

Schlussbericht

der
Hexagon Manufacturing Intelligence GmbH

über das Förderprojekt

newAIDE

new Artificial Intelligence based Design in Engineering

öffentlich

Autoren:

Angela Bücherl
Daniel Hitzelberger
Jan Bauch
Ralf Bosbach

Datum:

28.08.2024

Gefördert von



**Finanziert von der
Europäischen Union**
NextGenerationEU

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Die Verantwortung für den
Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor*innen.**

Förderkennzeichen: 19I21012D
Laufzeit: 01.06.2021 – 31.05.2024

Inhaltsübersicht

I	KURZE DARSTELLUNG	3
1.	Aufgabenstellung	3
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn	5
	Arbeitspaket 1: Datenbanken und Datenstrukturen	5
	Arbeitspaket 4: Fahrwerk	6
	Arbeitspaket 5: Exterieur	6
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder Firmen außerhalb des Verbundprojektes	7
II	EINGEHENDE DARSTELLUNG	8
6.	Erzielte Ergebnisse.....	8
	AP1 – Datenbanken und Strukturen und AP5 – Exterieur	8
	AP4 – Fahrwerk.....	28
7.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	43
8.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	43
	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	43
9.	Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Ergebnisverwertung	43
	AP1 – Datenbanken und Strukturen und AP5 - Exterieur	43
	AP4 – Fahrwerk.....	45
10.	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen	46
11.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	46
III	ANHANG	47
	Abbildungsverzeichnis.....	47

I KURZE DARSTELLUNG

1. Aufgabenstellung

Das Forschungsprojekt "newAIDE - new Artificial Intelligence based Design in Engineering" zielt auf die Forschungsfragestellungen, die im Förderaufruf „Künstliche Intelligenz als Schlüsseltechnologie für das Fahrzeug der Zukunft“ im Fachprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Hinblick auf den Einsatz von KI-Technologien in der Fahrzeugentwicklung und -auslegung adressiert werden.

Mithilfe vorhandener KI-Methoden sollen simulationsbasierte Auslegungsprozesse der Fahrzeugentwicklung verbessert, beschleunigt und vereinfacht werden. Durch den Einsatz von Algorithmen aus den Bereichen Machine Learning oder Deep Learning sollen die Rechenzeiten und Qualität der umfangreichen und teilweise heterogenen Simulationen in den verschiedenen Auslegungsdisziplinen optimiert werden. Zudem soll erforscht werden, ob und in welchem Umfang durch ML-Methoden menschliche Entscheidungsprozesse anhand vorhandener Simulationsdaten erlernt werden können. Dadurch könnte die Entwicklungssoftware mithilfe entsprechend trainierter ML-Modelle beispielsweise Konstruktionsvorschläge oder Analyseschritte unterbreiten, die schneller und einfacher zu einer funktionalen Lösung führen. Damit unterstützt das Projekt newAIDE die im Förderaufruf adressierten KI-Methoden für die „Next best action“ in der Fahrzeugentwicklung.

Ein zentraler Forschungsschwerpunkt ist zudem die Erforschung und Entwicklung von Datenwrangling-Tools, Datenstrukturierungen und Datenbankstrukturen, um die Erforschung, Entwicklung und Einsatz von KI-Methoden in den verschiedenen Disziplinen der Fahrzeugauslegung zu ermöglichen, zu unterstützen und zu vereinfachen. Auf dieser Basis können zukünftige Produktentwicklungen und Produktionsprozesse leichter und schneller von KI-Ansätzen profitieren und somit weitere wirtschaftliche Potenziale durch den Einsatz von KI in der Fahrzeugentwicklung erschlossen werden.

Die konkrete Forschungs- und Entwicklungsarbeit adressiert verschiedene Anwendungsfälle aus den komplexen Auslegungsprozessen. Hexagon beteiligte sich an den Bereichen Fahrwerk (Arbeitspaket 4) und Exterieur (Arbeitspaket 5) und dem übergreifendem Thema Datenbanken und Datenstrukturen (Arbeitspaket 1).

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Gesamtprojekt war in insgesamt sieben Arbeitspakete aufgegliedert, deren Abhängigkeiten voneinander in Abbildung 1 schematisch dargestellt sind.

Als verbindendes Element gab es das Arbeitspaket 1, Datenbanken und Datenstrukturen, das unterstützend für die vier disziplinspezifischen Arbeitspakete Konzepte, Lösungen, Tools und Schnittstellen für die Datenaufbereitung, Data-Mining und ML-Pipelines bereitstellte. Das Arbeitspaket 6 bündelte die Ergebnisse der zentralen Arbeitspakete, förderte die Vernetzung und bewertete die Gesamtergebnisse.

Als nichtfachlichen Rahmen gab es das Arbeitspaket 0, welches das notwendige Projektmanagement zur Durchführung des Forschungsprojekts enthielt.

Hexagon beteiligte sich an den Arbeitspaketen AP1, AP4 und AP5.

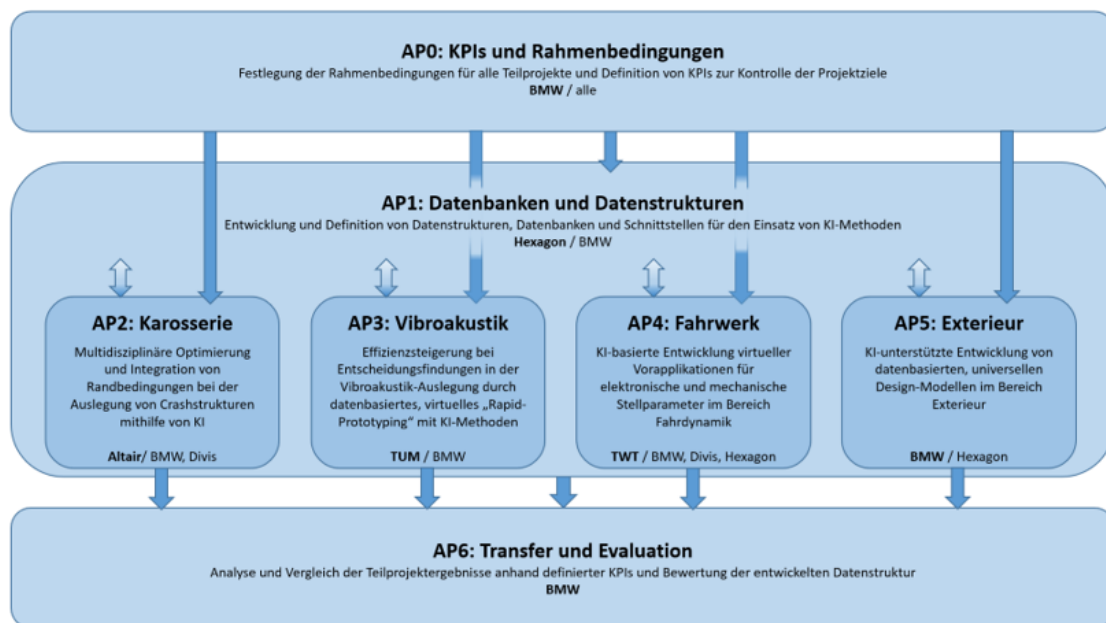


Abbildung 1: Aufteilung der Arbeitspakete inklusive beteiligter Firmen
(AP-Leitung jeweils fett gedruckt)

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

In Abbildung 2 ist der Zeitplan des Vorhabens aufgeteilt nach Arbeitspaketen dargestellt. AP1 in blau, AP4 in orange und AP5 in grün.



Abbildung 2: Projektplan über gesamte Laufzeit

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

Die im Projekt newAIDE beantragte Projektidee wurde von keinem Projektpartner im Rahmen einer anderen nationalen oder europäischen Fördermaßnahme zur Förderung eingereicht.

Die verschiedenen Fragestellungen im Projekt newAIDE adressierten unterschiedliche Bereiche. Der wissenschaftliche und technische Stand, an den in den Arbeitspaketen mit Hexagon-Beteiligung angeknüpft wurde, wird im Folgenden dargestellt.

Arbeitspaket 1: Datenbanken und Datenstrukturen

In der virtuellen Fahrzeugentwicklung sind Simulationsdaten- und Prozess-Management-Systeme (SDM-Systeme) ein essenzielles Tool, um die große Menge von Simulations-Modellen und Simulationsdaten zu organisieren, zu verwalten und Arbeitsabläufe zu automatisieren. SDM-Systeme erlauben die Durchführung und Speicherung tausender Simulation pro Tag. Dabei werden Datenmengen im Bereich von vielen TB pro Tag bzw. mehrere PB insgesamt verarbeitet. Um diese Datenmenge für die Erforschung und den Einsatz von KI-Methoden in Auslegungsprozessen nutzen zu können, fehlen Datenwrangling-Tools und geeignete Datenstrukturierungen und Datenbankstrukturen für das Feature-Engineering, Modelltraining, Datenanalyse bzw. allgemein für das Data-Mining.

Zur Bewältigung der großen Datenmengen, die für ML-Methoden benötigt werden, gibt es moderne Datenbanktechnologien, die besser dafür geeignet sind als traditionelle relationale Datenbanken, die bei sehr großen und komplexen Datenbeständen schnell an ihre Grenzen stoßen. Zu diesen sogenannten NoSQL-Datenbanken gehören auch Graphdatenbanken. Graphdatenbanken eignen sich insbesondere für stark vernetzte Daten und somit für Anwendungsfälle, in denen komplexe Beziehungen und Netzwerke analysiert, durchsucht und visualisiert werden müssen. Graphdatenbanken werden für Machine Learning Anwendungen bereits in verschiedenen Bereichen eingesetzt, z.B. in Empfehlungssystemen, zur Routenoptimierung, zur Betrugserkennung, zum Wissensmanagement, etc.. Aufgrund der hochgradigen Vernetzung der Simulationsdaten in der Fahrzeugentwicklung und der Finite-Elemente-Modelle bietet sich daher die Verwendung von Graphdatenbanken als optimale Datenbank-Technologie an.

Arbeitspaket 4: Fahrwerk

Die Verwendung vieler, alternativer Methoden des Machine Learnings zur Metamodellierung von Simulationsmodellen ist heute Stand der aktuellen Forschung, auf dem im Projekt aufgebaut werden soll. Methoden der automatischen Hyperparameteroptimierung zur Umsetzung eines Automated Machine Learning Ansatzes werden heute in der Automobilindustrie zur reinen Optimierung der Algorithmenparameter eingesetzt, nicht jedoch zur online-Auswahl des jeweiligen Metamodells wie bei der kombinierten Algorithmenselektion und Hyperparameteroptimierung. Zur automatischen Auswahl des Machine Learning Modells, auch während der Optimierung, gibt es erste Ansätze, die allerdings noch nicht für die rechenzeitintensiven Anwendungen in der Automobilentwicklung erweitert worden sind. Das gilt ebenfalls für neue Ansätze, in denen neben der Zielfunktion auch Restriktionen während der Optimierung gelernt werden.

Arbeitspaket 5: Exterieur

Trotz zahlreicher Optimierungsansätze und -routinen zur Unterstützung der Ingenieur*innen beim Entwicklungsprozess hinsichtlich der Wahl der Modifikation bzw. von Designparametern, sind Designmodelle für das Fahrzeug-Exterieur im hohen Maß abhängig von den Fähigkeiten und Erfahrungen der Entwickler*innen. Die Entwicklung von Designmodellen ist daher sehr zeitintensiv, aufwendig und wenig effizient.

Durch die Entwicklung von KI-Modellen, die aus der großen Menge vorhandener Simulations- und Konstruktionsdaten menschliche Entscheidungsfindungen erlernen, um gezielt Maßnahmen vorzuschlagen, könnten komplexe Auslegungsaufgaben in datenbasierte und automatisierbare Entscheidungsprozesse überführt werden. Dieser Ansatz würde den Zeitaufwand für die Entscheidungsfindung senken und somit deutlich Berechnungsumfänge, Kosten und Entwicklungszeiten reduzieren.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder Firmen außerhalb des Verbundprojektes

Über die Laufzeit des Förderprojektes newAIDE wurden folgende Drittfirmen beauftragt:

KB Informationssysteme GmbH
Dohlenweg 21
85591 Vaterstetten

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

6. Erzielte Ergebnisse

AP1 – Datenbanken und Strukturen und AP5 – Exterieur

Beteiligte Partner:

- Hexagon
- BMW AG

Da sich die Arbeitsinhalte von AP1 und AP5 inhaltlich stark überschneiden bzw. ergänzen und von den gleichen Hexagon-Mitarbeiter*innen bearbeitet wurden, werden die in diesen Arbeitspaketen erzielten Ergebnisse zur besseren Übersicht und Verständnis zusammengefasst dargestellt und erläutert.

In der virtuellen Auslegung und der Absicherung kommt bei BMW das SDM-System (SDM = Simulationsdaten- und –Prozess-Management) SimManager von der Hexagon Manufacturing Intelligence GmbH mit geeigneten BMW-spezifischen OEM-Custom-Komponenten zum Einsatz. Für FEM und CFD wird das Gesamtsystem als "CAE-Bench 2" oder einfach "CAE-Bench" bezeichnet. Das SDM-System für Mehrkörpersimulationen wird als MKS-Bench bezeichnet. Beide SDM-Systeme sind seit mehreren Jahren bei BMW im produktiven Einsatz. Daher existieren in CAE-Bench und MKS-Bench große Mengen von Simulationsdaten, die als Datenbasis für die Arbeitspakete verwendet wurden.

Das Ziel der von Hexagon bearbeiteten Arbeitsinhalte war, die vorhandene große Menge von Simulations- und Konstruktionsdaten in den SDM-Systemen für KI-Anwendungen nutzbar und zugänglich zu machen. Der Fokus lag dabei auf CAE-Bench aufgrund der Bestrebungen, die beiden Systeme zusammenzuführen. Dieses Ziel wurde erreicht durch die Entwicklung des Datenwrangling-Tools Bench2GO und der Entwicklung einer einheitlichen Datenstruktur für transformierte Simulationsdaten inklusive entsprechender Transformationsprozesse. Als geeignete Datenbank-Technologie für die Speicherung transformierter Simulationsdaten, zum Feature-Engineering und zum Data-Mining wurden Graphdatenbanken anhand der AP5 Usecases eingehend evaluiert, wodurch der enorme Nutzen einer Graphdatenbank in ML-Pipelines herausgearbeitet werden konnte. Des Weiteren wurden verschiedene Konzepte zur Integration des SDM-Systems in ML-Pipelines entwickelt.

Somit wurde die grundlegende Infrastruktur geschaffen für einen breiteren KI-Einsatz in der Fahrzeugentwicklung.

Das Datenwrangling-Tool Bench2GO

Das webbasierte Datenwrangling-Tool Bench2GO ermöglicht die Extraktion und Verarbeitung großer Datenmengen aus CAE-Bench und somit deren Nutzung für Data-

Mining-, Data-Analytics- und Machine-Learning-Methoden. Damit stellt Bench2GO ein entscheidendes Werkzeug für Data Science-Anwendungen im Bereich der virtuellen Fahrzeugentwicklung dar.

Funktionalität

- Daten-Extraktion
 - schnelle und einfache Extraktion großer Datenmengen
 - kein tiefgreifendes Wissen über die Datenstruktur erforderlich
 - intuitive grafische Methode zur Erstellung von Datenabfragen
- Werkzeuge zur Datenanalyse
 - Visualisierung der extrahierten Daten in Scatter Plots
 - statistische Auswertungsmethoden
- Automatisierung von Daten-Wrangling-Aufgaben
 - einfache Definition von Prozessketten zur Daten-Verarbeitung
 - einfache Skriptanbindung
- Reproduzierbarkeit und Zusammenarbeit
 - Speicherung von Abfragen und Prozessketten in Projektdateien
- Schnittstellen zu Datenstrukturen und Tools
 - Cloud Data Hub (CDH)
 - VDCNext
- offene Architektur
 - einfache Anbindung weiterer Datenquellen
 - einfache Integration von Schnittstellen zu Datenstrukturen, Datenbanken, Datenanalyse-Tools, etc.

Eigenschaften

- graphisches, intuitives User-Interface zur Datengenerierung und der Erstellung wiederholbarer automatisierter Datenpipeline-Prozesse
- effiziente Formulierung von Datenabfragen ohne umfassende Kenntnisse des Datenmodells
- Ausführung von Queries und Downloads erfolgt kontrolliert und sequenziell für eine möglichst niedrige Infrastruktur-Last
- integrierte Prüffunktionen für das Testen und Samplen von Anfragen vor der Durchführung umfangreicher Abfragen
- keine Einschränkungen beim Fernzugriff durch die serverseitige Ausführung von Prozessketten ohne Datentransfer über den Browser

Architektur

In Abbildung 3 ist die Architektur und die Schnittstellen von Bench2GO schematisch dargestellt.

