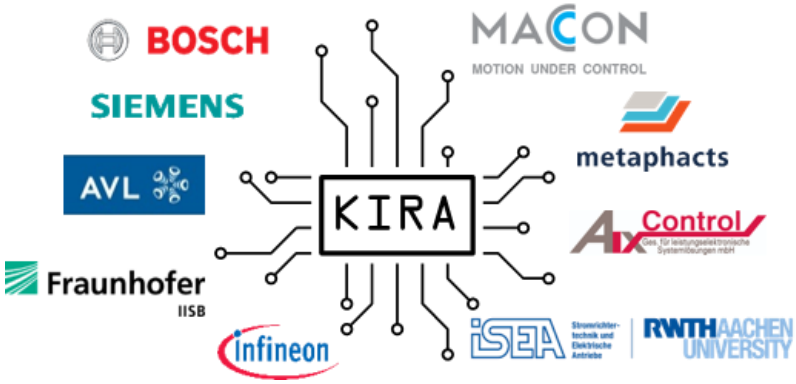

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

KIRA – KI-Methoden zur optimierten Regelung elektrischer Traktionsantriebe

Partnerspezifischer Schlussbericht

Förderkennzeichen:	19I21030D
Teilvorhaben:	Weiterentwicklung von Leistungselektronik Prüfständen für Inverter mit KI-basierten Regelalgorithmen
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2022 – 31.07.2024
Berichtszeitraum:	01.08.2022 – 31.07.2024
Vorgelegt durch:	AVL SET GmbH
Autoren:	Dr. Patrick Winzer & Stefan Merath (Admin: Julia Hartmann)
Datum:	24.01.2025

Projektkonsortium:

- Robert Bosch GmbH (Koordinator)
- AVL Software and Functions GmbH
- Infineon Technologies AG
- AixControl GmbH
- Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB)
- AVL SET GmbH
- Siemens AG
- metaphacts GmbH
- MACCON Elektroniksysteme GmbH
- Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe, RWTH Aachen (ISEA)

Inhaltsverzeichnis

1. Teil 1 - Kurzdarstellung 1

1.1 Aufgabenstellung 1

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 6

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an denen angeknüpft wurde 9

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 10

2. Teil 2 – Eingehende Darstellung 11

2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 11

2.1.1 AP 1: Bewertung von KI-Methoden in Traktionsantrieb 11

2.1.2 AP 2: KI-Ansätze zur Verbesserung der Antriebsregelung 15

2.1.3 AP 3: Verbesserung der Antriebsmodellierung 15

2.1.4 AP 4: Prototypische Umsetzung 31

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 37

2.3 Eingehende Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwendbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 38

2.4 Eingehende Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen 39

2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 40

3. Verzeichnisse 41

3.1 Abbildungsverzeichnis 41

3.2 Tabellenverzeichnis 41

3.3 Literaturverzeichnis 42

1. Teil 1 - Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Förderprojekt KIRA adressiert den bedeutenden und rasant wachsenden Markt für automatisierte und teilautomatisierte Fahrzeuge, mit einem besonderen Fokus auf intelligente und zukunftsweisende Antriebslösungen. Im Zentrum des Projekts steht die Anwendung von KI-basierten Verfahren zur Optimierung und präzisen Regelung elektrischer Antriebsstränge. Diese Verfahren sollen im Rahmen des Projekts weiterentwickelt werden, um zentrale Herausforderungen elektrischer Antriebe, insbesondere in autonomen Fahrzeugen, zu bewältigen.
In Bezug auf die technische Umsetzung bieten KI-basierte Verfahren im Vergleich zu traditionellen „starren" Ansätzen neue Freiheitsgrade und Lösungsansätze in der Regelung und Modellierung sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene. Mit KI-basierten Betriebsstrategien ist die Beherrschung hochkomplexer Systeme und die maximale Ausschöpfung neuer Freiheitsgrade möglich. Auf Komponentenebene können auch komplexe multiphysikalische Problemstellungen mit KI-basierten Verfahren in Echtzeit angegangen werden.

Der Erfolg des Projekts hängt maßgeblich von der engen und fachübergreifenden Verzahnung der Beiträge der Partner ab, die ein breit gefächertes Kompetenzspektrum abdecken. Die Kooperation der Partner wird durch eine eng vernetzte Arbeitspaketstruktur gewährleistet. Eine zielgerichtete Anforderungsanalyse zu Beginn des Projekts stellt sicher, dass die Bewertung der im Projekt entwickelten Methoden nach belastbaren und nachvollziehbaren Kriterien erfolgt. Die Einbindung der Partner aus verschiedenen Stufen der Lieferkette gewährleistet, dass der Anwendungsbezug stets im Fokus bleibt. Die Validierung der Projektergebnisse erfolgt auf mehreren Ebenen, von der simulativen Validierung bis hin zu Tests an verschiedenen Teildemonstratoren und einem skalierten Fahrzeugdemonstrator, der als Anwendungsbeispiel für ein autonomes Fahrzeug dient.

Das Projekt KIRA fokussiert sich auf die Nutzung von KI-basierten Verfahren zur Optimierung und Regelung elektrischer Antriebstränge in Fahrzeugen, um Effizienz, Ausnutzung, Geräuschentwicklung zu verbessern. Ziel ist es, durch exakte Modellansätze und innovative Regelungsverfahren die Reichweite und Leistung von Elektrofahrzeugen zu steigern. KIRA strebt eine Reduktion der Verluste und eine Erhöhung der kurzzeitigen Überlastkapazität elektrischer Maschinen an, was erhebliche Energieeinsparungen und Wettbewerbsvorteile mit sich bringt.

- **Optimierung des Betriebs elektrischer Antriebstränge**: Nutzung von KI-basierten Verfahren zur präzisen Regelung und Optimierung der Effizienz, Ausnutzung und Geräuschentwicklung und Drehmomentgenauigkeit elektrischer Antriebe.

- **Verlusteinsparung**: Reduktion der Verluste im elektrischen Antrieb um 10 %, was zu erheblichen Energieeinsparungen und Kostenvorteilen führt.
- **Erhöhung der Überlastkapazität**: Steigerung der kurzzeitigen Überlastkapazität elektrischer Maschinen um 20 % durch exakte und dynamische thermische Modellierung.
- **Präzise Regelung des Drehmoments**: Ein autonomes Fahrzeug muss das Drehmoment sehr präzise einstellen können, insbesondere bei Multi-Motor-Konzepten wie Torque-Vectoring. Ziel ist es, den Fehler in der Drehmomentregelung über den relevanten Temperaturbereich auf unter 2 % zu reduzieren.
- **Reduktion der akustischen Emissionen**: Elektrofahrzeuge erzeugen eine tonalere Geräuschkulisse, die oft als störend empfunden wird. Ziel ist es, durch präzise Regelung der elektromagnetischen Kräfte im Antrieb und Anpassung der Modellparameter die akustischen Emissionen um 10 dB in kritischen Betriebspunkten zu reduzieren.

Diese Ziele sollen durch die Kombination von klassischen und KI-basierten Regelungsverfahren erreicht werden, wobei der Fokus auf Elektrofahrzeugen liegt, die Lösungen jedoch auch auf Hybridfahrzeuge und andere elektrische Antriebe übertragbar sind.

Das Ziel des Teilverbundprojekts der AVL SET GmbH im Rahmen des KIRA-Projekts besteht darin, Emulator-basierte Leistungselektronik-Prüfstände an die Anforderungen zukünftiger KI-basierter Inverter-Generationen anzupassen und zu validieren. Die bereits etablierten Prüfstände von AVL SET zeichnen sich durch eine hohe Emulationsgenauigkeit aus, insbesondere bei der Emulation des elektromagnetischen Verhaltens von Synchronmaschinen.

Folgende Ziele sind daher vorgesehen, um die Prüfstände an die Anforderungen zukünftiger KI-basierter Inverter Generationen anzupassen:

- **Steigerung der Emulationsqualität des Wirkungsgrades**: Berücksichtigung von Eisenverlustmechanismen und Kupfeverlusten.
- **Steigerung der Emulationsqualität des Drehmoments**: Einbeziehung von Nichtlinearitäten und ähnlichen Faktoren, insbesondere bei Asynchronmaschinen.
- **Steigerung der Emulationsqualität des thermischen Verhaltens**: Integration eines thermischen Modells im Prüfstand, wobei die berechnete Temperatur das Emulationsergebnis direkt beeinflusst und die Temperatur einzelner Maschinenteile ortsaufgelöst ausgegeben werden kann.

Als weiteres Bearbeitungsthema ergibt sich als Konsequenz die Entwicklung eines Test-Antriebsumrichters, um die im Rahmen von KIRA entwickelten Features des AVL SET

InverterTS prüfen zu können. Der Test-Antriebsumrichter soll folgende Spezifikation aufweisen:

- Interne Komponenten der AVL SET GmbH werden verwendet
- Die Softwaregenerierung soll voll in den automatischen Codegenerierungs-Workflow der AVL SET integriert werden
- Gängige Maschinentypen sollen geregelt werden können, hierzu gehören die permanentmagneterregte Synchronmaschine (3ph, 6ph und doppelt 3ph), die fremderregte Synchronmaschine (3ph) und die Asynchronmaschine (3ph)
- Nichtlinearitäten wie Sättigungseffekte im Eisen sollen bei der Regelung berücksichtigt werden
- Der Antriebsumrichter soll ein Interface zu allen gängigen Rotorlagesensoriken aufweisen (xMR, Resolver und Digital Encoder)
- Verschiedene Schnittstellen zur Bedienung sollen implementiert werden, sodass KI-basierte Algorithmen verwendet werden können, die auf externen Systemen laufen

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt KIRA wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen der Fördermaßnahme „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien – Künstliche Intelligenz als Schlüsseltechnologie für das Fahrzeug der Zukunft“ gefördert. Die AVL SET GmbH war im Rahmen des Verbundprojekts „KIRA - KI-Methoden zur optimierten Regelung elektrischer Traktionsantriebe“ beteiligt. Ihr spezifisches Teilvorhaben trug den Titel „Weiterentwicklung von Leistungselektronik-Prüfständen für Inverter mit KI-basierten Regelalgorithmen“.

Das Projekt KIRA zielt darauf ab, den Markt für teil- und vollautomatisierte Fahrzeuge mit intelligenten und zukunftsfähigen Antriebslösungen zu adressieren. Es verfolgt ein domänenübergreifendes und eng vernetztes Vorgehen über alle Ebenen des Antriebsstrangs hinweg. Die Evaluation und Validierung umfassen eine zielgerichtete Anforderungsanalyse und eine Bewertung nach belastbaren Kriterien, wobei der Anwendungsbezug stets im Vordergrund steht.

Die allgemeinen Ziele des Projekts zielen darauf ab, einen hohen technologischen Hub zu erreichen. Dies wird durch die maximale Ausnutzung von Synergien, einen effizienten Ressourcenaufwand und die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit ermöglicht. Und dadurch die Attraktivität, Sicherheit und gesellschaftlichen Akzeptanz von Elektrofahrzeugen zu erhöhen.

Da für die erfolgreiche Umsetzung des Verbundprojekts KIRA hohe Anforderungen an die Kompetenzen und Erfahrungen der Partner gestellt wurden, wurde bereits vor Projektbeginn großer Wert auf die sorgfältige Auswahl und Zusammenstellung des Konsortiums gelegt.

Die Abbildung 2 zeigt die Stakeholder des Verbundprojekt KIRA. Die Koordination für die Verbundspartner übernahm als Konsortialführer die Firma Robert Bosch GmbH (Standort: Stuttgart).

Abbildung 1 | Konsortialpartner KIRA

Die Arbeiten im Teilvorhaben der AVL SET GmbH wurden am Hauptstandort in Wangen im Allgäu durchgeführt. Verschiedene Fachbereiche waren an der Forschung und Demonstration beteiligt. Die Hauptkoordination und Teilnahme an Jour Fixen übernahm Stefan Merath aus dem Fachbereich „Application Software Design“, wodurch ein ständiger Austausch und eine nachhaltige Dokumentation sichergestellt wurden. Im Mai 2022 zog die AVL SET GmbH an einen neuen Standort innerhalb Wangen um. Durch den Umzug bleiben alle Verträge und Vereinbarungen unverändert bestehen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Es wurde ein ganzheitlicher Ansatz zur Optimierung von elektrischen Traktionsantrieben mittels KI-Methoden angestrebt. Hierzu wurde der Optimierungsansatz in zwei Matrixdimensionen aufgeteilt.

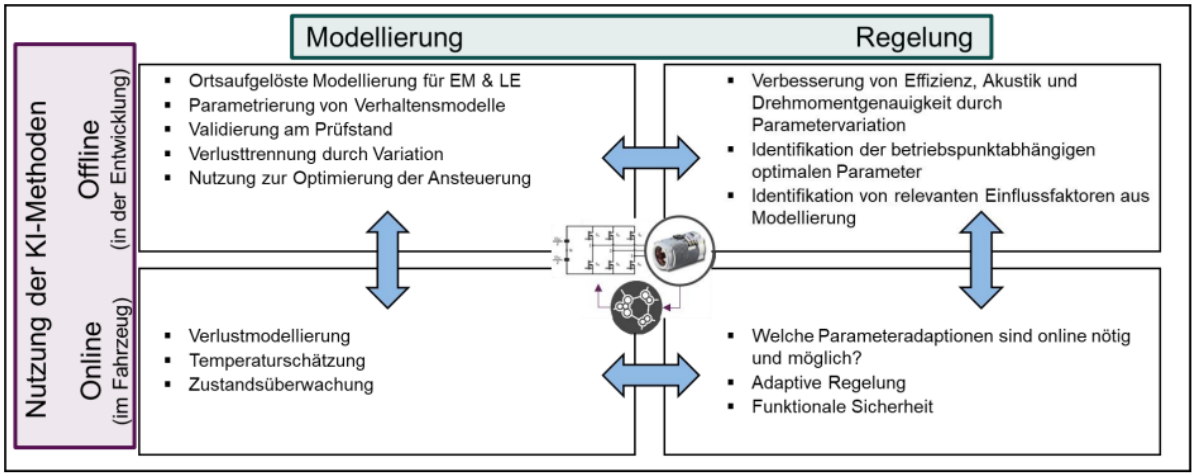

Abbildung 2 | Matrixdimensionen

Die Struktur der Arbeitspakete wurde wie in Abbildung 3aufgezeigt abgebildet und spiegelt so die Matrix-Struktur des Optimierungsansatzes wider.

