

Motivation

Unternehmen der industriellen Produktentwicklung stehen zunehmend unter Druck, den steigenden Anforderungen verschiedener Stakeholder gerecht zu werden. Gefordert werden unter anderem höhere Effizienz, Nachhaltigkeit und Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion, Ressourcenschonung sowie deutlich verkürzten Entwicklungs- und Time-to-Market-Zeiten. Die digitale Transformation verändert diese Prozesse grundlegend. Während numerische Simulationsverfahren wie die Finite-Elemente-Methode seit Jahrzehnten etablierte Werkzeuge sind, eröffnen datengetriebene Ansätze und Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) neue Wege zur Modellierung, Automatisierung und Entscheidungsunterstützung. In der Praxis existieren diese Welten jedoch meist nebeneinander: Physikalische Modelle liefern belastbare, aber rechenintensive Ergebnisse, während KI-Modelle zwar in Echtzeit Resultate erzeugen können, jedoch häufig schwer interpretierbar sind und eine erhebliche Menge an Daten benötigen. Ziel des Vorhabens ist es, beide Paradigmen zu vereinen – die physikalische Nachvollziehbarkeit und Genauigkeit klassischer numerischer Simulationen mit der Adaptivität und Effizienz maschineller Lernverfahren zu verbinden. So entstehen hybride Modelle, die in der Lage sind, komplexe technische Systeme ganzheitlich zu beschreiben, schneller zu bewerten und kontinuierlich aus Daten zu lernen. Das Projekt adressiert damit eine zentrale Herausforderung der modernen, datenbasierten Produktentwicklung und stärkt die Position Bayerns als führenden Standort für angewandte KI im Ingenieurwesen.

1. Kontext

Die digitale Produktentwicklung befindet sich im Spannungsfeld wachsender Anforderungen an Effizienz, Nachhaltigkeit und Innovationsgeschwindigkeit. Neben Ressourcenschonung und Gewichtsreduktion gewinnen verkürzte Entwicklungszyklen und eine raschere Markteinführung zunehmend an Bedeutung (siehe Abbildung 1). Um diese Ziele zu erreichen, müssen numerische Simulation, Material- und Prozessmodellierung sowie datengetriebene Analytik eng verzahnt werden.



Abbildung 1. Herausforderungen der modernen digitalen Produktentwicklung.

Numerische Verfahren liefern physikalisch fundierte Ergebnisse, erfordern jedoch hohen Rechenaufwand und Expertenwissen. KI-Methoden lernen komplexe Zusammenhänge aus Daten und liefern nahezu in Echtzeit Ergebnisse, sind aber oft schwer nachvollziehbar und benötigen große Datenmengen. Eine methodische Verbindung beider Ansätze verspricht daher die Stärken beider Welten zu kombinieren – Präzision und Nachvollziehbarkeit physikalischer Modelle mit der Adaptivität und Effizienz datengetriebener Verfahren.

Besondere Bedeutung kommt der Nutzung von CAD-Daten zu: Dreidimensionale Modelle liegen in komplexen geometrischen Strukturen vor, die für KI-Anwendungen erst aufbereitet werden müssen. Ihre effiziente Vereinfachung und Merkmalsextraktion sind Schlüssel

zur Kopplung von Simulation und datengetriebener Analyse. Zentrale Herausforderungen bestehen insbesondere in:

- mangelnder Interoperabilität zwischen Simulations-, Daten- und KI-Modellen,
- begrenzter Übertragbarkeit und Nachvollziehbarkeit rein datengetriebener Ansätze,
- hohem Aufwand für Aufbau und Validierung komplexer Modelle,
- fehlender Integration domänenübergreifender Wissensquellen,
- sowie der KI-gerechten Repräsentation und Strukturierung von CAD- und 3D-Daten.

Das Vorhaben adressiert diese Punkte durch die Erforschung einer einheitlichen Methodik zur Fusion numerischer, physikalischer und KI-basierter Modelle, um Produktentwicklung effizienter, robuster und datengetriebener zu gestalten.

2. Zielsetzungen

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines integrierten methodischen und technischen Rahmens, der die Fusion numerischer, physikalischer und datengetriebener Modelle in der Produktentwicklung ermöglicht. Dadurch sollen Entwicklungsprozesse effizienter, robuster und nachvollziehbarer werden.

