



eFlows4HPC FKZ:16HPC018

Schlussbericht Teil 1

Bearbeiter: Dr. Stefan Boschert, Siemens Technology, Siemens AG, 88748 Garching

Kurzbericht

Im Rahmen des Projekts eFlows4HPC wurde die erfolgreiche Anwendung von MOR-Techniken (Model Order Reduction) in verschiedenen Betriebsszenarien gezeigt und der Übergang von konzeptionellen Anwendungsfällen zu praktischen, realen Anwendungen verdeutlicht. Zu den wichtigsten Errungenschaften gehören:

- Validierung von Anwendungsfällen: Demonstration der effektiven Implementierung von stationären und instationären Simulationen, die sich eng an dem realen Verhalten eines Elektromotors orientieren.
- Echtzeitfähigkeiten: Demonstration der Fähigkeit der abgeleiteten Modelle, eine schnelle Entscheidungsfindung in Echtzeit und betriebliche Optimierung in industriellen Umgebungen zu ermöglichen.
- Evolution von Modellierungsstrategien: Reflexion über die strategische Entwicklung von detaillierten Geometrien zu vereinfachten, recheneffizienten Modellen, um die Praktikabilität von Anwendungen für digitale Zwillinge zu verbessern.

Durch die Integration von High-Performance Computing (HPC) für eine effiziente ROM-Erstellung trägt dieses Produkt erheblich zur Technologie der digitalen Zwillinge bei und setzt neue Maßstäbe für die Simulation und Analyse von Mittelspannungsmotoren.

Ziel des Projekts ist es den kompletten Workflow für eine HPC basierte Simulationskette anhand eines realen Anwendungsfalls zu verifizieren. Als Anwendungsfall wurde das thermische Verhalten eines luftgekühlten Mittelspannungsmotors gewählt. Dieser erwärmt sich insbesondere während des Anfahrens stark, wird aber auch durch die selbst erzeugte Luftströmung im Innern gekühlt. Diesen Prozess zu simulieren, erfordert mit konventionellen Methoden einen hohen simulativen Aufwand. Durch den Einsatz von Modellordnungsreduktion sollen die Modelle möglichst echtzeitfähig gemacht werden. Die Erstellung dieser reduzierten Modelle (ROM) erfordert nach wie vor einen hohen Rechenaufwand, der aber zeitlich entkoppelt von der Anwendung im Voraus

erfolgt. HPC wird vor allem dazu benötigt die detaillierten Simulationsmodelle (FOM) auszuwerten, die für die Erstellung der ROMs notwendig sind. Andererseits erfüllen dann die ROMs die Anforderung nach schnellen Ergebnissen in der Anwendung. Zusammen bilden sie so eine hervorragende Umgebung für digitale Zwillinge, die eine eingehende Analyse und Entscheidungsfindung in Echtzeit unterstützen.

Der Workflow für die Erstellung effizienter digitaler Echtzeit-Simulationen durchläuft fünf Phasen:

- **Phase 1: Generierung von Eingabedaten:** FOM-Simulationen dienen als "Trainingskampagne" zur Erfassung wesentlicher Daten. Das Datenmanagement wird durch parallele verteilte Arrays, insbesondere Dislib-Arrays, für eine effiziente Speicherung und einen effizienten Zugriff optimiert.
- **Phase 2: Datenextraktionsphase:** Singulärwertzerlegung (SVD) der Eingabedaten mit dem Ziel, signifikante Muster und Beziehungen innerhalb der Daten zu identifizieren und zu extrahieren, die für den Aufbau einer effektiven ROM-Basis entscheidend sind.
- **Stufe 3: Hyperreduktionstraining:** Dieser Prozess beinhaltet die Generierung von Hilfsdaten zur weiteren Steigerung der Recheneffizienz.
- **Stufe 4: HROM-Elementauswahlstrategie:** SVD auf projizierten Residuen + empirische Cubature-Methode, um die relevantesten Elemente für das Hyper-Reduced Order Model (HROM) auszuwählen.
- **Phase 5: HROM-Bereitstellung:** Die letzte Phase umfasst die Bereitstellung des validierten HROM, um ihn für reale Anwendungen zugänglich zu machen. Diese Bereitstellung kann in verschiedenen Formen erfolgen, einschließlich Cloud-basierter Plattformen.

Ein Skalierbarkeitstest demonstrierte die Fähigkeit des Workflows, den Konstruktionsprozess von ROMs und HROMs für realistische Modelle zu beschleunigen, die mittelgroße Matrizen erzeugen.

In Summe wurden im Projekt die folgenden Erkenntnisse erzielt:

- **Validierte komplexe Anwendungsfälle:** Es wurde im Projekt erfolgreich von theoretischen Rahmenbedingungen zu praktischen Simulationen übergegangen, die die Feinheiten der Fertigungsabläufe genau erfassen. Durch die Fokussierung auf instationäre Bedingungen konnte eine genauere und dynamischere Darstellung von Fertigungsprozessen ermöglicht werden.
- **Nachgewiesene Echtzeitfähigkeiten:** Die Echtzeit-Einsatzfähigkeit der Modelle wurde unter Beweis gestellt und zeigt ihre Effizienz und Praktikabilität für digitale Zwillinge in der Fertigungsindustrie. Die Integration von High-Performance-Computing-Workflows (HPC) hat den Modellentwicklungsprozess optimiert, schnelle Bewertungen ermöglicht und die Entscheidungsfindung in Echtzeit-Betriebskontexten verbessert.
- **Weiterentwickelte Modellierungsstrategien:** Die Modellierungsstrategien wurden angepasst und verfeinert, um die Komplexität der Fertigungsabläufe besser zu bewältigen. Dazu gehören der Übergang von detaillierten geometrischen Modellen zu vereinfachten, recheneffizienteren Modellen und der Einsatz fortschrittlicher Interpolationsmethoden.

Die erfolgreiche Validierung dieser Anwendungsfälle unterstreicht das Potenzial der entwickelten Modelle, einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie des digitalen Zwillings in der Fertigungsindustrie zu leisten. Mit Blick auf die Zukunft bilden die gewonnenen Erkenntnisse und die entwickelten Methoden eine solide Grundlage für zukünftige Innovationen, die weitere Fortschritte in der Simulation und Analyse komplexer Fertigungsmodelle versprechen.

eFlows4HPC FKZ:16HPC018

Schlussbericht Teil 2

Bearbeiter: Dr. Stefan Boschert, Siemens Technology, Siemens AG, 88748 Garching

1. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts eFlows4HPC wurde die erfolgreiche Anwendung von MOR-Techniken (Model Order Reduction) in verschiedenen Betriebsszenarien gezeigt und der Übergang von konzeptionellen Anwendungsfällen zu praktischen, realen Anwendungen verdeutlicht. Zu den wichtigsten Errungenschaften gehören:

- Validierung von Anwendungsfällen: Demonstration der effektiven Implementierung von stationären und instationären Simulationen, die sich eng an dem realen Verhalten eines Elektromotors orientieren.
- Echtzeitfähigkeiten: Demonstration der Fähigkeit der abgeleiteten Modelle, eine schnelle Entscheidungsfindung in Echtzeit und betriebliche Optimierung in industriellen Umgebungen zu ermöglichen.
- Evolution von Modellierungsstrategien: Reflexion über die strategische Entwicklung von detaillierten Geometrien zu vereinfachten, recheneffizienten Modellen, um die Praktikabilität von Anwendungen für digitale Zwillinge zu verbessern.

Durch die Integration von High-Performance Computing (HPC) für eine effiziente ROM-Erstellung trägt dieses Produkt erheblich zur Technologie der digitalen Zwillinge bei und setzt neue Maßstäbe für die Simulation und Analyse von Mittelspannungsmotoren.

2. Einleitung

2.1. Zweck und Umfang des Projekts

Ziel des Projekts ist es den kompletten Workflow für eine HPC basierte Simulationskette anhand eines realen Anwendungsfalls zu verifizieren. Als Anwendungsfall wurde das thermische Verhalten eines luftgekühlten Mittelspannungsmotors gewählt. Dieser erwärmt sich insbesondere während

des Anfahrens stark, wird aber auch durch die selbst erzeugte Luftströmung im Innern gekühlt. Diesen Prozess zu simulieren, erfordert mit konventionellen Methoden einen hohen simulativen Aufwand. Durch den Einsatz von Modellordnungsreduktion sollen die Modelle möglichst echtzeitfähig gemacht werden. Die Erstellung dieser reduzierten Modelle erfordert nach wie vor einen hohen Rechenaufwand, der aber zeitlich entkoppelt von der Anwendung im Voraus erfolgt. Im Rahmen des Projekts eFlows4HPC wurden die folgenden Fragestellungen bearbeitet

1. Validierung der Implementierung von Anwendungsfällen: Demonstrieren Sie die erfolgreiche Implementierung und Validierung der Anwendungsfälle, die sowohl stationäre als auch instationäre Bedingungen sowie den vollständigen Modellreduktionsprozess umfassen. Dazu gehört die Darstellung der Entwicklung von ersten Simulationen eines Motorabschnitts unter stationären Bedingungen über die umfassende Modellierung instationärer Bedingungen bis hin zur Anwendung von MOR-Techniken.
2. Präsentieren Sie die Echtzeitfähigkeiten der entwickelten Modelle: Heben Sie die Echtzeit-Betriebsfähigkeiten der abgeleiteten Modelle hervor und betonen Sie die Praktikabilität und Machbarkeit von Anwendungen digitaler Zwillinge in industriellen Umgebungen. Dazu gehört die detaillierte Beschreibung des Prozesses des Einsatzes von MOR-Techniken, um effiziente, echtzeitfähige Modelle zu erhalten, die die Entscheidungsfindung und Betriebsoptimierung verbessern.
3. Veranschaulichung der Entwicklung und Optimierung von Modellierungsstrategien: Reflexion über die Entwicklung unserer Modellierungsstrategien von der ersten Entwurfsphase an, einschließlich aller strategischen Änderungen, die vorgenommen wurden, um der Komplexität des Motorbetriebs besser gerecht zu werden. Dies umfasst den Übergang von detaillierten Einzelscheibenmodellen zu umfassenderen und recheneffizienteren generischen Halbmotormodellen und die Integration fortschrittlicher Interpolationsmethoden für den konvektiven Term unter Verwendung von EZyRB.

Der Umfang dieses Ergebnisses umfasst eine detaillierte Analyse der verwendeten Methoden, die Optimierung von Arbeitsabläufen, insbesondere die Integration von High-Performance Computing (HPC) für die ROM-Erstellung, und die praktischen Auswirkungen dieser Fortschritte auf die Branche. Durch die Validierung der Anwendungsfälle und den Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten Modelle zielt dieses Ergebnis darauf ab, einen wesentlichen Beitrag zum Bereich der digitalen Zwillingstechnologie zu leisten und einen Maßstab für zukünftige Innovationen in der Simulation und Analyse von Mittelspannungsmotoren zu setzen.

3. Der Anwendungsfall

Mittelspannungsmotoren sind von zentraler Bedeutung für die Automatisierung von Hochleistungsanwendungen in der Industrie in Sektoren wie Zement, Bergbau, Papier, Metall und Stahl, Chemie sowie Öl und Gas. Zur Veranschaulichung verweisen wir auf die Motoren der Simotics H-compact PLUS-Serie von Siemens, die für ihre signifikanten Abmessungen und ihre Leistung bekannt sind, um die Herausforderungen des Wärmemanagements hervorzuheben, mit denen diese Motortypen aufgrund der Wärme, die sie während des Betriebs erzeugen, konfrontiert sind. Wichtig ist, dass die Simotics H-compact PLUS-Serie zwar als praktisches Beispiel dient, die detaillierten 3D-Simulationen jedoch anhand eines generischen CAD-Modells eines Mittelspannungsmotors durchgeführt werden, um eine breitere Anwendbarkeit und Relevanz zu gewährleisten.

3.1. Das reale Modell

Es ist von entscheidender Bedeutung, die Herausforderung eines effizienten Managements der von diesen Motoren erzeugten Wärme anzugehen, insbesondere wenn sie direkt an das Stromnetz angeschlossen sind oder Umrichter verwenden. Die Simotics H-compact PLUS-Motoren verwenden ein fortschrittliches Kühlkonzept, das die Luft durch Schlitze im Rotor und Stator leitet, um die Wärme effektiv abzuleiten. Diese Konstruktion ist entscheidend, um eine Überhitzung zu verhindern und die Lebensdauer des Motors zu verlängern. +



Abbildung 1: Simotics H-compact PLUS Motor mit oben montiertem Wasserkühler (Wärmetauscher).

Um die in Abbildung 1 hervorgehobene externe Kühlfunktion zu ergänzen, sollten sie den internen Kühlmechanismus berücksichtigen, der durch die Konstruktion des Motors ermöglicht wird.