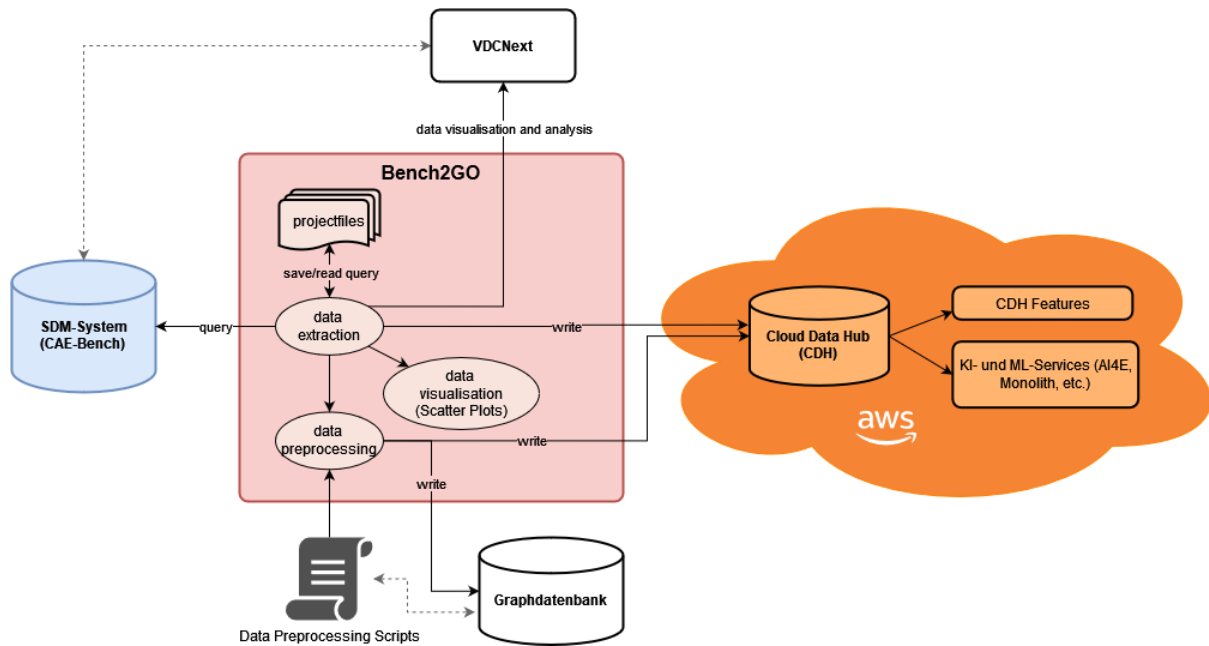


Abbildung 3: Architektur und Schnittstellen von Bench2GO

Entwickeltes Datenmodell für transformierte FE-Simulationsdaten

Um die im SDM-System CAE-Bench 2 gespeicherten Simulationsdaten für die Entwicklung von KI-Anwendungen verwenden zu können, müssen sie vorher aufbereitet werden und in einer geeigneten Datenstruktur zugänglich gemacht werden. Bei der Datenaufbereitung werden die Rohdaten überprüft, bereinigt, strukturiert und angereichert. Der Prozess der Umwandlung von Rohdaten in ein nutzbares Format wird als Datentransformation bezeichnet. Neben der Datenstruktur ist auch die Wahl des Daten-Repositorys für die Speicherung der transformierten Daten entscheidend für die Effizienz des Feature-Engineerings und Data-Minings.

Ziele der Datentransformation

- Verbesserung der Daten-Qualität durch die Beseitigung von Fehlern und Inkonsistenzen
- Gewährleistung der Daten-Konsistenz durch Transformation in ein einheitliches Format
- Verbesserung der Daten-Zugänglichkeit durch die Bereitstellung in einer geeigneten Datenbank und Datenstruktur
- Verbesserung der Nutzbarkeit der Daten, durch die Bereitstellung in einer leicht verständlichen und nutzbaren Datenstruktur

Analyse der CAE-Bench Datenstruktur

Zur Ermittlung der Anforderungen an das Datenmodell wurde eine morphologische Analyse des CAE-Bench Datenschemas durchgeführt zusammen mit quantitativen und qualitativen Daten-Analysen und einer metrologischen Analyse der numerischen Datenräume in Simulationsdaten.

Das SDM-System CAE-Bench wird zur strukturierten Ablage von Design-Varianten und zur automatischen Durchführung von FE-Simulationen verwendet.

Die konventionelle Fahrzeugentwicklung mithilfe von FE-Simulationen basiert typischerweise auf einem initialen Basismodell, welches in Iterationsschleifen angepasst wird, um Verbesserungen oder relevante Umstände mit zu berücksichtigen. Dabei werden immer wieder einige Varianten verworfen und auf einer ausgewählten neuen Basis weiterentwickelt. Abbildung 4 zeigt diesen Prozess schematisch auf.

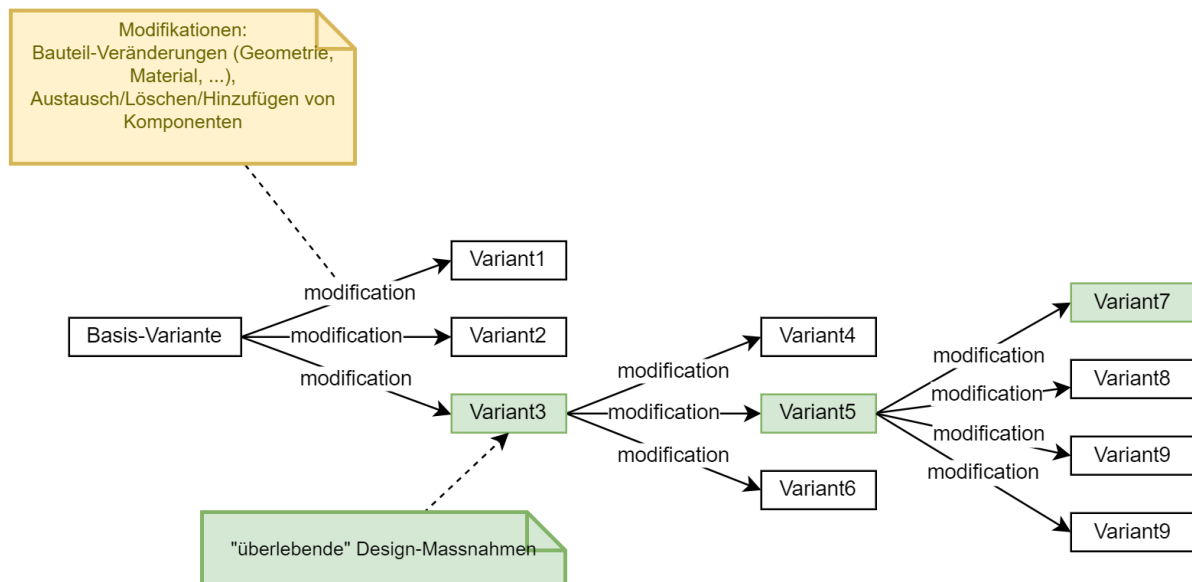


Abbildung 4: Variantenbaum-Schema

Zur Unterstützung dieses Prozesses werden in CAE-Bench alle von den jeweiligen Varianten verwendeten und erzeugten Simulationsdaten in einer relationalen Datenbank gespeichert: Submodell-Varianten, assemblierte Inputdecks, Ergebnisdateien des FE-Solvers und Postprocessing-Ergebnisse (Keyresults wie HIC-Werte, Kurven, Bilder, Movies, etc.). Die starke einheitlichen Strukturierung ermöglicht eine effiziente Simulationsautomatisierung (Assembly der Submodelle in ein Inputdeck, Solving des Inputdecks, Speicherung der Simulationsergebnisse, Durchführung von Postprocessing-Prozeduren) und eine effiziente Darstellung der genealogischen Struktur (Ableitungshistorie der Varianten).

Anforderungen an das Datenmodell

Da die benötigten Simulationsdaten über viele meist sehr große Dateien verteilt sind und deren Extraktion aufwendiges Parsing der komplexen Syntax von FE-Modellen erfordert, ergeben sich folgende Anforderungen an eine Datenstruktur für transformierte Simulationsdaten:

- **Datenzugänglichkeit:** Einfacher, gezielter Zugriff auf FE-Simulationsdaten:
 - Simulationseingabedaten: Geometrie, Materialdaten, Punktwolken, Randbedingungen, Kräfte, Lasten, Submodelle
 - Simulationsparameter: Parametersätze der berechneten Simulationen

- Simulationsergebnisse: Keyresults wie HIC-Werte und Beschleunigungskurven
- Metadaten der Simulation: Fahrzeugprojekt, Entwicklungsphase, Designvariante, Vorgänger-Variante, abgeleitete Varianten, Lastfall, Solver-Format
- Unterschiede zwischen Design-Varianten:
 - Komponenten des Fahrzeugmodells
 - Bauteil-Veränderungen (Geometrie, Material, etc.)
 - Simulationsergebnisse
- **Erweiterbarkeit:** einfache und schnelle Integration neuer Merkmale, die beim Feature-Engineering erzeugt werden, in das Datenmodell für deren flexible Abfrage und Zusammenstellung
- **Skalierbarkeit:** für den Umgang mit wachsenden Datenmengen und zunehmend komplexeren Abfragen
- **Performanz:** effiziente Speicherung und Abruf von Daten auch von großen Datensätzen

Logisches Datenmodell für transformierte FGS-Simulationsdaten

Basierend auf den ermittelten Anforderungen wurde ein allgemeines, generisches, konzeptionelles Datenmodell für transformierte FE-Simulationsdaten entwickelt und für die speziellen Anforderungen von AP5 logisch modelliert. Die Entwicklung beschäftigte sich dabei mit Fragen hinsichtlich geeigneter Datenformate zur Speicherung von großen Datenmengen, der Dimensionalität und Granularität von Daten sowie deren Generik bzw. Generalität.

AP5 verwendete als Datengrundlage die in CAE-Bench 2 vorhandenen Daten von Fußgängerschutz-Simulationen, die mit dem Abaqus-Solver berechnet wurden. Die Simulationseingabedaten einer Design-Variante bestehen aus einer Parameterdatei mit den Simulationsparametern (Aufprallkraft, -position, -geschwindigkeit), den Includedateien der Bauteil-Komponenten des Fahrzeugmodells und dem Inputdeck des FE-Solvers. Die Attribute der Variante beinhalten die Metadaten der Simulation (Fahrzeugprojekt, Bauphase, Name der Variante). Von den vorhandenen Simulationsergebnissen wurden nur der HIC-Wert und Beschleunigungskurven für das Modelltraining benötigt.

Zum gezielten Zugriff auf die jeweiligen Simulationsergebnisse eines Parametersatzes wurden die Parametersätze der Parameterdatei als eigene Entitäten modelliert und über die Relation "keyresults" direkt mit den einzelnen Ergebnissen der jeweiligen Simulation verknüpft.

Die Zugänglichkeit von Bauteil-Eigenschaften (Geometrie, Materialeigenschaften, Wandstärken) wurde durch die Modellierung von Entitäten für die benötigten Abaqus-Directiven ermöglicht.

In Abbildung 5 ist das logische Datenmodell als Entity-Relationship-Diagramm dargestellt.

Da sich FE-Solver nur hinsichtlich der Syntax zur Beschreibung der FE-Modelle unterscheiden, kann das Datenmodell sehr einfach für weitere Solver wie LS-Dyna oder Nastran angepasst und erweitert werden.

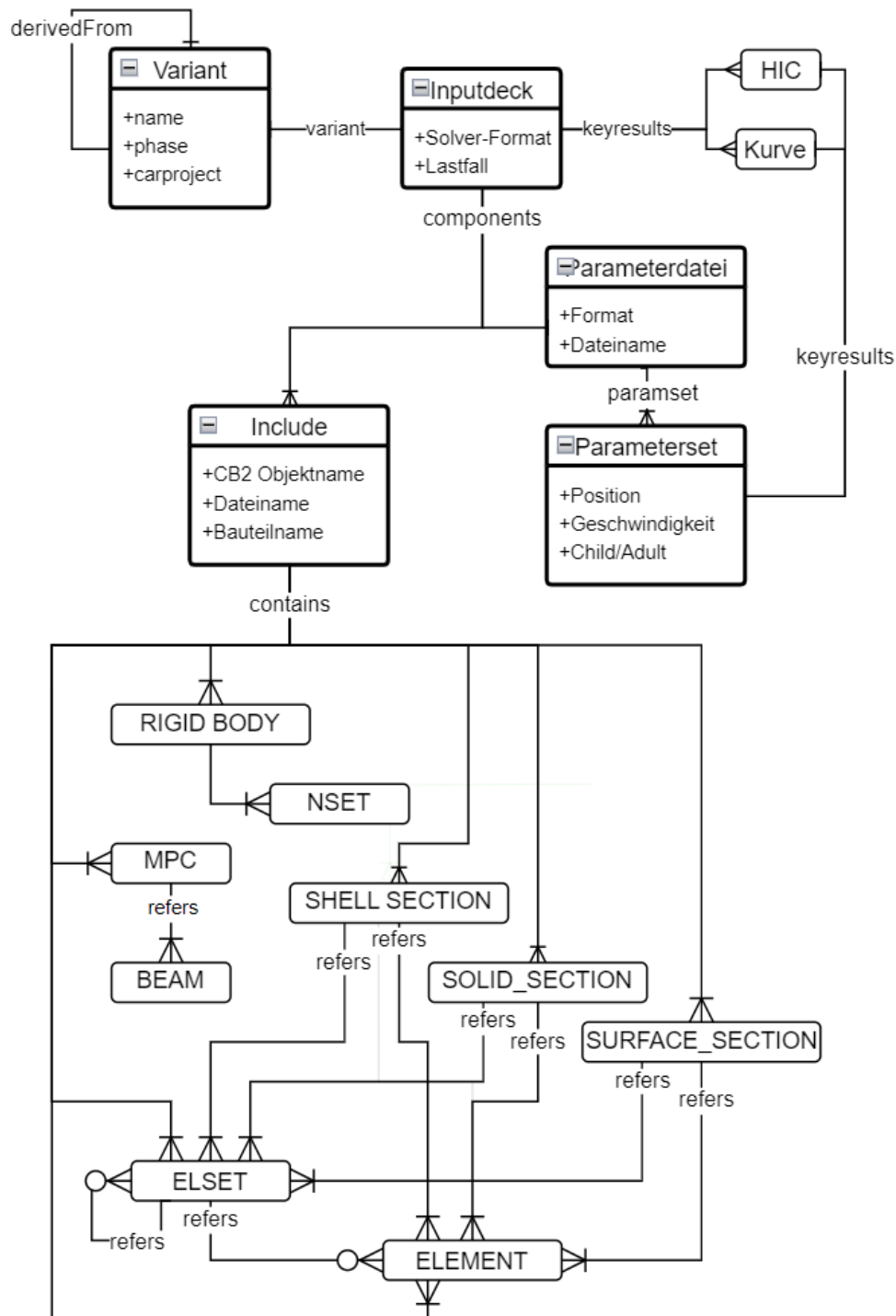


Abbildung 5: logisches Datenmodell für transformierte Fußgängerschutz-Simulationsdaten

Verwendung einer Graphdatenbank in der ML-Pipeline

Das entwickelte Datenmodell für transformierte Simulationsdaten wurde in einer Neo4j Graphdatenbank physikalisch umgesetzt. Anhand der AP5 Usecases konnte der enorme Nutzen der Verwendung von Graphdatenbanken als Datenbank-Technologie für transformierte Simulationsdaten, zum Feature-Engineering, Modelltraining und zur Orchestrierung von ML-Pipelines eingehend evaluiert und die Vorteile herausgearbeitet werden.

Eigenschaften von Graphdatenbanken

Graphdatenbanken sind eine spezielle Kategorie von NoSQL-Datenbanken, die auf der mathematischen Graphentheorie basieren und Graphen zur Organisation und Speicherung von Daten verwenden. Ein Graph besteht aus einer Menge von Knoten, die über Relationen (auch Kanten genannt) miteinander verbunden sind. Knoten beschreiben Objekte einer bestimmten Datenmenge und können mit einem oder mehreren Labels typisiert bzw. klassifiziert werden. Relationen beschreiben Beziehungen zwischen zwei Knoten. Knoten und Relationen können Eigenschaften haben.

Vorteile von Graphdatenbanken

- effiziente Verarbeitung von stark vernetzten Informationen
- schnelle Abfragen mit Graphalgorithmen
- direkte Integration in ML-Frameworks
- Flexibilität und Agilität bei der Modellierung
- intuitive Datenvisualisierung

Applikationsmodell für die Verwendung von Graphdatenbanken

Für die Verwendung von Graphdatenbanken in den ML-Pipelines der Arbeitspakete wurde ein allgemeines Applikationsmodell entwickelt und in AP5 mit einer Neo4j Graphdatenbank umgesetzt (s. Abbildung 6). Dadurch konnte das Applikationsmodell eingehend evaluiert werden, wobei viele Vorteile der Verwendung einer Graphdatenbank bei der Entwicklung und dem Einsatz von KI-Methoden für die virtuelle Fahrzeugauslegung ermittelt werden konnten.

