzwerkstrukturen zur Parameteridentifikation implementiert. Testrechnungen wurden zunächst für ein vereinfachtes Differentialgleichungssystem (Transportgleichung mit unbekanntem Quellterm) durchgeführt und dann Schritt für Schritt auf komplexere PDE-Modelle erweitert.

Die Implementierung dieser KI-Methoden zur Parameteridentifikation wurden in Abstimmung mit TP 1 (AGTM/Klar) und TP 3 (ITWM/Kuhnert) realisiert. Zum Abschluss erfolgte die Anwendung auf das PDE-Modell der Kontinuumsmechanik, das diesem gesamten Projekt zugrunde liegt. Die Parameter dieses Systems konnten erfolgreich bestimmt werden, siehe Publ. 4

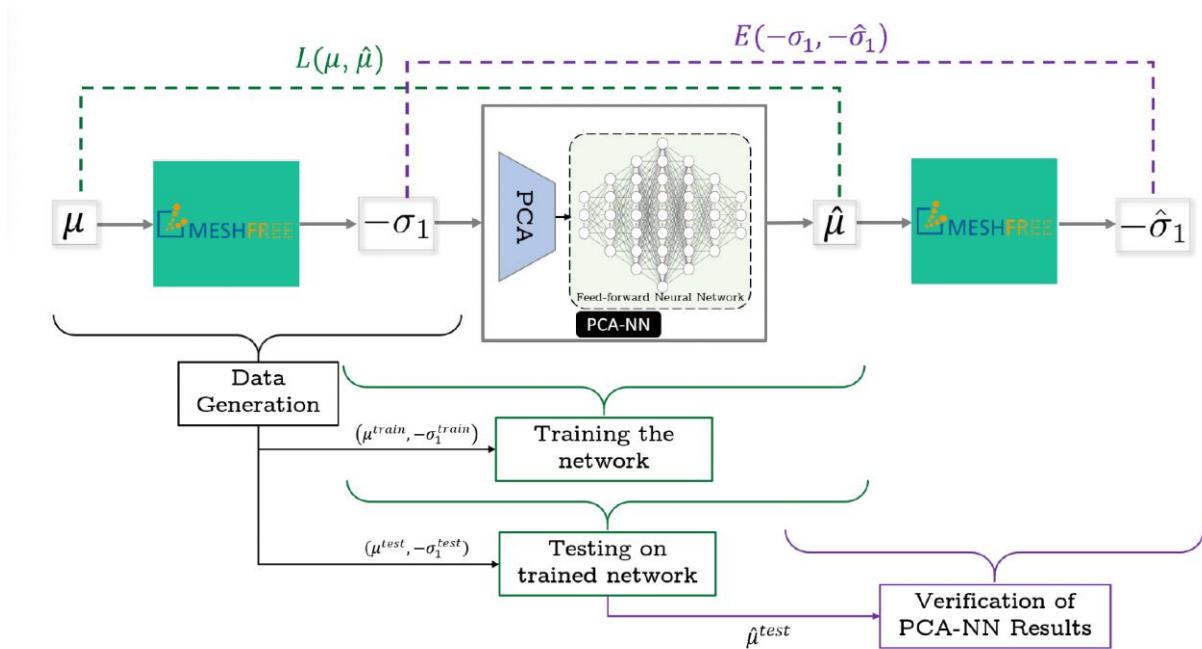


Abbildung 1: Methodik zur Parameteridentifikation mittels Deep Learning

Diese Arbeiten sind in die Publikation [1] eingeflossen.

Weiteres

Wie bereits erwähnt wurden die durch die in TP2 erarbeiteten Konzepte zur Lösung von PDE-basierten Parameteridentifikationsproblemen auf weitere Modellklassen angewendet. Schwerpunkt hierbei war eine elliptische Diffusionsgleichung (Impedanztomographie), siehe unsere Publikation [3]. Diese Arbeiten wurden nach Projektende von Dr. Nganyu Tanyu fortgesetzt und zum Vergleich von KI-Methoden für komplexe nicht-lineare PDE-Modelle eingesetzt.

Meilensteine:

Meilenstein 1 nach 12 Monaten:

TP 2 (ZeTeM/Maaß) – Die Definition der Schnittstellen wurde durchgeführt (AP 2.1), Konzept zum Maschinellen Lernen wurden erfolgreich entwickelt (AP 2.2)

Meilenstein 2 nach 24 Monaten

TP 2 (ZeTeM/Maaß) – Die Stabilitätsanalyse zu Meilenstein 2 wurde durchgeführt (AP 2.3) und in [1] publiziert.