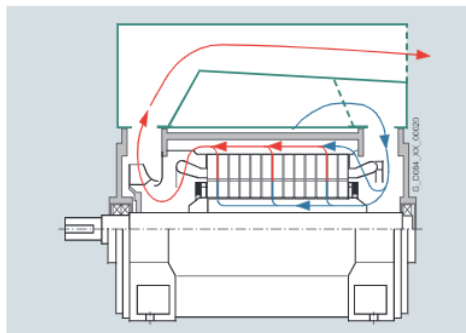


Abbildung 2: Schematische Anströmung des Simotics H-compact PLUS Motors [Sie17].

Abbildung 2 zeigt wie die Luft durch die Schlitze im Rotor und Stator geleitet wird. Diese Abbildung verdeutlicht die interne Kühlstrategie, die den externen Wasserkühler ergänzt und einen umfassenden Überblick über das Thermomanagement des Motors bietet

3.2. Das digitale Modell

Die Entwicklung von digitalen Zwillingen für Mittelspannungsmotoren stellt einen bedeutenden Schritt für das Verständnis und die Optimierung des Betriebs dieser wichtigen Systeme dar. Im Mittelpunkt dieser Weiterentwicklung steht die detaillierte Simulation der betrieblichen und thermischen Dynamik, die durch komplexe CAD-Geometrien innerhalb von Full Order Models (FOMs) ermöglicht wird. Diese Simulationen sind entscheidend für die Erstellung von High-Fidelity-Darstellungen, die das reale Verhalten der Motoren genau widerspiegeln.

Die Präzision, die für diese Simulationen erforderlich ist, stellt erhebliche Rechenanforderungen, insbesondere bei der Analyse der Finite-Elemente-Methode (FEM), bei der eine beträchtliche Anzahl von Elementen für die Genauigkeit erforderlich ist. Diese Komplexität erfordert oft den

Einsatz von High-Performance Computing (HPC), um die Simulationen innerhalb eines machbaren Zeitrahmens zu verwalten. Das Bestreben, Echtzeitanalysen und -feedback für die Betriebsoptimierung zu erreichen, stellt jedoch eine Herausforderung dar, da das Datenvolumen und die Komplexität der Berechnungen selbst die robustesten HPC-Funktionen übersteigen können.

Übergang zu Modellen reduzierter Ordnung, ROMs und HROMs

Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, bieten Reduced Order Models (ROMs) und Hyper-Reduced Order Models (HROMs) eine physikbasierte Lösung. Einen Überblick über diese Methoden gibt [D4.2]. Durch die Vereinfachung der Komplexität des Modells bei gleichzeitiger Beibehaltung der wesentlichen Dynamik des Systems ermöglichen HROMs eine schnelle Simulationsverarbeitung. Diese Effizienz ermöglicht Echtzeitanalysen und schließt die Lücke zwischen dem Bedarf an detaillierten Simulationen und dem Bedarf an schnellen, umsetzbaren Erkenntnissen für betriebliche Entscheidungen und Optimierungen.

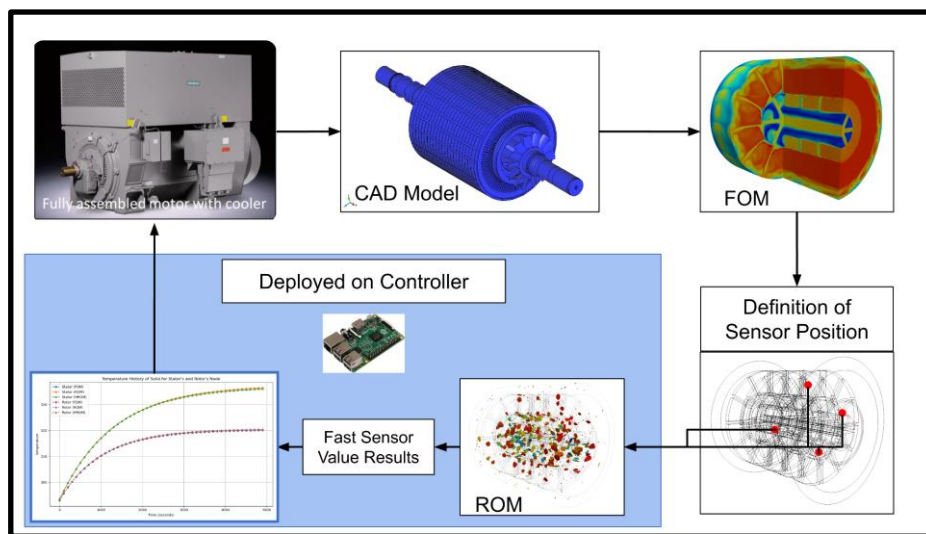


Abbildung 3: Workflow eines automatisierten digitalen Zwillings mit Controller-Integration

Beschreibung: Dieses Diagramm skizziert den Arbeitsablauf von einem realen Motor über seine Darstellung als digitaler Zwilling bis hin zur betrieblichen Anwendung. Beginnend mit dem physischen Motor wird ein CAD-Modell als Grundlage für das FOM verwendet. Das FOM wird dann zu einem ROM verfeinert, das schnell umsetzbare Erkenntnisse generiert. Diese Erkenntnisse werden über eine Steuerung auf den realen Motor übertragen, was die Rolle des ROMs innerhalb eines Steuerungssystem-Setups hervorhebt. Diese Illustration zeigt die dynamische Interaktion zwischen dem physischen Motor und seinem digitalen Gegenstück und beleuchtet die Effizienz- und Entscheidungsverbesserungen, die durch die Technologie des digitalen Zwillings in Echtzeit-Betriebskontexten ermöglicht werden.

Die Notwendigkeit von HPC und ROMs

Die Kombination von HPC und ROMs bildet eine umfassende Strategie für das Management von Mittelspannungsmotoren. HPC wird vor allem dazu benötigt die FOMs auszuwerten, die für die Erstellung der ROMs notwendig sind. Andererseits erfüllen dann die ROMs die Anforderung nach schnellen Ergebnissen in der Anwendung. Zusammen bilden sie so eine hervorragende Umgebung für digitale Zwillinge, die eine eingehende Analyse und Entscheidungsfindung in Echtzeit unterstützen.

Für die Erstellung der physikalischen Modelle wurde wie folgt vorgegangen:

Implementierung der Slide-Mesh-Technologie für den rotierenden Teil des Rotors in 2D.

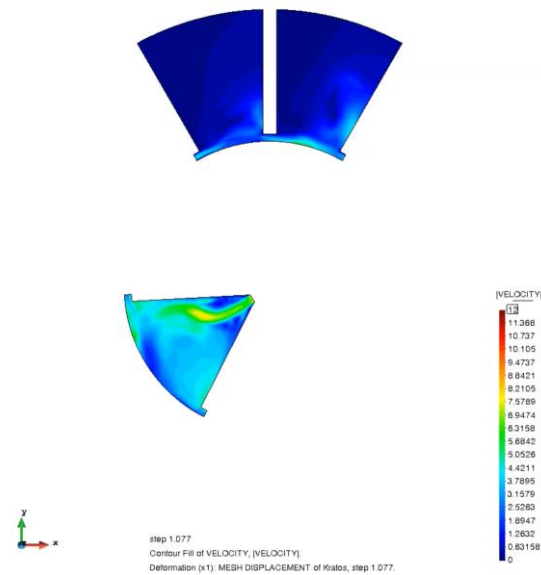


Abbildung 4: 2D-Slide-Mesh-Technologie für eine vereinfachte Scheibenanalyse

Übergang zu einem umfassenderen Ansatz mit einem generischen 3D-CAD-Modell, das die gesamte Halbmotorgeometrie darstellt, um ein vollständigeres Verhalten des Motors zu erfassen.

Entkopplung der konvektiven (Navier-Stokes) und Wärmeübertragungsprobleme bei der Erstellung des konjugierten Wärmeübertragungsmodells und Lösung eines transienten Navier-Stokes-Problems, um einen stationären konvektiven Term für das FOM zu erhalten.

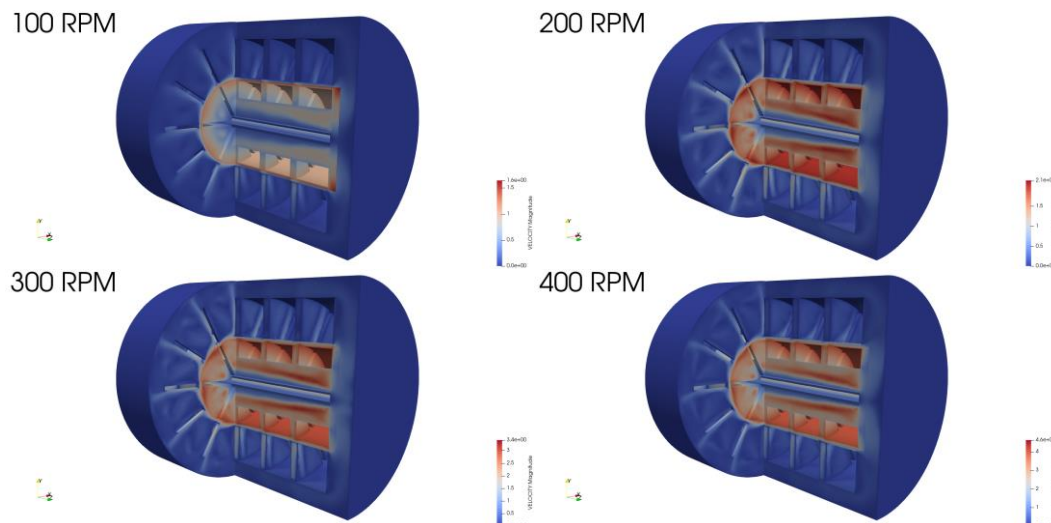


Abbildung 5: Stationäre 3D-Geschwindigkeitsfelder in der Halbmotorgeometrie

Berücksichtigung der unterschiedlichen Eigenschaften von Fluid und Feststoff sowie potenzieller Instabilitäten an ihrer Grenzfläche durch die Anwendung von Domänenzerlegungsmethoden und die Erforschung eines neuartigen ROM-to-ROM-Ansatzes.

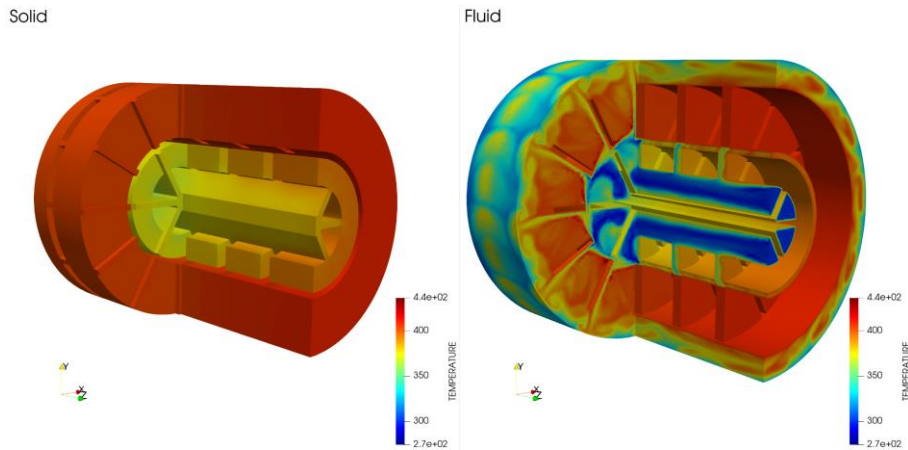


Abbildung 6: 3D-Co-Simulation des Temperaturfeldes für Fluid und Festkörper

3.2.1. HROM: Ein-, Ausgangs- und Echtzeitanwendungen

Im folgenden Abschnitt gehen wir auf die Besonderheiten unseres HROM-Entwicklungsprozesses ein, beschreiben die Ein- und Ausgaben dieser Modelle und erörtern, wie sie die Prognose und Entscheidungsfindung in Echtzeit erleichtern.

Entwicklung hin zu instationären Simulationen

Während die stationäre Lösung zunächst ausreichend erschien, führte die dynamische Natur des Motorbetriebs – gekennzeichnet durch Schwankungen in Drehzahl, Last und Umgebungsbedingungen – zu einer Verlagerung hin zu instationären Simulationen. Diese Änderung war unerlässlich, um das Verhalten des Motors genauer zu erfassen, insbesondere unter Start-Stopp-Bedingungen, die sich entscheidend auf die thermische und betriebliche Leistung auswirken.