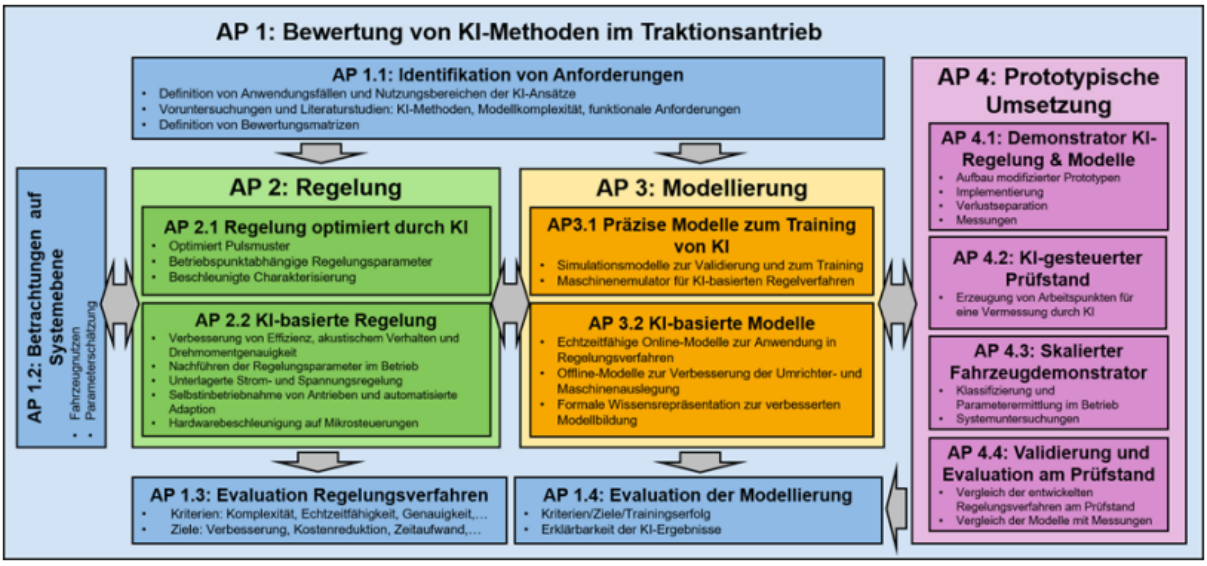

Abbildung 3 | Struktur der Arbeitspakete

Die Arbeitspaketstruktur der Aktivitäten beim Projekt KIRA wird mit der Abbildung 3 dargestellt. Die aufgeführte Abbildung zeigt, dass das Arbeitspaket 1 den Überbau des Projekts bildet. Hier werden zunächst Anwendungsfälle und Nutzungsbereiche der KI-Ansätze definiert und diese fließen direkt in die weiteren Arbeitspakete ein, welche einen sequenziellen Aktivitätsfluss aufweisen. Stellenweise wurde es erforderlich, dass

Aktivitäten in Arbeitspaketen parallel zu Arbeiten anderer Teilvorhaben stattfanden, um Verzögerungen aufgrund zu enger Abhängigkeiten voneinander zu vermeiden. Dies war aber von Projektbeginn an entsprechend so geplant. Generell ist festzuhalten, dass es 4 Arbeitspakete gab:

1. **Bewertung von KI-Methoden im Traktionsantrieb**

   Dieses Paket bildet den Rahmen des Projekts und definiert Anwendungsfälle und Nutzungsbereiche der KI-Ansätze. Es wurden zulässige Änderungsbereiche und Leistungsindikatoren festgelegt. Voruntersuchungen und Literaturstudien identifizieren geeignete KI-Methoden und Modellkomplexitäten. Zudem wurden Parameter für effiziente Modelle zur KI-Trainingserstellung bestimmt. Auf Systemebene wurde die Nutzung von KI im Traktionsantrieb und die Überwachung von Systemparametern zur Verbesserung des Fahrverhaltens untersucht. Hierzu gab es Arbeitspakete, die Input und teilweise auch Output für die weiteren Arbeitspakete gaben und bekamen.

2. **KI-Ansätze zur Verbesserung der Antriebsregelung**

   In diesem Arbeitspaket hatte die AVL SET keine direkte Aufgabe, daher wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

3. **Verbesserung der Antriebsmodellierung**

   Hier lag der Fokus auf der Modellierung des elektrischen Antriebsstrangs und wurde in zwei Teilarbeitspakete gegliedert. Im ersten Paket wurden klassische Modelle optimiert, um sie für das KI-Training zu nutzen, und es wurde untersucht, wie synthetische Daten zur Validierung der KI-Regelungsverfahren aus Arbeitspaket 2 verwendet werden können. Im zweiten Paket wurden KI-basierte Modellierungsverfahren entwickelt.

4. **Prototypische Umsetzung.**

   In Arbeitspaket 4 wurden mehrere Demonstratoren zur Validierung der entwickelten Modelle und Regelungsverfahren aufgebaut. Ein Labordemonstrator und zusätzlicher Sensorik wurde genutzt, um die Modelle aus Arbeitspaket 3 zu verifizieren und die Regelungsverfahren aus Arbeitspaket 2 zu evaluieren. Diese Verfahren wurden auf Rapid-Control-Prototyping Plattformen implementiert. Zudem wurde ein skalierter Fahrzeugdemonstrator aufgebaut, der autonom in einer simulierten Umgebung fährt, um die auf Systemebene erzielten KI-Innovationen zu demonstrieren.

Die AVL SET GmbH war in folgenden Arbeitspaketen integriert:

- 1.1. Identifikation von Anforderungen
  In diesem Arbeitspaket wurden die Anforderungen zur Verbesserung der Emulationsgenauigkeit des EME-Prüfstands identifiziert. Zudem wurden Anforderungen für die Optimierung des Prüfstands ermittelt.

- 1.4. Evaluation der Modellierung
  Hier wurden die Ergebnisse aus 1.1 mit den aktuellen Emulationen von AVL SET für das elektromagnetische Verhalten von Synchronmaschinen verglichen.

- 3.1. Präzise Modelle zum Training von KI
  In diesem Arbeitspaket werden die Ergebnisse aus 1 umgesetzt, in dem Modelle angepasst und erweitert wurden. Die Anpassung der Modelle erfolgt iterativ, wobei theoretische und gemessene Werte schrittweise überprüft und an die KI-Anforderungen angepasst wurden.

- 4.2. KI-gesteuerter Prüfstand / Lead für das Arbeitspaket
  Hier wurden die Modellanpassungen aus 3.1 am Prüfstand validiert und evaluiert. Dafür wurde ein EME Prüfstand der AVL SET verwendet.

- 4.4. Validierung und Evaluation am Prüfstand
  Durchgeführte Messungen wurden ausgewertet, aufbereitet und dokumentiert.

Der Projektbeginn erfolgte wie vorgesehen im August 2021. Die Besprechungen fanden überwiegend virtuell statt. Insgesamt nahm die AVL SET an drei Meilensteintreffen vor Ort teil und organisierte zusätzlich das Abschlusstreffen am Hauptsitz in Wangen. Im Verlauf des Projekts musste der Zeitplan aufgrund von Ressourcenengpässen seitens AVL SET angepasst werden. Es gelang jedoch sicherzustellen, dass keine Arbeitspakete der Partner durch das Verschieben der Arbeitspakete der AVL SET beeinträchtigt wurden und das Projekt planmäßig erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Der angepasste Zeitplan ist im zweiten Teil dieses Berichtes unter dem Punkt 2.1. einzusehen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an denen angeknüpft wurde

Klassische Regelungsverfahren in der Antriebstechnik steuern komplexe Systeme auf Basis fester Parameter und Modelle und optimieren verschiedene Zielfunktionen. Diese Ansätze stoßen an ihre Grenzen bei stark nichtlinearen Einflüssen und hoher Systemkomplexität, was KIRA durch Reduzierung des Vermessungsaufwands verbessern kann.

Daher beabsichtigte AVL SET im Rahmen des Forschungsprojekts KIRA, das Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL)-basierte Testsystem für Antriebsinverter auf die spezifischen Anforderungen zur Prüfung von KI-basierten oder KI-optimierten Antriebsinvertern vorzubereiten. Ziel war es, die Emulationsqualität des Elektro-Motor-Emulators, der ein integraler Bestandteil des Inverter-Testsystems ist, signifikant zu verbessern. Neben den derzeit berücksichtigten physikalischen Abhängigkeiten einer elektrischen Maschine, wie der Sättigung von Eisen, der Berücksichtigung von Harmonischen und den Temperaturabhängigkeiten der magnetischen Parameter, sollten zusätzliche Nichtlinearitäten und Verlustmechanismen in die Emulation einfließen, siehe [1] und [2].

Darüber hinaus wurde eine umfassende Verbesserung des Gesamtsystems angestrebt, die Aspekte wie Ausfallsicherheit, Modulationsverfahren und weitere relevante Parameter umfasst. Diese Optimierungen sollen es den Kunden ermöglichen, ihre Antriebsumrichter zukünftig unter realitätsnahen Bedingungen mit KI-basierten oder KI-optimierten Algorithmen intensiv zu testen und zu validieren.

Durch die Integration fortschrittlicher KI-Technologien und die Berücksichtigung komplexer physikalischer Phänomene strebt das Projekt KIRA an, die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Antriebsinvertern maßgeblich zu steigern. Dies wird nicht nur die Effizienz der Testverfahren erhöhen, sondern auch die Entwicklung sicherer und leistungsfähiger Antriebssysteme fördern.

Die AVL SET ist der international führende Anbieter von Testsystemen für die Entwicklung und Validierung von Antriebsinvertern. Das Unternehmen ist eine Tochtergesellschaft der AVL List GmbH und hat seinen Sitz in Wangen im Allgäu. AVL SET konzentriert sich mit rund 180 Mitarbeiter*innen auf die Prüfung von Invertern und Leistungselektronik für die Automobil- und Mobilitätsbranche. OEMs, Tier1s/Tier2s, Universitäten und Forschungsinstitute gehören zum weltweiten Kundenstamm, der mit effizienten Leistungselektronik-Testsystemen beliefert wird. Diese Testsysteme basieren auf der E-Motor-Emulationstechnologie mit Echtzeitsimulation.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die AVL SET GmbH hat im Teilvorhaben „Weiterentwicklung von Leistungselektronik Prüfständen für Inverter mit KI-basierten Regelalgorithmen“ nur mit den unter Punkt 1.2 Abbildung 1 aufgeführten Konsortialpartnern zusammengearbeitet und keine weiteren externen Stellen inkludiert.

2. Teil 2 – Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die AVL SET GmbH war im Verbundprojekt KIRA vor allem bei den unter Arbeitspaket 3 aufgeführten Tätigkeiten vertreten. Alle Arbeitspakete konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Gemeinsam mit den Konsortialpartner von KIRA wurden die hohen Anforderungen an die KI-Methoden zur optimierten Regelung elektrischer Traktionsantriebe identifiziert, bewertet, konzipiert und realisiert. In Teil 1 unseres Abschlussberichtes sind wir auf die Planung und den Ablauf des Projekts eingegangen. Die Strukturen der Arbeitspakete und die Aufteilung des Optimierungsansatzes in zwei Matrixdimensionen hat sich als erfolgreich herausgestellt. Daniel Scharfenstein und sein Team (als Funktion: Koordinator) hat dabei stehts den erstellten Projektplan im Blick gehabt und hier in den regelmäßigen Meetings den Status erhalten.

Die AVL SET GmbH hat dabei mehrere Aufgabenteile abgedeckt. Hierzu gehörten die Abbildung von Eisenverlustmechanismen auf dem Inverter-Testsystem, die Implementierung eines thermischen Modells einer Elektromaschine, arbeitspunktabhängige Nachführung von Ersatzschaltbildparametern der Asynchronmaschine und die Entwicklung eines hausinternen Test-Antriebsumrichter. Weitere kleinere Arbeiten und Optimierungen am System wurden ebenfalls während KIRA durchgeführt.

Die unter Abbildung 4 eingefügte Zeitplanung entspricht der angepassten Planung während des Projekts. Wie bereits erwähnt erstellte die Verschiebung kein Risiko für den Projektverlauf dar.

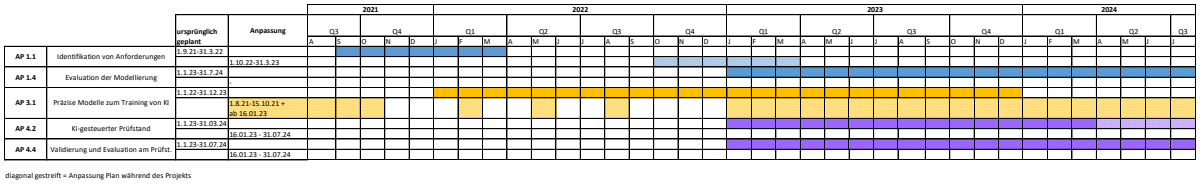

Abbildung 4 | Zeitplanung

2.1.1 AP 1: Bewertung von KI-Methoden in Traktionsantrieb

AP 1.1: Identifikation von Anforderungen

Es wurden Kundenanforderungen und aktuelle Entwicklungen zur wirkungsgradoptimalen Ansteuerung von E-Motoren analysiert. Der Trend zeigt gerade in diesem Bereich, dass hier in Zukunft verstärkt, KI-basierte Systeme eingesetzt werden. Im Laufe des Projektes wurden dabei mehrere Bereiche identifiziert, in denen das

Testsystem optimiert werden kann, um den neuen Anforderungen gerecht zu werden. Diese sind:

- Erhöhung der Ausfallsicherheit des Testsystems
- Anzeige der Messwerte aus Umrichtersicht
- Erhöhung des Spannungsbereichs des Testsystems
- Emulation des thermischen Verhaltens von E-Motoren
- Abbildung von nichtlinearen Effekten der Asynchronmaschine
- Emulation von Eisenverlusten

Im Folgenden wird auf die Anforderungen der einzelnen Bereiche genauer eingegangen:

Erhöhung der Ausfallsicherheit des Testsystems

Insbesondere bei KI-basierten Invertern sind verhältnismäßig lange Testzyklen üblich, bei der die KI des Inverters zunächst das Systemverhalten lernen muss, um anschließend die optimale Ansteuerung in einzelnen Arbeitspunkten zu finden. Hinderlich hierbei ist es, wenn das Testsystem sporadische Fehler generiert und in einen Fehlerzustand wechselt, da dann der Testzyklus abgebrochen wird und neu gestartet werden muss. Aus diesem Grund wurde das bestehende Inverter-Testsystem der AVL SET GmbH mehrtägigen Dauerläufen unterzogen, im Detail analysiert und mehrere Punkte zur Verbesserung der Systemstabilität identifiziert.

Die Kommunikation innerhalb des Testsystems basiert auf Lichtwellenleitern, auf denen ein XCP-Protokoll auf einer Aurora-Verbindung Anwendung findet. In Dauerlaufversuchen konnten sporadische Kommunikationsausfälle identifiziert werden. Eine detaillierte Ursachenanalyse zeigte Verbesserungspotential an mehreren Komponenten wie dem VHDL-Code der implementierten Schnittstelle in der Haupt-Rechenplattform und einigen Peripheriegeräten wie etwa der Rotorlageemulation und der internen galvanischen Spannungstrennung.

Anzeige der Messwerte aus Umrichtersicht

Während Inverter in der Regel nur einen Messwert für z.B. die Phasenströme innerhalb einer Taktperiode zur Verfügung stellen (z.B. 20kHz), stellt das Inverter-Testsystem der AVL SET GmbH – ähnlich wie ein Oszilloskop – Messwerte mit einer viel höheren Bandbreite zur Verfügung, nämlich mit 3,125 MHz. Vergleicht nun ein externes Prüf- und Optimierungsprogramm bzw. ein Automatisierungssystem diese Messwerte, können stark unterschiedliche Kurvenformen von ein und demselben Messignal resultieren. Im stationären Zustand kann der d/q-transformierte Messstrom des Inverters glatt sein und wie eine Konstantgröße anmuten, obwohl er tatsächlich mit Oberschwingungen („Ripple“) behaftet ist, wie ein schneller abtastendes Messsystem anzeigen würde. Dieser Widerspruch kann im Worst Case dazu führen, dass KI-basierte Optimierungsalgorithmen „in die falsche Richtung laufen“ oder Automatisierungssysteme einen Fehler wegen unplausibler oder nicht korrelierender Größen generieren. Eine neu zu implementiertende Funktion „Inverter View“ soll das Messsignal des Inverter-

Testsystems parametrierbar filtern, um die Messignale zur Deckung zu bringen und die genannten Probleme zu umschiffen.

Erhöhung des Spannungsbereichs des Testsystems

Durch Ausnutzen moderner Modulationsverfahren kann die Spannungsgrenze des Emulators um ca. 15% erhöht werden. Dadurch wird zum einen die Regelungsdynamik des Testsystems erhöht, wodurch KI-optimierte dynamische Inverterregelungen besser getestet werden können. Zum anderen wird der Betriebsbereich des Testsystems erweitert, um KI-basierte Inverter in einem größeren Betriebsbereich testen zu können.