Zusammenfassung des allgemeinen Applikationsmodells:

1. Transformation von Simulationsdaten in eine graph-basierte Datenstruktur:
 - a. Parsing von FEM-Direktiven der Submodelle
 - b. Berechnung von zusätzlichen Merkmalen
 - c. Transformation in eine Graph-Datenstruktur
 - d. Erweiterung der Graph-Datenstruktur um weitere Simulationsdaten (Variante, Inputdeck, Simulationsergebnisse, Simulationsparameter)
 - e. Import der Graph-Datenstruktur in eine Graphdatenbank
2. Vergleich von Varianten zur Datenanreicherung und Datenreduktion durch Bildung von Differenzgraphen

3. Feature-Engineering durch Datenanreicherung und Erweiterung des Datenschemas
4. Verwendung der Graphdatenbank als Wissensspeicher, um Informationen über Design-Varianten und ihre Beziehungen zu speichern und einfach, schnell und gezielt abzufragen
5. Anwendung von Graphalgorithmen:
 - a. zur effizienten, einfachen und schnellen Erzeugung von Trainingsdaten für das Modelltraining
 - b. zum Data-Mining durch Anwendung von Clustering-Algorithmen, Kürzeste-Wege-Algorithmen, ...
 - c. zur Generierung von Vorhersagen

In Abbildung 6 ist die Umsetzung des Applikationsmodells für AP5 mittels des Datenwrangling-Tools Bench2GO dargestellt.

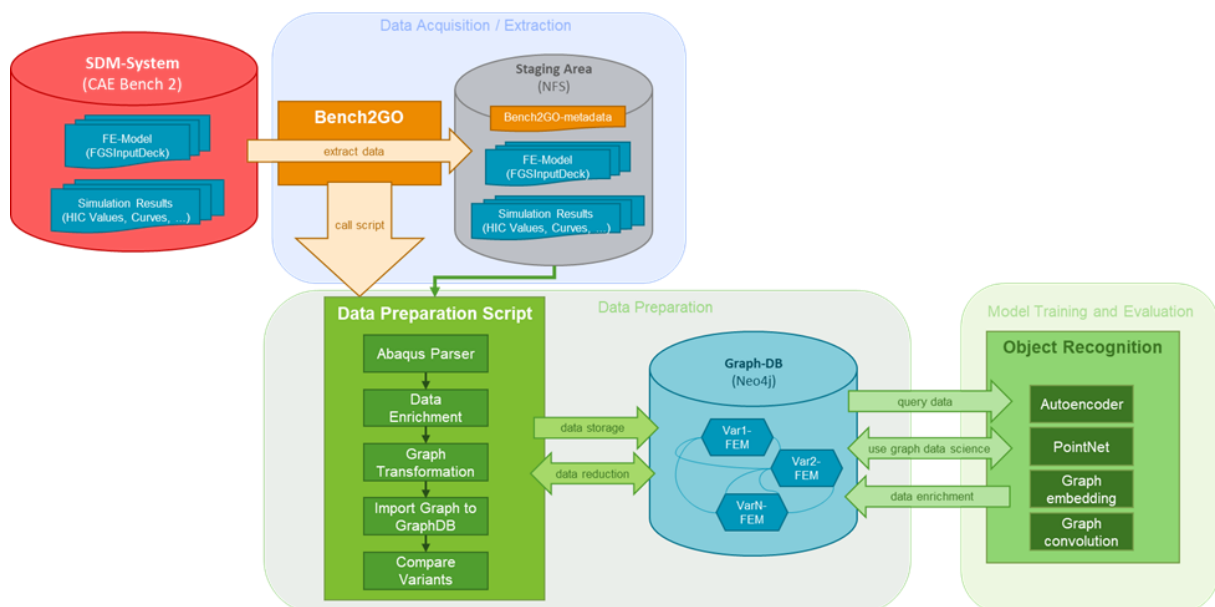


Abbildung 6: Verwendung einer Graphdatenbank in der AP5 ML-Pipeline

Vorteile der Verwendung einer Graphdatenbank

Zusammenfassung der ermittelten Vorteile der Verwendung einer Graphdatenbank bei der Entwicklung und dem Einsatz von KI-Methoden für die virtuelle Fahrzeugauslegung:

- Graph-Datenschema ist intuitiv, leicht zugänglich und einfach erweiterbar
- Korrelation der Modifikationen in den Fahrzeugmodellen (Austausch, Löschen, Hinzufügen von Komponenten, Änderungen in der Geometrie, Materialeigenschaften und Wandstärken) mit funktionalen Ergebnissen (Simulationsergebnisse wie HIC, Beschleunigungskurven, etc.) ermöglicht den Vergleich von FE-Modellen, Klassifizierung von CAD-Änderungen und Klassifikation von Design-Maßnahmen

- Standardisierte, performante Abfrage der
 - FEM-Modell-Informationen
 - Bauteil-Komponenten
 - Bauteil-Eigenschaften: Geometrie (Punktwolken), Material, Wandstärken
 - Randbedingungen
 - Simulationsparameter (Aufprallkraft, -position, -geschwindigkeit)
 - Unterschiede zwischen Design-Varianten
- einfache Formulierung komplexer Abfragen und i.a. schnelle Lieferung von Ergebnissen
- strukturierte Ablage erlaubt gezielten Zugriff auf singuläre wie auch multiple bzw. gruppierte Informationen
- einfaches Abfragen und Darstellen von Beziehungen zwischen Varianten
- gute Eignung für laufende Entwicklungsprozesse und wachsende Spezifikationen, durch einfaches Hinzufügen weiterer Informationen und Metadaten (z.B. Ergebnisse von ML-Prozessen) ohne Änderung des Datenbank-Schemas
- vollständiges Ausführen diverser Operationen innerhalb der Datenbank (Zählen, Gruppieren, Vergleichen, ...)
- Verfügbarkeit einer großen, ständig wachsenden Vielzahl von Graphalgorithmen für Maschine Learning und Datenanalysen
- Verfügbarkeit von Graphdatenbanken in den ML-Plattformen aller Hyperscaler (AWS, Google, Azure) und dadurch Erstellung nahtloser End-to-End-Workflows von Datenaufbereitung über Feature Engineering bis Modelltraining und Vorhersage

Implementierter Datentransformationsprozess für Simulationsdaten

Zur physikalischen Umsetzung des entwickelten Datenmodells für Fußgängerschutz-Simulationen in einer Graphdatenbank wurde ein Transformationsprozess implementiert. Dabei wurde der anfangs implementierte Prozess durch eine Modularisierung der Transformationsskripte optimiert, die sich am Datenschema und Workflow von CAE-Bench orientiert.

Zur Implementierung des Datentransformationsprozess wurden folgende Transformationsmodule implementiert:

- Transformation von FE-Submodellen (Include-Dateien) im Abaqus-Format
- Transformation von Parameterdateien
- Transformation von Varianten

- Transformation von Keyresults

Diese Modularisierung ermöglichte die Zusammenstellung von Skripten für verschiedene Anwendungen:

1. Batch-Transformation mit Bench2GO:
 - a. Extraktion beliebig vieler Design-Varianten aus CAE-Bench
 - b. Transformation aller extrahierten Design-Varianten entsprechend dem entwickeltem logischen Datenmodell in eine Graph-Struktur mit dem Batch-Transformationsskript
 - c. Import der Graph-Strukturen in die Graphdatenbank via Integration in das Batch-Transformationsskript oder manuellem Anstoß
2. Kontinuierliche Transformation neuer Design-Varianten in CAE-Bench:
 - a. automatische Transformation einer neuen Design-Variante mit Vorliegen aller erforderlichen Simulationsdaten durch Definition geeigneter Prozesse in CAE-Bench
3. Kontinuierliche Transformation neuer FE-Submodelle in CAE-Bench:
 - a. automatische Transformation beim Import neuer FE-Submodelle durch Definition geeigneter Prozesse in CAE-Bench möglich
 - b. dadurch Optimierung der Aktualisierung der Graphdatenbank mit neuen Fahrzeugmodellen (zeitaufwendigster Schritt des Parsens neuer Design-Varianten entfällt)

Je nach Verfügbarkeit einer Graphdatenbank, kann der Import der transformierten Simulationsdaten bereits in die Anwendungen integriert werden.

In den Transformationsmodulen wurden Schnittstellen zum Export der Graph-Strukturen in verschiedene Dateiformate implementiert. Die exportierten Graph-Strukturen können für einen manuellen oder Cronjob-gesteuerten Import in die Graphdatenbank verwendet werden. Somit können auch nicht hochverfügbare Graphdatenbanken zur Datentransformation verwendet werden.

Teilweise werden die Knoten mit mehreren Labels versehen, dem entsprechenden CAE-Bench-Objektyp und einem abstrakten Label. Somit können CAE-Bench-Datenabfragen einfacher in Graph-Abfragen übersetzt werden und das Graph-Datenschema ist leichter verständlich für User mit Kenntnissen des CAE-Bench Datenschemas, was die Einarbeitung in die Benutzung der Graphdatenbank (zur Generierung von Trainingdaten, Data-Mining mittels Graphalgorithmen, etc.) vereinfacht und beschleunigt.

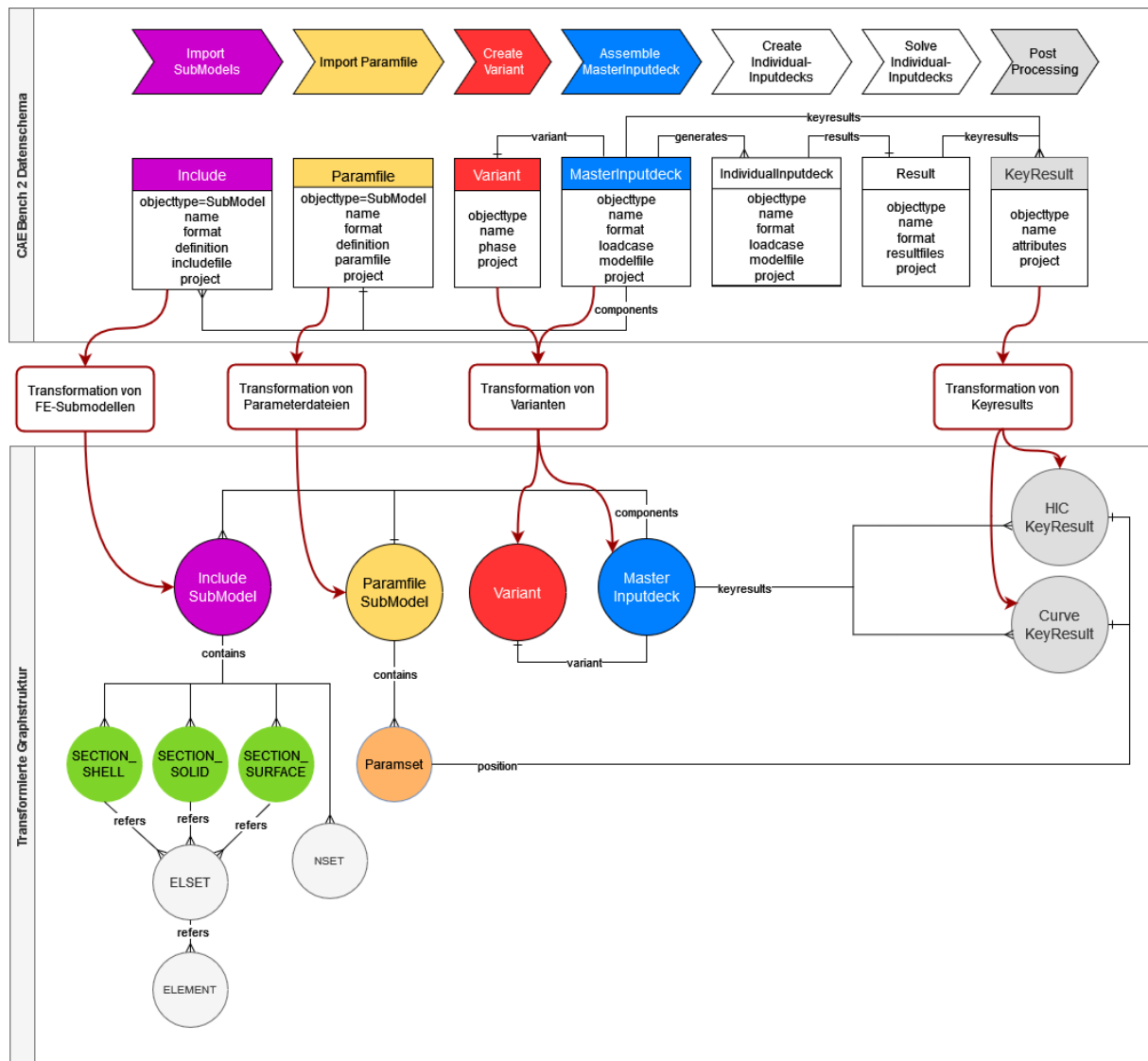


Abbildung 7: Darstellung des Transformationsprozesses

Transformation von Submodellen (Includes) im Abaqus-Format

FE-Submodelle werden in CAE-Bench in Objekten vom Typ SubModel gespeichert. Die FE-Struktur der im SubModel gespeicherten Include-Datei wird geparkt, in eine Graphstruktur transformiert und in die Graphdatenbank importiert. Bei der Transformation werden aus den FE-Modelldaten zusätzliche Merkmale für Schalen-Querschnitte (SHELL SECTION), Volumenelemente (SOLID SECTION), Oberflächen (SURFACE SECTION), starre Körper (RIGID BODY), Balken (BEAM) berechnet und in den Knoten als Properties gespeichert:

- Knoten-Anzahl
- Punktwolke
- MD5-Checksum
- Bounding Box
- Trägheitstensor

Diese Merkmale werden für den Variantenvergleich und die Ableitung von Maßnahmen verwendet.

Zur Reduktion des Speicherbedarfs werden die im Submodell definierten FE-Knoten nicht durch eigene Knoten modelliert. Stattdessen wird in den Knoten, die Schalenelemente (SHELL SECTION), Volumenelemente (SOLID SECTION) und Oberflächenelemente (SURFACE SECTION) repräsentieren, die repräsentative Punktwolke (= Array der Koordinaten aller referenzierten finiten Elemente) und das verwendete Material als Knoten-Eigenschaften gespeichert. Somit wird ein direkter und schneller Zugriff auf die für das Modelltraining von AP5 (Autoencoder) benötigten Punktwolken ermöglicht.

Beispiel:

Cypher-Query zur Abfrage der Punktwolke aller in einer Graphdatenbank gespeicherten Schalenelemente:

```
MATCH (n:SECTION_SHELL) RETURN n.POINTCLOUD as Punktwolke
```

Zur weiteren Verwendung kann die zurückgelieferte Punktwolke bei Bedarf in ein Numpy-Array umgewandelt werden:

```
np.array(eval(Punktwolke), dtype=float)
```

Transformation von Parameterdateien und Simulationsergebnissen

Für Fußgängerschutz-Simulationen werden Parameterdateien mit den Parametersätzen (Aufprallposition, Geschwindigkeiten, etc.) der zu berechnenden Einzelsimulationen (IndividualInputDecks) verwendet, die in CAE-Bench ebenfalls in Objekten vom Typ SubModel gespeichert sind.

Damit schnell und direkt auf die relevanten Simulationsergebnisse (z.B. HIC-Wert und Beschleunigungskurven) zugegriffen werden kann, werden die Parametersätze direkt mit den jeweiligen Simulationsergebnissen verknüpft.

Transformation einer Design-Variante

Zur Simulationsautomatisierung von Fußgängerschutz-Simulationen wird in CAE-Bench zunächst ein parametrisiertes Inputdeck aus den Bauteil-Submodellen (Includes) assembliert und in Objekten vom Typ MasterInputDeck gespeichert. Für jeden Parametersatz wird anschließend ein lauffähiges Inputdeck für die FE-Simulation mit dem Abaqus FE-Solver erstellt und als Objekt vom Typ IndividualInputDecks gespeichert. Die jeweiligen Ergebnisdaten jeder Einzel-Simulation werden in einem Result-Objekt gespeichert. Aus den Solver-Ergebnisdaten werden anschließend im Postprocessing Schritt geeignete Keyresults extrahiert und in CAE-Bench gespeichert. Über die IndividualInputDecks kann auf die jeweiligen Solver-Ergebnisdaten und Keyresults zugegriffen werden.

Da die Solver-Ergebnisdaten nur für das Postprocessing benötigt werden, werden in der Regel die Solver-Ergebnisdaten nach einiger Zeit automatisch von CAE-Bench

gelöscht, um Speicherplatz zu reduzieren. Für die Feature-Vektoren für das Modell-training werden diese Informationen jedoch nicht benötigt, so dass im Datenmodell keine Result-Objekte modelliert wurden. Indem im Datenmodell die Parametersätze als Entitäten modelliert wurden, die direkt mit den jeweiligen Keyresults verbunden werden, kann auch auf die Abbildung der IndividualInputDecks verzichtet werden.