Auswählen gegen einen detaillierten einzelnen Disk-Slice

Der ursprüngliche Plan sah vor, eine hochdetaillierte Geometriescheibe einer einzelnen Scheibe zu verwenden. Dieser Ansatz wurde jedoch aus folgenden Gründen überarbeitet:

- **Repräsentative Modellierung:** Die Entscheidung für ein halbmotorisches Modell mit vereinfachter Geometrie bot eine ausgewogenere Lösung, die die Simulation eines breiteren Spektrums von Betriebsszenarien ohne den Rechenaufwand einer hochdetaillierten Schicht ermöglichte.
- **Betriebsrelevanz:** Das Halbmotormodell, das Symmetriebedingungen berücksichtigt, spiegelt die realen Betriebsbedingungen besser wider, bietet eine solide Grundlage für die ROM-Entwicklung und ermöglicht Simulationen verschiedener Drehzahlkonfigurationen und Wärmeerzeugungsszenarien.

Um diese strategische Verschiebung visuell zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 7 unten den Übergang vom ursprünglichen detaillierten Ansatz zu unserer weiterentwickelten Modellierungsstrategie:

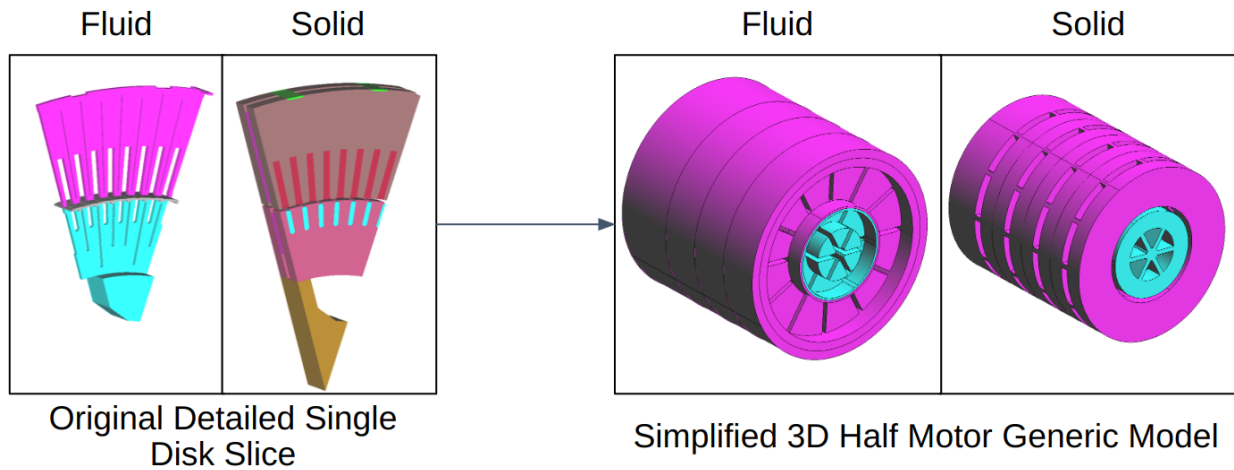


Abbildung 7: Übergang von der detaillierten zur vereinfachten Motormodellierung

Im Anschluss an die Abbildung verdeutlicht die detaillierte Erläuterung des visuellen Inhalts die strategische Verschiebung:

- **Ursprünglicher detaillierter Single Disk Slice:** Unser ursprünglicher Plan sah vor, uns auf einen hochdetaillierten Geometrie-Slice einer einzelnen Disk zu konzentrieren. Wir haben uns jedoch entschieden, diese detaillierte Modellierung nicht zu Beginn zu verfolgen, sondern uns zunächst auf die Etablierung des Workflows zu konzentrieren. Diese strategische Entscheidung ermöglichte es uns, die Entwicklung eines robusten und effizienten Workflows zu priorisieren, der später verschiedene Modellierungskomplexitäten bewältigen konnte.
- **Vereinfachtes generisches 3D-Halbmotormodell:** Weiterentwickelte Modellierungsstrategie, die eine vereinfachte Halbmotorgeometrie verwendet. Dieser Ansatz wurde entwickelt, um das Gesamtverhalten des Motors zu erfassen und eine breitere Perspektive auf seine Betriebsdynamik zu bieten, ohne die Modelltreue wesentlich zu beeinträchtigen.

Parameter für HROM-Training und -Test

Bei der Entwicklung unseres HROM werden zwei primäre Parameter für Training und Test identifiziert: Wärmeentwicklung und RPM (Drehzahl pro Minute). Diese Parameter sind aufgrund der intrinsischen Betriebseigenschaften von Mittelspannungsmotoren von entscheidender Bedeutung.

- **Wärmeentwicklung:** Dieser Parameter ist eine direkte Folge des Betriebs des Motors, insbesondere unter Lastbedingungen oder wenn er direkt an die Stromleitung angeschlossen ist. Die erzeugte Wärme kann zu einer erheblichen thermischen Belastung des Motors führen, die sich insbesondere auf die Spulen auswirkt und möglicherweise zu einem Ausfall führt, wenn sie nicht angemessen behandelt wird. Unser HROM zielt darauf ab, den thermischen Zustand des Motors unter verschiedenen Wärmeerzeugungsszenarien genau vorherzusagen und so proaktive Kühl- und Wärmemanagementstrategien zu ermöglichen.
- **Drehzahl (U/min):** Die Drehzahl des Motors hat direkten Einfluss auf die Kühleffizienz und die Wärmeentwicklung. Höhere Drehzahlen können zu einer erhöhten Wärmeentwicklung führen und gleichzeitig die Selbstkühlfähigkeit des Motors durch einen verbesserten

Luftstrom verbessern. Das HROM ist darauf trainiert, die Beziehung zwischen Drehzahl, Wärmeerzeugung und Kühleffizienz zu verstehen, was die Optimierung des Motorbetriebs ermöglicht, um Leistung und thermische Sicherheit in Einklang zu bringen.

Echtzeit-Prognose und Betriebstests

Durch die Nutzung des HROM können Bediener verschiedene Betriebsszenarien simulieren und die Wärmeerzeugung und die Drehzahlparameter variieren, um deren Auswirkungen auf den thermischen Zustand des Motors vorherzusagen. Diese Fähigkeit ist entscheidend für:

- **Vorhersage der Temperatur an kritischen Punkten:** Das HROM bietet Echtzeit-Vorhersagen der Temperatur an verschiedenen kritischen Stellen innerhalb des Motors, um eine Überhitzung zu vermeiden und die Integrität der Isolierung zu gewährleisten.
- **Bestimmung der Zeit bis zum Erreichen des stationären Zustands:** Zu verstehen, wie schnell der Motor nach einem Stillstand sicher wieder in Betrieb gehen kann oder wie er auf Änderungen der Betriebsparameter reagiert, ist von unschätzbarem Wert, um Ausfallzeiten zu minimieren und Produktionsprozesse zu optimieren.

Die Integration dieser Parameter in unser HROM, gepaart mit den aus den Simulationen gewonnenen Erkenntnissen, bildet die Grundlage für ein leistungsfähiges Echtzeit-Prognosetool. Dieses Tool verbessert nicht nur die Betriebseffizienz von Mittelspannungsmotoren, sondern trägt auch erheblich zu ihrer Langlebigkeit und Sicherheit bei, indem es die wichtigsten Herausforderungen adressiert, die in der Betriebsübersicht solcher Motoren hervorgehoben werden.

Unser Ziel ist es, ein Echtzeit-Prognosetool zu entwickeln, das in der Lage ist, verschiedene Betriebsszenarien zu testen und ein thermisches multiparametrisches ROM für die Simulation verschiedener Startups zu nutzen. Dieses Tool zielt darauf ab, wertvolle Erkenntnisse zur Optimierung der Motorleistung und zur Gewährleistung der Sicherheit zu liefern und die praktische Anwendung unserer weiterentwickelten Modellierungsstrategien zu verkörpern.

Optimierung von Motorsimulationen: Ein fünfstufiger Weg von FOM bis zum HROM-Einsatz

Der Workflow, der für die Erstellung effizienter digitaler Echtzeit-Simulationen unerlässlich ist, durchläuft fünf Phasen:

- **Phase 1: Generierung von Eingabedaten:** FOM-Simulationen - Diese erste Phase ist der Durchführung von FOM-Simulationen (Full Order Model) gewidmet, die als "Trainingskampagne" zur Erfassung wesentlicher Daten dienen. Das Datenmanagement wird durch parallele verteilte Arrays, insbesondere Dislib-Arrays, für eine effiziente Speicherung und einen effizienten Zugriff optimiert.
- **Phase 2: Datenextraktionsphase:** SVD der Eingabedaten - Nach der Erfassung der Simulationsdaten beinhaltet diese Phase die Anwendung der Singulärwertzerlegung (SVD) auf die Eingabedaten, wie von BSC entwickelt und von CIMNE für unseren Workflow angepasst. Ziel ist es, signifikante Muster und Beziehungen innerhalb der Daten zu identifizieren und zu extrahieren, die für den Aufbau einer effektiven ROM-Basis entscheidend sind.
- **Stufe 3: Hyperreduktionstraining:** Mit der etablierten ROM-Basis verlagert sich der Fokus auf das Hyperreduktionstraining. Dieser Prozess beinhaltet die Generierung von Hilfsdaten auf der Grundlage des ROM mit dem Ziel, das Modell weiter zu verfeinern und zu optimieren, indem seine Recheneffizienz gesteigert und die Komplexität des Modells reduziert wird, ohne die Genauigkeit zu beeinträchtigen.

- **Stufe 4: HROM-Elementauswahlstrategie:** SVD auf projizierten Residuen + empirische Cubature-Methode - In dieser fortgeschrittenen Phase wird eine Kombination aus SVD auf projizierten Residuen und der empirischen Cubature-Methode verwendet, um die relevantesten Elemente für das Hyper-Reduced Order Model (HROM) auszuwählen. Diese Auswahlstrategie ist entscheidend, um sicherzustellen, dass das HROM eine hohe Wiedergabetreue zum FOM beibehält und gleichzeitig deutlich effizienter bei der Datenverarbeitung ist.
- **Phase 5: HROM-Bereitstellung:** Die letzte Phase umfasst die Bereitstellung des validierten HROM, um ihn für reale Anwendungen zugänglich zu machen. Diese Bereitstellung kann in verschiedenen Formen erfolgen, einschließlich Cloud-basierter Plattformen oder der Integration in kompakte Geräte, was die Verwendung des Modells in betrieblichen Umgebungen und Entscheidungsprozessen erleichtert.

Die Notwendigkeit von High-Performance Computing (HPC) ist eine Konstante in diesen Phasen, von der Durchführung der ersten FOM-Simulationen über die Durchführung der SVD-Analyse bis hin zur Verwaltung der umfangreichen Datensätze, die mit dem Hyperreduktionstraining verbunden sind. Die Rolle von HPC ist unverzichtbar, wenn es darum geht, die für die ROM-Entwicklung erforderlichen anspruchsvollen Analysen und Berechnungen zu ermöglichen. Der kommende Abschnitt "HPC Workflow for ROM Creation" befasst sich mit dem detaillierten Arbeitsablauf, der im Laufe dieses Projekts entwickelt wurde, und zeigt die integrale Rolle von HPC bei der Erreichung der Projektziele und der Verbesserung der Praktikabilität von digitalen Zwillingsanwendungen für Mittelspannungsmotoren.

3.2.2. Interpolation des konvektiven Terms für unterschiedliche RPMs mittels EZyRB

Um die Anpassungsfähigkeit unseres Modells an unterschiedliche Betriebsgeschwindigkeiten zu verbessern, haben wir eine fortschrittliche Interpolationsmethode für den konvektiven Term implementiert, der aus instationären Navier-Stokes-Simulationen abgeleitet wurde. Diese von SISSA entwickelte Methode nutzt die nicht-intrusiven Modellierungsfunktionen reduzierter Ordnung von EZyRB, einem Python-Paket, das für eine effiziente datengesteuerte Analyse entwickelt wurde. Der Prozess ist unkompliziert und dennoch leistungsstark und erfordert nur die RPM-Parameter und die entsprechenden Geschwindigkeitsfeld-Snapshots aus High-Fidelity-Simulationen.

Nicht-intrusiver Interpolationsprozess mit EZyRB:

ROM.fit-Prozess:

- `Reduction.fit(snapshots)`: Dieser Schritt umfasst das Trainieren der Reduktionsmethode mit den Snapshots der Eingabelösung, um die wesentliche Dynamik des Systems effektiv zu erfassen.
- `Reduction.reduce(snapshots)`: Führt eine Dimensionalitätsreduzierung für diese Snapshots durch, um das Modell zu vereinfachen, ohne dass wichtige Informationen verloren gehen.
- `Interpolation.fit(Parameter, reduzierte Lösungen)`: Die Interpolationsmethode wird dann mit den bekannten RPM-Parametern und den entsprechenden reduzierten Lösungen angepasst.

ROM.predict-Prozess:

- `Interpolation.predict(neuer Parameter)`: Für jeden neuen RPM-Parameter interpoliert diese Funktion, um die entsprechende neue reduzierte Lösung zu finden.