Meilenstein 3 – Projektende

TP 2 (ZeTeM/Maaß) – Die optimierte Netzwerkstrukturen für das Problem der Kontinuumsmechanik wurde implementiert und evaluiert (AP 2.4), siehe [4]

Mit Erreichen des letzten Meilensteins steht ein effizienter Prototyp zur Parameteridentifikation für PDE-Modelle der Kontinuumsmechanik zur Verfügung

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

HYDAMO ist komplementär zu den fachspezifischen BMBF-Programmen anderer Disziplinen angelegt. Die breite methodische Aufstellung und das Innovationspotenzial durch die Kombination von Modellen auf Basis nichtlinearer partieller Differentialgleichungen und moderner Analysemethoden des Maschinellen Lernens ist anwendungsorientierte Grundlagenforschung mit hohem wirtschaftlichem sowie wissenschaftlich-technischem Risiko und bedarf der Förderung durch ein mathematisch ausgerichtetes Programm. Die programmtypische Zusammenarbeit von Antragstellern und Anwendungspartnern ist erforderlich, um robuste, verifizierbare Modelle zu entwickeln und deren Verwendung in der Praxis mittels geeigneter Softwareentwicklung voranzutreiben.

Die vom Projektträger zur Verfügung gestellten Mittel wurden in erster Linie zur Deckung der Personalkosten des eingesetzten Personals benötigt (227.837,74 €). Des Weiteren wurden 7.270,59 € benötigt, um die Projektergebnisse auf Konferenzen vorzutragen.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Bei VW und ESI werden Teile der Projektergebnisse schon seit Anfang 2022 eingesetzt. Die Ergebnisse des Projektes fließen im Rahmen einer bereits seit 2019 bestehenden Zusammenarbeit des Fraunhofer ITWMs mit VW und ESI in die Implementierungen der dort verwendeten Software (MESHFREE) ein.

Die Umsätze aus gemeinsamen Projekten des ITWMs mit den jeweiligen Firmen zur Sandmodellierung im Automobilbau belaufen sich dabei auf jährlich ca 30T Euro zu Sand-Modellierungsprojekten von ESI/ITWM und außerdem jährlich ca 20T Euro zu entsprechenden Softwareentwicklungsprojekten von VW/ITWM. Zusätzlich konnten noch jährlich ca 20 T Euro an Lizezeinnahmen erzielt werden.

8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nicht bekannt-

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

[1] J.D. Nganyu Tanyu, J. Ning, T. Freudenberg, N. Heilenkötter, A. Rademacher, U. Iben, P. Maaß. **Deep learning methods for partial differential equations and related parameter identification problems.**

Inverse Problems, 39(10), 2023.

DOI: 10.1088/1361-6420/ace9d4

[2] D. Nganyu Tanyu, D. Schulz, T. Tatiitse, T. Lukong.

Long Term Electricity Load Forecast Based on Machine Learning for Cameroon's Power System.

Energy and Environment Research, 12(1), 2022.

DOI: 10.5539/eer.v12n1p45

online unter: <https://ccsenet.org/journal/index.php/eer/article/view/0/47276>

[3] D. Nganyu Tanyu, J. Ning, A. Hauptmann, B. Jin, P. Maaß.

Electrical Impedance Tomography: A Fair Comparative Study on Deep Learning and Analytic-based Approaches.

Zur Veröffentlichung eingereicht.

online unter: <https://arxiv.org/abs/2310.18636>

[4] D. Nganyu Tanyu, I. Michel, A. Rademacher, J. Kuhnert, P. Maaß.

Parameter Identification by Deep Learning of a Material Model for Granular Media.

Zur Veröffentlichung eingereicht.

DOI: 10.48550/arXiv.2307.04166

online unter: <https://arxiv.org/abs/2307.04166>

Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

[5] D. Nganyu Tanyu.

On the Interplay between Deep Learning Partial Differential Equations and Inverse Problems

Dissertation, Universität Bremen, 2023

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger:	Universität Bremen, Fachbereich 3, Zentrum für Technomathematik (ZeTeM)
Projektleitung:	Prof. Dr. Peter Maaß
Verbund:	05M2020 - HYDAMO: Hybride datengetriebene und modellbasierte Simulation komplexer Strömungsprobleme in der Fahrzeugindustrie.
Thema:	05M20LBC TP2: Parameteridentifikation komplexer nichtlinearer Abhängigkeiten

1. Ziel und Inhalt des Projektes

Ziel des vorliegenden Verbundvorhabens war es, anhand eines bisher unzureichend verstandenen kontinuumsmechanischen Problems aus der Fahrzeugindustrie datengetriebenes und modellbasiertes Vorgehen beispielhaft zu einer Gesamtlösung zu integrieren und die rechnergestützte Abbildung des zugehörigen Prozesses entscheidend zu verbessern. Als prototypisches Beispiel wurde dazu eine Anwendung mit großer industrieller und gesellschaftlicher Bedeutung betrachtet: die Interaktion eines Fahrzeugs mit komplexen Materialien wie Sand, Schlamm oder Schnee. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden hochparametrische Modelle verwendet, die an einen komplett datengetriebenen Ansatz gekoppelt sind. Aus mathematischer Sicht stand dabei die Entwicklung geeigneter effizienter Algorithmen für die Analyse der Daten, die Parameteridentifikation und die spezielle numerische Behandlung der Gleichungen im Fokus.