Emulation des thermischen Verhaltens von E-Motoren

Als weiteres Arbeitspaket wurde identifiziert, dass die Optimierung der Ansteuerstrategien eines Inverters hinsichtlich des thermischen Verhaltens einer Maschine sinnvoll und von Kundenseite gefordert ist. Dazu muss die bereits vorhandene Temperaturabhängigkeit der Motormodelle des Emulators um ein thermisches Modell des Motors selbst erweitert werden, sodass betriebspunktabhängig das dynamische thermische Verhalten korrekt nachgebildet wird. Hierzu wurden verschiedene Aufgaben erledigt:

1) Benennung von Wärmequellen und Wärmesenken.
2) Aufbau eines simplen thermischen Modells mit den Eingangsgrößen Kupfer- und Eisenverluste aus der Motoremulation und den Temperaturen der verschiedenen Motorkomponenten als Ausgang.
3) Implementierung auf dem Automatisierungssystem PUMA mit der Testbed.CONNECT-Erweiterung.

Abbildung von nichtlinearen Effekten der Asynchronmaschine

Speziell bei der Asynchronmaschine ist die Identifikation der Ersatzschaltbildparameter sehr komplex. Diese weisen Abhängigkeiten vom Strom oder auch von der Rotor- beziehungsweise Statorstomfrequenz auf. Eine betriebspunktabhängige Nachführung dieser Ersatzschaltbilder erschien als sinnvoll, um die Ansteuerstrategien eines Inverters für Asynchronmaschinen zu optimieren. Folgendes Vorgehen war geplant und wurde so umgesetzt:

1) Identifikation der Abhängigkeiten und Generierung eines Parametersets
2) Aufbau eines Modells, welches die Ersatzschaltbildparameter abhängig von Stromfrequenzen im Rotor bzw. Stator und den Strömen in d- und q-Richtung abbildet
3) Implementierung auf dem Automatisierungssystem PUMA mit der Testbed.CONNECT-Erweiterung

Emulation von Eisenverlusten

Bei der Untersuchung der Anforderungen zeigte sich, dass die Abbildung von Eisenverlusten mithilfe von E-Motor Emulatoren entscheidend ist, um die Ansteuerstrategien zu optimieren. Eisenverluste sind jedoch komplex und erfordern oft kundenspezifische Lösungen. Um eine echtzeitfähige Lösung darstellen zu können, müssen diese Modelle in Echtzeit auf einem FPGA lauffähig sein. Bei den von AVL SET eingesetzten Modellen dauert eine Modellperiode 320ns, der Modelltakt beträgt 3.125MHz.

Ein zweistufiger Ansatz wird daher angestrebt, der in zwei Teil-Arbeitspakete aufgeteilt war:

1. **Extern berechnete Eisenverluste**: Diese werden dem E-Motor-Emulator zugeführt, in ein Verlustmoment umgerechnet und vom Wellendrehmoment subtrahiert. Dies beeinflusst das elektrische Teilmodell nicht. Der Nutzer des Testsystems kann eine extern berechnete Verlustleistung vorgeben, die auf dem FPGA drehzahlabhängig in ein Verlustmoment umgerechnet wird.
2. **Parallele Widerstände in d- und q-Richtung**: Eisenverluste werden als parallele Widerstände in den elektromagnetischen Gleichungen berücksichtigt, was das elektrische Teilmodell beeinflusst. Die Parametrierung dieser Widerstände erfolgt extern.

Die Eisenverlustmechanismen sollen in folgende Motormodelle implementiert werden:

- 3-phasige Asynchronmaschine
- 6-phasige Asynchronmaschine
- 3-phasige permanentmagneterregte Synchronmaschine
- 6-phasige permanentmagneterregte Synchronmaschine
- Doppel-3-phasige permanentmagneterregte Synchronmaschine
- 3-phasige fremderregte Synchronmaschine
- 6-phasige fremderregte Synchronmaschine

AP 1.2: Betrachtung auf Systemebene

In diesem Arbeitspaket war die AVL SET GmbH nicht involviert.

AP 1.3: Evaluation der Regelungsverfahren

In diesem Arbeitspaket war die AVL SET GmbH nicht involviert.

AP 1.4: Evaluation der Modellierung

Die Evaluierung der implementierten Modelle wurde erfolgreich durchgeführt. Die detaillierte Beschreibung erfolgt untenstehend in Arbeitspaket 3.

2.1.2 AP 2: KI-Ansätze zur Verbesserung der Antriebsregelung

AP 2.1: Regelung optimiert durch KI

In diesem Arbeitspaket war die AVL SET GmbH nicht involviert.

AP 2.2: KI-basierte Regelung

In diesem Arbeitspaket war die AVL SET GmbH nicht involviert.

2.1.3 AP 3: Verbesserung der Antriebsmodellierung

AP 3.1: Präzise Modelle zum Training von KI

Neben der Erhöhung der Ausfallsicherheit des Inverter-Testsystems konnten zwei weitere wichtige Funktionen identifiziert werden. Auf diese Funktionen – Inverter View und Erhöhung des Spannungsbereiches - gehen wir in diesem Bereich detaillierter ein. Diese Features wurden erst nach dem Projektantrag identifiziert, jedoch als sehr wichtig eingestuft und daher ergänzt.

3.1.1. Erhöhung der Ausfallsicherheit

Bei KI-basierten Invertern sind lange Testzyklen üblich, da die KI zunächst das Systemverhalten lernen muss, um anschließend die optimale Ansteuerung in verschiedenen Arbeitspunkten zu finden. Sporadische Fehler im Testsystem können diese Zyklen unterbrechen und erfordern einen Neustart, was ineffizient ist. Daher wurde das bestehende Inverter-Testsystem der AVL SET GmbH mehrtägigen Dauerläufen unterzogen, um die Systemstabilität zu verbessern. Die Kommunikation innerhalb des Testsystems erfolgt über Lichtwellenleiter mit einem XCP-Protokoll auf einer Aurora-Verbindung. In diesen Dauerlaufversuchen wurden sporadische Kommunikationsausfälle identifiziert. Eine detaillierte Ursachenanalyse zeigte Verbesserungspotential in mehreren Komponenten, wie dem VHDL-Code der implementierten Schnittstelle in der Haupt-Rechenplattform und einigen Peripheriegeräten wie der Rotorlageemulation und der internen galvanischen Spannungstrennung.

3.1.2. Anzeige der Messwerte aus Umrichtersicht

Das Inverter-Testsystem der AVL SET GmbH bietet Messwerte mit einer viel höheren Bandbreite (3,125 MHz) im Vergleich zur Taktfrequenz des Inverters, die üblicherweise im Bereich von 10-20 kHz liegt. Hierdurch wird im Inverter-Testsystem insbesondere der unvermeidliche Stromrippel sichtbar, durch das Takten des Inverters entsteht. Dieser bleibt beim Inverter durch das üblicherweise einmalige Samplen pro Taktperiode unsichtbar.

Die im Rahmen von KIRA entwickelte „Inverter-View“-Funktion ermöglicht es, das Messsignal des Inverter-Testsystems parametrierbar zu filtern, um die Messsignale zur Deckung zu bringen und Probleme mit KI-basierten Optimierungsalgorithmen zu vermeiden.

In Abbildung 5 sind Messungen der Ströme in den Phasen sowie deren transformierte Größen ins dq-Koordinatensystem abgebildet. Gut zu erkennen sind die Effekte eines taktenden Inverters, welcher zu einem rippelbehafteten Strom führt. Durch Abtasten zum nicht korrekten Zeitpunkt können die Parametrierung eines Inverters und KI-Optimierungsverfahren fehlschlagen. Auch Aliasing-Effekte werden hierdurch begünstigt. Durch Aktivieren der „Inverter-View“-Funktion werden die Größen parametrierbar gefiltert, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. Der Rippel auf den Signalen verschwindet so und KI-Optimierungsverfahren können basierend auf geglätteten Messsignalen arbeiten.

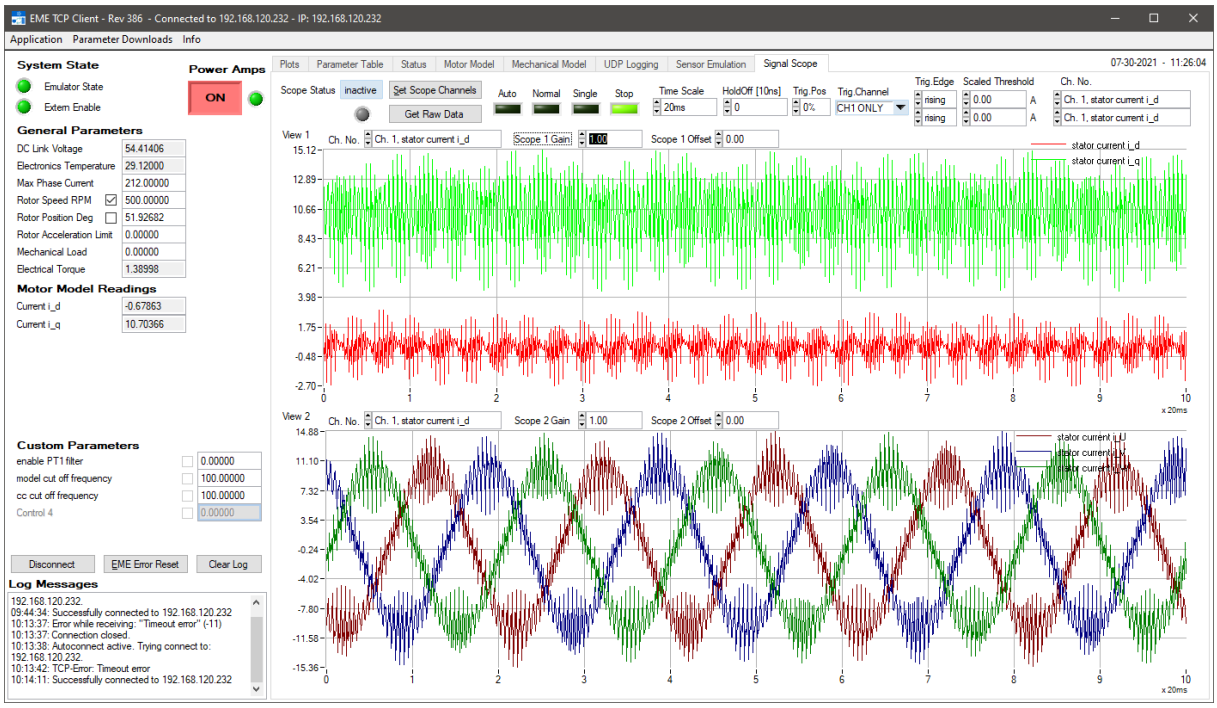

Abbildung 5 | Messsignale mit deaktiviertem "Inverter-View"

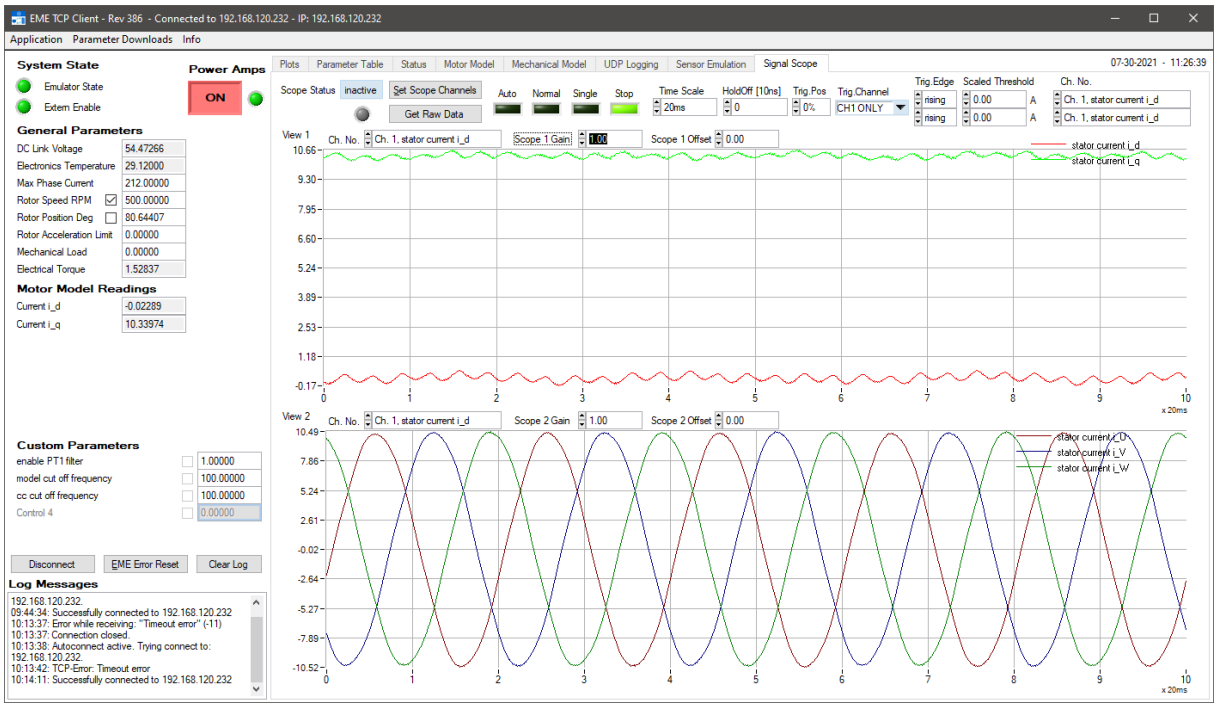

Abbildung 6 | Messsignale mit aktiviertem "Inverter-View"

3.1.3. Erhöhung des Spannungsbereichs

Die Emulation von Maschinen basiert auf der Einstellung einer emulatorseitigen Spannung, die in Kombination mit einer vorhandenen Regelstrecke, üblicherweise einer Induktivität, einen Stromfluss verursacht, der demjenigen der zu emulierende Maschine entspricht. Gerade bei hoch ausgenutzten KI-basierten Invertern kann die dem Emulator zur Verfügung stehende Spannung je nach Arbeitspunkt an ihre Grenzen kommen. Die Erhöhung dieser zur Verfügung stehenden Spannung geht daher mit der Erhöhung der Emulationsqualität einher.

Durch moderne Modulationsverfahren konnte die Spannungsgrenze des Emulators um ca. 15% erhöht werden. Dies verbessert die Regelungsdynamik des Testsystems und erweitert den Betriebsbereich, um KI-basierte Inverter in einem größeren Betriebsbereich testen zu können. Hierzu wurde die bisher verwendete Sinus-Dreieck-Modulation (siehe Abbildung 7) durch eine Modulation mittels Super-Sinus ersetzt (siehe Abbildung 8), um die Spannungserhöhung realisieren zu können. Es ist zu erkennen, dass bei der Sinus-Dreieck-Modulation die Nullkomponente der Spannung immer 0 V beträgt. Die Phasenspannungen sind hier alle sinusförmig. Bei der Super-Sinus-Modulation ist die Nullspannung eine Dreiecksfunktion. Durch diese Dreiecksspannung verändert sich die Phasenspannung der einzelnen Phasen. Hier ist schon zu erkennen, dass die Spannungszeitfläche größer wird. Das führt dazu, dass die Leiter-Leiter-Spannungen hier höher sind als bei der Sinus-Dreieck-Modulation.