Das Vorhaben konzentriert sich auf vier komplementäre Zielrichtungen:

- **Hybride Modellierungsstrategien:** Entwicklung von Methoden zur Kopplung physikalisch fundierter Modelle mit lernfähigen KI-Komponenten, um präzise und zugleich adaptive Modelle zu schaffen.
- **Automatisierte Geometrieverarbeitung:** KI-gestützte Analyse, Vereinfachung und Merkmalsextraktion aus CAD-Daten zur automatisierten Vorbereitung technischer Geometrien für KI-Anwendungen.
- **Standardisierte Daten- und Austauschformate:** Aufbau interoperabler Schnittstellen, Metadatenmodelle und Ontologien für einen konsistenten Informationsfluss zwischen CAD, Simulation und KI.
- **Foundational Model:** Entwicklung eines domänenübergreifenden Basismodells, das physikalische Eigenschaften und Si-

mulationsergebnisse aus geometrischen Eingaben vorhersagen kann und als Ersatzmodell numerischer Verfahren dient.

Diese vier Säulen bilden die Grundlage für Werkzeuge und Methoden, die Ingenieurwissenschaft und Datenanalyse verbinden und die Entwicklung digitaler Zwillinge auf eine neue Stufe heben.

3. Methodik

Die Methodik basiert auf der engen Integration von numerischer Simulation, physikalisch fundierter Modellbildung und KI-gestützten Lernverfahren. Sie vereint klassische Ingenieurwissenschaft mit modernen Machine-Learning-Techniken in einem einheitlichen Rahmen.

Kern des Ansatzes sind vier miteinander verknüpfte Arbeitsebenen:

- **Hybride Modellierung:** Kombination numerischer und physikalischer Modelle mit datengetriebenen Komponenten, etwa durch Differentiable Programming oder Physics-Informed Neural Networks (PINNs), um physikalische Gesetzmäßigkeiten in Lernprozesse einzubinden.
- **Geometrieverarbeitung:** Transformation von 3D-CAD-Daten mittels semantischer Segmentierung, Feature-Extraktion und Topologievereinfachung in KI-kompatible Repräsentationen; Einsatz geometrischer Deep-Learning-Methoden und synthetischer Trainingsdaten zur Steigerung der Modellrobustheit.
- **Daten- und Austauschformate:** Entwicklung eines interoperablen Datenfundaments mit standardisierten Schnittstellen und Ontologien zur durchgängigen Rückverfolgbarkeit und Wiederverwendbarkeit hybrider Modelle.
- **Foundational Model:** Aufbau eines auf großen Geometrie- und Simulationsdatensätzen trainierten Basismodells unter Nutzung von Multi-Task- und Transfer-Learning zur generalisierbaren Vorhersage physikalischer Eigenschaften.

Einbindung industrieller Partner: Industriepartner aus Maschinenbau, Fahrzeugtechnik und Elektronik liefern reale Entwicklungsdaten und Validierungsszenarien. Sie sind in die Spezifikation der Demonstratoren und die Definition praxisnaher Use-Cases eingebunden, um direkte Übertragbarkeit sicherzustellen. Der entstehende bidirektionale Wissenstransfer zwischen Forschung und Anwendung gewährleistet, dass die entwickelten Methoden praxisrelevant, generalisierbar und industriell umsetzbar sind.

4. Outcomes

Das Projekt liefert wissenschaftlich fundierte Methoden und praxisnahe Werkzeuge für hybride Modellierung in der Produktentwicklung. Erwartete Ergebnisse sind:

- prototypische Software-Demonstratoren für CAD- und Simulationsumgebungen,
- ein validiertes Datenframework für die Kopplung physikalischer und KI-basierter Modelle,
- Leitfäden und Richtlinien für den industriellen Einsatz hybrider Modelle,
- Schulungs- und Weiterbildungsangebote zur nachhaltigen Verankerung der Ergebnisse an der Hochschule.

5. Impact

Die Wirkung des Projekts zeigt sich auf mehreren Ebenen:

- **Wissenschaftlich:** Beitrag zur methodischen Integration von Simulation und KI sowie Entwicklung erklärbarer, datengetriebener Modelle.

- **Wirtschaftlich:** Beschleunigte Entwicklungsprozesse, geringere Kosten und höhere Produktqualität, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen.
- **Gesellschaftlich:** Förderung nachhaltiger, ressourceneffizienter Technologien.
- **Politisch-strategisch:** Unterstützung der bayerischen Digitalstrategie durch Stärkung des Wissens- und Technologietransfers zwischen Hochschule und Industrie.