- **Reduction.expand**(neue reduzierte Lösung): Schließlich wird die reduzierte Lösung wieder in den hochdimensionalen Raum expandiert, wodurch die vollständige Geschwindigkeitsfeldlösung für den neuen Parameter bereitgestellt wird.

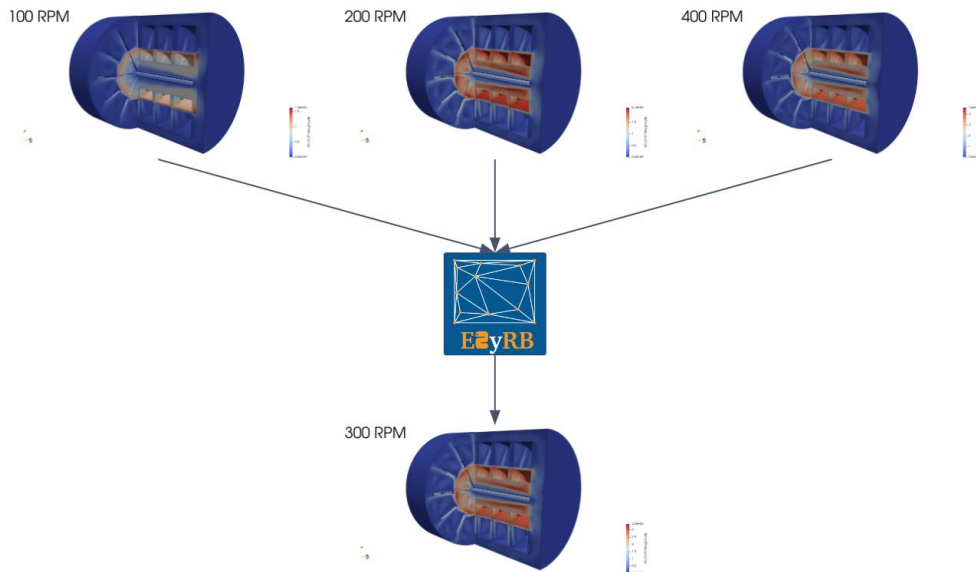


Abbildung 8 Interpolation des konvektiven Terms für verschiedene RPMs mit EZyRB.

Diese Interpolationsstrategie ist entscheidend für die Simulation des Verhaltens des Motors bei Drehzahlen, die von den ersten Simulationen nicht direkt abgedeckt wurden. Es ist wichtig zu verdeutlichen, dass sich die Interpolation von EZyRB zwar auf die Variabilität des konvektiven Terms bei RPM-Änderungen konzentriert, sich aber von den breiteren nicht-intrusiven ROM-Techniken unterscheidet, die von SISSA entwickelt wurden, wie z. B. denen, die RBF mit POD und ANN kombinieren. Diese letztgenannten Methoden sind integraler Bestandteil der umfassenden ROM-Entwicklung des Projekts, während die Anwendung von EZyRB speziell auf die effiziente und genaue Interpolation des konvektiven Terms unter verschiedenen Betriebsbedingungen abzielt.

4.HPC-Workflow für die ROM-Erstellung

Wie bereits erwähnt, umfasst der Aufbau eines HROM von Anfang bis Ende die Phasen 1 bis 5, die jeweils für den Entwicklungsprozess entscheidend sind. Im Gegensatz zu herkömmlichen modularen Ansätzen, bei denen jede Phase sequenziell mit Zwischendatenspeicherung abgewickelt wird, ist unser HPC-Workflow für eine nahtlose End-to-End-Ausführung ausgelegt. Dieser integrierte Ansatz ermöglicht die direkte Eingabe von Trainingsparametern, die Ausführung von Simulationen und den Einsatz von HROM-Modellen, wodurch der Übergang zwischen den Phasen durch paralleles Datenmanagement optimiert wird.

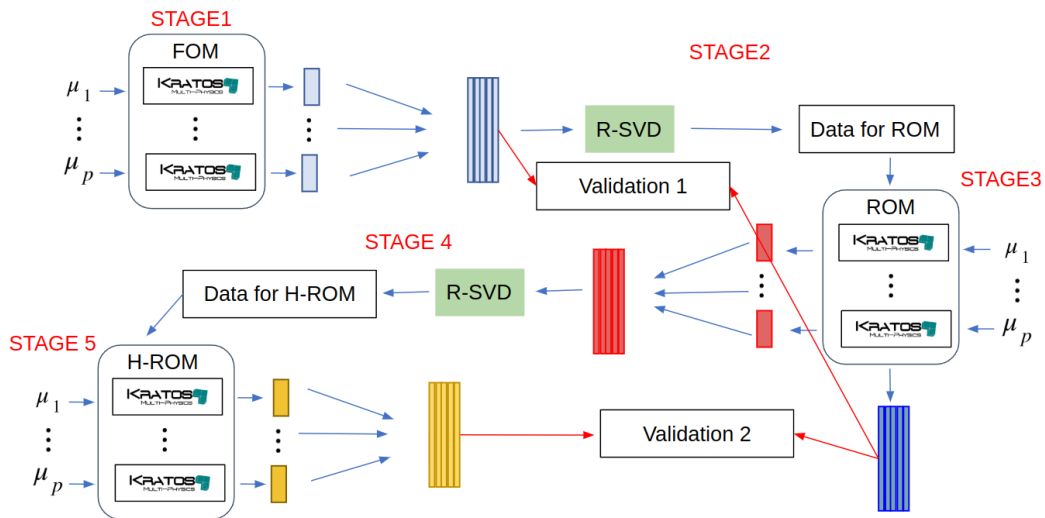


Abbildung 9: Schematischer Überblick über den Workflow für die parallele HROM-Entwicklung

Durch diesen HPC-optimierten Workflow streben wir an, dass jede Phase der HROM-Entwicklung mit maximaler Effizienz und minimalen Ausfallzeiten ausgeführt wird. Durch die parallele Verwaltung aller Daten und die Optimierung von Phase-zu-Stage-Übergängen erreichen wir einen optimierten Prozess, der die Praktikabilität und Anwendbarkeit unserer ROMs in realen Szenarien erheblich verbessert.

4.1. Durchführung des parallelen Workflows für die ROM-Erstellung

Diese Tests wurden in Nordllv2 durchgeführt, einem Supercomputer, der auf Intel SandyBridge-Prozessoren, iDataPlex Compute Racks, einem Linux-Betriebssystem und einer Inband-Verbindung basiert. Es verfügt über 756 IBM dx360 M4 Rechenknoten mit regulärem (32GB), mittlerem (64GB) und hohem (120GB) Speicher.

Um die parallele Leistung des HPC-Workflows zu bewerten, wurde zunächst ein vereinfachtes Beispiel gerechnet. In diesem Beispiel wird die gleiche Physik verwendet, während die Geometrie ein 2D-Schnitt des Anwendungsfalls für Elektromotoren mit weniger Freiheitsgraden ist.

Konkret reduziert die 2D-Geometrie die Anzahl der Freiheitsgrade um den Faktor 20 und die Anzahl der Elemente um den Faktor 60 im Vergleich zum 3D-Modell. Folglich sind die Matrizen, die an jeder der 5 in Abbildung 9 dargestellten Stadien beteiligt sind, für das 2D-Modell kleiner. Indem wir unsere Bewertung mit einer kleineren Geometrie beginnen, können wir Leistungsengpässe innerhalb des Workflows leicht identifizieren und beheben.

Zusätzlich zu der variierenden Anzahl von Rechenknoten berücksichtigt der ROM-Workflow mehrere Parameter. Tabelle 1 veranschaulicht die Parameter, die für die Optimierung innerhalb des ROM-Workflows verfügbar sind. Für unseren ersten Skalierbarkeitstest haben wir uns dafür entschieden, feste Werte für alle Parameter beizubehalten, wie in Tabelle 1 dargestellt, während wir nur die Anzahl der Rechenknoten angepasst haben.

Parameter	Wert	
Anzahl der Rechenknoten	[1,2,4,8,16,32]	
Anzahl der Fälle (μ)	16	
Recheneinheiten pro Aufgabe	16	
Maximale Aufgaben pro Knoten	1	
Physik	Gas	Fest
Toleranz SVD der Lösung	1e-6	1e-6
Anzahl der Partitionen Lösungsmatrix	10	10
Toleranz SVD von Residuen	1e-8	1e-8
Anzahl der Partitionen, Restmatrix	4	4

Tabelle 1 Parameter, die zur Überprüfung der Leistung des ROM-Workflows für die in D4.5 dargestellte 2D-Geometrie verwendet werden

Wir definieren nun die Metriken, die zur Bewertung der Leistung des parallelen Workflows verwendet werden:

$$\text{Beschleunigung} = \frac{T_{\text{serial}}}{T_{\text{parallel}}}$$

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Speedup}}{\text{Number Computing Nodes}}$$

Diese Metriken berücksichtigen die Gesamtzeit, die für den Start des gesamten ROM-Workflows auf einer unterschiedlichen Anzahl von Rechenknoten erforderlich ist, wobei der Fall mit einem Rechenknoten als Basispunkt oder serieller Fall berücksichtigt wird.

Die folgenden Diagramme zeigen die Leistung des ROM-Workflows unter Verwendung der in Tabelle 1 für die 2D-Geometrie gezeigten Parameter.

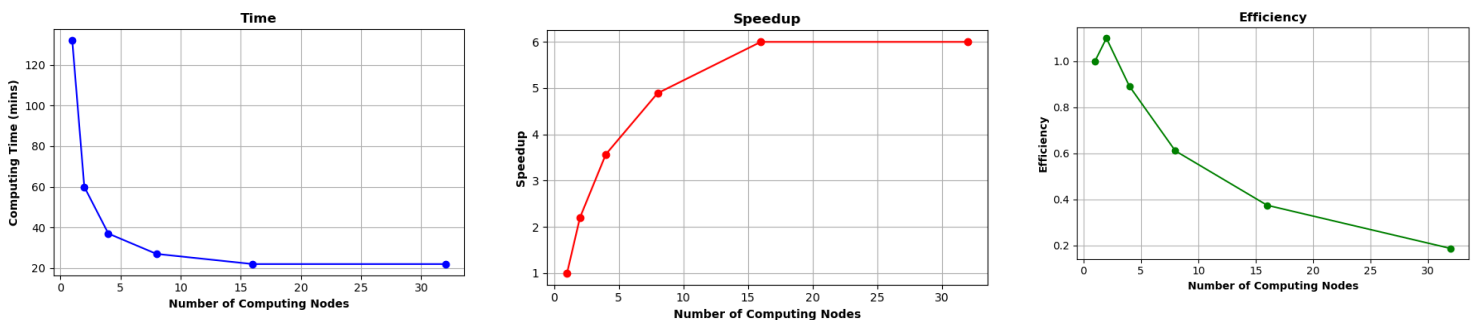


Abbildung 10: Leistungsmetriken für den ROM-Workflow für die in D4.5 dargestellte 2D-Geometrie

Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, liegt die maximale Beschleunigung in der Größenordnung von 6. Diese ist erreicht, wenn die Anzahl der Rechenknoten der Anzahl der gestarteten Simulationen entspricht. Die Erhöhung der Anzahl der Rechenknoten über die Anzahl der zu startenden Simulationen hinaus reduzierte die Rechenzeit nicht weiter.

Während dieser ersten Bewertung konnten wir die folgenden Engpässe im ROM-Workflow feststellen:

- Einige der Matrizen wurden kopiert und gleichzeitig im schnellen Speicher gehalten. Dies verhinderte, dass die Jobs beim ersten Versuch gestartet wurden, selbst wenn der verfügbare Speicher in einem einzelnen Knoten ausreichen sollte, um die Matrixoperationen zu verarbeiten.
- Wir stellten auch fest, dass einige Phasen nacheinander durchgeführt wurden, insbesondere sind die SVDs jedes der physikalischen Modelle unabhängig, aber sie wurden nacheinander durchgeführt. Abhängig von der Größe der beteiligten Matrizen kann jedoch die serielle Berechnung dieses Schritts (Schritt 4 in Figure 9) in Fällen bevorzugt werden, in denen die Größe der beteiligten Matrizen den in den lokalen Knoten verfügbaren Speicher übersteigt.

Wir präsentieren Daten aus einem Modelllauf, der mit Knoten mit hohem Arbeitsspeicher ausgeführt wurde. Diese Knoten, die auf dem Supercomputer NordIIIv2 zugänglich sind, umgehen vorübergehend die Engpässe und ermöglichen es uns, erste Analysen durchzuführen.