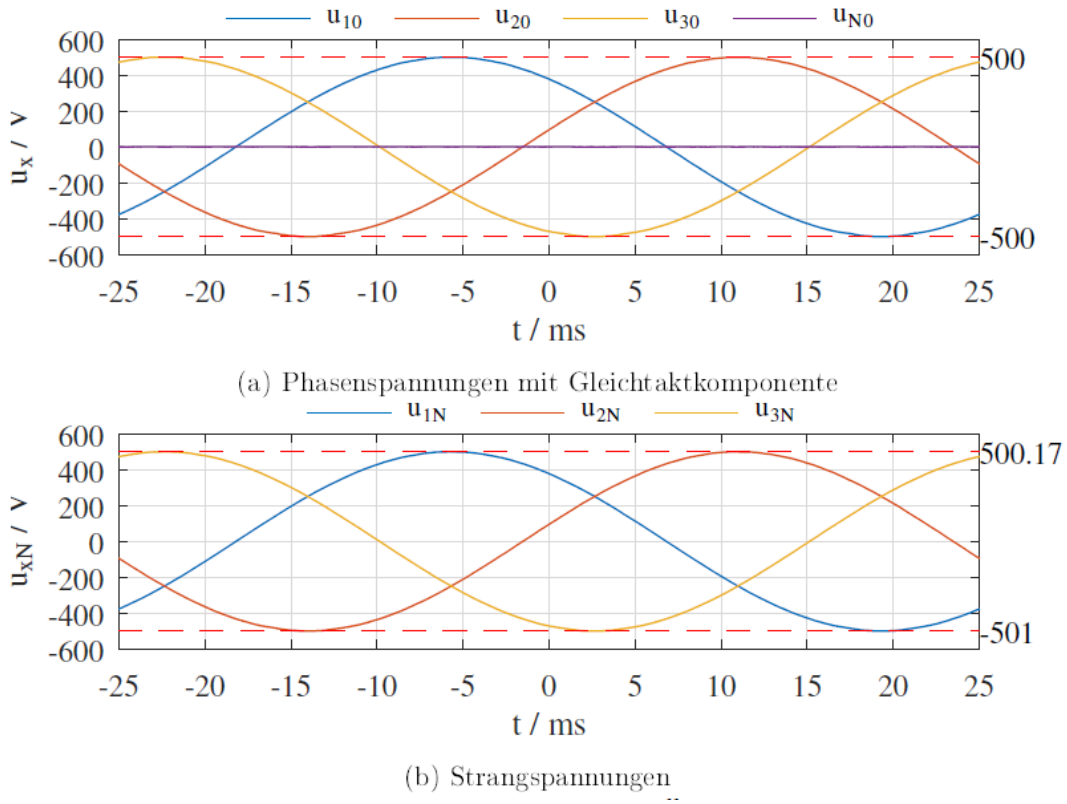

Abbildung 7 | Sinus-Dreieck-Modulation

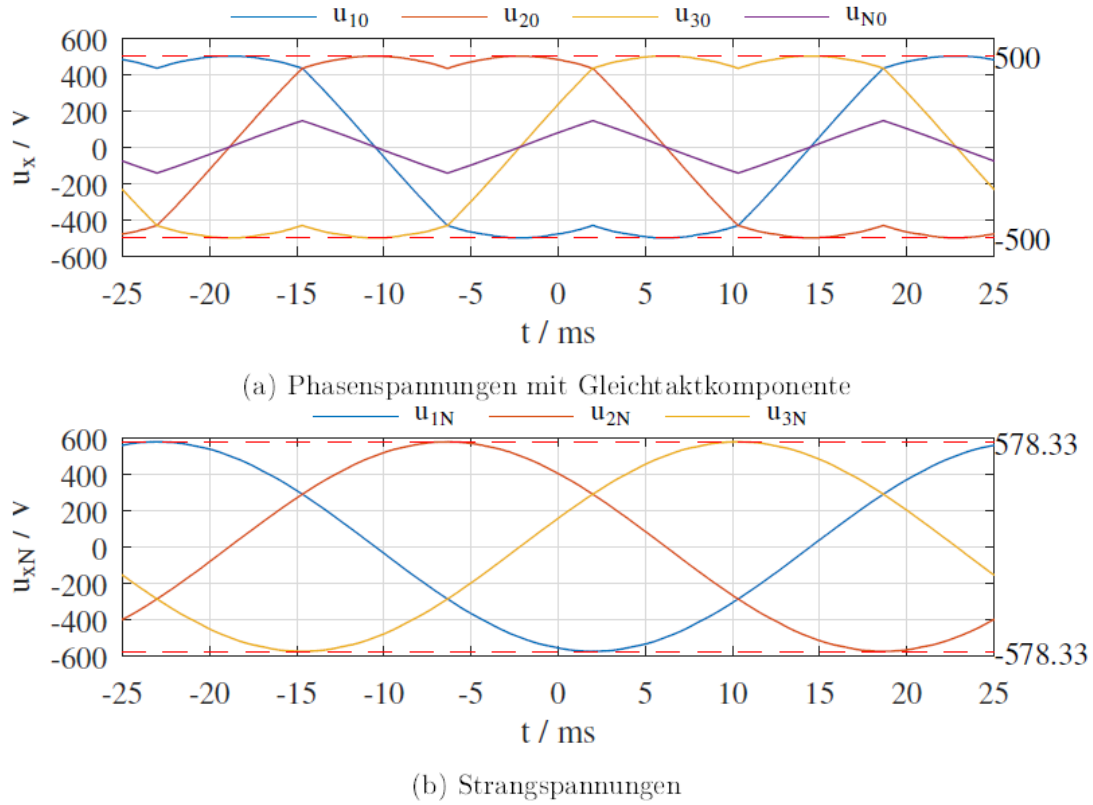

Abbildung 8| Super-Sinus-Modulation

3.1.4. Abbildung des thermischen Verhaltens von E-Motoren

Eine weitere identifizierte Aufgabe neuartiger KI-basierter Inverter ist die thermische Überwachung und Optimierung von Antriebssystemen. Ein Prüfsystem wie das Inverter-Testsystem muss hierzu das thermische Verhalten der Maschine und die Rückwirkung auf elektrische Größen realistisch darstellen. Dies erfordert ein thermisches Modell des Motors, das das stationäre und dynamische thermische Verhalten korrekt nachbildet.

Hierzu wurde ein thermisches Modell entwickelt, das das dynamische thermische Verhalten des Motors korrekt nachbildet. Dieses Modell wurde ebenfalls auf dem PUMA-System implementiert und getestet. Es umfasst 10 Knoten und thermische Übergangswiderstände dazwischen. Eingangsgrößen des Modells sind die vom Inverter-Testsystem berechneten Verluste (Eisen, Kupfer) in den jeweiligen Komponenten des Motors. Ausgangsgrößen sind die Temperaturen von Komponenten wie Wickelkopf, Kühlwasser, Statorjoch und Magneten (nur PMSM = Permanent Magnet Synchronous Motor). Ziel war es, ein gemeinsames Temperaturmodell für jede Maschinenart (ASM = Asynchronous Motor, PMSM, EESM = Electrically Excited Syncronous Motor) zu implementieren, was erreicht wurde. Das implementierte Temperaturmodell ist in Abbildung 9dargestellt. Gut zu erkennen sind die Wärmekapazitäten, welche als Kondensator dargestellt sind, und die thermischen Übergangswiderstände der einzelnen Komponenten. Diese sind die mechanischen Bauteile einer Elektromaschine wie Gehäuse, Statorjoch, Statorzahn, Wicklung, Lagerung und viele mehr.

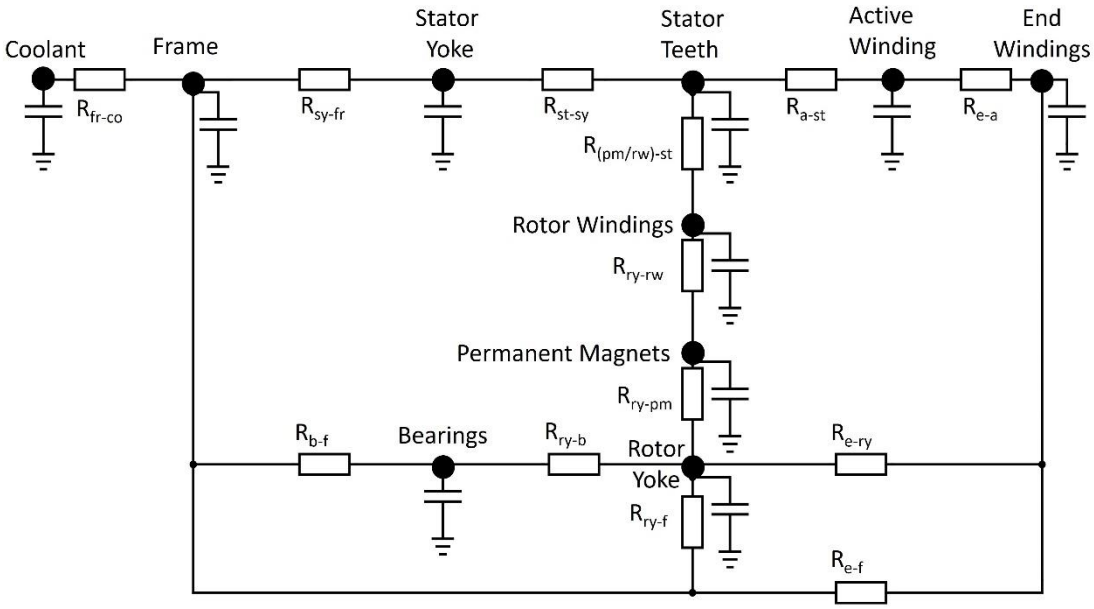

Abbildung 9 | Temperaturmodell und dessen Komponenten

Das Temperaturmodell wurde am Prüfstand validiert, indem manuell Verlustleistungen vorgegeben und die entsprechenden Temperaturen auf dem Echtzeitsystem der PUMA-

Automatisierung berechnet und auf das Inverter-Testsystem übertragen wurden. Die Validierung erfolgte im Open-Loop-Verfahren.

In Abbildung 10 ist der Temperaturverlauf bei verschiedenen Verlustleistungen dargestellt. Die Rotortemperatur steigt kontinuierlich an, während die Statortemperaturen zunächst ansteigen und bei reduzierter Verlustleistung wieder sinken. Ähnliches Verhalten zeigt sich bei den Gehäusekomponenten, deren Temperatur zunächst abnimmt, da das Kühlmedium kühler ist.

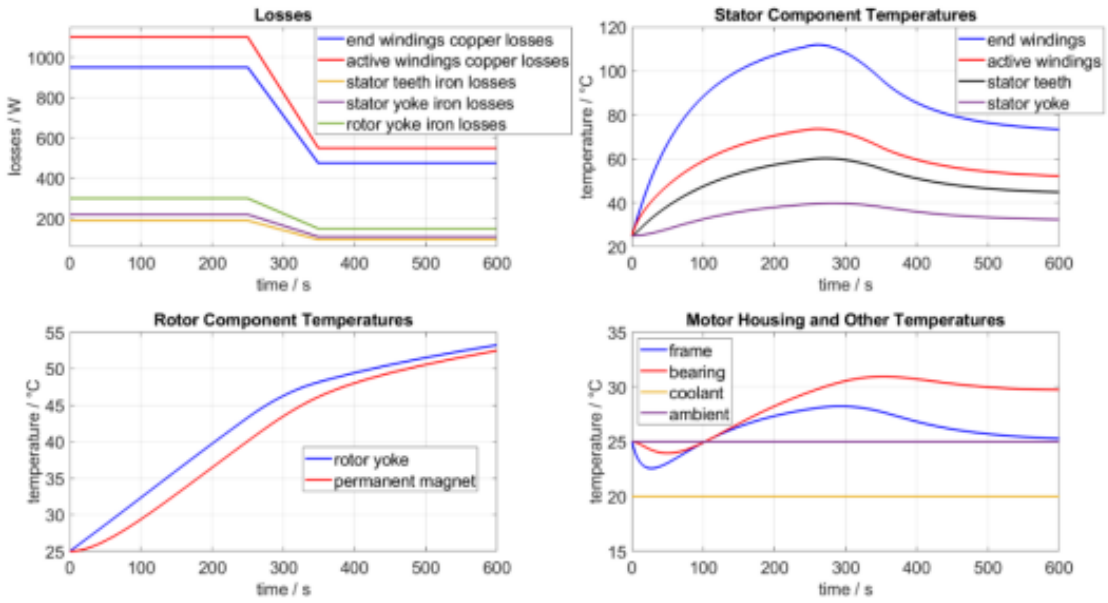

Abbildung 10 | Validierung Temperaturmodell

Mit dieser Implementierung ist es möglich, KI-basierte Inverter auf das thermische Verhalten des Motors zu trainieren und elektrische Messgrößen zur thermischen Überwachung des Antriebssystems auszuwerten.

3.1.5. Abbildung von nichtlinearen Effekten der Asynchronmaschine

Beim Training und bei der Validierung KI-basierter Inverter ist es notwendig, eine hohe Drehmoment-Abbildungsgenauigkeit zu erreichen, um den Unterschied zu realen Systemen zu minimieren. Zur hochgenauen Emulation des Maschinen-Drehmoments ist es jedoch wichtig, die komplexen Zusammenhänge der nichtlinearen elektromagnetischen Parameter eines Elektromotors korrekt abzubilden. Während AVL SET über solche genauen Modelle für Synchronmaschinen verfügt, wurde bei eingehender Analyse festgestellt, dass das Asynchronmaschinen-Modell hier noch Optimierungspotential bietet. [1]

Für Asynchronmaschinen ist die Identifikation der Ersatzschaltbildparameter komplex und abhängig von Strom und Stromfrequenz. Eine betriebspunktabhängige Nachführung dieser Parameter wird als sinnvoll erachtet. In Abbildung 11 ist das T-Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine dargestellt. [1]

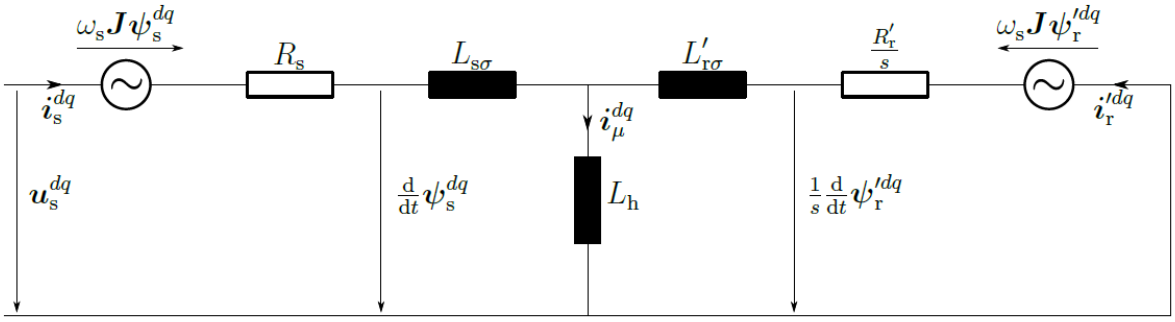

Abbildung 11 | T-Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

Wie durch FEM-Analyse herausgefunden wurde, sind die am stärksten von Stromamplitude und Stromfrequenz betroffenen Ersatzschaltbildparametern die Streuinduktivitäten, die Hauptinduktivität und der Rotorwiderstand. Diese Ersatzschaltbildparameter sind in Abbildung 12bis Abbildung 15zu sehen. Gut zu erkennen ist hierbei, dass die Einflüsse der Stromfrequenzen auf die Streuinduktivitäten sehr gering sind, dafür aber relativ groß auf den Rotorwiderstand. Die Stromamplitude beeinflusst die Streuinduktivitäten jedoch stärker als den Rotorwiderstand. Die nichtlineare Hauptinduktivität weist keinerlei Abhängigkeiten der Stromfrequenz auf.