Vergleich von Varianten zur Datenanreicherung und Datenreduktion durch die Bildung von Differenzgraphen

Zur Datenanreicherung und Datenreduktion durch die Bildung von Differenzgraphen wurde folgender Varianten-Vergleich mittels eines Graph-Algorithmus implementiert:

1. Komponenten-Vergleich: Datenanreicherung durch Vernetzung gemeinsamer Submodelle und Parameterdateien:
 - a. Da sich abgeleitete Design-Varianten nur in wenigen Submodellen unterscheiden, werden bei der Transformation einer neuen Design-Variante nur diejenigen Submodelle geparkt, transformiert und in die Graphdatenbank importiert, die es noch nicht in der Graphdatenbank gibt. Bereits existierende Submodelle werden nur mit der Relation „components“ mit dem MasterInputdeck-Knoten verbunden.
 - b. Analog werden mehrfach verwendete Parameterdateien nur einmal modelliert und mit den entsprechenden MasterInputdecks verbunden.
2. Submodell-Vergleich:
 - a. Datenanreicherung und Datenreduktion durch Ersetzung identischer Bauteil-Komponenten (Schalen-Querschnitte, Oberflächen, Volumenelemente, etc.) durch Vernetzung: Die Identität wird durch identische Werte der MD5-Property festgestellt.
 - b. Datenanreicherung durch Modifikationsknoten:
 - i. Bei geometrisch identischen Bauteil-Komponenten: Unterschiede (bzgl. Material, Wandstärke, etc.) werden in einem zusätzlichen Modifikations-Knoten gespeichert.
 - ii. Bei minimalen geometrischen Änderungen zwischen zwei (oder mehr) Bauteil-Komponenten werden diese als Änderungsvektoren bzw. gerichtete Punktwolken abgespeichert.
 - iii. Anhand der Modifikations-Knoten kann mit einer einfachen Cypher-Abfrage festgestellt werden, welche Änderungen es zwischen einzelnen Includes gibt.

Beispiele:

Abbildung 8: Differenzgraph von 3 MasterInputdecks (rosa) mit gemeinsamen Submodellen (gelb), Parameterdateien (blau) und den identischen Schalenelementen (hellgrün) in zwei verschiedenen Submodellen:

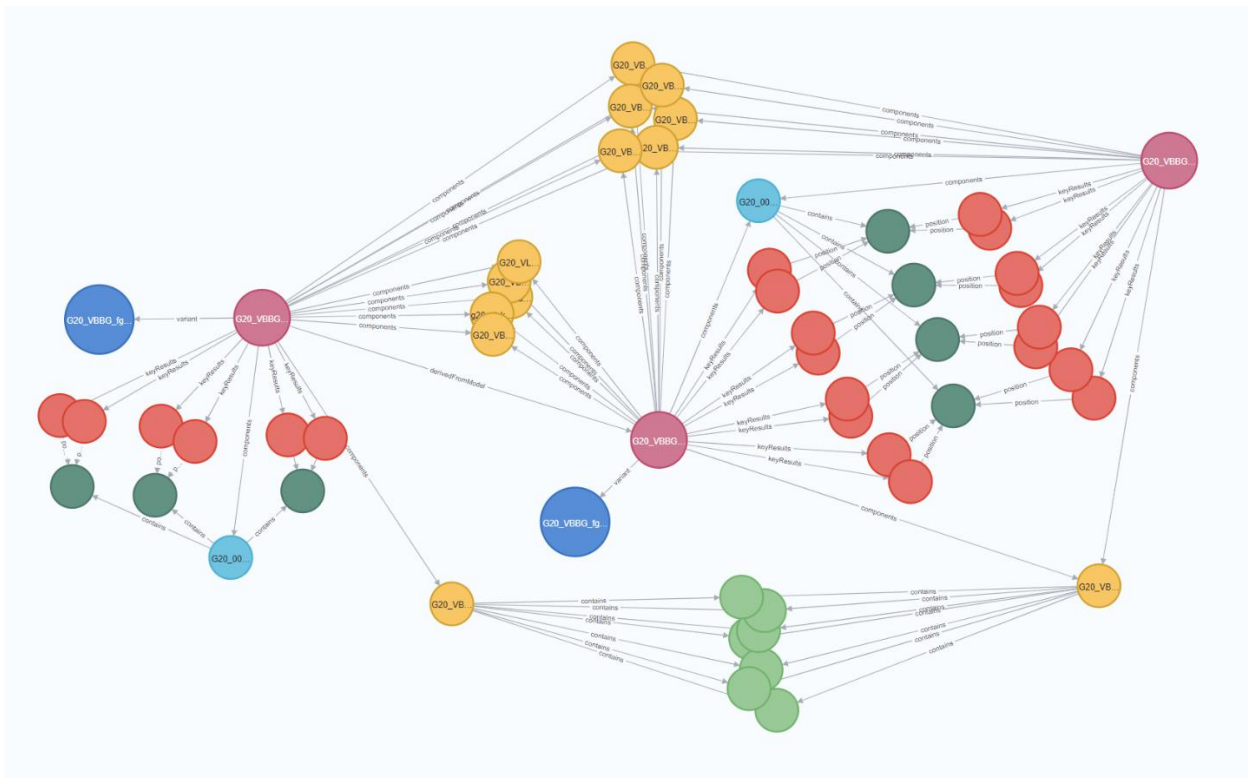


Abbildung 8: Differenzgraph bzgl. Komponenten und gemeinsamer Geometrie

Abbildung 9: Teilweise expandierter Graph mit drei verknüpften Varianten nach dem Variantenvergleich: Die Unterschiede zwischen ähnlichen geometrischen Schalenelementen (blau) werden durch Modifikationsknoten (grün) abgebildet und mittels geeigneter Relations-Properties (z.B. Material und Wandstärken) quantifiziert.

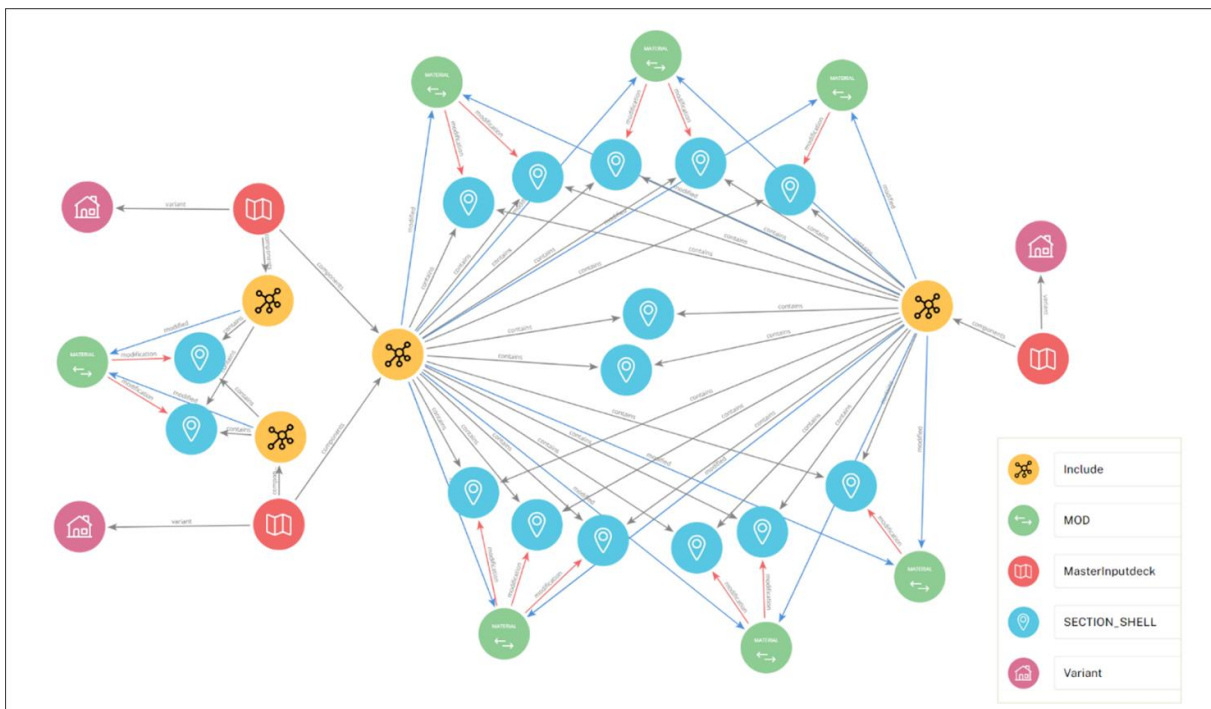


Abbildung 9: Modifikationsknoten zur Modellierung von ähnlichen Bauteil-Komponenten

Datenanreicherung mit Ergebnissen von ML-Methoden

Im Folgenden sind einige Beispiele der Datenanreicherung durch die in AP5 entwickelten ML-Methoden aufgeführt:

- latenter Vektor als Property in den entsprechenden Bauteil-Elementen (z.B. SECTION_SHELL)
- Ergebnisse der Objekterkennung durch Hinzufügen eines zusätzlichen Labels der Objektbezeichnung (z.B. Schließbügel, Schloss, Scharnier) in den entsprechenden Knoten
- Relationen zur Beschreibung von Merkmalsänderungen, z.B. feature_change mit dem Änderungsvektor als Property

Integration des SDM-Systems in die ML-Pipeline

Zur Implementierung einer durchgängigen KI-Pipeline bietet das SDM-System CAE-Bench 2 vielfältige Schnittstellen und Integrationsmöglichkeiten, die in einer Übersicht zusammengefasst wurden und dem Konsortium präsentiert und zur Verfügung gestellt wurde. Damit wurden die Arbeitspakete hinreichend befähigt, Konzepte für die Integration des SDM-Systems in ihre KI-Pipeline zu entwerfen, und eine Umsetzung bei den entsprechenden BMW-Abteilungen zu beauftragen.

Automatisierung der Datenvorbereitung

Um neue Simulationsdaten in CAE-Bench automatisch zu transformieren und für ein kontinuierliche Modelltraining zu verwenden, können die gleichen Skripte verwendet werden, die in Bench2GO zum Aufbau von Prozessketten integriert wurden. Dabei bietet es sich an, die Datentransformationsskripte in die entsprechenden von CAE-Bench verwendeten Automatisierungsskripte zu integrieren.

Am Beispiel von AP5 wurde dargestellt, wie die Data Enrichment Funktionalität von CAE-Bench zur automatischen Transformation neuer Submodelle und Speicherung in einer Graphdatenbank verwendet werden kann. Die Data Enrichment Funktionalität von CAE-Bench erlaubt die Definition von Aktionen für beliebige Objekttypen, die automatisch ausgeführt werden, sobald ein Objekt dieses Typs importiert wird.

Bei der Integration von Datentransformationsskripten müssen jedoch die spezifischen infrastrukturellen und betrieblichen Randbedingungen berücksichtigt werden. Insbesondere darf es nicht zu Performance-Einbußen kommen, die durch eine längere Ausführungsdauer der Automatisierungsskripte hervorgerufen wird. In dieser Hinsicht wurde exemplarisch für den Anwendungsfall von AP5 ein Konzept entwickelt, wie das bereits in CAE-Bench konfigurierte Data Enrichment von Submodellen ohne große Performance-Verluste mit einer Datentransformationsfunktionalität erweitert werden kann. Aufgrund dadurch notwendiger infrastruktureller Anpassungen einiger SDM-Komponenten, konnte das Konzept im Rahmen des newAIDE Projekts nicht umgesetzt werden. Es kann jedoch für die Beauftragung einer Umsetzung bei den entsprechenden BMW-Abteilungen verwendet werden.

Integration von KI-Tools

Zur Integration von KI-Tools können in CAE-Bench dedizierte Aktionen implementiert werden. Alternativ können eigene Clients mittels der REST-API implementiert werden, die auf den Datenbestand zugreifen und bei Bedarf die Daten um bestimmte Ergebnisse der Modell-Auswertung erweitern. Wegen der unterschiedlichen Anforderungen der Arbeitspakete konnte dafür kein einheitliches Konzept erstellt und nur die verschiedenen Möglichkeiten aufgezeigt werden.

Integration einer Graphdatenbank

Zum Aufbau einer ML-Pipeline mit einer Graphdatenbank wie in AP5, muss die verwendete Graphdatenbank bestimmten Anforderungen bzgl. Skalierbarkeit, Sicherheit und Performance genügen. In dieser Hinsicht ist eine cloudbasierte, gemanagte Neo4j Graphdatenbank geeignet. Um die in der Graphdatenbank gespeicherten Daten vor unberechtigtem Zugriff zu schützen, wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, wie das komplexe Datenzugriffsmodell von CAE-Bench in Neo4j abgebildet werden kann.

Zur produktiven Anbindung einer Neo4j Graphdatenbank an CAE-Bench, wird ein Zugriffsmanagement in Neo4j benötigt, das weitgehend dem von CAE-Bench entspricht. In CAE-Bench werden Daten in Projekten organisiert und Zugriffsrechte projektbezogen erteilt. Für jedes Fahrzeugprojekt gibt es Projekte für Simulationsdaten und Submodelle. Submodelle werden in der Regel in mehreren Fahrzeugprojekten verwendet.

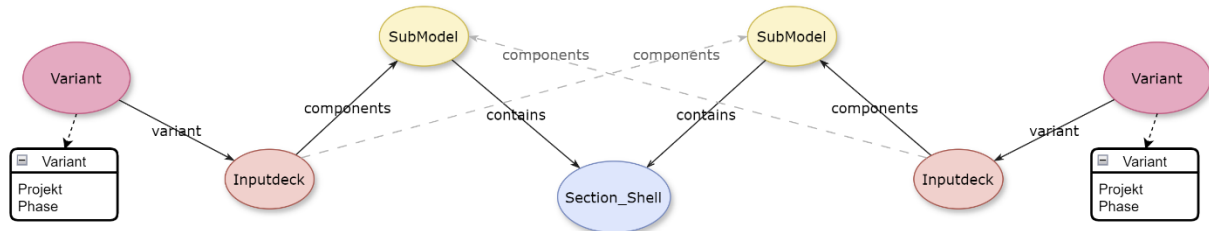


Abbildung 10: Graphstruktur mit Blick auf das Fahrzeugprojekt

Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, ist die Information über Fahrzeugprojekt und Bauphase in den Knoten mit dem Label 'Variant' gespeichert. Um nun ausgehend von einem Part (z.B. Section Shell oder Submodell) herauszufinden, zu welchem Projekt und Phase der Knoten gehört, muss der komplette Weg bis hin zur Variante abgefragt werden. Das kann die Performance massiv verschlechtern.

So sieht eine Cypher-Abfrage aus, um von einer bestimmten Section Shell das Fahrzeugprojekt und die Bauphase herauszufinden:

```
MATCH (:SECTION_SHELL {ObjectID: 'XXXXX'})<-[:contains]-(:Include)
<-[:components]-(:MasterInputdeck)-[:variant]->(v:Variant)
RETURN v.Project, v.Phase
```

Je nach Usecase bieten sich nun verschiedene Möglichkeiten an, die Zugriffsverwaltung zu implementieren.

Zugriffsmanagement bleibt in CAE-Bench

Bei dieser Möglichkeit interagiert der User nur über das CAE-Bench UI mit der Graphdatenbank, z.B. um generell Ähnlichkeiten oder bei ähnlichen Fahrzeugen und Problemen angewandte Lösung abzufragen. Bei dieser Option gibt es keine Zugriffsbeschränkungen innerhalb der Graphdatenbank. Der User hat auch keinen direkten Zugriff auf die Datenbank. Eine Aktion zur Abfrage der GraphDB wird aus CAE-Bench heraus gestartet und die Abfrage dann in der GraphDB durchgeführt. Dabei wird dann nicht das direkte Ergebnis mit fahrzeugbezogenen Daten zurückgeliefert, sondern nur ein "Zeiger" auf das Fahrzeug oder Objekt in CAE-Bench, z.B. die ObjectID, die in CAE-Bench ein Objekt eindeutig identifiziert. Mit dieser ObjectID kann CAE-Bench die Datenabfrage durchführen und liefert dabei dann natürlich nur diejenigen Daten zurück, für die der User auch die nötigen Berechtigungen besitzt. Somit ist für diesen Usecase in der GraphDB keine separate Rechteverwaltung notwendig. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass es zu jedem Knoten in der Graphdatenbank auch ein entsprechendes Objekt in CAE-Bench geben muss und dessen ObjectID in der Graphdatenbank gespeichert werden muss. Außerdem sind die Nutzungsmöglichkeiten der Graphdatenbank dadurch limitiert.

Einführung einer Rechteverwaltung in der Graphdatenbank

Die Einführung eines Zugriffsmanagement in der Graphdatenbank ist automatisch mit mehr Aufwand verbunden - sowohl bei der Einführung als auch bei der Wartung. Allerdings ergeben sich dadurch mehr Nutzungsmöglichkeiten für eine Vielfalt von Use-cases.

Die Zugriffsrechteverwaltung in Neo4j ist rollenbasiert (Role-based Access Control - RBAC). Es werden verschiedene Rollen mit spezifischen Privilegien (Rechten) angelegt. Diese Rollen werden dann Usern zugewiesen und ihnen somit auch die Privilegien der Rolle übertragen. Ein User kann auch mehrere Rollen zugewiesen haben. Prinzipiell können einem User Privilegien auch direkt erteilt werden. Das macht die Zugriffsverwaltung bei vielen Usern schnell unübersichtlich und aufwändig.