Die Parameter, die zum Starten des ROM-Workflows für die 3D-Geometrie verwendet werden, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Parameter	Wert	
Anzahl der Rechenknoten	2 (Knoten mit hohem Arbeitsspeicher)	
Anzahl der Fälle (μ)	2	
Recheneinheiten pro Aufgabe	16	
Maximale Aufgaben pro Knoten	1	
Physik	Gas	Fest
Toleranz SVD der Lösung	1e-6	1e-6
Anzahl der Partitionen Lösungsmatrix	20	20
Toleranz SVD von Residuen	1e-8	1e-8
Anzahl der Partitionen, Restmatrix	40	40

Tabelle 2: Parameter, die zur Überprüfung der Leistung des ROM-Workflows für die 3D-Geometrie in Abschnitt 3.2 verwendet werden

Wie ersichtlich, wurden die Berechnungen für jede Simulation auf ihren dedizierten Rechenknoten durchgeführt. Der zugewiesene Speicher auf jedem Knoten verarbeitet die resultierenden Ausgabematrizen für jede Simulation, die SVD- und die HROM-Berechnungen angemessen.

4.1.1. HPC-Ausführung: Diagramme und Traces

Der Vollständigkeit halber enthält dieser Abschnitt auch Diagramme und Ablaufverfolgungen ausgewählter Aufträge für die 2D- und 3D-Geometrien, die in Abbildung 11 bzw. Abbildung 12 dargestellt sind. Abbildung 11 veranschaulicht die verschiedenen Phasen und ihre gegenseitige Abhängigkeit, ein Diagramm, das sowohl über 2D- als auch über 3D-Geometrien hinweg konsistent ist, unabhängig von der Anzahl der verwendeten Rechenknoten.

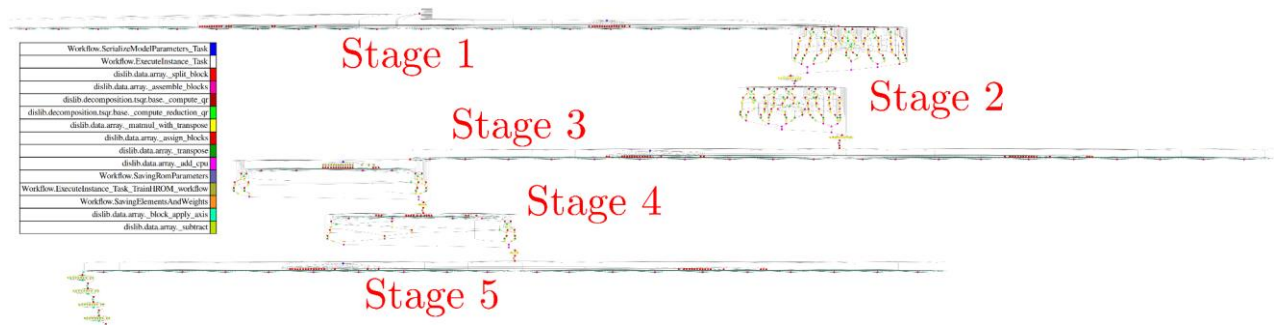


Abbildung 11 Ablaufverfolgung für die Ausführung des ROM-Workflows, die die in den einzelnen Phasen ausgeführten Aufgaben und deren Abhängigkeit zeigt

In Abbildung 12 sind die Ausführungsspuren des Workflows sowohl für 2D- als auch für 3D-Geometrien dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass der End-to-End-Workflow für den 2D-Geometriefall 31 Minuten benötigt, während er sich für den 3D-Geometriefall auf 7 Stunden erstreckt. Eine bemerkenswerte Beobachtung ist der Vergleich der Rechenzeiten zwischen Simulationen und anderen Phasen. Insbesondere bei der 3D-Geometrie, die mit weißen Balken dargestellt wird, nehmen Simulationen einen erheblichen Teil der Gesamtzeit in Anspruch.

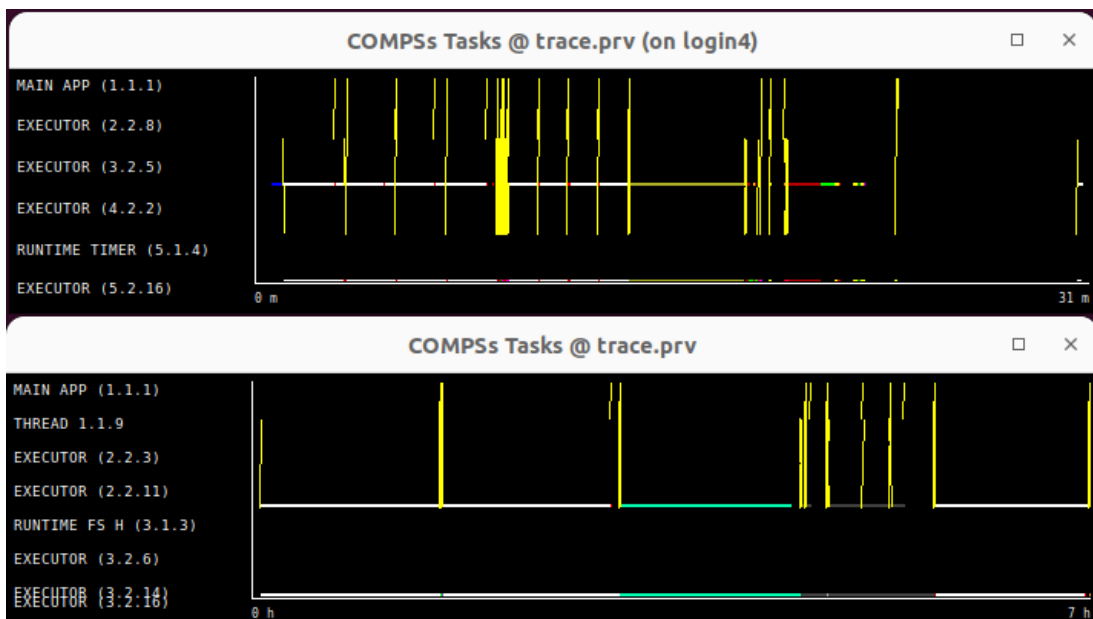


Abbildung 12 Ausführungsablaufverfolgungen zum End-to-End-ROM-Workflow für die 2D- (oben) und 3D-Geometrien (unten).

4.2. Schlussfolgerungen für die Workflow-Leistung

In diesem Abschnitt wurde die Leistung des End-to-End-Workflows teilweise bewertet. Der Skalierbarkeitstest, der an der 2D-Geometrie durchgeführt wurde, demonstrierte die Fähigkeit des Workflows, den Konstruktionsprozess von ROMs und HROMs für realistische Modelle zu beschleunigen, die mittelgroße Matrizen erzeugen. Im Fall der 3D-Geometrie verhinderten jedoch bestimmte Engpässe eine gründliche Leistungsbewertung.

5. Validierung des ROM-Modells

5.1. Überblick über die Erfolgskriterien

Die Validierung der Anwendungsfälle stellt einen bedeutenden Meilenstein in unserem Projekt dar und markiert den erfolgreichen Abschluss unserer Bemühungen, ein umfassendes Modellierungs- und Simulationsframework für Mittelspannungsmotoren zu entwickeln und zu implementieren.

5.1.1. Validierung der Implementierung von Anwendungsfällen:

Vorgehen: Erfolgreicher Übergang von konzeptionellen Anwendungsfällen in die praktische Anwendung, wobei der Schwerpunkt ausschließlich auf instationären Bedingungen lag, um die dynamische Natur des Motorbetriebs widerzuspiegeln. Diese Verschiebung von stationären zu instationären Simulationen unterstreicht unseren adaptiven Modellierungsansatz, der eine genauere Darstellung des motorischen Verhaltens in der realen Welt gewährleistet.

Bei der Validierung der Anwendungsfälle konzentrierten wir uns auf die primäre Größe von Interesse für das Reduced Order Model (ROM) - die Zeit, die benötigt wird, um eine kritische Temperatur unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen zu erreichen. Dieser Fokus auf die zeitliche Dynamik über dem Temperaturfeld selbst erforderte eine Betonung der instationären Zustandsbedingungen, die die transiente Natur motorischer Operationen besser nachahmen. Während stationäre Bedingungen für spezifische Analysen zugänglich bleiben, unterstreichen unsere Ergebnisse die umfassenden Einblicke, die instationäre Simulationen über das Verhalten des Motors im Laufe der Zeit liefern.

Schlussfolgerung: Das Projekt hat sein Ziel erreicht, die Anwendungsfälle zu validieren, indem es die Anwendung von MOR-Techniken in verschiedenen Betriebsszenarien effektiv demonstriert und damit die Fähigkeit der Modelle bestätigt hat, die thermische und betriebliche Dynamik des Motors genau zu simulieren. Unser Ansatz, bei dem instationäre Simulationen Vorrang haben, steht im Einklang mit der Absicht, die betriebliche Effizienz und Sicherheit durch Echtzeitprognosen zu verbessern, und ist ein Beweis für die Anpassungsfähigkeit und Tiefe unserer Modellierungsstrategien.

5.1.2. Echtzeitfähigkeiten entwickelter Modelle:

Ergebnis: Unser Projekt hat die Echtzeit-Einsatzfähigkeit der entwickelten Modelle erfolgreich demonstriert und ihre Effizienz und Praktikabilität für digitale Zwillingsanwendungen unterstrichen. Durch die Integration von High-Performance-Computing-Workflows (HPC) haben wir den Übergang zwischen den Phasen optimiert und ermöglichen so die nahtlose Generierung, Verarbeitung und Bereitstellung von Reduced Order Models (ROMs). Diese Optimierung ist entscheidend, um schnellere Simulationszeiten zu erreichen und uns unserem Ziel der Echtzeitanalyse und -prognose näher zu bringen.

Echtzeit-Anwendungskontext: Im Zusammenhang mit dem Motorbetrieb kann das Erreichen eines stationären Zustands in der Regel etwa 4 bis 5 Stunden dauern. Die ursprünglichen Full Order Models (FOM) spiegelten diese Dauer wider, was sie für die Entscheidungsfindung in Echtzeit unpraktisch machte. Mit einer Wall-Clock-Beschleunigung von ca. 3,22 haben unsere HROMs diese Simulationszeit jedoch auf etwa 1 Stunde reduziert. Diese Verbesserung erreicht zwar nicht das ideale Szenario, bringt unser Ziel jedoch erheblich voran, indem sie zeitnahe Erkenntnisse liefert, die zuvor innerhalb des Betriebszeitrahmens nicht erreichbar waren.

Schlussfolgerung: Das Projekt hat seine Erfolgskriterien für den Nachweis der Echtzeitfähigkeit erfüllt, wobei die entwickelten Modelle die Entscheidungsfindung und die betrieblichen Optimierungsprozesse deutlich verbessern. Dieser Erfolg unterstreicht das Potenzial unserer Modelle, einen sinnvollen Beitrag zu industriellen Anwendungen zu leisten und ein robustes Werkzeug für Echtzeitanalysen und Prognosen zu bieten.

Ausblick: Obwohl die derzeitige Beschleunigung von 3,22 Sekunden hinter dem Ideal zurückbleibt, stellt sie einen bedeutenden Schritt in Richtung unseres Ziels einer Echtzeitprognose dar. Der Hauptfaktor, der unsere Beschleunigung einschränkt, ist die Verwendung eines umfassenden komplementären Netzes an der Grenzfläche zwischen Fluid und Festkörper, das für genaue Simulationen erforderlich ist, sich aber auf die Recheneffizienz auswirkt. Da wir unseren Ansatz so verfeinern, dass wir uns nur auf die wesentlichen Elemente konzentrieren, erwarten wir erhebliche Verbesserungen bei der Beschleunigung. Detaillierte Pläne für diese Optimierungen und ihre erwarteten Auswirkungen werden im Abschnitt "Future Works" untersucht, um ein effizienteres Modell vor der abschließenden Präsentation von eFlows4HPC und in unserer bevorstehenden gemeinsamen Veröffentlichung vorzustellen.

5.1.3. Entwicklung und Optimierung von Modellierungsstrategien:

Ergebnis: Die strategischen Änderungen, die an unserem ursprünglichen Modellierungsansatz vorgenommen wurden, einschließlich der Einführung der nicht-intrusiven Interpolationsmethode für den konvektiven Term und der Optimierung von HPC-Arbeitsabläufen, haben unsere digitale Zwillingsstechnologie bereichert. Die Umstellung auf die Verwendung eines vereinfachten generischen 3D-Halbmotormodells für umfassendere Simulationen von Betriebsszenarien ist ein Beispiel für unser Engagement, unsere Strategien weiterzuentwickeln, um komplexe Modellierungsherausforderungen zu bewältigen.