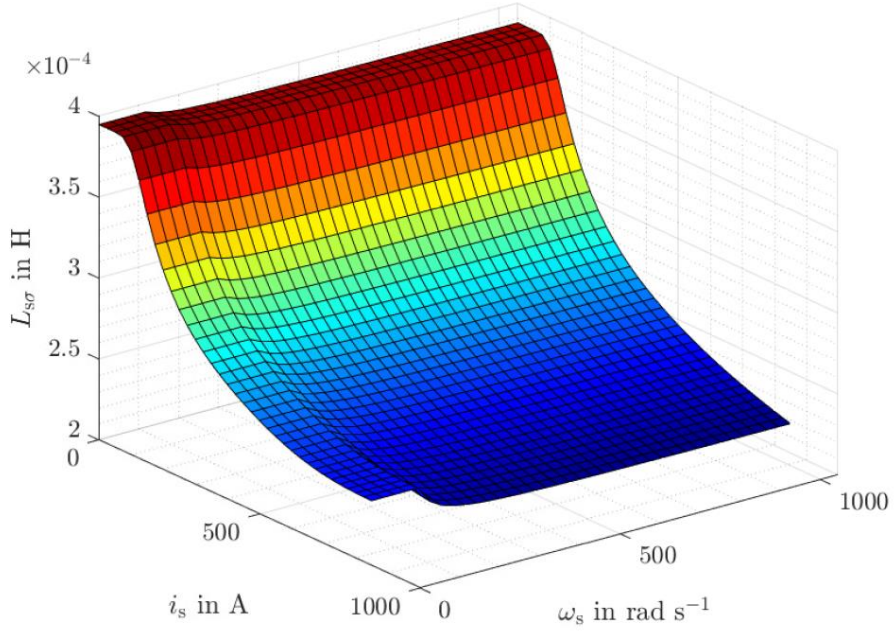

Abbildung 12 | Nichtlineare Statorstreuinduktivität

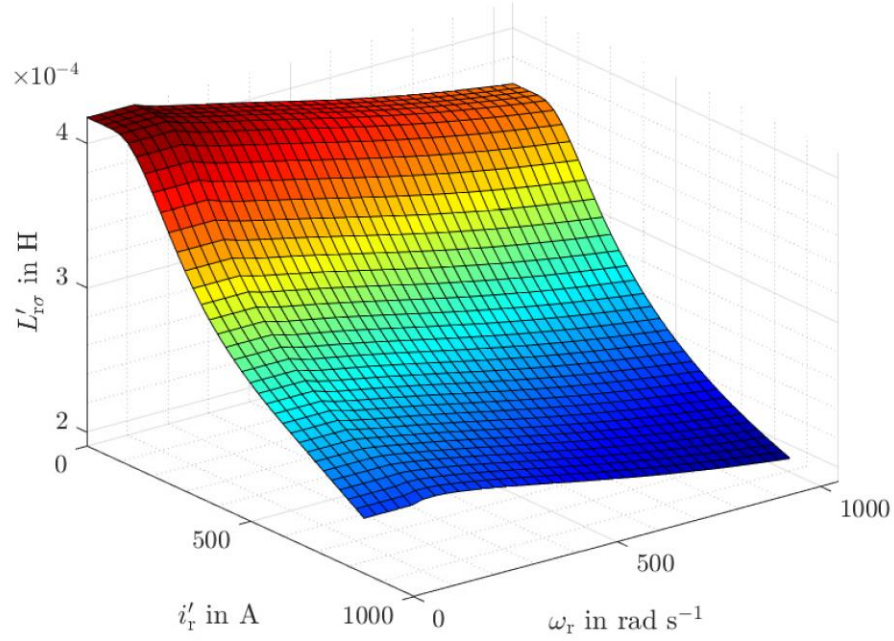

Abbildung 13 | Nichtlineare Rotorstreuinduktivität

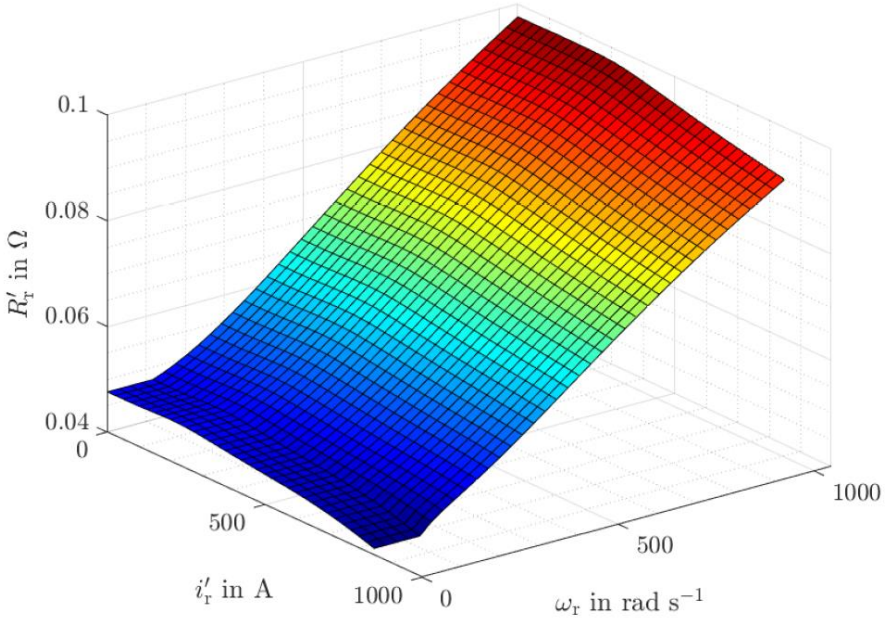

Abbildung 14 | Nichtlinearer Rotorwiderstand

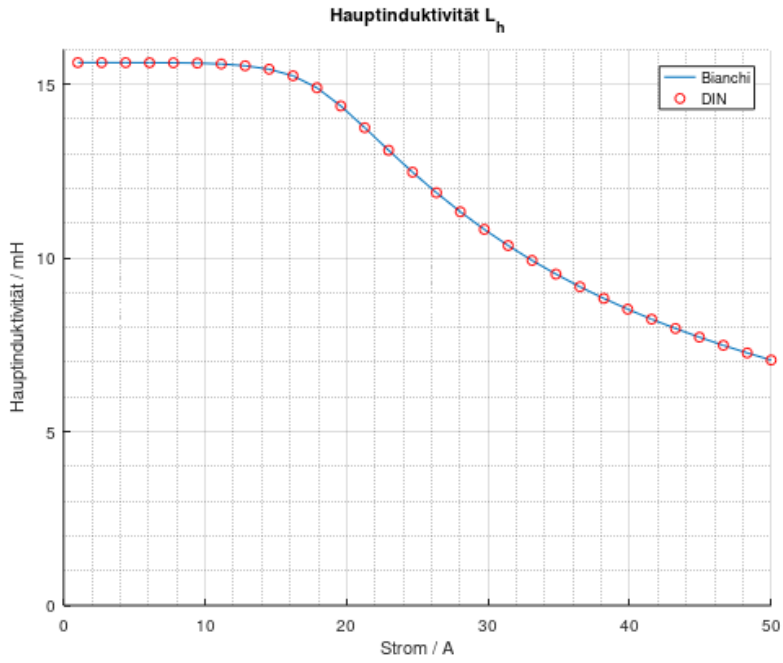

Abbildung 15 | Nichtlineare Hauptinduktivität

Die Implementierung eines Modells, welches die Ersatzschaltbildparameter der Asynchronmaschine abhängig von Strömen und Stromfrequenzen bestimmt, wurde in AVL PUMA mit der Erweiterung Testbed.CONNECT durchgeführt und vorerst simulativ getestet. Die Bestimmung der Ersatzschaltbildparameter erfolgte dabei basierend auf Lookup-Tabellen. Das Modell erhält als Eingangsparameter die Ströme in dq-Richtung von Stator und Rotor sowie deren Stromfrequenz vom Inverter-Testsystem. Basierend auf diesen Eingangsgrößen werden die bekannten Größen des T-Ersatzschaltbilds der

Asynchronmaschine bestimmt und auf die Plattform des Inverter-Testsystems geschrieben. Dadurch wird die Parametrierung arbeitspunktabhängig nachgeführt. Das Testbed.CONNECT-Modell zur dynamischen Anpassung der Ersatzschaltbildparameter der Asynchronmaschine wurde mit der PUMA-Automatisierung und Rechenplattform der AVL SET GmbH getestet. In Abbildung 16sind die open-loop Testergebnisse dargestellt. Wie zu erkennen, haben die Statorströme Einfluss auf die Statorstreuinduktivität und die Hauptinduktivität, die Rotorströme beeinflussen die Rotorstreuinduktivität und auch die Hauptinduktivität. Stromfrequenzen von Stator und Rotor haben keinen Einfluss auf die Hauptinduktivität, aber auf die jeweiligen Streuinduktivitäten. Weitere Informationen zu verschiedenen Modellen können in [2] nachgelesen werden.

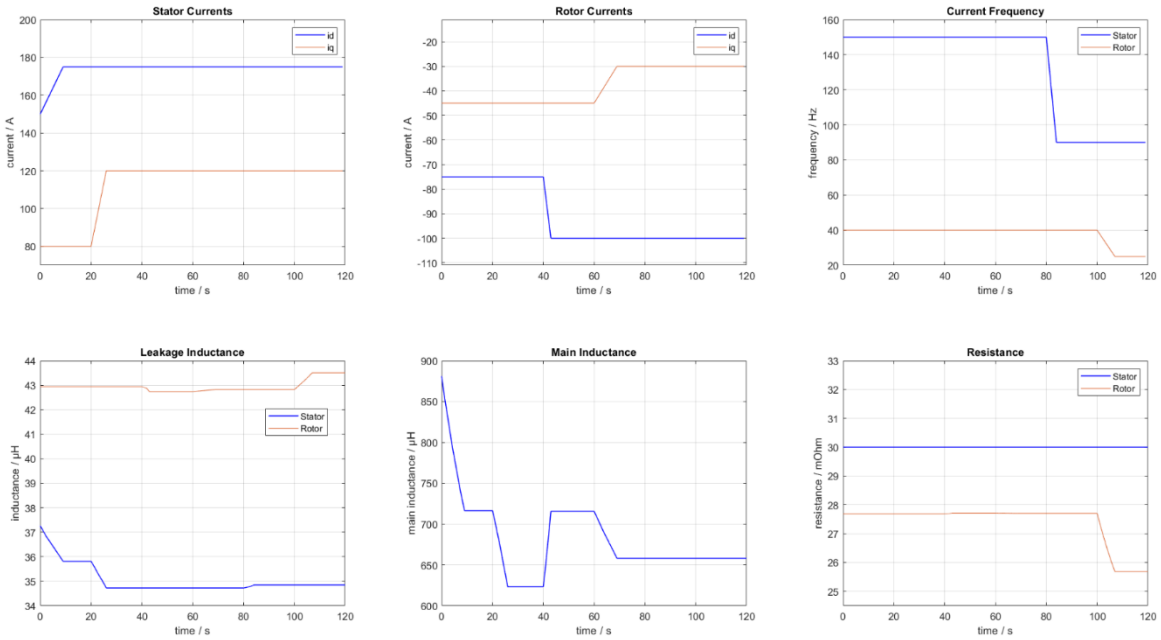

Abbildung 16 | Open-Loop Testergebnisse der arbeitspunktabhängigen Nachführung von ASM- Ersatzschaltbildparametern

Mit dieser Implementierung ist es möglich, das Drehmoment- und Frequenzverhalten der Asynchronmaschine deutlich realitätsnäher abzubilden, was im Zuge der Optimierung von KI-basierten Invertern als wichtig eingestuft wurde.

3.1.6. Extern berechnete Eisenverluste

Für die Bestimmung der extern berechneten Eisenverluste zusammen mit Ansatz 1 wurde ein AVL-Produkt herangezogen: Das Automatisierungssystem PUMA mit der Erweiterung Testbed.CONNECT. Nach anfänglicher Schulung der Mitarbeiter erfolgte eine Implementierung eines Modells, welches die Verlustleistung arbeitspunktabhängig nachführt. Das Modell wurde vorerst simulativ getestet und validiert. Im Anschluss erfolgte eine Validierungsphase, welche mit PUMA / Testbed.CONNECT in Kombination mit dem AVL SET Inverter-Testsystem durchgeführt wurde.

Eingangsgrößen sind die Ströme in dq-Richtung und die mechanische Drehzahl der Rotorwelle. Diese Eingangsgrößen werden dabei von der echtzeitfähigen Rechenplattform ausgelesen. Ausgangsgröße ist die auf Lookup-Tabellen basierte Verlustleistung, die Hysterese- und Wirbelstromverluste berücksichtigt. Diese Verlustleistung wird auf die Rechenplattform des Testsystems geschrieben.

In den nachfolgenden Abbildungen sind normalisierte Hystereseverluste und normalisierte Wirbelstromverluste bezogen auf die Ströme zu sehen. Diese Daten wurden herangezogen, um die Eisenverluste arbeitspunktabhängig auf das Inverter-Testsystem zu schreiben. Wichtig hierbei ist, dass die Drehzahl des Motors in den Lookup-Tabellen nicht mitberücksichtigt ist. Diese wird im Testbed.CONNECT-Modell in einem nachfolgenden Schritt durch Multiplikation (Hystereseverluste) oder quadratische Multiplikation (Wirbelstromverluste) berücksichtigt.

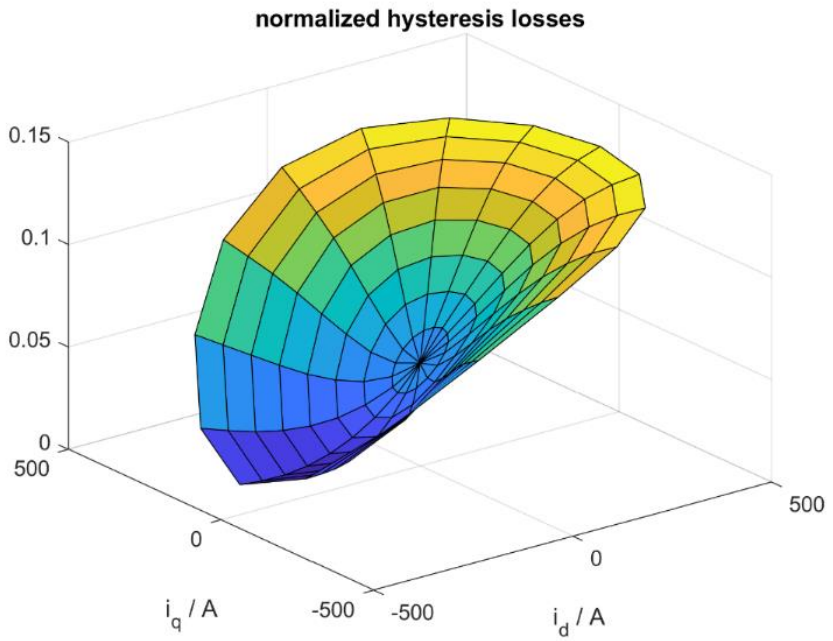

Abbildung 17 | Normalisierte Hystereseverluste einer PMSM mit 3 Phasen

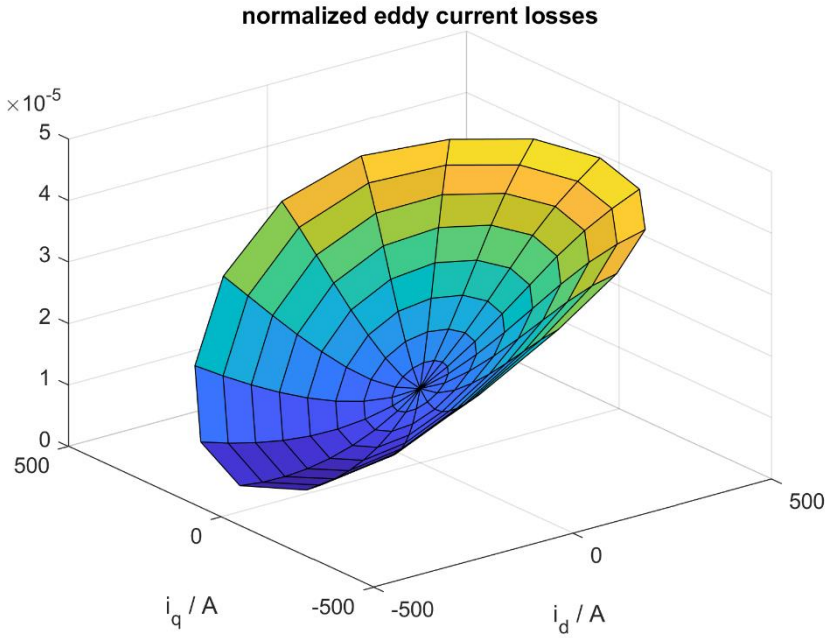

Abbildung 18 | Normalisierte Wirbelstromverluste einer PMSM mit 3 Phasen

In der nachfolgenden Abbildung sind die aus den Arbeitspunkten resultierenden Eisenverluste dargestellt. Deutlich sichtbar ist, dass die Verluste sowohl vom Strom als auch von der mechanischen Drehzahl des Elektromotors abhängig sind. Die Abhängigkeit von der Drehzahl ist jedoch bei den Wirbelstromverlusten deutlich größer. Diese Ergebnisse wurden während der simulativen Validierungsphase erzeugt.