Für die Umsetzung des Rollen- und Rechtemanagements in der Graphdatenbank gibt es unterschiedliche Ansätze. Um die Zugriffsrechte weiterhin basierend auf dem Fahrzeugprojekt zu steuern und die langen Abfragen, wie zu Beginn des Abschnitts beschrieben, zu vermeiden, muss das Datenmodell erweitert werden.

Zugriffssteuerung über Properties

Bei dieser Methode werden die Berechtigungen für den Zugriff auf Knoten und Beziehungen in der Graphdatenbank durch Projekt-Properties in den Knoten definiert. Dies ermöglicht eine feingranulare Kontrolle basierend auf spezifischen Attributen der Knoten.

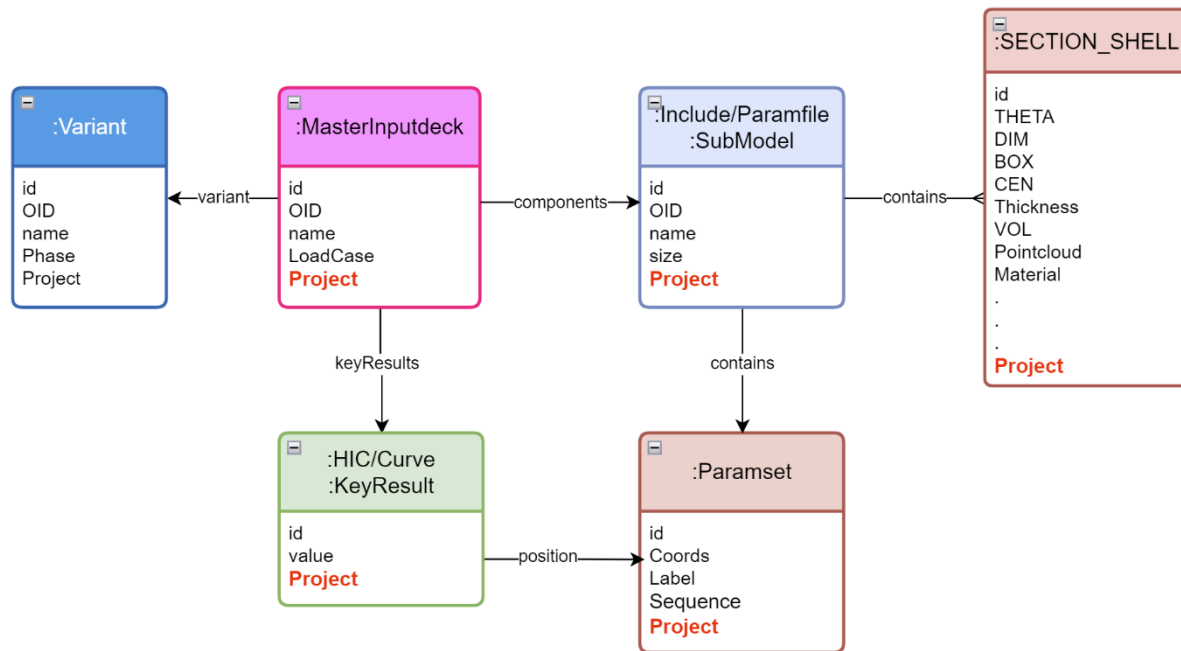


Abbildung 11: Erweiterung des Datenmodells um Projekt-Properties in jedem Knoten

Für diese Zugriffssteuerung muss in jedem Knoten eine Projekt-Property hinzugefügt werden (Abbildung 11). Wenn ein Knoten zu mehreren Projekten gehört, werden diese als Liste in der Property gespeichert.

Mit dieser Möglichkeit lässt sich der Zugriff feingranular steuern und die Rechteverwaltung ist flexibel und skalierbar für verschiedene Projekte und Benutzergruppen. Allerdings werden dadurch auch die Abfragen für die Zugriffskontrolle komplexer und können länger dauern.

Zugriffssteuerung über Labels

Die zweite Möglichkeit verwendet nicht die Properties, sondern die Labels, um die Projektzugehörigkeit zu kennzeichnen und den Zugriff zu steuern. Das ist eine einfachere Methode zur Verwaltung von Berechtigungen, da die Labels direkt zur Definition des Zugriffs verwendet werden.

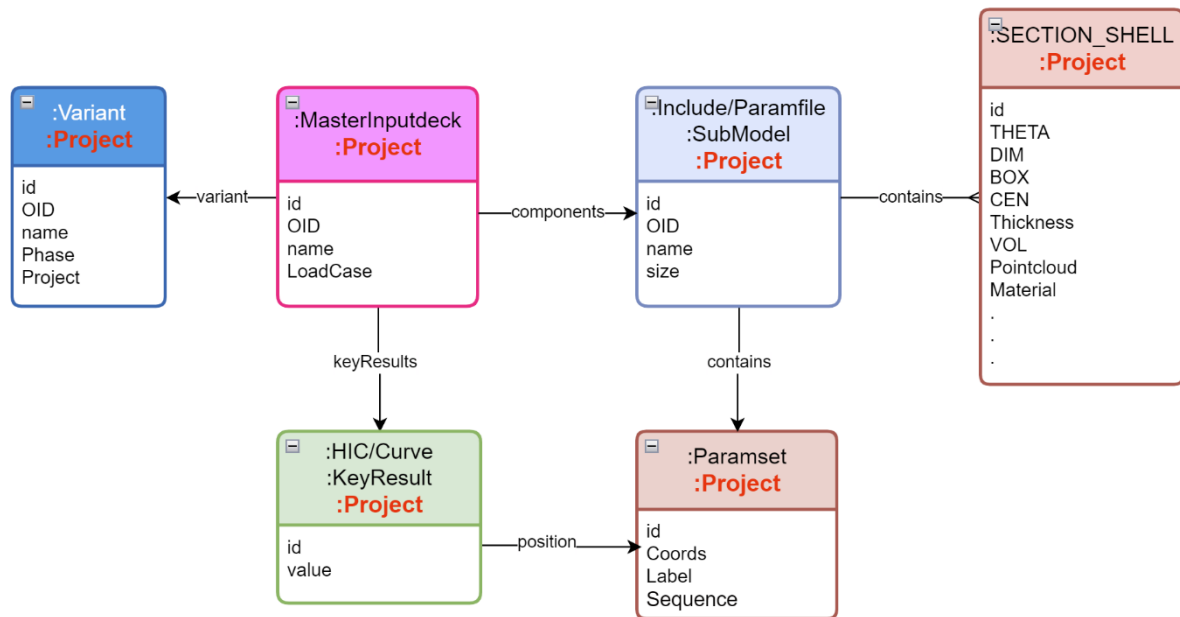


Abbildung 12: Erweiterung des Datenmodells um Projekt-Labels

In Abbildung 12 ist die Erweiterung des Datenmodells um Projekt-Labels bei jedem Knoten dargestellt. Da in einer Neo4j Graphdatenbank jeder Knoten auch mehrere Labels haben kann, die sich gegenseitig nicht beeinträchtigen, bietet es sich an, die Projektzugehörigkeit als Label an den Knoten zu speichern.

Gegenüber einer Speicherung in den Properties hat das den Vorteil einfacherer Abfragen. Außerdem erfolgt die Zugriffssteuerung mit den Projekt-Labels gut strukturiert und leicht nachvollziehbar. Ein Nachteil ist allerdings, dass diese Methode bei vielen Projekten auch sehr viele Labels produziert.

Benutzerdefinierte Prozeduren zur Zugriffskontrolle

Die dritte Möglichkeit ist die Implementierung von benutzerdefinierten Neo4j-Prozeduren, um den Zugriff basierend auf komplexeren Regeln und Beziehungen zu steuern. Benutzerdefinierte Prozeduren können in Java geschrieben und dann als Neo4j-Plugin installiert werden. Diese Lösung ermöglicht es, das Fahrzeugprojekt nur in den Variant-Knoten zu speichern und den Zugriff auf die verbundenen Knoten basierend auf diesen Properties zu kontrollieren. Die Prozedur muss dann bei jeder Cypher-Query vorher die Zugriffsrechte abfragen. Das sieht zum Beispiel so aus:

```
CALL com.example.hasAccess('username', 'projectA') YIELD hasAccess
WITH hasAccess
WHERE hasAccess = true
MATCH .....
```

Der Vorteil der Verwendung einer eigenen Prozedur ist eine sehr flexible Zugriffskontrolle, mit der auch komplexe Logiken abgebildet werden können. Allerdings erfordert diese Methode einen größeren Initialaufwand bei der Implementierung und ist aufwändiger zu warten.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Methode mit der in den Labels gespeicherten Projektzugehörigkeit prototypisch implementiert. Erste Tests waren vielversprechend. Für den produktiven Einsatz sind jedoch weitere Tests notwendig und eine Anbindung an die Zugriffsverwaltung von CAE-Bench.

AP4 – Fahrwerk

Die fahrdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs werden von einer Vielzahl von mechanischen und regelungstechnischen Parametern beeinflusst, deren Optimierung derzeit noch eines hohen manuellen Aufwands bedarf. Im Rahmen einer virtuellen Vorapplikation sollen diese Aufwände reduziert und die letztendliche Ergebnis-Qualität gesteigert werden, indem die Prozesse zur virtuellen Fahrdynamik-Auslegung automatisiert und so für den Einsatz von KI-Ersatzmodellen befähigt werden.

Das Trainieren geeigneter KI-Ersatzmodelle erfordert jedoch eine umfangreiche Datenbasis, weshalb der Generierung dieser Daten eine zentrale Rolle zukommt. Mit der Mehrkörpersimulations-Software Adams/Car bietet Hexagon eine Lösung zur virtuellen Abbildung des Fahrzeug-Verhaltens unter frei definierbaren Randbedingungen. Zudem können sämtliche Parameter des Fahrzeugmodells variiert und somit deren Einfluss auf fahrdynamische Kennwerte ermittelt werden. Ein wesentliches Ziel des Arbeitspakets ist es, diese Instrumente an die spezifischen Anforderungen der in der Fachabteilung etablierten Auslegungs-Methoden sowie an die dort existierenden Infrastrukturen anzupassen und so dem User zu einer durchgehend automatisierten und generisch anwendbaren Prozesskette zu verhelfen.

Beteiligte Partner:

- TWT GmbH
- BMW AG
- divis intelligent solutions GmbH
- Hexagon

Ermittlung von Anwendungsfällen

Zur Use-Case-Definition für die virtuelle Vorapplikation im Bereich Fahrwerk wurden einleitend im Rahmen einer Workshop-Serie Bewertungskriterien formuliert, in denen neben der fachlichen Relevanz und simulativen Abbildbarkeit auch deren Eignung für eine Multi-Objective-Optimierung berücksichtigt wird. Diese setzt voraus, dass durch die Auswahl der Fahrdynamik-Phänomene ein Zielkonflikt provoziert wird, sodass sich bei einer späteren Parameter-Optimierung in Abhängigkeit von der jeweiligen Ziel-Gewichtung eine Pareto-Front optimierter Modell-Designs ausbildet.

Zudem besteht der Anspruch, dass sich die erarbeitete Prozesskette generisch auf andere Anwendungsfälle übertragen lässt und somit eine Vereinbarung beliebiger Fahrdynamik-Phänomene im Sinne einer vernetzten Auslegung ermöglicht wird.

Aufbaubewegung

Unter Betrachtung der o.g. Kriterien erfolgte eine schematische Sichtung und Einordnung sämtlicher bei BMW betrachteten Fahrdynamik-Phänomene. Um die Anforderungen für eine Multi-Objective-Optimierung zu erfüllen, wurde der Zielkonflikt „Fahrstabilität vs. Fahrkomfort“ als für dieses Forschungsvorhaben geeignet identifiziert und anhand entsprechender Fahrdynamik-Phänomene aus Quer- und Vertikaldynamik weiter konkretisiert. So gilt hinsichtlich der Aufbaubewegung eines Fahrzeugs eine vertikal weiche Abstimmung als sehr komfortabel, kann aber im Übergangsverhalten zu einer Beeinträchtigung der Fahrstabilität führen.

Zur Auswahl der Zielgrößen, welche im Zuge der späteren datenbasierten Auswertung entweder als Restriktionen oder Optimierungsziele verwendet werden sollen, diente ein von der Fachabteilung bereitgestelltes objektives Zielsystem als maßgebende Vorlage. Hierauf aufbauend wurde eine Selektion von Handling- (Continuous-Sine-Steer, Sine-With-Dwell, Weave, Power-Off-While-Cornering, Quasi-Steady-State-Cornering) und Ride-Manövern (Hydropulse) mit unterschiedlichen Analyse-Parametern abgeleitet und als Analyse-Sequenz definiert. Bei der Auswahl des zu analysierenden Fahrzeug-Modells wurde der Fokus auf den BMW G45 gelegt, welcher ein aktuell in der Entwicklung befindliches und damit für neue Methoden-Ansätze in besonderem Maße geeignetes Derivat darstellt. Zudem war hierzu zunächst die Lieferung eines parametrisierbaren Regelsystems in Aussicht gestellt worden. Eine Verkettung von mechanischem System und Regelsystem sollte bei Bedarf die Möglichkeit vorhalten, die Komplexitätsstufe der Anwendungsfälle (bspw. durch Co-Simulationen) zu steigern. Ein späteres Hinzuziehen weiterer Derivate, bspw. zum Zwecke von Vergleichsanalysen, wurde als Option einer späteren Use-Case-Erweiterung vorgehalten.

Es wurde beschlossen, bereits beim Fahrzeugentwickler etablierte Teilprozesse, sofern geeignet bzw. möglich, wiederzuverwenden, um die Nutzbarkeit der im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse auch nachhaltig, d.h. über den Projektzeitraum hinaus sicherstellen zu können. Dies beinhaltet neben einer Auswahl von in der Fachabteilung gepflegten Adams-Autorun-Analysen auch das dort genutzte, Matlab-basierte Postprocessing-Tool GUPP.

Bremmung auf μ -Split

Das ursprüngliche Vorhaben, den oben beschriebenen mechanischen Use-Case zur Aufbaubewegung in einer nachgelagerten DoE-Studie um ein Regelsystem zu erweitern, musste verworfen werden, nachdem absehbar wurde, dass seitens der externen Zulieferfirmen kein parametrisierbares Regelsystem bereitgestellt werden könne. Um dennoch neben den rein mechanischen auch andere Klassen von Design-Parametern funktional zu untersuchen, wurde entschieden, eine isolierte Regelsystem-Optimierung durchzuführen.

Als Use-Case fiel hier die Wahl auf die μ -Split-Identifikation, welche eine Teilfunktion der ABS-Bremsregelung ist. Unter μ -Split ist der fahrdynamische Zustand zu verstehen, bei welchem ein Fahrzeug auf linker und rechter Spur unterschiedliche Reibwerte

zwischen Reifen und Fahrbahn aufweist (z.B. bei einseitig auftretendem Glatteis). Ein zu starker Bremsengriff kann in diesem Fall zu einem instabilen Fahrzustand bzw. einem Ausbrechen des Fahrzeugs führen, was durch eine entsprechende ABS-Auslegung unterbunden werden soll. Um den μ -Split Zustand robust und schnell identifizieren zu können, werden verschiedene Messgrößen (Längs- und Aufstandskräfte der Vorderräder, Rad-Drehzahlen, Fahrzeug-Geschwindigkeit, kommandierte Antriebs- und Bremsmomente, Längs- und Querbefleunigungen, etc.) in eine Simulink-Logik eingespeist. Anhand von parametrisierten Schwellwerten, Multiplikatoren, Signal-Delays und PT1-Zeitkonstanten wird am Ende der Logik der binäre Zustand " μ -Split = True/False" ermittelt. Da die Applikation der o.g. Regelparameter einen hohen Ressourcenaufwand am Realfahrzeug bedeutet, wird einer virtuellen Vorapplikation ein hohes Potenzial beigemessen.

Automatisierung der Simulations-Prozesskette

Modell- und Analyse-Parametrisierung

Der Anwendungsfall Aufbaubewegung wurde aufgrund seiner hohen Dimensionalität und dem damit verbundenen hohen Bedarf an Trainings-Daten als geeignet befunden, um eine exemplarische Prozess-Automatisierung in Adams/Car vorzunehmen, welche sich durch einen generischen Ansatz auch auf beliebige andere Fahrdynamik-Phänomene übertragen lässt. Das im Arbeitspaket AP4 festgelegte Fahrzeug-Derivat G45 wurde als Adams-Modell in allen für die im Forschungsprojekt geplanten Analysen erforderlichen Ausführungen (d.h. inklusive aller benötigten Versuchsaufbauten bzw. Testtrigs) bereitgestellt. Es erfolgte eine initiale Ausführung des Nominal-Workflows bestehend aus dem nicht variierten Adams-Modell und insgesamt 28 Handling- und Ride-Manövern. In der Adams-Simulation kam es dabei zu keinerlei Robustheits-Problemen oder Fehlern. Aus den von Adams erzeugten Rohergebnissen wurden über das von der Fachabteilung bereitgestellte Postprocessing-Tool GUPP die CVs (Characteristic Values) abgeleitet, die angelehnt an das objektive Zielsystem als Restriktion oder Optimierungs-Zielgröße dienen sollen.