Es ist wichtig anzuerkennen, dass das Projekt nicht wie ursprünglich geplant den 3D-Ausschnitt einer Scheibe mit detaillierter Geometrie lieferte. Diese Entscheidung wurde durch die zunehmende Komplexität der Physik des Problems beeinflusst, die über den primären Rahmen des

Projekts hinausging und sich auf die Etablierung eines HPC-Workflows für Reduced Order Models (ROMs) konzentrierte. Die grundlegende Technologie für die Analyse einer Scheibenscheibe wurde jedoch erfolgreich in 2D entwickelt, was die Voraussetzungen für die zukünftige Erforschung der 3D-Version schafft. Dieser Bereich bleibt auch nach Abschluss des Projekts eFlows4HPC ein vielversprechender Weg für die weitere Forschung und Entwicklung.

Schlussfolgerung: Das Projekt hat seine Modellierungsstrategien erfolgreich weiterentwickelt und optimiert, indem es sich an den ursprünglichen Zielen orientiert und sich gleichzeitig an die Feinheiten der Motorsimulation angepasst hat. Diese Fortschritte bestätigen nicht nur unseren Ansatz, sondern setzen auch einen neuen Maßstab für zukünftige Innovationen in der digitalen Zwillings-technologie für Mittelspannungsmotoren.

Insgesamt konnten wir den umfassenden und innovativen Ansatz zur Modellierung und Simulation von Mittelspannungsmotoren bestätigen und erfüllen damit die zu Beginn des Projekts gemachten Versprechen. Die erfolgreiche Integration von HPC-Workflows für die ROM-Erstellung und die strategische Weiterentwicklung unserer Modellierungstechniken unterstreichen den Beitrag des Projekts auf diesem Gebiet und ebnen den Weg für zukünftige Entwicklungen und Anwendungen.

5.2. Beschleunigung, Ressourcen, Genauigkeit und Prognosen

Beschleunigung

Während die Metriken "Wall-Clock" und "CPU-Time Speed Up" (Tabelle 3) ein klares Bild der Effizienzgewinne liefern, die durch die Verwendung von Reduced Order Models (ROMs) in Bezug auf die Zeitersparnis erzielt werden, ist es ebenso wichtig, die Auswirkungen dieser Modelle auf die Rechenressourcen zu berücksichtigen. Die Effizienz von ROMs beschränkt sich nicht nur auf die Beschleunigung von Simulationsprozessen. Es erstreckt sich auch auf eine signifikante Reduzierung der Rechenressourcen, die für die Durchführung dieser Simulationen erforderlich sind. Dieser Aspekt ist entscheidend bei der Bereitstellung von Modellen in Umgebungen mit begrenzter Rechenkapazität, wie z. B. Edge-Geräten oder mobilen Plattformen, bei denen sowohl die Geschwindigkeit als auch die Ressourcenoptimierung im Vordergrund stehen.

Physik	Wall-clock-Geschwindigkeit erhöhen	CPU-Zeit-Beschleunigung
Gas + Fest	3.22	39.19

Tabelle 3: Vergleichende Analyse der Recheneffizienz zwischen FOM und ROM

Erklärung der Begriffe

- **Wall-Clock-Geschwindigkeit erhöhen:** Diese Metrik stellt den Faktor dar, um den die Gesamtzeit vom Start bis zum Ende einer Simulation reduziert wird, wenn das Reduced Order Model (ROM) im Vergleich zum Full Order Model (FOM) verwendet wird. Zum Beispiel bedeutet eine 10-fache Wandtakt-Beschleunigung für die Fluidphysik, dass das, was im FOM 10 Minuten dauerte, jetzt mit dem ROM nur noch 1 Minute dauert. Dieses Measure umfasst alle Aspekte des Simulationsprozesses, z. B. Initialisierung, Berechnung, Warten auf Ressourcen und Ausgabegenerierung.

- **CPU-Zeitbeschleunigung:** Diese Metrik gibt den Reduktionsfaktor der reinen Rechenzeit an, die von der CPU benötigt wird, um die Simulationsaufgaben auszuführen, wenn ROM anstelle von FOM verwendet wird. Eine CPU-Zeitbeschleunigung von 50x für die Fluidphysik deutet darauf hin, dass der Rechenaufwand, für den die CPU ursprünglich 50 Minuten für die Verarbeitung im FOM benötigte, jetzt mit dem ROM in nur 1 Minute abgeschlossen ist. Diese Kennzahl konzentriert sich auf die Erstellungszeit, die Projektionszeit, die Lösungszeit und die Zeit, um die Ergebnisse wieder auf die Feinbasis zu projizieren, wobei Leerlaufzeiten oder Wartezeiten, die nicht direkt mit der Rechenarbeit zusammenhängen, ausgeschlossen werden.

Auswirkungen auf die Rechenressourcen

Die Effizienzgewinne durch den Übergang zu Reduced Order Models (ROMs) gehen über die bloße Beschleunigung der Simulationszeiten hinaus. Sie verändern die rechnerische Ressourcenlandschaft grundlegend. Der Schlüssel zu diesen Effizienzsteigerungen liegt in der erheblichen Reduzierung sowohl der Matrixgröße als auch der Anzahl der für die Simulationen erforderlichen Elemente. Diese Verschiebung beschleunigt nicht nur die Berechnungen, sondern reduziert auch den Bedarf an Arbeitsspeicher, CPU/GPU-Rechenleistung und Gesamtsystemressourcen erheblich (Tabelle 4). Durch die Untersuchung der spezifischen Auswirkungen auf die Matrixgröße und die Anzahl der Elemente können wir besser verstehen, wie ROMs solche Ressourceneffizienzen erreichen, und die breiteren Auswirkungen auf ihren Einsatz in verschiedenen Computerumgebungen untersuchen.

Aspekt	Typ der Physik	BFM	ROM	Anmerkung
Größe der Matrix	Gas	843817 x 843817	16 x 16 cm	Anmerkung 1: Die Reduzierung der Matrixgröße von FOM auf Galerkin ROM verringert den Speicherverbrauch drastisch, da kleinere Matrizen weniger Speicherplatz benötigen.
	Fest	796547 x 796547	9 x 9 cm	
Anzahl der Elemente	Gas	4508372	402 (ausgewählt)	Hinweis 2: Eine reduzierte Elementanzahl in ROMs senkt den Rechenaufwand.
	Fest	4656929	206 (ausgewählt)	

Tabelle 4: Ressourcenauslastung in FOM- vs. ROM Simulationen

Erläuterungen

- Hinweis 2: Speicherauslastung - Die Reduzierung der Matrixgröße von FOM auf Galerkin ROM verringert die Speicherauslastung drastisch, da kleinere Matrizen weniger Speicherplatz benötigen. Diese Effizienz ist entscheidend für Anwendungen, bei denen der Arbeitsspeicher ein limitierender Faktor ist, so dass komplexere Simulationen auf Hardware mit begrenzten Ressourcen ausgeführt werden können.

- Anmerkung 1: Rechenkosten und Elementanzahl - Die Anzahl der Elemente in ROMs wird erheblich reduziert, was die Rechenkosten direkt senkt, indem die Anzahl der für die Montage- und Lösungsphasen erforderlichen Berechnungen begrenzt wird. Für das ROM sind nur 402 ausgewählte Elemente (für Fluid) und 9x9-Matrizen (für Volumenkörper) direkt in die Baugruppenberechnungen einbezogen, was die Effizienz des ROM-Ansatzes unterstreicht.
- Zusätzlicher Kontext zum komplementären Netz - Während das ROM die Anzahl der Elemente, die aktiv an den Berechnungen beteiligt sind, erheblich reduziert, ist es wichtig, ein komplementäres Netz beizubehalten, um den Informationsaustausch an der Schnittstelle zwischen festem und flüssigem Bereich zu erleichtern. Dieses Netz, das aus 1.495.347 Elementen für Fluide und 1.525.676 Elementen für Festkörper besteht, ist entscheidend für die genaue Modellierung der Wechselwirkungen zwischen diesen Bereichen. Obwohl dieses komplementäre Netz die Gesamtrechenlast erhöht, ist sein Vorhandensein von entscheidender Bedeutung, um die Genauigkeit und Genauigkeit der ROM-Simulationen bei der Erfassung der komplexen Dynamik des Systems zu gewährleisten. Die Notwendigkeit dieses Meshes unterstreicht das Gleichgewicht zwischen Effizienz und Genauigkeit bei der ROM-Entwicklung, insbesondere bei Multiphysik-Simulationen, bei denen Schnittstelleninteraktionen eine entscheidende Rolle spielen.

Genauigkeit beim Training und bei der Vorhersage von Szenarien für ROMs

Um die Leistung von Reduced Order Models (ROMs) in Bezug auf die Genauigkeit zu bewerten, konzentrieren wir uns auf zwei kritische Aspekte: Konsistenz in Trainingsszenarien und Prognosefähigkeit in Testszenarien. Diese Aspekte sind entscheidend für die Bewertung der Zuverlässigkeit und Vorhersagekraft des ROM über verschiedene Physiktypen hinweg, insbesondere in der Fluid- und Festkörperphysik.

Aspekt	Typ des Szenarios	Genauigkeit der Strömungsphysik	Genauigkeit der Festkörperphysik
Konsistenz	Ausbildung	0.00708	0.00713
Prognose	Test	0.00267	0.00205

Tabelle 5: Genauigkeit und Vorhersageleistung in ROM-Anwendungen

- Konsistenz (Training): Diese Metrik bewertet die Fähigkeit des ROMs, die während der Trainingsphase in Full Order Models (FOMs) beobachteten Ergebnisse genau zu replizieren. Hohe Genauigkeitsstufen, die denen der ursprünglichen FOMs nahekommen, weisen auf die Zuverlässigkeit des ROMs in Szenarien hin, die denen ähneln, in denen es trainiert wurde.
- Prognose (Test): Diese Metrik bewertet die Fähigkeit des ROMs, Systemreaktionen in neuen oder unbekanntem Szenarien genau vorherzusagen. Die hohe Prognosegenauigkeit zeigt den Nutzen des ROM in Anwendungen, die eine prädiktive Analyse und Entscheidungsfindung auf der Grundlage von Szenarien erfordern, die während der Trainingsphase nicht abgedeckt wurden.

Visuelle Analyse anhand numerischer Berechnungen

Um die Leistung des ROM weiter zu veranschaulichen, präsentieren wir drei Abbildungen, die das ROM visuell mit dem FOM unter bestimmten Bedingungen vergleichen:

- Aufbau des Trainingszenarios:** Das ausgewählte Trainingszenario beinhaltet eine Wärmeerzeugungsrate von 33 kW/m^3 bei 200 U/min , was repräsentativ für die Bedingungen ist, unter denen das ROM trainiert wurde. Abbildung 13 vergleicht die Temperaturreaktionen an einem bestimmten Sensorknoten und zeigt so die Genauigkeit und Konsistenz des ROMs. Abbildung 14 zeigt die Temperatur über die Zeit am Sensorknoten und unterstreicht die Fähigkeit des ROMs, die Temperaturdynamik des FOM genau anzupassen.

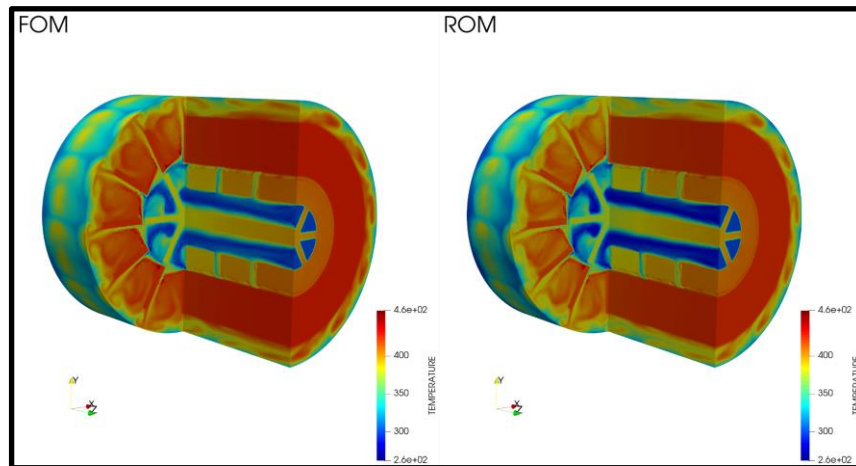


Abbildung 13: FOM vs. ROM Temperaturvergleich im Trainingszenario

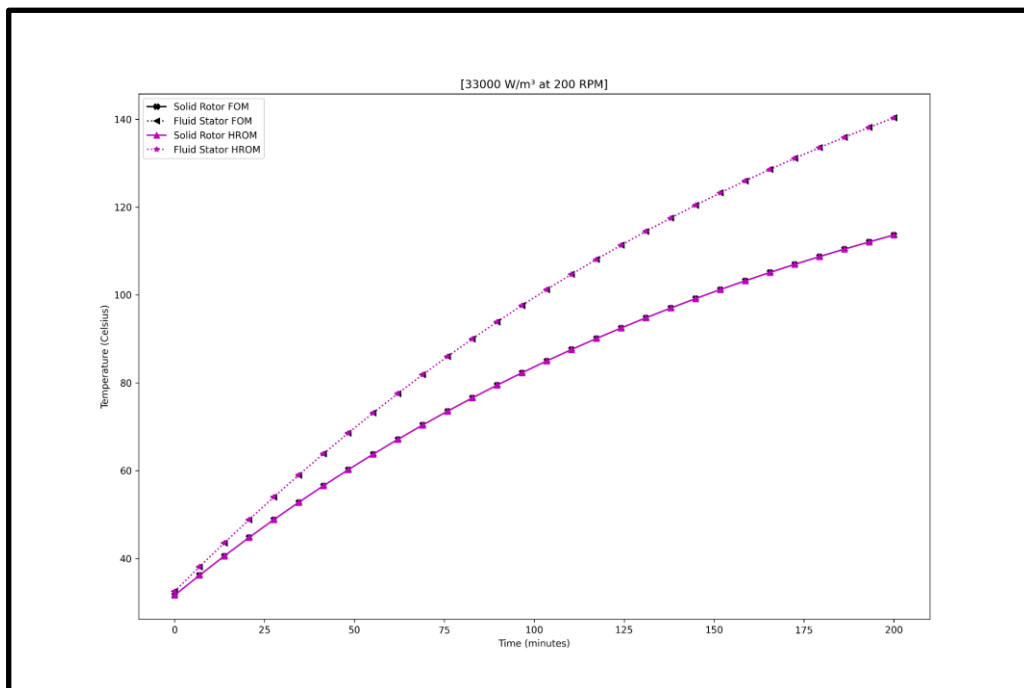


Abbildung 14: Temperaturprofil am Sensorknoten - Validierung des HROM für das Trainingszenario: 33 kW/m^3 bei 200 U/min .