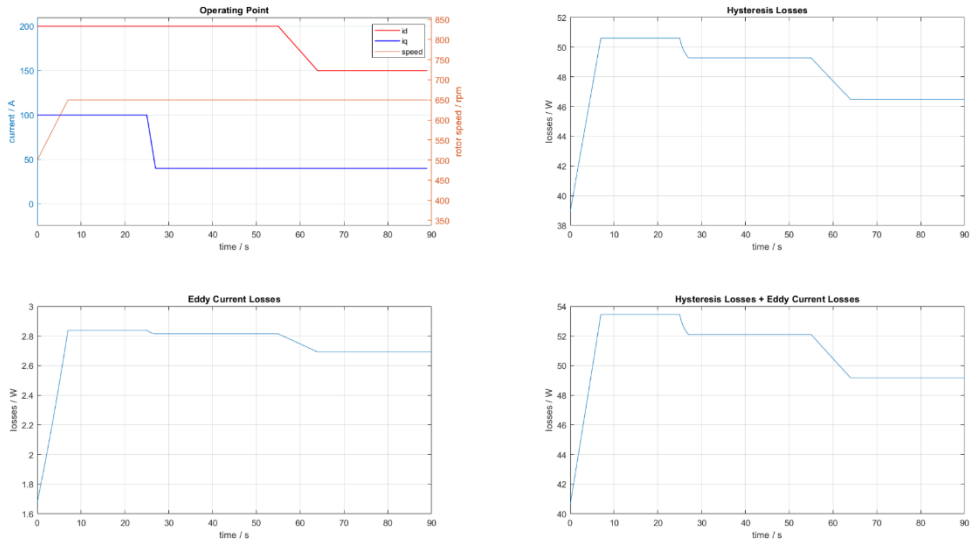

Abbildung 19 | Arbeitspunktabhängige Nachführung der Eisenverluste

3.1.7. Parallele Widerstände in d- und q-Richtung zur Berechnung von Eisenverlusten

In Abbildung 20 ist das, um den Eisenverlust-Ersatzwiderstand erweiterte Ersatzschaltbild einer dreiphasigen Drehfeldmaschine zu sehen. Der Widerstand zur Berücksichtigung der Eisenverluste ist hier zwischen Statorwiderstand und Induktivität eingebracht.

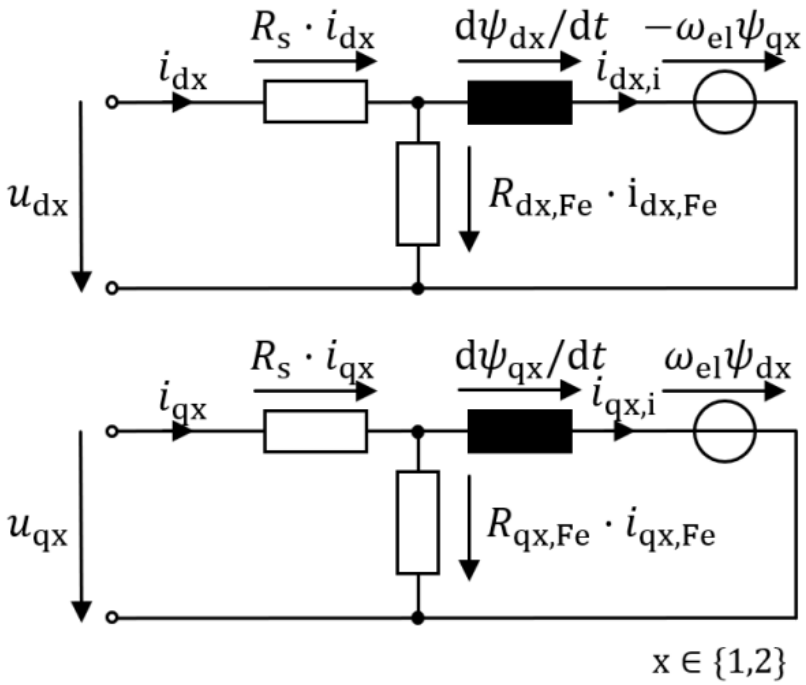

Abbildung 20 | Ersatzschaltbild Eisenverlustmodellierung mit Eisenverlustwiderstand

Beide Modelle wurden zunächst in MATLAB/Simulink implementiert und validiert. Dabei wurden beide Ansätze der Eisenverlustmodellierung parametriert und die Simulationsergebnisse hinsichtlich ihrer Genauigkeit bewertet.

In Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die simulierten Ströme durch die Eisenverlustwiderstände dargestellt. Gut zu erkennen ist hierbei, dass die Ströme dieselbe Form haben wie die angelegte Spannung in d- und q-Achse, was anhand des Ersatzschaltbildes nachvollziehbar ist. Wichtig hierbei ist, dass diese Ströme durch den Eisenverlust-Ersatzwiderstand keine realen Ströme sind, sondern nur modellbasiert. Der Ersatzwiderstand existiert so in einer realen Maschine nämlich nicht. Dieser dient nur dazu, Eisenverlustmechanismen abbilden zu können.

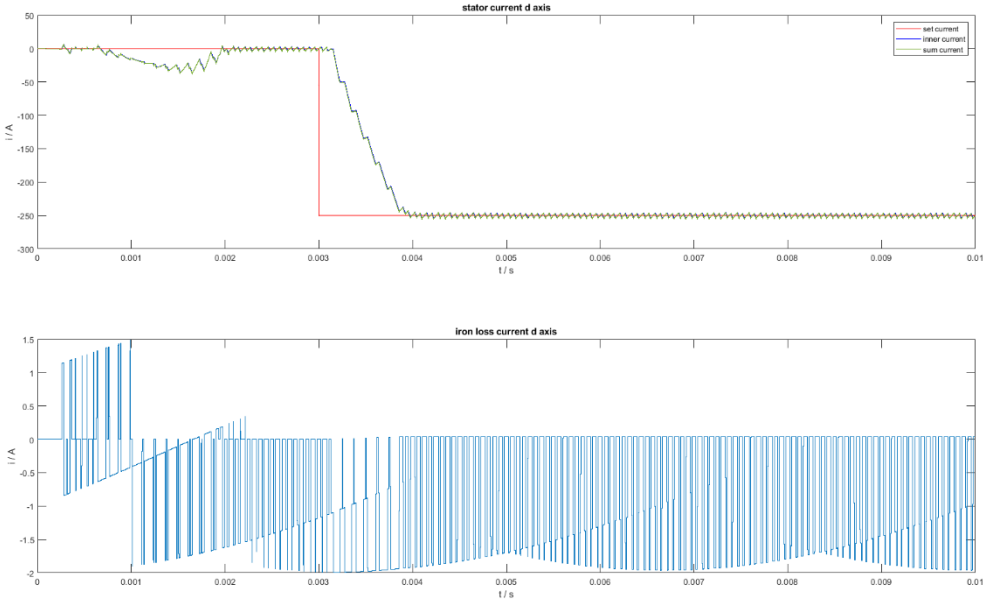

Abbildung 21 | d-Strom durch Eisenverlustwiderstand einer PMSM mit 3 Phasen

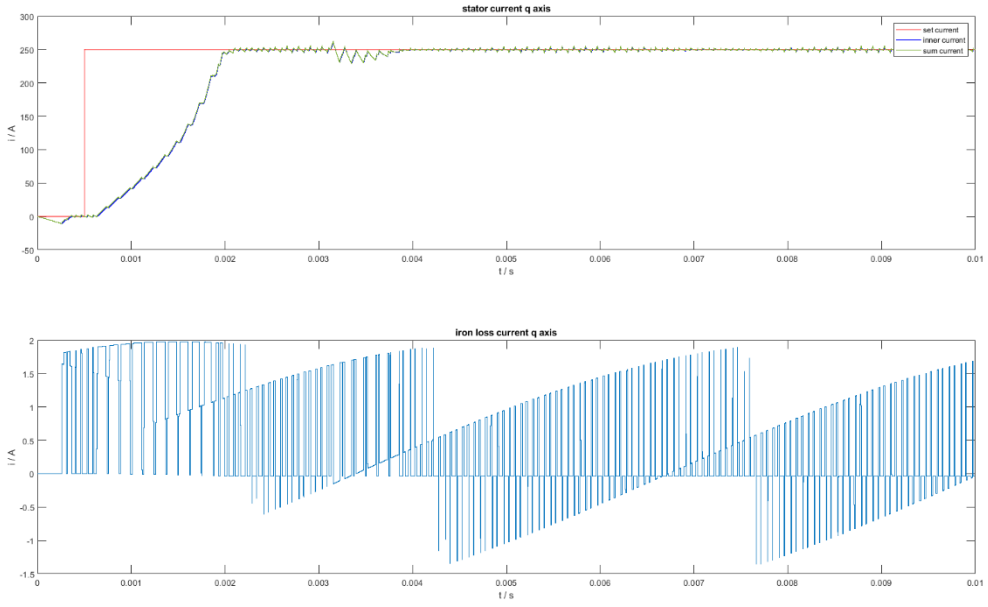

Abbildung 22 | q-Strom durch Eisenverlustwiderstand einer PMSM mit 3 Phasen

Nach diesem ersten Validierungsschritt in reiner Simulationsumgebung (Co-Simulation mit Invertermodell) erfolgte die Implementierung auf der echtzeitfähigen Rechenplattform der AVL SET GmbH. Nach der erfolgreichen Codegenerierung erfolgte eine ausgiebige Validierung auf dem Inverter-Testsystem. In Tabelle 1 sind die

Widerstände pro Modell dargestellt. Zu erkennen ist, dass es für den Rotor einen separaten Eisenverlustwiderstand für die fremderregte Synchronmaschine gibt.

Parameter	Modelle
Eisenverlustwiderstand Stator in d-Richtung Eisenverlustwiderstand Stator in q-Richtung	3ph Asynchronmaschine, 3ph Synchronmaschine permanenterregt, 3ph Synchronmaschine fremderregt, 2x3ph Synchronmaschine permanenterregt
Eisenverlustwiderstand Stator in d1-Richtung Eisenverlustwiderstand Stator in q1-Richtung Eisenverlustwiderstand Stator in d2-Richtung Eisenverlustwiderstand Stator in q2-Richtung	6ph Asynchronmaschine, 6ph Synchronmaschine permanenterregt, 6ph Synchronmaschine fremderregt
Eisenverlustwiderstand Rotor	3ph Synchronmaschine fremderregt, 6ph Synchronmaschine fremderregt

Tabelle 1 | Parameter Eisenverlustmodellierung mit Eisenverlustwiderständen

In Abbildung 23 sind Messergebnisse am AVL SET Inverter-Testsystem beim Betrieb einer sechsphasigen Synchronmaschine mit Permanenterregung zu sehen. Hier ist sehr gut zu erkennen, wie die Ströme durch die Ersatzwiderstände zur Berechnung der Eisenverluste und die Spannungen in d- und q-Richtung übereinstimmen.

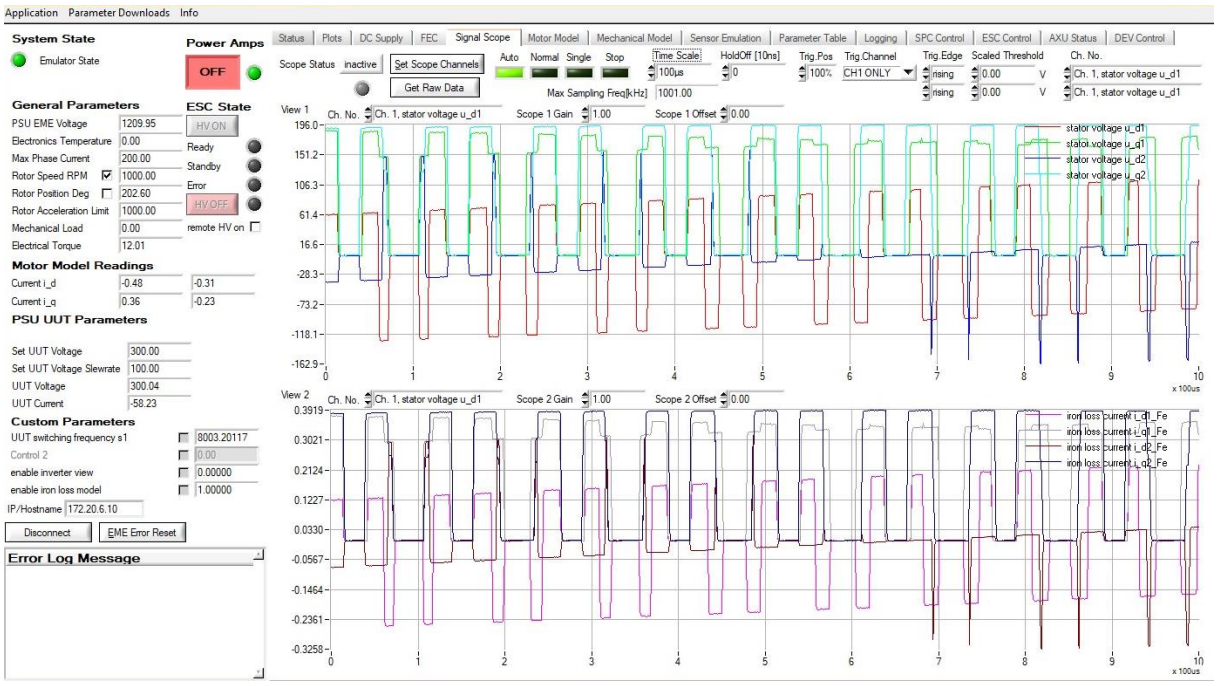

Abbildung 23 | Eisenverlustströme einer PMSM mit 6 Phasen

Aus diesen resultierenden Strömen und den Widerstandswerten der Ersatzwiderstände kann die Eisenverlustleistung berechnet werden. Da die Ströme von der Kurvenform aussehen wie eine Spannung, ist eine nachfolgende Filterung erforderlich. In der nachfolgenden Abbildung sind die Einflüsse von Strom und mechanischer Drehzahl der Maschine auf die entstehenden Eisenverluste sehr gut zu erkennen. Mit steigender Drehzahl (Plot 4) steigen auch die Eisenverluste an (Plot 3). Wird ein Drehmoment gestellt, so steigen auch die Ströme an (Plot 1 und 2). Da die Eisenverluste auch abhängig von den Strömen sind, werden diese dadurch auch beeinflusst. Es ist jedoch sehr gut zu erkennen, dass der Einfluss der Stromamplitude wesentlich geringer ist, als der Einfluss der Drehzahl des Motors.