Hierbei wurden infrastrukturelle Instabilitäten beobachtet, bei welchen für befristete Zeitintervalle kein Zugriff auf die GUPP-Runtime möglich ist. Da die Ursache hierfür von dem begleitenden GUPP-Support-Ansprechpartnern nicht identifiziert werden konnte, wurde diesen Bedingungen mit einer Iterations-Schleife begegnet, in der nach jedem DoE-Durchlauf nicht ausgewertete Analysen wiederholt werden. Ein adäquater Umgang mit Simulationsausfällen infolge von Infrastruktur-Instabilitäten oder Netzwerk-Ausfällen ist bei der Durchführung von DoE-Studien insofern entscheidend, als diese typischerweise sequenzhaft auftreten und somit bei nicht kontinuierlich erweiterbaren Versuchsplänen zu einer übermäßigen Verschlechterung der späteren Ersatzmodell-Güte führen können.

Über die Prozessautomatisierungs-Lösung Adams/Scale wurde eine Funktion zur automatisierten Anpassung von Variations- und Manöver-bedingten Eigenschaften be-

reitgestellt. Ein initialer Test zeigte auch hier keinerlei Robustheits-Probleme oder Fehler. Im Zusammenhang mit den in der Fachabteilung geltenden Konvention zur Gummilager-Ausrichtung in MKS-Modellen wurde eine neue Anforderung an die Automatisierungs-Lösung identifiziert. Hintergrund ist, dass die Orientierung des lokalen Gummilager-Koordinatensystems unabhängig von den Kinematik-Punkten der Achse in der Modell-Topologie definiert ist. Wird die Kinematik infolge der Parameter-Variation geändert, so wird die Orientierung der Gummilager nicht automatisch nachjustiert und widerspricht damit der fachlichen Ausrichtungs-Konvention. Eine entsprechende Korrektur muss folglich in einem externen Tool erfolgen, welche in die Gesamt-Toolkette der Automatisierungs-Lösung integriert werden musste. Zudem wurde die Anforderung formuliert, das GUPP-Postprocessing in den Concrete-Job Workflow von Adams/Scale zu integrieren, sodass auf Ebene des Open-Loop-Workflows die auf Key-Results basierende Live-Darstellung von DoE-Zwischenergebnissen genutzt werden kann. Diese direkt an die Simulation anschließende Ergebnis-Prozessierung ermöglichte gleichzeitig eine drastische Konsolidierung der Simulations-Ergebnisse, welche für einen effizienten Datenfluss und damit performanten Workflow unabdingbar ist.

Für den Anwendungsfall der Bremsung auf μ -Split wurden weitestgehend dieselben Prozess-Schnittstellen verwendet wie beim mechanischen Anwendungsfall. Zur Use-Case-Definition für die virtuelle Vorapplikation im Bereich Fahrwerk wurden einleitend im Rahmen einer Workshop-Serie Bewertungskriterien formuliert, in denen neben der fachlichen Relevanz und simulativen Abbildbarkeit auch deren Eignung für eine Multi-Objective-Optimierung berücksichtigt wird. Diese setzt voraus, dass durch die Auswahl der Fahrdynamik-Phänomene ein Zielkonflikt provoziert wird, sodass sich bei einer späteren Parameter-Optimierung in Abhängigkeit von der jeweiligen Ziel-Gewichtung eine Pareto-Front optimierter Modell-Designs ausbildet.

Zudem besteht der Anspruch, dass sich die erarbeitete Prozesskette generisch auf andere Anwendungsfälle übertragen lässt und somit eine Vereinbarung beliebiger Fahrdynamik-Phänomene im Sinne einer vernetzten Auslegung ermöglicht wird.

Aufbaubewegung. Lediglich die Ergebnis-Übergabe erfolgte aufgrund der unterschiedlichen Ergebnis-Klasse (Zeitreihen anstelle von Kennwerten) in einem anderen Format. So ist es aufgrund der zusätzlichen Zeit-Dimension der Ergebnisse nicht mehr möglich, die DoE Ergebnisse aller N Varianten zusammen in einer CSV-Tabelle zu aggregieren. Übergeben wird stattdessen ein Verzeichnis mit N CSV-Tabellen, welche sich dank einer entsprechenden Nomenklatur automatisch weiterverarbeiten lassen. Als generische Daten-Schnittstelle könnte alternativ auf strukturabbildende Datei-Formate wie JSON oder XML zurückgegriffen werden.

Ergebnis-Validierung am Fahrsimulator

Allgemein bietet die Einbeziehung eines Fahrsimulators in die virtuelle Fahrdynamik-Auslegung die Möglichkeit, mit im Vergleich zum Realversuch vernachlässigbar kleinem zeitlichen Aufwand zahlreiche Fahrzeug-Konfigurationen zu applizieren und zu erproben. Im Kontext einer DoE-Analyse, wie sie für den Use Case Aufbaubewegung durchgeführt wurde, schließt sich somit der Kreis aus

- Objektivierung des Fahrdynamik-Phänomens mittels Definition von CVs
- Virtualisierung des Fahrdynamik-Phänomens mittels Mehrkörpersystemen
- Parametrisierung des Mehrkörpersystems und Überführung in ein nicht-physikalisches Ersatz-Modell
- Optimierung der Ersatz-Modell-Parameter in Hinblick auf die objektivierten Zielgrößen
- Rückführung auf die subjektive Ebene durch Validierung der Optimierungsergebnisse auf dem Fahrsimulator mittels echtzeitfähigem MKS-Modell

Der Anspruch, den oben beschriebenen Auslegungsprozess auf verschiedene Anwendungsfälle und Fahrzeugmodelle übertragen und anwenden zu können, führt in Anbetracht der hohen Anzahl an Fahrzeugderivaten zu dem Bedarf nach einer Funktion zur automatisierten Ausleitung eines echtzeitfähigen MKS-Modells, welche für die MKS-Software Adams/Car entwickelt und zur Verfügung gestellt wurde. Für die exemplarische Durchführung wurden auf technischer Seite weitere Maßnahmen getroffen wie die Bereitstellung aller für die Integration auf dem Fahrsimulator erforderlichen Adams/Car-Features. Als Versuchsträger wurde das Fahrzeug-Modell G45 eingehend untersucht und hinsichtlich Stabilität und Performanz verbessert, um die Echtzeitfähigkeit zu jeder Zeit gewährleisten zu können.

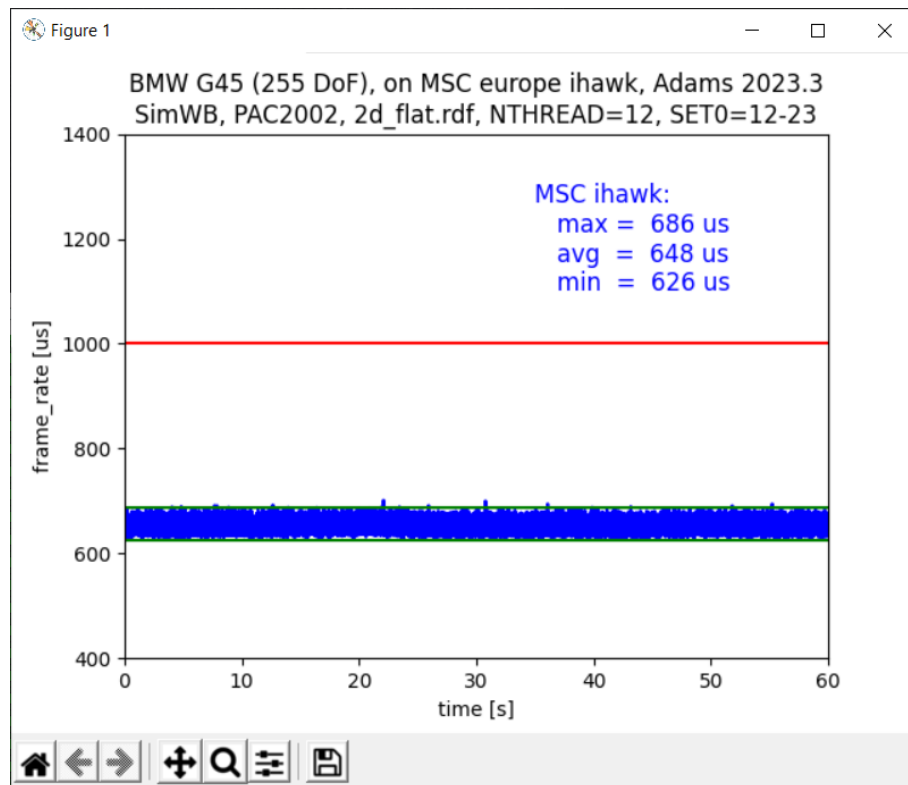


Abbildung 13: Die Echtzeitfähigkeit des BMW-G45-Gesamtfahrzeugmodells wird in Adams/Realtime zu jeder Zeit mit hohem Sicherheitspuffer gewährleistet.

Spezifizierung des Versuchsplans

Aufbaubewegung

Die Parametrisierung des Modells erfolgte über die in Adams integrierte DoE-Funktionalität Adams/Insight. Die in Absprache mit der Fachabteilung festgelegten mechanischen Modell-Parameter (Kinematik-Hardpoints, Gummilager-Steifigkeiten, Stabi-Steifigkeiten, Feder-Steifigkeiten, Dämpfer-Zug- und Druckstufen, Zusatzfeder-Steifigkeiten und Einsatzpunkte) wurden über Adams/Insight als Design-Variablen exponiert, mit Verteilungsarten und Variationsbreiten bedatet und in einem neutralen XML-Format exportiert.

component	parameter	range	type
- kinematics	loc upright sided	[-5, 5]mm	disp [x,y,z]
	loc subframe sided	[-10, 10]mm	disp [x,y,z]
- elastokinematics	stiffness bushings	[50, 200]%	scale [f,t] [x,y,z]
	stiffness bearings	[constant]	n/a
- anti-roll bar	stiffness front	[80, 150]%	scale
	stiffness rear	[50, 150]%	scale
- auxiliary spring	engage point	[0, 10]mm	disp
	stiffness	[75, 125]%	scale
- spring	stiffness	[80, 120]%	scale
- damper	rebound	[50, 300]%	scale
	compression	[85, 300]%	scale

Diese Design-Space-Definition wurde an den Projektpartner Divis zur Erstellung eines Sobol-Versuchsplans übermittelt. Dieser beinhaltet eine Matrix mit M mal N Zellen, wobei M die Anzahl der zu variierenden Modellparameter (221) und N die Anzahl der entsprechend des Sobol-Plans erstellten Samples (2000) beschreibt. Der Versuchsplan wurde als CSV-Tabelle in Adams/Scale eingelesen und in N Berechnungs-Verzeichnisse mit entsprechenden Command-Files übersetzt.

Um den Zielkonflikt zwischen Fahrsicherheit und Fahrkomfort simulativ abzubilden wurde auf Basis des in der Fachabteilung geltenden objektiven Zielsystems eine Reihe von Handling- und Ride-Manövern selektiert, welche unter teils unterschiedlichen Analyse-Parametern durchgeführt werden sollen:

Continuous Sine Steer (Sinus-Lenken bei konstanter Fahrgeschwindigkeit und verschiedenen Querbesehleunigungen)

csst conditions:			
- longitudinal velocity [km/h]:	100		[1]
- lateral acceleration [m/s ²]:	2, 4, 6		[3]
maneuver count:	1* 3 =		[3]

Sine with Dwell (Sinus-Lenken mit Halte-Dauer bei verschiedenen Lenkwinkelüberhöhungen)

swd conditions:			
- steering wheel angle increase:	1.5, 2, 2.5, 3		[4]
maneuver count:	4 =		[4]

Weave (Sinus-Lenken bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten und Querbesehleunigungen)

weave conditions:			
- longitudinal velocity [km/h]:	70, 100, 190		[3]
- lateral acceleration [m/s ²]:	2, 4, 6		[3]
maneuver count:	3* 3 =		[9]

Quasi Steady-State Cornering (quasi-stationäre Kreisfahrt auf konstantem Kurven-Radius)

qssc conditions:			
- cornering radius [m]:	105		[1]
maneuver count:	1 =		[1]

Power off while Cornering (Ausrollen bei Kurvenfahrt auf konstantem Kurvenradius bei verschiedenen Querbeschleunigungen)

powc conditions:		
- cornering radius [m]:	105	[1]
- lateral acceleration [m/s ²]:	4, 5, 6, 7, 8, 9	[6]
maneuver count:	1* 6 =	[6]

Hydropulse (Hydropuls-Prüfstand mit Weg-Anregung)

hydropulse conditions kinematic:		
- vert. kin. excitation [m/s]:	0.071, 0.12, 0.22	[3]
maneuver count:	3 =	[3]

Hydropulse (Hydropuls-Prüfstand mit Kraft-Anregung)

hydropulse conditions force:		
- long. force. excitation [N]:	100	[1]
- location:	front left, rear left	[2]
maneuver count:	1* 2 =	[2]

Bremsung auf μ -Split

Im Gegensatz zum mechanischen Anwendungsfall zur Aufbaubewegung, in dem der Zielkonflikt „Fahrsicherheit vs. Fahrkomfort“ im Fokus steht, sollten bei der μ -Split-Identifikation die Regelsystem-Parameter isoliert optimiert werden, sodass keine Parameter-Variation des mechanischen Fahrzeugmodells durchgeführt wurde.

Um für die virtuelle Vorapplikation dieses Systems ein möglichst breites und vollständiges Spektrum an Fahrsituationen bereitstellen zu können, wurde in Adams/Car ein parametrisiertes Bremsmanöver definiert, bei welchem neben verschiedenen Reibwert-Kombinationen von Hoch- und Nieder-Reibwert-Seite auch Initialgeschwindigkeiten, Bremsdrücke sowie Lenkrad-Stellungen variiert werden. Ausfaktoriert ergaben sich 1296 Analysen zur Geradeaus-Bremsung sowie 576 weitere zur Bremsung bei verschiedenen Kreisbahnradien, wobei letztere aufgrund physikalischer Grenzen (ggf. zu geringe Reibwerte, um Zielgeschwindigkeit bei engen Kreisbahnradien zu erreichen) von der Bewertung ausgeschlossen werden. Effektiv ergeben sich hier folglich 466 Analysen:

Braking at μ -Split (Geradeaus-Bremsung bei μ -Split bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, Bremsdrücken, Bremsdauern, Lenkungsmodi und Reibwert-Kombinationen zwischen links und rechts)

brmu conditions:		
- longitudinal velocity [km/h]:	60, 80, 100	[3]
- brake pressure [bar]:	60, 80, 100, 120	[4]
- brake pressure step duration [s]:	0.1, 0.2, 0.4	[3]
- steering control:	locked, straight	[2]
- mu right (high):	1.0, 0.8, 0.6	
- mu left (low):	1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 →	[18]
maneuver count:	3* 4* 3* 2* 18 =	[1296]

Braking at μ -Split on Skipad (Kurven-Bremsung bei μ -Split bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, Kurven-Richtungen, Bremsdrücken und Reibwert-Kombinationen zwischen links und rechts)

brmu conditions on skidpad:		
- radius [m] / velocity [km/h]:	100/80, 100/70, 40/50, 40/40	[4]
- turn direction:	left, right	[2]
- brake pressure [bar]:	60, 80, 100, 120	[4]
- brake pressure step duration [s]:	0.2	[1]
- steering control:	controlled	[1]
- mu right [high]:	1.0, 0.8, 0.6	
- mu left [low]:	1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 →	[18]
maneuver count:	4* 2* 4* 2* 2* 18 =	[576]

Zur Robustheit der μ -Split-Erkennung gehört nicht nur das korrekte Erkennen von μ -Split Situationen, sondern auch die zuverlässige Unterscheidung von Situationen, bei denen kein μ -Split vorliegt, die bewerteten Mess-Signale diese Schlussfolgerung aber nahelegen könnten. Dies ist bspw. bei der Überfahrt von Gullideckeln oder Schlaglöchern der Fall. Zwar liegt hier zeitweise eine hohe Reibwert-Differenz zwischen linkem und rechtem Rad vor, da dieser Zustand aber nur für einen sehr kurzen Zeitabschnitt gilt, sollte die μ -Split-spezifische ABS-Regelung hierauf nicht reagieren. Auch für diese Szenarien wurden in Adams/Car Bremsmanöver definiert, bei denen unter anderem die geometrischen Eigenschaften des Gullideckels bzw. des Schlaglochs variiert werden können. Ausfaktorisiert kamen für die Untersuchungen mit Schlagloch 864, für die mit Gullideckel 792 weitere Analysen hinzu:

Braking at μ -Split over Pothole (Geradeaus-Bremsung bei μ -Split über Schlagloch bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, Bremsdrücken, Bremsdauern, Lenkungsmodi und Reibwert-Kombinationen zwischen links und rechts und Schlagloch-Geometrien)

brmu conditions over pothole:		
- longitudinal velocity [km/h]:	60, 80, 100	[3]
- brake pressure [bar]:	80, 100, 120	[3]
- brake pressure step duration [s]:	0.2, 0.4	[2]
- steering control:	locked, straight	[2]
- mu right (high):	1.2, 1.0, 0.8, 0.6	[4]
- Tiefe Schlagloch [m]:	0.04, 0.06, 0.08	[3]
- Laenge Schlagloch [m]:	0.3, 0.4	[2]
- Breite Schlagloch [m]:	0.4	[1]
maneuver count:	3* 3* 2* 2* 4* 3* 2* 1 =	[864]

Braking at μ -Split over Manhole Cover (Geradeaus-Bremsung bei μ -Split über Gullideckel bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, Bremsdrücken, Bremsdauern, Lenkungsmodi und Reibwert-Kombinationen zwischen links und rechts und Gullideckel-Geometrien)

brmu conditions over manhole cover:		
- longitudinal velocity [km/h]:	60, 80, 100	[3]
- brake pressure [bar]:	80, 100, 120	[3]
- brake pressure step duration [s]:	0.2, 0.4	[2]
- steering control:	locked, straight	[2]
- mu right (high):	1.2, 1.0, 0.8, 0.6	
- mu left rel. to right:	-0.2, -0.4, -0.6 →	[11]
- Laenge Schlagloch [m]:	0.3, 0.6	[2]
- Breite Schlagloch [m]:	0.4	[1]
maneuver count:	3* 3* 2* 2* 11* 2* 1 =	[792]

Datenbeschaffung

Bei der Bereitstellung einer parallelisierungsfähigen Rechenressource gilt es, zwischen den technischen und administrativen Voraussetzungen zu unterscheiden. Da die von Adams/Scale unterstützte Cloud-basierte Process-Engine einen Transfer von BMW-Modelldaten auf einen außerhalb des BMW-Netzwerks befindlichen Server erfordert, war auf der administrativen Seite dem Aspekt der Datensicherheit hohe Bedeutung zuzumessen. In diesem Zusammenhang wurde ein sog. TISAX-Audit angestoßen, welcher die Automatisierungs-Lösung im Hinblick auf die standardisierten Sicherheitskriterien der OEMs überprüft und zertifiziert. Darüber hinaus wurde zum Zwecke dieses Projekts der Aufbau eines eigenen Clusters mit angepasster Zeebe Architektur in die Wege geleitet, wodurch die Konfigurationsmöglichkeiten der Cluster-internen Rechteverwaltung erweitert werden können. Da auf der technischen Seite die Voraussetzungen bereits weitgehend erfüllt sind, wurde beschlossen, bereits eine pilot-hafte Berechnung der vorbereiteten DoE-Analyse innerhalb des BMW-Netzwerkes vorzunehmen. Die standardmäßige Prozesskette von Adams/Scale wurde zu diesem Zweck nach der automatisierten Erstellung von Simulations-Verzeichnissen unterbrochen und stattdessen eine einfache Routine zum parallelisierten Submittieren auf verschiedenen Virtuellen Maschinen innerhalb des BMW-Netzwerkes eingesetzt. Auf diese Weise konnten bereits frühzeitig DoE-Ergebnisse generiert und der Workflow fachlich plausibilisiert werden. Ein initialer Open-Loop-Workflow mit 2000 Varianten und jeweils 28 Manövern (5 Ride, 23 Handling) konnte mit nahezu 100% Robustheit in Adams/Car durchgeführt werden. Die Ausleitung der von GUPP berechneten CVs (1118 pro Sample) konnte ebenfalls parallelisiert erfolgen, indem dem Prozess eine Matlab-Run-time zur Verfügung gestellt und entsprechende Batch-Aufrufe innerhalb des Concrete-Job-Workflows integriert wurden. Abschließend wurden die GUPP-CVs aller 2000 Samples automatisiert eingelesen und in einer Input-Output-Matrix aggregiert, welche im weiteren Prozessverlauf zur Generierung von Metamodellen zur Verfügung gestellt wurde. Zur fachlichen Plausibilisierung wurde auf Basis einer linearen Regression eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt und mit der Fachabteilung diskutiert. Die statistisch nachweisbaren Wirkzusammenhänge konnten so auch auf fachlicher Ebene verifiziert werden.

Hinsichtlich des μ -Split-Use-Cases konnten sowohl die "Positiv-Szenarien", in denen die μ -Split Erkennung positiv reagieren soll, als auch die "Negativ-Szenarien" (Gullideckel und Schlagloch-Überfahrt) erfolgreich gerechnet werden. Die hiermit generierten Datensätze sollen die Robustheit der μ -Split-Erkennung gegenüber Situationen erhöhen, in denen das Fahrzeug kurzzeitige Schlupf-Differenzen auf beiden Fahrzeugseiten erfährt, ohne dass tatsächlich ein Unterschied bei den jeweiligen Reibwerten der Fahrbahnkontakte besteht. Die Ergebnisse wurden erfolgreich plausibilisiert und an den zuständigen Fachbereich für die virtuelle Vorapplikation übergeben.

Ersatzmodellerstellung

Basierend auf den in Adams/Car berechneten DoE-Ergebnissen aus dem Anwendungsfall Zur Use-Case-Definition für die virtuelle Vorapplikation im Bereich Fahrwerk wurden einleitend im Rahmen einer Workshop-Serie Bewertungskriterien formuliert, in denen neben der fachlichen Relevanz und simulativen Abbildbarkeit auch deren Eignung für eine Multi-Objective-Optimierung berücksichtigt wird. Diese setzt voraus, dass durch die Auswahl der Fahrdynamik-Phänomene ein Zielkonflikt provoziert wird, sodass sich bei einer späteren Parameter-Optimierung in Abhängigkeit von der jeweiligen Ziel-Gewichtung eine Pareto-Front optimierter Modell-Designs ausbildet.

Zudem besteht der Anspruch, dass sich die erarbeitete Prozesskette generisch auf andere Anwendungsfälle übertragen lässt und somit eine Vereinbarung beliebiger Fahrdynamik-Phänomene im Sinne einer vernetzten Auslegung ermöglicht wird.

Aufbaubewegung, konnten im nächsten Schritt Ersatzmodelle generiert werden, welche im weiteren Prozess eine Anwendung effizienter Optimierungs-Methoden zulassen. Als Trainings- und Test-Grundlage diente dabei die aggregierte Input-Output-Matrix, welche im Format einer CSV-Tabelle zur Verfügung gestellt worden ist. Eine anschließende Sichtung der Metamodell-Güten ergab, dass sich die für die Optimierung relevanten Zielgrößen überwiegend gut modellieren ließen, sodass eine nachträgliche Anpassung des DoE-Workflows nicht notwendig erschien. Dennoch musste eine nachträgliche Änderung der auszuwertenden Größen vorgenommen werden, da nach Sichtung der Ergebnisse befunden wurde, dass für die Bewertung des Fahrkomforts bei vertikaler Anregung ein anderer charakteristischer Wert geeigneter ist als der, der initial in Abstimmung mit dem Fachbereich festgelegt worden war. Entsprechend wurde eine aktualisierte Fassung der Input-Output-Matrix im CSV-Format erarbeitet und zur Verfügung gestellt.

Optimierung

Um die Randbedingungen und Ziele der Optimierung formulieren zu können, musste neben der fachlichen Relevanz auch die Güte der zugehörigen Metamodelle berücksichtigt werden. Nach erster Sichtung schienen jedoch die zur Bewertung des Zielkonflikts "Fahrsicherheit vs. Fahrkomfort" benötigten Output-Größen ausreichend gut modelliert worden zu sein. Die quantitative Festlegung der Randbedingungen und Ziele erfolgte im engen Austausch mit dem BMW-Fachbereich. Als Orientierungshilfe wurde eine Übersicht über die Streubereiche der jeweiligen Output-Größen angelegt, sodass die Optimierungsziele zwar weiterhin erstrebenswert, gleichzeitig aber nicht zu weit vom Streu-Spektrum entfernt und damit nicht realisierbar sind.

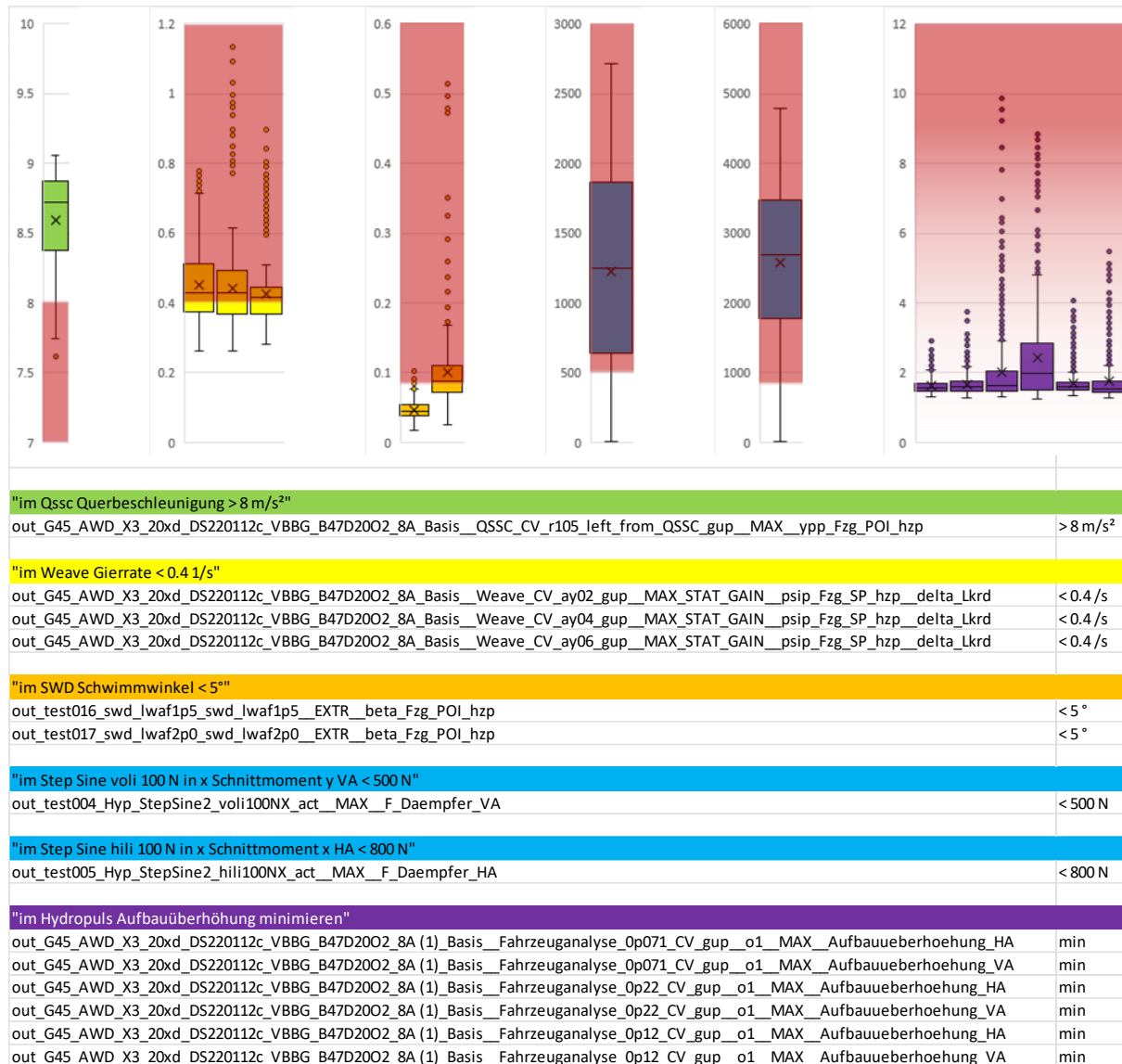


Abbildung 14: Die Restriktionen und Optimierungsziele der Studie wurden in Abstimmung mit dem BMW-Fachbereich definiert.

Auf Basis der übergebenen Input-Output-Matrix konnten für alle Randbedingungen und Optimierungsgrößen Metamodelle generiert werden, die die gesetzten Güte-Kriterien erfüllen. Der zu erwartende Zielkonflikt zwischen Fahrkomfort und Fahrsicherheit spiegelt sich erwartungsgemäß in einer Pareto-Front wider, entlang welcher ein Satz von optimierten Parameter-Sets ausgeleitet wurde, die gleichzeitig alle formulierten Randbedingungen erfüllen. Anhand eines Regressions-Tests in Adams/Car ließ sich feststellen, dass die durch die Metamodelle vorausgesagten Ergebnisgrößen, mit denen der Simulation bis auf wenige Prozent übereinstimmen.

Validierung von Optimierungsergebnissen

Ausgehend von der in der Optimierung ermittelten Pareto-Front wurden vom Konsortialpartner Divis eine Reihe von 36 optimierten Parameter-Konfigurationen ausgeleitet, welche zur Validierung in Adams/Car mit der festgelegten Manöver-Sequenz simuliert

wurden. Die Ergebnis-Werte wurden mit den auf Basis der Metamodelle prognostizierten Ergebnis-Werten verglichen und wiesen nach Einschätzung von Divis hinreichend geringe Abweichungen auf.