- Aufbau des Vorhersageszenarios:** Das Vorhersageszenario testet die Vorhersagegenauigkeit des ROM unter neuen Bedingungen mit einer

Wärmeerzeugungsrate von $41,5 \text{ kW/m}^3$ bei 250 U/min . Abbildung 15 zeigt die Temperaturentwicklung im Laufe der Zeit und veranschaulicht die Vorhersagegenauigkeit des ROM unter ungewohnten Bedingungen.

Diese Zahlen unterstreichen zusammen mit der vergleichenden Analyse die Wirksamkeit des ROM nicht nur als effizientes Rechenwerkzeug, sondern auch als zuverlässige und prädiktive Modellierungslösung. Durch die hohe Genauigkeit sowohl bei der Replikation bekannter Verhaltensweisen als auch bei der Vorhersage von Ergebnissen unter neuen Bedingungen erweisen sich ROMs sowohl in der akademischen Forschung als auch in praktischen Anwendungen als unschätzbare Bereicherung, insbesondere in Szenarien mit Fluid- und Festkörperphysik.

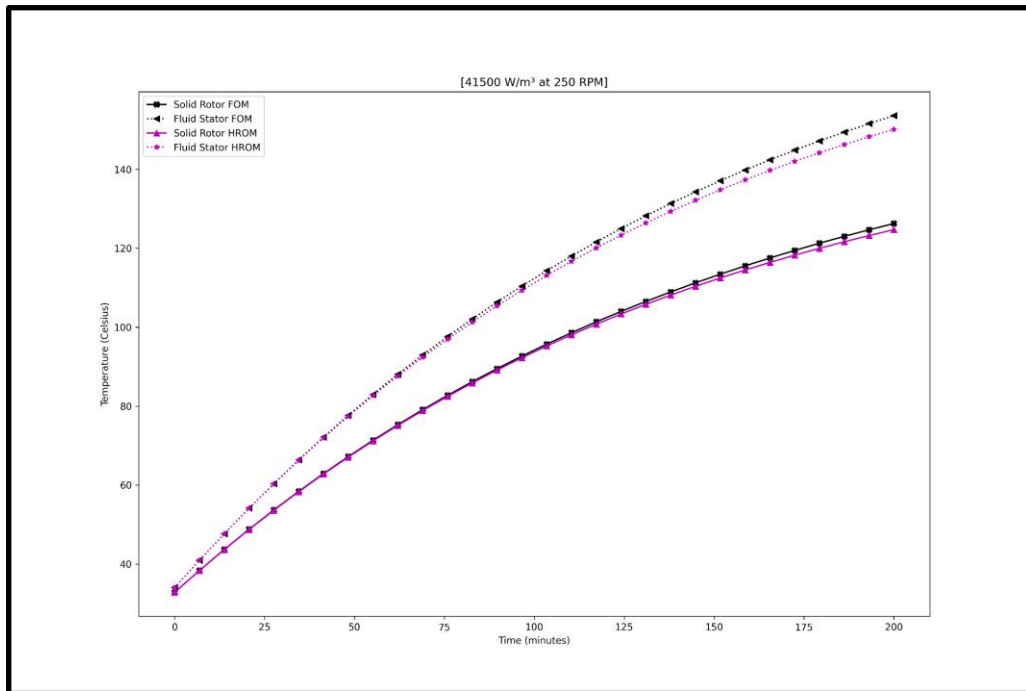


Abbildung 15: Temperaturprofil am Sensorknoten - Validierung des HROM für das Vorhersageszenario: $41,5 \text{ kW/m}^3$ bei 250 U/min .

6. Vorteile des eFlows4HPC-Software-Stacks

Der eFlows4HPC-Software-Stack bietet eine umfassende Suite von Technologien, die entwickelt wurden, um die Effizienz, Skalierbarkeit und Effektivität von High-Performance-Computing-Workflows zu verbessern, insbesondere im Zusammenhang mit den Zielen unseres Projekts. Im Folgenden finden Sie eine Erläuterung der Schlüsselkomponenten dieses Stacks und ihrer Beiträge:

- **PyCOMPSs:** PyCOMPSs dient als Rückgrat für die Einführung paralleler Arbeitsabläufe und ist maßgeblich an der Orchestrierung der verteilten Ausführung unserer Simulations- und Modellierungsaufgaben beteiligt. Die Fähigkeit, die Komplexität der parallelen Programmierung zu abstrahieren, ermöglicht es unserem Team, sich auf die anstehenden wissenschaftlichen Herausforderungen zu konzentrieren, die Entwicklungszeit erheblich zu verkürzen und die Recheneffizienz zu verbessern. Durch die Nutzung von PyCOMPSs stellen wir sicher, dass die verschiedenen Phasen unseres HROM-Entwicklungsprozesses nahtlos integriert sind, was einen reibungslosen Übergang von der Datengenerierung zur Modellbereitstellung ermöglicht.
- **Dislib:** Dislib ist in den HPC-Workflow integriert und bietet eine skalierbare Machine Learning-Bibliothek, die speziell für verteilte Umgebungen entwickelt wurde. Der Einsatz in

unserem Projekt ist entscheidend für den Umgang mit großen Datensätzen und die Durchführung komplexer Datenverarbeitungsaufgaben, wie z. B. Dimensionalitätsreduktion und Interpolationsschritte. Die effizienten Algorithmen und parallelen Verarbeitungsfunktionen von Dislib ermöglichen es uns, die umfangreichen Daten, die während der Simulationen generiert werden, zu verwalten und zu analysieren und so die Gesamtleistung unseres ROM-Entwicklungsprozesses zu verbessern.

- **Kratos Multiphysik:** Das Herzstück unserer Simulationen und der intrusiven Modellierung reduzierter Ordnung ist die Kratos Multiphysik. Dieses leistungsstarke Framework ermöglicht die detaillierte und genaue Simulation verschiedener physikalischer Phänomene, einschließlich der komplexen Strömungsdynamik und thermischen Wechselwirkungen in Mittelspannungsmotoren. Die Vielseitigkeit und Robustheit von Kratos Multiphysics machen es zu einem unverzichtbaren Werkzeug für die Generierung von High-Fidelity-Daten, die für das ROM-Training und die Validierung erforderlich sind, um sicherzustellen, dass unsere Modelle die realen Bedingungen genau widerspiegeln.
- **EZyRB:** EZyRB ist auf die Interpolation des Geschwindigkeitsfeldes für den konvektiven Term spezialisiert und bietet einen nicht-intrusiven Ansatz für die Modellierung reduzierter Ordnung. Diese Open-Source-Python-Bibliothek, die von SISSA entwickelt wurde, ermöglicht es uns, Geschwindigkeitsfelder bei neuen Betriebsparametern (RPMs) effizient zu extrapolieren und so die Anpassungsfähigkeit unserer Modelle an verschiedene Bedingungen zu verbessern, ohne dass zusätzliche kostspielige Simulationen erforderlich sind. Die datengesteuerte Methodik von EZyRB ergänzt unseren Arbeitsablauf, indem sie eine flexible und leistungsstarke Lösung für die Aktualisierung des konvektiven Terms basierend auf unterschiedlichen Motordrehzahlen bietet.
- **PyEDDL:** Obwohl PyEDDL im Zusammenhang mit der Motor-Fallstudie in diesem Lieferwerk nicht direkt erwähnt wird, hat es eine zentrale Rolle in einem parallelen Aspekt unseres Projekts gespielt, der sich auf die nicht-intrusive Modellierung reduzierter Ordnung für ein konjugiertes Wärmeübertragungspipeline-Problem konzentriert. Diese Deep-Learning-Bibliothek ist maßgeblich an der Entwicklung und dem Training neuronaler Netze beteiligt, die das Verhalten in Szenarien vorhersagen sollen, die von unseren Simulationen nicht explizit abgedeckt werden. Speziell für die konjugierte Wärmeübertragungspipeline ermöglichte PyEDDL die Erforschung fortschrittlicher Techniken des maschinellen Lernens zur Vorhersage des thermischen Verhaltens unter verschiedenen Bedingungen und demonstrierte die Fähigkeit der Bibliothek, die Vorhersagemodellierung erheblich zu verbessern. Die erfolgreiche Integration von PyEDDL in diesen separaten Testfall zeigt das Potenzial der Kombination traditioneller Simulationsmethoden mit künstlicher Intelligenz zur Lösung komplexer technischer Probleme und ebnet den Weg für innovative Ansätze in zukünftigen Anwendungen der digitalen Zwillingstechnologie.

7. Herausforderungen, Grenzen und zukünftige Arbeit

Auf unserem Weg zur Verbesserung der Erstellung digitaler Zwillinge für Motoren haben wir eine Reihe von Herausforderungen und Einschränkungen überwunden, die jeweils wertvolle Einblicke in die Komplexität der Erstellung effizienter und genauer Simulationen bieten.

Der Weg von FOM zu optimiertem HROM

Als Ausgangspunkt dient uns das Full Order Model (FOM), das die komplizierten Details der physikalischen und betrieblichen Eigenschaften des Motors erfasst. Die Komplexität dieses

Modells ist in Abbildung 16 visuell dargestellt und zeigt das umfangreiche Netz, das erforderlich ist, um das Verhalten des Motors genau zu simulieren.

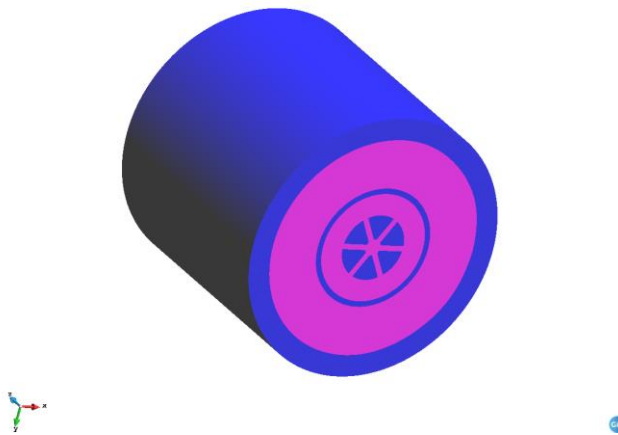


Abbildung 16: Komplexität des FOM-Netzes

Mit dem Übergang vom FOM verlagert sich unser Fokus auf Hyperreduktionstechniken, die darauf abzielen, die Essenz des Modells zu destillieren und gleichzeitig seine Vorhersagegenauigkeit zu erhalten. Dieser Prozess führt zu einer deutlich reduzierten Menge von Elementen, die für das Reduced Order Model (ROM) von entscheidender Bedeutung sind. Die ausgewählten Elemente, die in Abbildung 17 hervorgehoben sind, stellen die Kernkomponenten dar, die die Dynamik der Simulation steuern.