Die mit den beiden oben beschriebenen Methoden implementierten Eisenverluste erhöhen die Darstellungsgenauigkeit von Verlustmechanismen im Inverter-Prüstand signifikant. Je nach vorliegender Parametrierung können Kunden eine der beiden Methoden beispielsweise zum Training und zur Validierung KI-basierter Inverter verwenden.

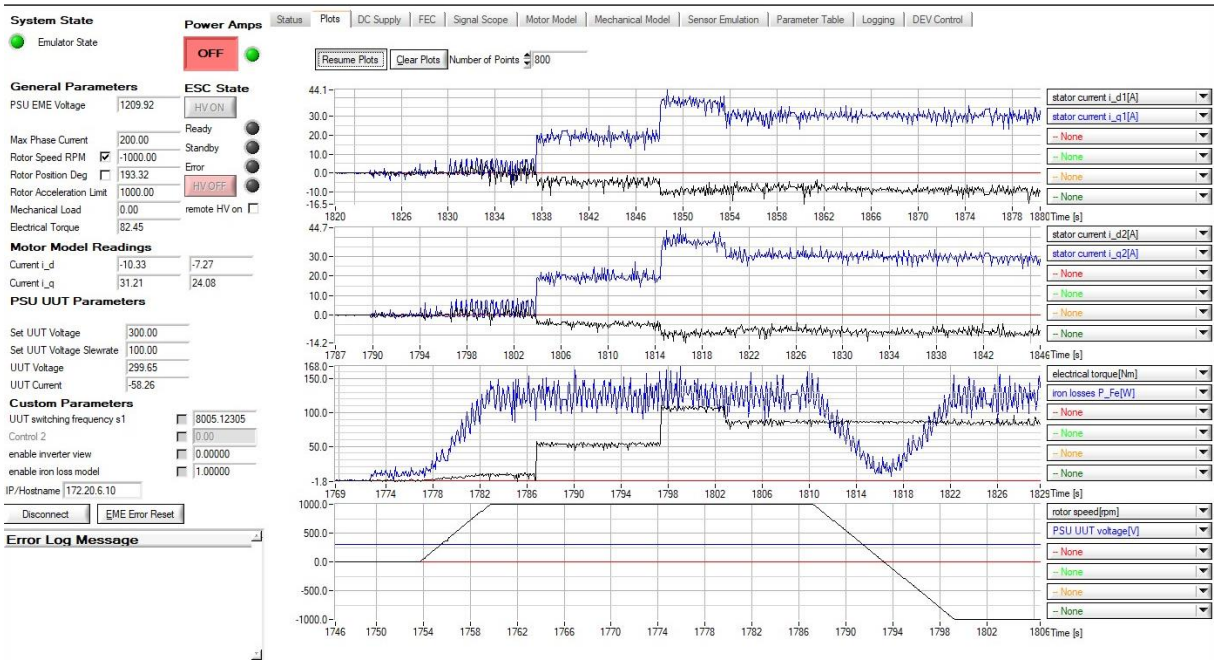

Abbildung 24 | Eisenverlustmodellierung einer PMSM mit 6 Phasen

Die AVL SET GmbH hat im Rahmen des KIRA Projekts erfolgreich die Anpassung und Validierung von Emulator basierten Leistungselektronik-Prüfständen an die Anforderungen kommender Invertergenerationen umgesetzt. Dabei wurden die Emulationsqualität des Wirkungsgrades und des thermischen Verhaltens durch Berücksichtigung spezifischer Verlustmechanismen und Modelle erheblich gesteigert. Zudem wurde das magnetische Modell auf Asynchronmaschinen erweitert und eine neue Optimierungsfunktionalität integriert, die die Emulationsgenauigkeit und damit die Optimierung des Betriebs elektrischer Traktionsantriebe verbessert.

AP 3.2: KI-basierte Modelle

In diesem Arbeitspaket war die AVL SET GmbH nicht involviert.

2.1.4 AP 4: Prototypische Umsetzung

AP 4.1: Aufbau Demonstrator/Prüfstand

In diesem Arbeitspaket war die AVL SET GmbH nicht direkt involviert.

AP 4.2: KI-gesteuerter Prüfstand

Im Verlauf des Projekts wurde das Inverter-Testsystem um die in Arbeitspaket 3 genannten Funktionen und Features erweitert, die insbesondere zum Testen von KI-optimierten und KI-gesteuerten Invertern als notwendig identifiziert wurden. Um diese implementierten Funktionen unter realistischen Bedingungen zu testen, wurde ein Versuchsinverter notwendig, der die Fähigkeiten des Prüfstands gezielt ausnutzen kann und an seine Grenzen bringt.

Im Rahmen KIRA-Projekts wurde daher ein solcher Versuchsinverter aufgebaut. Um Zeit- und Kostenaufwände gering zu halten und eine hohe Verfügbarkeit sicherzustellen, basiert er auf firmeneigenen Software- und Hardwarekomponenten. Die Software kann zeiteffizient und fehlerarm generiert werden, was schnelle Anpassungen ermöglicht, um die im KIRA-Forschungsprojekt entwickelten Features zu testen.

4.2.1. Hardware

Der Versuchsinverter besteht grundlegend aus Standardkomponenten der AVL SET GmbH. Hierzu gehören eine Rechenplattform, auch CCU (Current Control Unit) genannt, die in ähnlicher Form auch im Inverter-Testsystem selbst verwendet wird. Als Leistungsverstärker werden eine bzw. mehrere dreiphasige Zweilevel-Endstufen verwendet, die AVL SET in anderen Produktlinien verwendet. Hinzukommen noch einige Kabel zur Kommunikation und Schläuche zur Wasserkühlung des Inverters.

Der Inverter hat folgende Spezifikation:

- Dauerstrom ≥ 400A RMS
- Zwischenkreisspannung bis zu 1200V DC
- Elektrische Grundfrequenz bis 5kHz (entspricht 100.000 rpm bei Polpaarzahl von 3)

In Abbildung 25 ist der Inverter in Frontansicht zu sehen. Gut zu erkennen ist die Zweilevel-Endstufe, auf deren Oberseite die Rechenplattform (Current Control Unit) platziert ist. Auch zu erkennen ist hier die Kommunikationsschnittstelle über TCP und die Kommunikation von Rechenplattform und Endstufe über einen Lichtwellenleiter. Auch

die Anschlüsse für die Wasserkühlung der Endstufe sind auf der Vorderseite zu finden. In Abbildung 26 sind die Anschlussfelder des Inverter auf der Rückseite zu sehen. Hierzu gehören die Phasenanschlüsse, sowie auch die Terminals für die DC-Spannungsversorgung. Für eine sechsphasige Operation oder mit Fremderregung werden zwei Endstufen verwendet.

Abbildung 25 | AVL SET Inverter Frontansicht

Abbildung 26 | AVL SET Inverter Anschlussseite

Es wurde eine Variante entwickelt, bei der die bisher losen Komponenten wie das Current Controller Board (CCB) für Regelungsalgorithmen, die Spannungsmessungseinheit (VMU)

für die Auswertung der Rotorlagesensoriken, das Netzteil und weitere Komponenten in einem einzigen Gehäuse untergebracht sind. Dies bietet den Vorteil, dass nur dieser Signalteil und eine oder mehrere dreiphasige Endstufen benötigt werden, wodurch die Rüstzeiten reduziert werden können.

4.2.2. Software

Es wurden Regelungsmodelle für verschiedene Maschinentypen implementiert und getestet:

- Permanentmagneterregte Synchronmaschine (3-phasig, 6-phasig, 2x3-phasig)
- Asynchronmaschine (3-phasig)
- Fremderregte Synchronmaschine (3-phasig)

Diese Modelle wurden hinsichtlich Funktion, nichtlinearer Parametrierung, Regler, Schaltfrequenz, Flussschätzer (Asynchronmaschine), stromoptimale Betriebspunktführung und Feldschwächung in der Simulation ausführlich getestet. Die Modelle zur Motorregelung wurden um eine Auswertung verschiedener Rotorlagesensoriken erweitert, darunter Resolver, Digitalencoder und xMR.

Ein weiteres Modell zur Regelung des Inverters als 3-phasiger Hochsetzsteller wurde entwickelt und simulativ sowie am realen System evaluiert. Dieses Modell kann als Ladegerät für die Batterie eines batterieelektrischen Fahrzeugs verwendet werden. [3]

Es wurden verschiedene Features entwickelt und implementiert:

- **Stromoptimaler Betrieb**: Nutzung von offline berechneten Lookup-Tabellen für den Grunddrehzahl- und Feldschwächbereich.
- **Modellprädiktiver Regler**: Implementierung für Synchronmaschinen.
- **Exakter und schneller Flussschätzer**: Speziell für das Asynchronmodell.
- **Betrieb im Feldschwächbereich**: Nutzung von Lookup-Tabellen für nichtlinearen Betrieb (Eisensättigung) und Näherungsgleichungen für linearen Betrieb (isotrop) für alle Modelltypen.
- **DC/DC-Ladefunktion**: Ermöglicht die Nutzung des Inverters zusammen mit einer Maschine als Hochsetzsteller für DC/DC-Laden (Inverterladen).
- **Auswertung verschiedener Rotorlagesensoriken:** Unterstützung für Resolver, Digitalencoder und xMR. Eine Variante der AVL SET internen Spannungserfassung wurde entwickelt, die für geringe Spannungen ausgelegt ist.
- **Bereitstellung von hinreichend schnellen Kommunikationsschnittstellen**: Der Inverter soll in Zukunft um KI-fähige Controllersysteme erweitert werden können (z.B. Ethernet, EtherCat, elektrische I/Os).

- **Anbindung an das Automatisierungssystem PUMA**: zur Durchführung von Dauerlauftests soll der Inverter an das Automatisierungssystem PUMA angebunden werden, sodass die KI-relevanten Funktionen des Inverter-Testsystems validiert werden können
- **Schaltfrequenz**: variabel einstellbare Schaltfrequenz im Betrieb von 1 kHz bis ca. 100 kHz (mit Derating)
- **Modulationsverfahren**: mehrere Modulationsverfahren mit/ohne Spannungs-Nullkomponente stehen zur Auswahl
- **Verschiedene DC-Spannungen:** Der Inverter kann mit verschiedenen Spannungen betrieben werden. Hiermit ist gemeint, dass pro Endstufe eine unterschiedliche Spannung DC-seitig anliegen kann, wenn mehrere Endstufen verwendet werden, etwa bei sechsphasigen Reglermodellen oder auch der Fremderregung. Dies wird etwa bei redundanten Antriebskonzepten, zum Beispiel im Bereich des elektrischen Fliegens angewendet.

Die Softwaregenerierung wurde vollständig in den Workflow der AVL SET integriert und beinhaltet einige weitere Features:

- FPGA-basierte Stromregelung
- Sollwertbereitstellung und Fehlerhandling
- ARM-basiertes Parameterinterface
- TCP-Kommunikationsschnittstelle

Die Validierung der Umrichtermodelle wurde am AVL SET Inverter-Testsysten durchgeführt. Der Schwerpunkt lag auf der Optimierung der Reglercharakteristik, sodass die neu implementierten Funktionen des Inverter-Testsystems hinreichend genau qualifiziert werden konnten. Die Regelungsmodelle für alle Maschinentypen und auch die Ladefunktion simulativ wie auch am Testsystem evaluiert.

Während der Inbetriebnahme des Inverters wurden Abbildungen erstellt, die das Verhalten des Systems dokumentieren. Abbildung 27 zeigt das Einregelverhalten des modellprädiktiven Reglers (MPC) einer dreiphasigen permanentmagneterregten Synchronmaschine. Nach einem Sollwertsprung des d-Stroms von -200A auf +200A erreicht der Regler den neuen Sollwert präzise und ohne Überschwingen. Dies demonstriert die Effektivität des Reglers in der genauen und stabilen Regelung des Stroms. Weitere Informationen zum implementierten MPC sind in [4] und [5] zu finden.

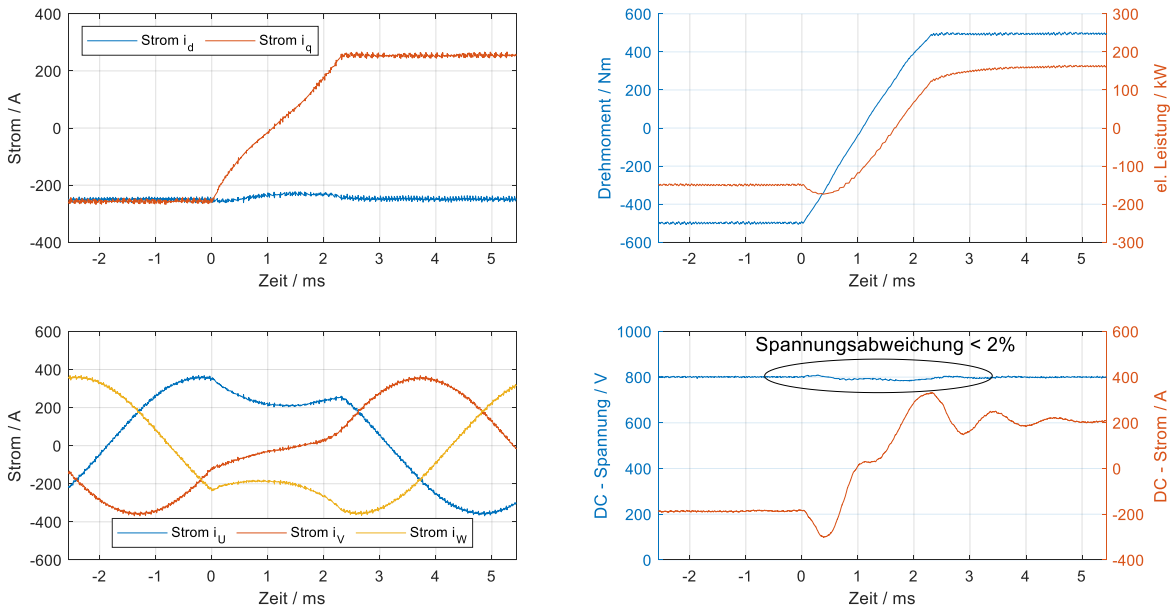

Abbildung 27 | Sprungantwort modellprädiktiver Regler AVL SET Inverter PMSM 3ph

Abbildung 28 zeigt das Einregelverhalten des PI-Reglers, der in einer Asynchronmaschine implementiert ist. Nach einem Sollwertsprung des d-Stroms von -200A auf +200A ist ein typisches leichtes Überschwingen zu beobachten. Dieses Verhalten ist charakteristisch für PI-Regler. Die Anpassung der Reglerparameter ermöglicht es, das Einregelverhalten und die Höhe des Überschwingens zu modifizieren.