Design	CV_r105	CV_ay02	CV_ay04	CV_ay06	hwaf1p5	hwaf2p0	MAX_F_0p071_HA	MAX_F_0p12_HA	MAX_F_0p22_HA	MAX_F_0p071_VA	MAX_F_0p12_VA	MAX_F_0p22_VA	MAX_Aufbau_0p071_HA	MAX_Aufbau_0p071_VA	MAX_Aufbau_0p22_HA	MAX_Aufbau_0p22_VA	MAX_Aufbau_0p12_HA	MAX_Aufbau_0p12_VA
1	0.91%	-9.44%	-3.27%	-2.07%	-4.16%	-1.66%	-3.12%	-0.53%	2.11%	0.57%	0.34%	0.04%	-0.33%	0.53%	0.82%	1.57%	0.83%	6.27%
2	0.70%	-2.90%	-0.84%	3.79%	-0.11%	1.29%	-0.95%	0.65%	1.79%	1.40%	1.03%	2.79%	0.78%	0.85%	0.08%	1.67%	0.54%	0.02%
3	0.31%	1.21%	1.05%	0.69%	-0.39%	-0.13%	-0.51%	-0.01%	0.50%	1.14%	-0.24%	1.23%	0.79%	1.46%	0.83%	2.71%	1.62%	2.28%
4	1.98%	-1.74%	0.54%	1.73%	-0.31%	-0.26%	-0.29%	0.21%	1.00%	0.74%	1.33%	3.04%	-0.83%	0.52%	-0.49%	0.72%	-0.02%	1.07%
5	-0.30%	-3.84%	-1.70%	-0.66%	-0.46%	0.67%	-0.87%	0.19%	1.81%	-0.49%	-0.12%	1.20%	1.66%	0.78%	0.56%	0.92%	2.08%	0.38%
6	-0.01%	-5.83%	-2.63%	3.46%	0.83%	1.04%	0.07%	0.81%	1.14%	1.60%	1.22%	1.06%	1.60%	2.46%	0.92%	2.79%	2.03%	2.50%
7	-0.01%	2.23%	0.73%	0.74%	1.14%	0.45%	-1.06%	1.23%	2.19%	0.60%	0.50%	1.78%	0.59%	0.32%	0.76%	1.99%	0.23%	0.82%
8	0.41%	-6.37%	-1.63%	-2.16%	-2.78%	-1.54%	-0.82%	1.18%	2.44%	0.44%	0.99%	2.45%	3.09%	0.85%	0.58%	1.41%	1.77%	0.81%
9	0.53%	-0.90%	0.96%	-1.21%	-0.69%	0.18%	-0.91%	1.27%	1.32%	0.17%	-0.52%	0.42%	4.86%	-0.29%	1.02%	1.67%	2.02%	0.96%
10	0.83%	-1.29%	0.46%	2.45%	-0.67%	0.55%	-0.94%	-1.17%	1.36%	1.16%	1.43%	3.42%	-2.37%	1.80%	-0.04%	2.05%	-1.67%	2.20%
11	0.12%	-1.45%	0.23%	0.40%	-4.24%	-2.58%	-1.14%	0.35%	0.53%	0.71%	0.29%	-0.33%	-1.11%	-0.06%	0.33%	0.72%	-0.56%	0.47%
12	0.00%	-9.72%	-3.57%	-3.11%	-6.84%	-1.74%	-1.71%	-0.62%	1.61%	1.27%	0.84%	1.10%	-1.44%	1.06%	0.50%	2.37%	-0.67%	1.09%
13	-0.19%	-8.09%	-2.38%	4.06%	-3.68%	-0.39%	-1.54%	-0.16%	1.59%	0.48%	1.46%	1.80%	1.57%	1.92%	0.52%	2.24%	1.26%	2.38%
14	0.12%	-7.01%	-2.68%	0.04%	-4.65%	-1.70%	-1.21%	-0.42%	2.73%	0.61%	0.82%	1.48%	-0.94%	0.34%	0.62%	0.76%	0.10%	0.57%
15	0.41%	-10.37%	-1.92%	4.08%	-3.43%	-1.32%	-0.61%	0.40%	1.83%	0.49%	1.74%	0.65%	-0.60%	1.17%	-0.02%	1.65%	0.18%	1.65%
16	0.74%	-0.85%	1.34%	3.30%	-0.06%	1.74%	-0.05%	0.20%	1.41%	0.82%	0.57%	4.18%	0.17%	2.82%	0.51%	3.24%	-0.05%	1.87%
17	0.59%	-2.41%	-0.29%	1.50%	-1.17%	1.14%	-0.71%	0.20%	1.54%	-0.10%	-0.16%	2.90%	0.66%	-0.29%	0.07%	3.01%	1.22%	0.98%
18	0.44%	-0.30%	2.12%	0.87%	-2.24%	-0.94%	0.07%	0.65%	0.46%	1.79%	1.88%	2.11%	-0.55%	0.83%	-0.03%	3.24%	0.37%	1.37%
19	5.51%	0.84%	1.77%	0.96%	-0.09%	-0.40%	0.87%	-0.39%	1.57%	0.04%	-0.07%	0.42%	1.69%	0.30%	0.23%	0.86%	1.40%	0.39%
20	1.00%	-3.38%	0.39%	2.34%	0.41%	0.75%	-0.13%	-0.31%	2.49%	0.68%	1.22%	3.00%	0.12%	1.14%	1.06%	3.01%	-0.12%	1.85%
21	0.01%	-12.82%	-3.05%	1.21%	-0.29%	1.03%	-0.66%	-0.59%	2.48%	0.72%	0.83%	2.06%	-0.87%	0.40%	0.38%	2.32%	0.61%	0.14%
22	-0.22%	0.67%	2.67%	3.15%	1.02%	0.49%	0.60%	0.65%	0.54%	1.35%	1.07%	2.36%	-0.97%	0.31%	0.51%	4.44%	1.28%	0.69%
23	1.05%	-1.72%	1.10%	0.66%	-3.59%	-1.59%	-2.32%	0.33%	1.67%	0.66%	0.13%	0.60%	0.16%	0.53%	1.23%	0.94%	0.53%	1.01%
24	-1.82%	-2.37%	-0.58%	0.98%	-3.88%	-1.81%	0.13%	1.15%	2.01%	1.09%	1.42%	2.44%	-0.75%	1.66%	0.30%	2.77%	-0.94%	1.37%
25	-0.26%	-9.25%	-3.07%	-3.08%	-3.02%	-0.73%	0.16%	0.12%	0.90%	0.67%	1.44%	1.83%	-2.40%	0.76%	-0.01%	1.34%	0.38%	1.42%
26	0.33%	1.05%	2.02%	6.63%	4.88%	3.55%	-0.67%	0.64%	0.86%	0.38%	1.67%	1.73%	1.27%	0.65%	1.31%	2.62%	1.08%	1.18%
27	0.10%	-4.32%	-1.45%	-0.31%	-2.62%	-1.09%	0.14%	-0.34%	1.88%	-0.27%	-0.36%	1.32%	0.46%	-0.49%	0.17%	1.92%	-0.78%	0.00%
28	-1.28%	-2.55%	-0.75%	1.33%	-2.78%	-1.00%	-0.13%	0.21%	2.55%	0.23%	0.29%	1.19%	-0.40%	1.43%	0.21%	2.49%	0.47%	0.68%
29	-1.03%	-3.04%	-0.52%	0.67%	-4.06%	-0.66%	-0.52%	1.05%	1.53%	1.21%	0.48%	2.19%	0.77%	1.02%	2.16%	1.96%	1.27%	1.34%
30	1.12%	-7.80%	-1.84%		1.41%	1.61%	0.30%	0.95%	0.02%	0.27%	0.98%	2.49%	-1.01%	0.10%	1.23%	2.06%	-0.07%	0.37%
31	3.28%	-9.59%	-4.44%	-3.74%	-3.10%	-0.56%	1.00%	0.93%	-0.13%	1.22%	0.12%	1.25%	1.47%	0.51%	0.68%	2.02%	0.89%	0.84%
32	-1.27%	-2.13%	-0.95%	1.26%	-4.79%	-0.02%	0.80%	-0.65%	-1.11%	0.52%	1.97%	2.52%	-0.67%	1.51%	1.22%	2.11%	-0.83%	1.79%
33	0.40%	-3.06%	-0.47%	-0.41%	-1.65%	-0.42%	2.03%	0.59%	1.36%	0.97%	2.39%	0.66%	-1.90%	0.78%	0.09%	2.69%	0.72%	1.38%
34	0.64%	0.21%	2.26%	2.46%	-2.01%	-0.01%	1.21%	0.08%	-0.49%	1.06%	1.50%	1.59%	-1.12%	0.51%	-0.40%	2.13%	-0.72%	1.05%
35	0.68%	-1.60%	-0.61%	1.99%	-0.95%	0.59%	1.45%	-1.82%	-1.15%	0.66%	1.47%	0.59%	-1.05%	1.56%	-0.32%	2.51%	-0.72%	1.44%
36	1.64%	1.05%	0.46%	0.03%	-2.33%	-0.77%	1.05%	1.07%	0.48%	0.92%	1.33%	1.94%	1.05%	-0.35%	0.94%	0.77%	0.68%	0.41%

Abbildung 15: Die Optimierungsergebnisse wurden in Adams/Car validiert und weisen eine ausreichend gute Prädiktionsgüte auf.

Ausgehend von den 36 Fahrzeug-Konfigurationen wurde ein Versuchsplan aufgestellt, welcher die optimierten Parameter-Sets in verschiedenen Fahrsituationen zur Beurteilung aussetzt. So wurden neben der Nominal-Variante als Baseline zwei weitere Parameter-Sets entlang der von der Optimierung ermittelten Pareto-Front ausgewählt, wobei ersteres eine Gewichtung auf die querdynamischen Optimierungsziele und letzteres eine Gewichtung auf die vertikaldynamischen Optimierungsziele aufweist. Die Szenario-Auswahl fiel einerseits auf ein Double-Lane-Change-, ein Slalom- und ein Step-Steer-Manöver, um die querdynamischen Fahreigenschaften zu bewerten und andererseits auf je zwei Fahrbahnen mit gleichseitigem und wechselseitigem Sinus-Höhenprofil mit verschiedenen Wellenlängen, welche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten überfahren werden können und somit Aufschluss über die vertikaldynamischen Fahreigenschaften liefern. Aus organisatorischer Sicht musste berücksichtigt

werden, dass nur eine limitierte Zeit am Fahrsimulator zur Verfügung stehen würde, weshalb in Abstimmung mit der für den Fahrsimulator zuständigen Abteilung bei BMW entschieden wurde, lediglich die technische Durchführbarkeit und Robustheit (siehe Abbildung 13) nachzuweisen, den Fahrversuch selbst aber nicht vorzunehmen.

7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises können dem beigefügten Erfolgskontrollbericht entnommen werden.

8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die entwickelten Methoden und das Knowhow sollen im Bereich der FE-Technologie nach Ablauf des Projekts schrittweise zu neuen Software-Funktionen oder eigenständigen Software-Produkten von Hexagon weiterentwickelt werden. Dies gilt sowohl für den Bereich FE-Technologie als auch für das Simulationsdatenmanagement. Insbesondere im Bereich des Simulationsdatenmanagements ist damit zu rechnen, dass mittelfristig erste ML-basierte Anwendungen als Dienstleistungen oder spezialisierte Software-Lösungen verfügbar sein werden und von Kunden der Hexagon Manufacturing Intelligence GmbH in deren CAE-Workflows genutzt werden können.

Hexagon sieht in den im Projekt erarbeiteten Ergebnissen sowohl eine deutliche Arbeitserleichterung für CAE-Ingenieure als auch innovative neue Methoden, die als Erweiterung zu den etablierten Software-Tools von Hexagon zur Anwendung kommen. Beginnend mit dem Datenmanagement und der Datenverfügbarkeit werden sich weitere Integrationsmöglichkeiten in Hexagon-Produkten anschließen.

9. Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Ergebnisverwertung

AP1 – Datenbanken und Strukturen und AP5 - Exterieur

Projektergebnisse und Verwertung

Leistungs- und Effizienzsteigerungen, sowie verkürzte Bearbeitungszeiten im Entwicklungsprozess haben in der Automobilindustrie eine große Hebelwirkung in Bezug auf die Entwicklung des Gesamtfahrzeugs.

Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist die teilweise oder vollständige Entkopplung einzelner Auslegungsprozesse von menschlichen Erfahrungen und die Überführung von wissensbasierten Entscheidungen in einen datenbasierten Prozess.

Im Projektzeitraum wurde der grundlegende ETL-Prozess (Extract-Transform-Load), das Datenmodell und die durch den Einsatz einer Graphdatenbank einfachere Datenzugänglichkeit bzw. -nutzbarkeit erfolgreich implementiert und getestet.

Dieser einfachere und schnellere Zugriff auf spezielle Details der FE-Modelle ermöglicht, das implizite Wissen und die Erfahrung der Ingenieur*innen greifbar, verfügbar und bewertbar zu machen. Dazu zählen Schritte wie Objekterkennung und das automatische Labeling von einzelnen Bauteilen und Bauteilgruppen über die Identifikation von geänderten Bauteilen zwischen Varianten bis hin zur Maßnahmenerkennung und Bewertung. So können die relevantesten Verbesserungen identifiziert werden.

Diese Bereitstellung von impliziter Erfahrung birgt enormes Potenzial in der Beschleunigung der Fahrzeugentwicklung und der Vermeidung von „Entwicklungssackgassen“.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die im Projekt newAIDE entwickelten Datenstrukturen, Datenbanken und Schnittstellen für einen einfacheren Einsatz von KI-Methoden haben große technische Erfolgsaussichten.

Im Rahmen des Service-Angebots von Hexagon in Deutschland sind mittelfristig erste kundenspezifische Verwertungen der in diesem Forschungsprojekt entwickelten Technologien angestrebt. Dabei schafft Hexagon einen besonderen Nutzen und Wettbewerbs-Vorteil für seine Kunden durch eine wesentlich erleichterte Zugänglichkeit zu neuartigen Machine-Learning-basierten Lösungen im CAE-Bereich.

Durch die in diesem Forschungsprojekt erarbeiteten wissenschaftlichen Ergebnisse kann Hexagon neue innovative Ansätze (z.B. basierend auf Graphdatenbanken) in der Nutzung von Simulationsdaten anbieten, welche die virtuelle Produkt-Entwicklung mit neuartigen Methoden und einer signifikant umgestalteten Informations-Basis beschleunigen, erweitern und verbessern. Langfristig sollen erste Anwendungen auch als Teilfunktionen in bestehende Produkte branchenübergreifend einfließen und neuartige Produkt- bzw. Service-Lösungen gestaltet und angeboten werden. Dabei profitieren Dienstleistungen und Produkte von der Grundlagenarbeit dieses Projekts. Durch diese werden den Nutzern neuartige und verbesserte Workflows sowie innovative und intelligente Funktionen im CAE-Prozess zur Verfügung stehen, die eine zukunftsfähige datengetriebene Produkt-Entwicklung ermöglichen.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Durch entsprechende Softwarelösungen könnte der Projektansatz mittel- bis langfristig auch in simulationsgetriebenen Entwicklungsprozessen anderer Branchen angewendet werden, z. B. im Flugzeugbau. Da sich die Auslegungs- und Entwicklungsprozesse hier von denen der Automobilindustrie unterscheiden, müssen die KI-befähigten Ansätze aber an die neuen Rahmenbedingungen angepasst und gegebenenfalls erweitert werden.

Eine grundsätzliche Verbesserung der Datenspeicherung, Datenanalyse und Datennutzbarkeit lässt sich gut auf andere Branchen mit CAE-Workflows übertragen, da die Grundlage für den ETL-Prozess in die Graphdatenbank FE-Daten bilden.

AP4 – Fahrwerk

Projektergebnisse und Verwertung

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden auf technischer Ebene nicht nur die mit Adams/Car bereitgestellte DoE-Funktionalität mit realen Anwendungsfällen aus der Industrie erfolgreich erprobt, sondern dabei auch wertvolle Erkenntnisse für das Anforderungs-Management gesammelt. Beispielhaft ist hier die generische Einbindung externer Pre- und Postprocessing-Tools sowie deren Absicherung gegen Infrastrukturbedingte Instabilitäten zu nennen. Der Ansatz einer vernetzten Auslegung unterschiedlicher Fahrdynamik-Phänomene, ließe sich auch produktseitig aufbereiten und im Rahmen einer internen Projektfortführung weiter ausgestalten. Zwar konnte im Rahmen der Projektlaufzeit die aufgestellte Prozesskette aufgrund fehlender Kapazitäten (beim Fahrsimulator) oder Freigaben (beim Regelsystem externer Zulieferfirmen und noch ausstehender TISAX-Audit) nicht durchgängig demonstriert werden. Die einzelnen Prozess-Schritte sowie deren Schnittstellen aber wurden exemplarisch erprobt und die Funktionalität und Robustheit seitens des Fahrzeugherstellers ohne Einschränkungen attestiert.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Es konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass der Einsatz KI-gestützter Methoden nicht nur signifikant zu einer Effizienzsteigerung des Fahrdynamik-Auslegungs-Prozesses beitragen, sondern überdies auch eine höherwertige Ergebnis-Qualität erzielt werden kann als dies mit konventionellen, manuell iterierenden Prozessen möglich wäre. Das enorme wirtschaftliche Potenzial sowie die bereits jetzt fortgeschrittene technische Reife der Prozesskette lassen erwarten, dass aufbauend auf den im Forschungsprojekt erlangten Erkenntnissen eine baldige Überführung in die industrielle Nutzung angestrebt wird.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Eine weiterführende Standardisierung und die damit einhergehende Formalisierung der aufgezeigten Prozesskette (Objektivierung – Virtualisierung – Parametrisierung – Optimierung – Subjektivierung) würde die Voraussetzungen für eine vernetzte Auslegung schaffen und damit die Art und Weise, wie Zielsysteme Arbeitsgruppen-übergreifend behandelt und aufgelöst werden nachhaltig zum Positiven verändern. Dabei ist der methodische Ansatz auch auf andere Fachgebiete abseits des Fahrdynamik-Resorts übertragbar und bietet somit zahlreiche Anknüpfungspunkte für weitere wissenschaftliche und wirtschaftliche Untersuchungen.

10. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Im Laufe des Projekts gingen wir in Austausch mit dem Fraunhofer SCAI zum Thema Repräsentation von automotiven FE-Simulationsdaten als Graph und mit dem Fraunhofer EMI zum Thema Wissensgraphen für automotive CAE-Metadaten.

11. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Das Projekt wurde im Rahmen der VDI Tagung SIMVEC im November 2022 in Baden Baden und die Ergebnisse im November 2024 auf der SIMVEC in Baden Baden in einer speziellen Session vorgestellt.

Zudem wurden eine Vielzahl von Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit getätigt. Eine Übersicht über alle findet sich im gemeinsamen Projektabschlussbericht.

Der Abschlussbericht zu diesem Projekt wird in der Technischen Informationsbibliothek Hannover und der Bibliothek des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz zur Verfügung gestellt.

III ANHANG

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufteilung der Arbeitspakete inklusive beteiligter Firmen	4
Abbildung 2: Projektplan über gesamte Laufzeit	5
Abbildung 3: Architektur und Schnittstellen von Bench2GO	10
Abbildung 4: Variantenbaum-Schema	11
Abbildung 5: logisches Datenmodell für transformierte Fußgängerschutz-Simulationsdaten	13
Abbildung 6: Verwendung einer Graphdatenbank in der AP5 ML-Pipeline	15
Abbildung 7: Darstellung des Transformationsprozesses.....	18
Abbildung 8: Differenzgraph bzgl. Komponenten und gemeinsamer Geometrie	21
Abbildung 9: Modifikationsknoten zur Modellierung von ähnlichen Bauteil-Komponenten	21
Abbildung 10: Graphstruktur mit Blick auf das Fahrzeugprojekt	23
Abbildung 11: Erweiterung des Datenmodells um Projekt-Properties in jedem Knoten	25
Abbildung 12: Erweiterung des Datenmodells um Projekt-Labels	26
Abbildung 13: Die Echtzeitfähigkeit des BMW-G45-Gesamtfahrzeugmodells wird in Adams/Realtime zu jeder Zeit mit hohem Sicherheitspuffer gewährleistet.	33
Abbildung 14: Die Restriktionen und Optimierungsziele der Studie wurden in Abstimmung mit dem BMW-Fachbereich definiert.....	40
Abbildung 15: Die Optimierungsergebnisse wurden in Adams/Car validiert und weisen eine ausreichend gute Prädiktionsgüte auf.....	41