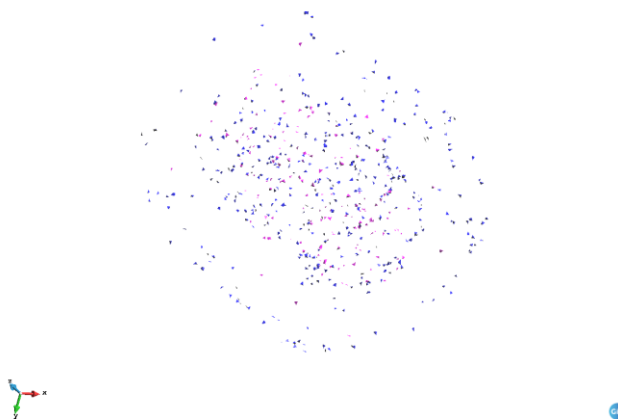


Abbildung 17: HROM Ausgewählte Elemente

Die Herausforderung ergibt sich jedoch bei der Betrachtung der Grenzfläche zwischen dem fluiden und dem festen Bereich. Um eine genaue Kommunikation der Informationen über diese Domänen hinweg zu gewährleisten, pflegen wir zunächst ein umfassendes komplementäres Netz. Unser Ziel ist es, diesen Ansatz zu verfeinern und nur die wesentlichen Elemente der Benutzeroberfläche beizubehalten. Diese Optimierung ist entscheidend für die Verbesserung der Recheneffizienz, ohne die Genauigkeit und Konvergenz des Modells zu beeinträchtigen. Der aktuelle Zustand des

Interface-Meshes und unsere Vision für dessen Optimierung sind in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt.

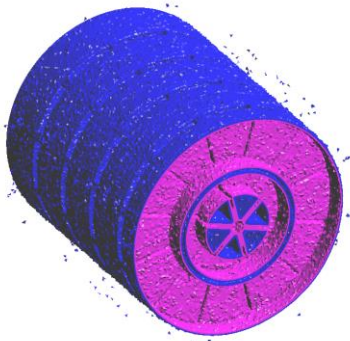


Abbildung 18: HROM mit vollständigem Interface Mesh



Abbildung 19: Vision für ein optimiertes HROM-Netz

Erwartete Effizienzgewinne

Vorarbeiten und Tests deuten darauf hin, dass wir durch diesen Optimierungsprozess erhebliche Beschleunigungen erzielen können. Die folgende Tabelle zeigt die erwarteten Beschleunigungen, indem die ursprünglichen FOM-Zeiten mit den optimierten HROM-Zeiten verglichen werden. Diese Berechnungen unterstreichen unsere Fortschritte in Richtung Echtzeit-Simulationsfähigkeiten, einem entscheidenden Meilenstein für die praktische Anwendung der digitalen Zwillingstechnologie in industriellen Umgebungen. Tabelle 6 zeigt die berechneten Beschleunigungen sowohl für die Wandtaktzeit als auch für die CPU-Zeit und veranschaulicht die potenziellen Effizienzgewinne durch unsere Optimierungsbemühungen.

Beschleunigungstabelle:

Physik	Wanduhr-Geschwindigkeit erhöhen	CPU-Zeit-Beschleunigung
Flüssig + Feststoff	154.78	1539

Tabelle 6: Erwartete Beschleunigungserfolge: FOM-vs. ROM mit optimiertem Netz

Durch diese visuellen und quantitativen Erkundungen stellen wir uns den inhärenten Herausforderungen, Recheneffizienz und Simulationsgenauigkeit in Einklang zu bringen. Die Zahlen fügen sich nahtlos in unsere Erzählung ein und verdeutlichen die Entwicklung unseres Modellierungsansatzes und die strategischen Entscheidungen, die unsere Optimierungsbemühungen leiten.

Ausblick

Unsere zukünftige Arbeit ist darauf ausgerichtet, die derzeitigen Einschränkungen zu beheben, mit besonderem Fokus auf die weitere Verfeinerung des Schnittstellennetzes. Indem wir uns nur auf die notwendigen Elemente für eine genaue Domain-Kommunikation konzentrieren, wollen wir noch größere Beschleunigungen erreichen und die Grenzen des Möglichen mit der ROM-Technologie erweitern. Diese kontinuierliche Entwicklung, gepaart mit strengen Tests auf Konvergenz und Genauigkeit, wird entscheidend sein, um das volle Potenzial unserer digitalen Zwillingstechnologie für Motoren auszuschöpfen.

Erweiterung des Horizonts: Modulare Arbeitsabläufe, detaillierte Modellierung und Netzanpassung

Wenn wir über den aktuellen Umfang unseres Projekts hinausblicken, haben sich mehrere Schlüsselbereiche als entscheidend für unseren anhaltenden Erfolg und unsere Innovation in der digitalen Zwillingstechnologie herauskristallisiert. Diese Bereiche stellen nicht nur die nächsten Schritte in unserer technologischen Entwicklung dar, sondern beheben auch einige der Einschränkungen, auf die wir bei unserem aktuellen Ansatz gestoßen sind.

- **Modularität im Workflow:** Die gewonnenen Erfahrungen haben die Grenzen eines strikten End-to-End-Workflows aufgezeigt, insbesondere seine Unflexibilität bei der Berücksichtigung erweiterter Trainingsparameter und der Erleichterung detaillierter Tests und Validierungen. Für die Zukunft wollen wir einen modularen Workflow entwickeln, der den Prozess in verschiedene, überschaubare Phasen unterteilt. Diese Modularität ermöglicht gezielte Verbesserungen, einfachere Updates und eine gründlichere Validierung in jeder Phase, wodurch die allgemeine Robustheit und Anpassungsfähigkeit unserer Modelle verbessert wird.
- **Auf dem Weg zu einer detaillierten 3D-Motormodellierung:** Das Streben nach höherer Genauigkeit und Vorhersagekraft treibt uns zur Entwicklung eines detaillierten 3D-Motormodells an. Dieses ehrgeizige Unterfangen zielt darauf ab, die nuancierten Verhaltensweisen und komplexen Wechselwirkungen innerhalb des Motors mit beispielloser Genauigkeit zu erfassen. Aufbauend auf den grundlegenden Konzepten sind wir bestrebt, Simulationen zu erstellen, die nicht nur eine verbesserte Genauigkeit, sondern auch tiefere Einblicke in die Motordynamik bieten. Ein solches Modell legt den Grundstein für Simulationen, die sowohl genauer als auch aufschlussreicher sind, und stellt einen bedeutenden Schritt nach vorne in unserer Entwicklung der Technologie für digitale Zwillinge dar. Abbildung 20 zeigt die komplizierte Geometrie des vorgeschlagenen detaillierten 3D-Motormodells. Jedes Bild innerhalb der Collage beleuchtet verschiedene Aspekte der komplexen Struktur des Motors und bietet einen umfassenden Überblick über das Design des Modells und den Detaillierungsgrad, der in zukünftigen Simulationen angestrebt wird.
- **Integration von Netzanpassungstechniken:** Netzanpassungstechniken erweisen sich als vielversprechender Weg, um unsere Simulationen weiter zu optimieren. Durch die

dynamische Anpassung des Netzes an die Simulationsanforderungen können wir den Rechenaufwand erheblich reduzieren und gleichzeitig ein hohes Maß an Genauigkeit beibehalten. Dieser Ansatz wird entscheidend dazu beitragen, die Effizienz und Leistung zu erreichen, die für Echtzeitanwendungen erforderlich sind.

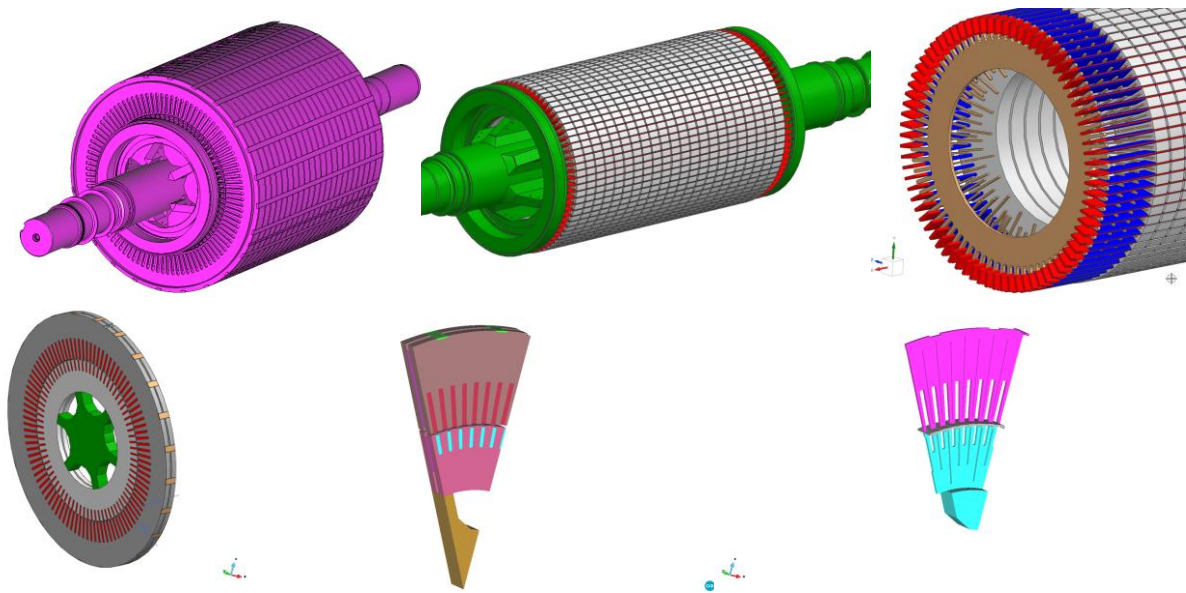


Abbildung 20: Detaillierte Geometrie des 3D-Motormodells

8. Fazit

In Summe wurden im Projekt die folgenden Erkenntnisse erzielt:

- **Validierte komplexe Anwendungsfälle:** Wir sind erfolgreich von theoretischen Rahmenbedingungen zu praktischen Simulationen übergegangen, die die Feinheiten der Fertigungsabläufe genau erfassen. Durch die Fokussierung auf instationäre Bedingungen haben wir eine genauere und dynamischere Darstellung von Fertigungsprozessen ermöglicht.
- **Nachgewiesene Echtzeitfähigkeiten:** Die Echtzeit-Einsatzfähigkeit unserer Modelle wurde unter Beweis gestellt und zeigt ihre Effizienz und Praktikabilität für digitale Zwillingeanwendungen im Fertigungssektor. Die Integration von High-Performance-Computing-Workflows (HPC) hat den Modellentwicklungsprozess optimiert, schnelle Bewertungen ermöglicht und die Entscheidungsfindung in Echtzeit-Betriebskontexten verbessert.
- **Weiterentwickelte Modellierungsstrategien:** Unsere Modellierungsstrategien wurden angepasst und verfeinert, um die Komplexität der Fertigungsabläufe besser zu bewältigen. Dazu gehören der Übergang von detaillierten geometrischen Modellen zu vereinfachten, recheneffizienteren Modellen und der Einsatz fortschrittlicher Interpolationsmethoden, die unsere digitale Zwillingstechnologie für komplexe Fertigungsmodelle erheblich bereichern.

Die erfolgreiche Validierung dieser Anwendungsfälle unterstreicht das Potenzial der entwickelten Modelle, einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie des digitalen Zwillings in der Fertigungsindustrie zu leisten. Mit Blick auf die Zukunft bilden die gewonnenen Erkenntnisse und die entwickelten Methoden eine solide Grundlage für zukünftige Innovationen, die weitere Fortschritte in der Simulation und Analyse komplexer Fertigungsmodelle versprechen.

9. Akronyme und Abkürzungen

10. MOR - Model Order Reduction
11. CAD - Computer Aided Design
12. FEM - Finite Element Method
13. FOM - Full Order Model
14. ROM - Reduced Order Model
15. HROM - Hyper-reduced Order Model
16. HPC - High-Performance Computing
17. SVD - Singular Value Decomposition
18. RBF - Radial Basis Function
19. POD - Proper Orthogonal Decomposition
20. ANN - Artificial Neural Network
21. TSQR - Tall and Skinny QR
22. CPU - Central Processing Unit
23. GPU - Graphics Processing Unit
24. WaaS - Workflow as a Service
25. SISSA - International School for Advanced Studies
26. CIMNE -International Centre for Numerical Methods in Engineering
27. BSC - Barcelona Supercomputing Centre

28. Referenzen

- [Sie17] Three-phase Induction Motors H-compact / H-compact PLUS Catalog D 84.1; Siemens AG; 2017
- [D4.2] eFlows4HPC Consortium. (2022). Design of the Pillar I use cases (Deliverable D4.2, Version 1.0). eFlows4HPC. Retrieved from https://eflows4hpc.eu/wp-content/uploads/2022/09/eFlows4HPC_D4.2-Design-of-the-Pillar-I-use_V1.0.pdf