Im Projekt wurden einerseits die physikalische Modellierung und die Numerik der Kontinuumsgleichungen und andererseits die datengetriebene Modellierung mit Hilfe der von den Industriepartnern zur Verfügung gestellten Videodaten betrachtet. Dabei beschäftigten sich die Teilprojekte einerseits mit numerischen Aspekten der zugrundeliegenden gitterfreien Methoden, der effizienten Approximation granularer Zustandsrelationen mittels einer Modellhierarchie und einem skalenübergreifenden Ansatz. Andererseits wurden die Schnittstellen zur Datenintegration definiert sowie die Parameter der Modellhierarchie beginnend von einfachen Modellen bis zu komplexen nichtlinearen funktionalen Abhängigkeiten basierend auf einem parametrisierten Netzwerk identifiziert. Schlussendlich wurden diese Ansätze in ein bereits vorhandenes und industriell stark genutztes Simulations-Framework integriert.

2 Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

In den Teilprojekten TP 1 (AGTM/Klar) und TP 2 (ZeTeM/Maaß) wurden einerseits die physikalische Modellierung und die Numerik der Kontinuumsgleichungen und andererseits die datengetriebene Modellierung mit Hilfe der von VW zur Verfügung gestellten Videodaten betrachtet. Dabei beschäftigte sich TP 1 mit numerischen Aspekten der zugrundeliegenden gitterfreien Methoden, der effizienten Approximation granularer Zustandsrelationen mittels einer Modellhierarchie und einem skalenübergreifenden Ansatz. In TP 2 wurden die Schnittstellen zur Datenintegration definiert sowie die Parameter der Modellhierarchie beginnend von einfachen Modellen bis zu komplexen nichtlinearen funktionalen Abhängigkeiten basierend auf einem parametrisierten Netzwerk identifiziert. TP 3 (ITWM/Kuhnert) arbeitete an der effizienten Integration des hybriden Ansatzes aus TP 1 und TP 2 in das MESHFREE-Framework. Dabei fokussierte es auf ein generisches Materialmodell und koppelte dies mit der entwickelten Parameteridentifikationsstrategie. Darüber hinaus wurden der skalenübergreifende Ansatz aus TP 1, sowie die dort als geeignet identifizierten Optionen zur Effizienzsteigerung eingebunden. Die industriellen Partner VW und ESI waren durch die Zurverfügungstellung der Daten (VW) sowie der Bereitstellung und Adaption der Schnittstelle zur Software VPS zur Vollsimulation des Fahrzeugs (ESI) direkt in die Arbeiten eingebunden.

3 Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und deren konkreter Nutzen sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Teilprojekt 2 ist an der Schnittstelle zur Modellierung angesiedelt und knüpft an die Simulationsansätze der Projektpartner an. Die Hauptaufgabe liegt in der Parametrierung der von den Projektpartnern verwendeten Modellen mittels numerischer Parameteridentifikation auf Basis von neuronalen Netzen.

Mit Erreichen des letzten Meilensteins steht nun ein effizienter Prototyp zur Parameteridentifikation für PDE-Modelle der Kontinuumsmechanik zur Verfügung

Bei VW und ESI werden Teile der Projektergebnisse schon seit Anfang 2022 eingesetzt. Die Ergebnisse des Projektes fließen im Rahmen einer bereits seit 2019 bestehenden Zusammenarbeit des Fraunhofer ITWMs mit VW und ESI in die Implementierungen der dort verwendeten Software (MESHFREE) ein.

Neben der Parameteridentifikation für das den Experimenten zugrundeliegende Gleichungssystem der Kontinuumsmechanik als der Schwerpunkt der Arbeiten in Teilprojekt 2 auf der Entwicklung von Vergleichsmetriken für Deep Learning Ansätze für allgemeine Differentialgleichungen. Hier gilt es insbesondere Aufwand und Genauigkeit für verschiedene Ansätze vergleichend zu bewerten, um geeignete Verfahren für die jeweilige Anwendung auswählen zu können. Darüber hinaus wurde der Vergleich auch auf den Einsatz von Neuronalen Netzen bei der Lösung von Inversen Problemen erweitert. Die Publikation der erzielten Ergebnisse erfolgte in [1].

[1] Derick Nganyu Tanyu, Jianfeng Ning, Tom Freudenberg, Nick Heilenkötter, Andreas Rademacher, Uwe Iben, Peter Maass: Deep Learning Methods for Partial Differential Equations and Related Parameter Identification Problems, *Inverse Problems*, 39(10), 2023.
DOI: 10.1088/1361-6420/ace9d4