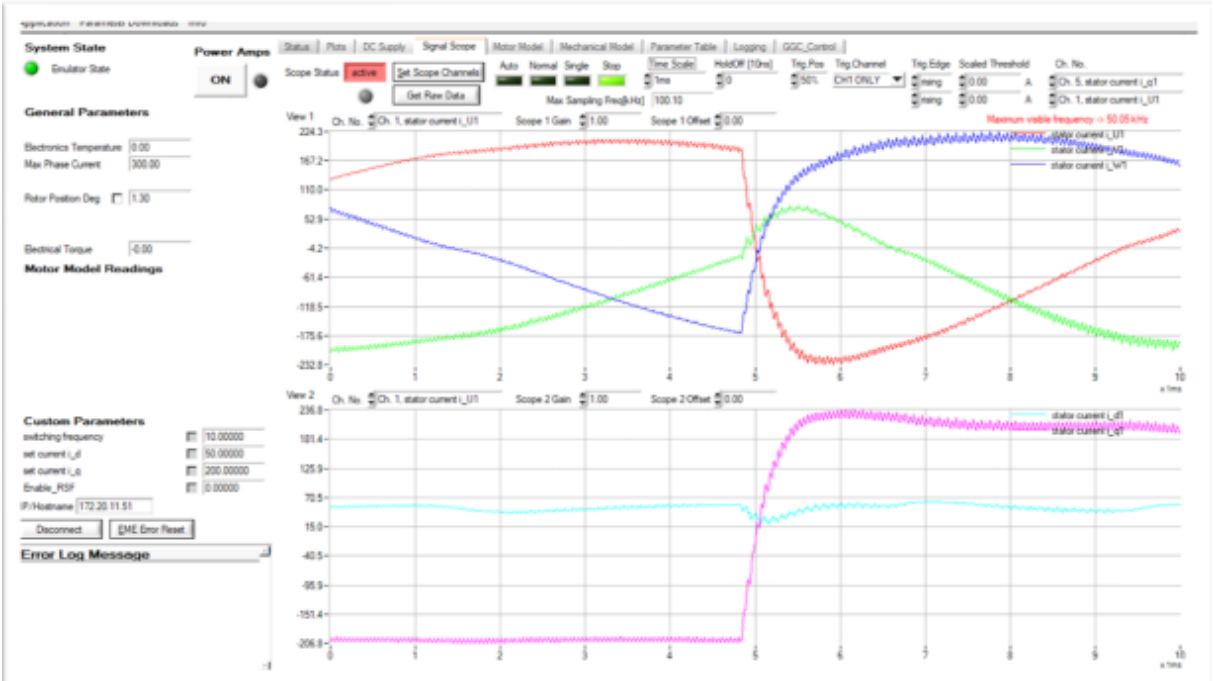

Abbildung 28 | Sprungantwort PI-Regler AVL SET Inverter ASM 3ph

Die Funktion des Inverterladens, bei der der Umrichter zusammen mit einem Motor als DC/DC-Boost-Konverter verwendet wird, wurde simulativ und auch am Prüfstand evaluiert. Zusätzlich wurde die Prüfstandfunktion als einphasige Spannungsquelle getestet. [3]

In Abbildung 29 wird ein Sollwertsprung von 300A auf der Primärseite des Inverters dargestellt, was einem Leistungssprung von 0kW auf 120kW entspricht. Die Spannungen betrugen primärseitig 400V und sekundärseitig 700V. Die unterschiedlichen Ströme, die sich aufgrund der Leistungsgleichheit einstellen, sind gut zu erkennen.

Das Bild unten links zeigt die Phasenströme des Inverters, wobei ein Interleaved-Verfahren sichtbar ist. Hierbei werden die Phasen um 120° versetzt getaktet, was zu einer Reduktion des Rippels im Gesamtstrom um den Faktor 9 im Vergleich zur Gleichtaktung führt.

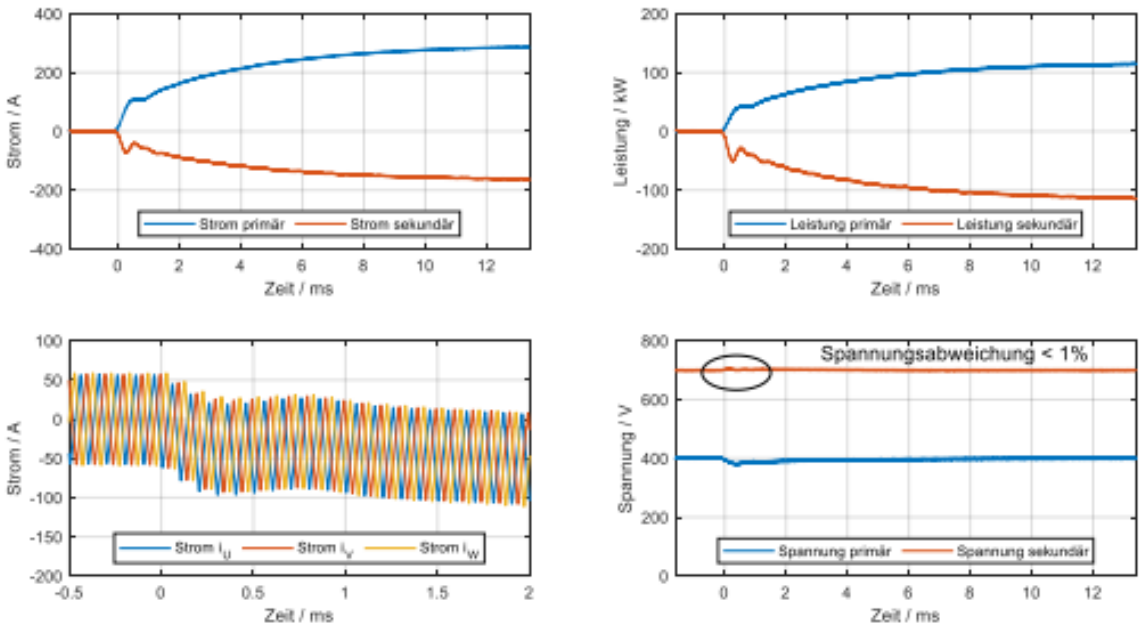

Abbildung 29 | Regelverhalten Inverter als DC/DC-Boost-Konverter

AP 4.3: Skalierter Fahrzeugdemonstrator

In diesem Arbeitspaket war die AVL SET GmbH nicht involviert.

AP 4.4: Validierung und Evaluation am Prüfstand

Der Aspekt der Validierung und Evaluation am Prüfstand wurde in den vorangegangenen Arbeitspaketen behandelt, um ein einheitliches Gesamtbild zu gewährleisten. Hier sind auch Testergebnisse sichtbar und erläutert.

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Matrix-Struktur und der damit verbundene Projektplan erwiesen sich als äußerst zielführend. Auf Grund von Ressourcenengpässen musste der Plan bei AVL SET modifiziert werden, welches den Projekterfolg aber nicht beeinträchtigte. Die zu Beginn des Projekts festgelegten Maßnahmen erwiesen sich am Ende als notwendig und angemessen. Regelmäßige Meetings (zweiwöchentlich als virtuelles Meeting via Microsoft Teams) und Meilensteintreffen ermöglichten einen effizienten Wissensaustausch, das gemeinsame Bewältigen von Herausforderungen und das Erreichen der festgelegten Ziele. Jedes einzelne Arbeitspaket war unverzichtbar und hätte nicht abgesetzt werden können. Die meisten Ressourcen wurden für Arbeitspaket 3 aufgewendet, welches jedoch von entscheidender Bedeutung war und unsere besondere Aufmerksamkeit erforderte. In Summe haben wir unter 10% Personalmehraufwand generiert, als zu Projektanfang vermutet.

Die wichtigste Position bei den Materialausgaben entfällt auf den während des Projektes entwickelten Versuchsinverter. Dieser wurde benötigt, um alle entwickelten Features des AVL SET InverterTS funktionell abprüfen zu können. Auf den Inverter sind wir in Kapitel 2.1. im Detail eingegangen.

Die durchgeführten Arbeiten und Maßnahmen standen in einem angemessenen Verhältnis zu den Zielen und dem Umfang des Projekts. Die Tatsache, dass wir einen Minderantrag für den nicht benötigten erfolgreich eingereicht und genehmigt bekommen haben, sowie einen reduzierten Materialverbrauch nachweisen können, unterstreicht unser verantwortungsbewusstes und effizientes Management der zur Verfügung stehenden Ressourcen. Es ist festzustellen, dass die eingesetzten Ressourcen (Zeit, Geld, Personal) effizient und sinnvoll genutzt wurden.

2.3 Eingehende Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwendbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen von KIRA erzielten Ergebnisse sind für die AVL SET im Allgemeinen sehr wichtig und durchweg positiv. Das Inverter-Testsystem konnte durch Implementierung vieler Features wie

- Eisenverlustmechanismen
- Erhöhung der Ausfallsicherheit und des Spannungsbereichs
- Filterung einiger Ausgangssignale
- Verbesserung der Modellierung einer Asynchronmaschine
- Abbildung des Temperaturverhaltens einer E-Maschine

und weiteren deutlich weiterentwickelt werden. Dies betrifft insbesondere den Betrieb zusammen mit einem KI-basierten oder KI-optimierten Antriebsinverter. Damit stellt sich die AVL SET gut gerüstet für den zukünftigen Markt, was Testmöglichkeiten und KI-Integrierung betrifft. Die entwickelten Features konnten alle im Rahmen von KIRA vollständig implementiert, getestet und validiert werden.

Das Marktpotential der Projektergebnisse ist äußerst vielversprechend. Der im Rahmen von KIRA entwickelte Test- und Validierungsinverter bietet der AVL SET eine vielseitige und kostengünstige Möglichkeit, Inverter-Testsysteme vollständig zu testen. Besonders hervorzuheben ist die Fähigkeit, Softwarefeatures schnell in einem sicheren Umfeld zu entwickeln und mit dem Testinverter zu validieren. Alle während KIRA entwickelten Features wurden mit diesem Umrichter umfassend validiert.

Zusätzlich ermöglicht der Einsatz von KI-Methoden für innovative Steuerungs- und Regelkonzepte eine weitere Reduktion des Aufwands. Dies senkt nicht nur die Entwicklungskosten, sondern verkürzt auch die Zeit bis zur Markteinführung erheblich, was uns bedeutende Wettbewerbsvorteile verschafft.

Es ist gelungen, von den ersten prototypischen Implementierungen und vorangegangen Nachweisen über die Funktionsfähigkeit unserer Technologie Richtung Marktreife voranzuschreiten. So konnten wir erste Features (bspw. Inverter-View und Verlustmechanismen) bereits in Kundenprojekten einsetzen. Teilweise steht allerdings die Erstnutzung noch aus.

Die im Rahmen des Projekts erzielten Erkenntnisse werden durch Lehrveranstaltungen verbreitet. Dies dient unter anderem der gezielten Ausbildung von Fachkräften in diesem speziellen Bereich und trägt zur Weiterentwicklung der gewonnenen Erkenntnisse hin zum zukünftigen Stand der Technik bei.

2.4 Eingehende Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Die AVL SET hat alle im Rahmen des Forschungsprojekts geplanten Features implementiert, getestet und vollständig validiert. Zudem konnten im Rahmen von KIRA weitere Themen abgearbeitet werden, wie die Entwicklung des Testinverters. Der Fortschritt, der im Rahmen von KIRA erzielt werden konnte, sichert den Fortbestand des AVL SET Inverter-Testsystems auch bei Eintritt einer neuen Generation KI-basierter Antriebsumrichter.

Wir haben während der Durchführung des Vorhabens keine spezifischen Fortschritte oder Entwicklungen von anderen Institutionen oder Projekten in Erfahrung bringen können.

2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Einen Teil der bereits durch unsere Konsortialpartner erfolgten Veröffentlichungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Schüller S., Azeem M., von Hoegen A., De Doncker R., Temperature Estimation of a PMSM using a Feed-Forward Neural Network, *IEEE Xplore, 2017*
- Wiedemann S, Hackl C., Simultaneous Identification of Inverter and MachineNonlinearities for Self-Commissioning of Electrical Synchronous Machine Drives*, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2023*
- Mai A., Liu X., Wagner B., Hofmann M., Current Harmonics Minimization of Permanent Magnet Synchronous Machine Based on Iterative Learning Control and Neural Networks, Machines, 11, 78, 2023
- Lange T., Hoegen A., Hartgenbusch N., Götz G., De Doncker, R., Improvement of Phase-Voltage Measurement with Voltage-to-Frequency Converters via Residual-Voltage Sensing, EPE'23 ECCE Europe, 2023

Darüber hinaus werden Fachvorträge abgehalten und über die Erkenntnisse berichtet.

3. Verzeichnisse

3.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 | Konsortialpartner KIRA 4
Abbildung 2 | Matrixdimensionen 6
Abbildung 3 | Struktur der Arbeitspakete 6
Abbildung 4 | Zeitplanung 11
Abbildung 5 | Messsignale mit deaktiviertem "Inverter-View" 16
Abbildung 6 | Messsignale mit aktiviertem "Inverter-View" 17
Abbildung 7 | Sinus-Dreieck-Modulation 18
Abbildung 8| Super-Sinus-Modulation 18
Abbildung 9 | Temperaturmodell und dessen Komponenten 19
Abbildung 10 | Validierung Temperaturmodell 20
Abbildung 11 | T-Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine 21
Abbildung 12 | Nichtlineare Statorstreuinduktivität 22
Abbildung 13 | Nichtlineare Rotorstreuinduktivität 22
Abbildung 14 | Nichtlinearer Rotorwiderstand 23
Abbildung 15 | Nichtlineare Hauptinduktivität 23
Abbildung 16 | Open-Loop Testergebnisse der arbeitspunktabhängigen Nachführung von ASM- Ersatzschaltbildparametern 24
Abbildung 17 | Normalisierte Hystereseverluste einer PMSM mit 3 Phasen 25
Abbildung 18 | Normalisierte Wirbelstromverluste einer PMSM mit 3 Phasen 26
Abbildung 19 | Arbeitspunktabhängige Nachführung der Eisenverluste 26
Abbildung 20 | Ersatzschaltbild Eisenverlustmodellierung mit Eisenverlustwiderstand 27
Abbildung 21 | d-Strom durch Eisenverlustwiderstand einer PMSM mit 3 Phasen 28
Abbildung 22 | q-Strom durch Eisenverlustwiderstand einer PMSM mit 3 Phasen 28
Abbildung 23 | Eisenverlustströme einer PMSM mit 6 Phasen 29
Abbildung 24 | Eisenverlustmodellierung einer PMSM mit 6 Phasen 30
Abbildung 25 | AVL SET Inverter Frontansicht 32
Abbildung 26 | AVL SET Inverter Anschlussseite 32
Abbildung 27 | Sprungantwort modellprädiktiver Regler AVL SET Inverter PMSM 3ph 35
Abbildung 28 | Sprungantwort PI-Regler AVL SET Inverter ASM 3ph 35
Abbildung 29 | Regelverhalten Inverter als DC/DC-Boost-Konverter 36

3.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 | Parameter Eisenverlustmodellierung mit Eisenverlustwiderständen 29

3.3 Literaturverzeichnis

[1] S. Merath, Aufbau einer FEM-Simulationsumgebung zur Parametrierung von nichtlinearen Asynchronmotor-Modellen von E-Motor-Emulatoren, unveröffentlicht, 2019.

[2] S. Merath, Evaluierung verschiedener Asynchronmaschinen-Modelle zur Implementierung auf einem FPGA-basierten Echtzeitsystem, unveröffentlicht, 2021.

[3] M. Schmid, D. Wollschläger, M. Schnabler und T. Hackl, „Hocheffiziente EV-Plattformlösung für Hochleistungsanwendungen," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift,* pp. 28-35, 1 12 2022.

[4] J. Richter, Modellbildung, Parameteridentifikation und Regelung hoch ausgenutzter Synchronmaschinen, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2016.

[5] P. Winzer, Steigerung von Drehmoment und Wirkungsgrad bei Synchronmaschinen durch Nutzung der magnetischen Asymmetrie, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT9, 2017.

[6] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, „Verkehr in Zahlen," 2010.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht

3. Titel
KI-Methoden zur optimierten Regelung elektrischer Traktionsantriebe
Akronym: KIRA
Teilvorhaben: Weiterentwicklung von Leistungselektronik Prüfständen für Inverter mit KI-basierten Regelalgorithmen

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens Juli 2024
Merath, Stefan Winzer, Patrick Dr.	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Broschüre
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) AVL SET GmbH Spinnerei 8 88239 Wangen i.A. DE	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 19I21030D
	11. Seitenzahl 42
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 6
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 29

16. Zusätzliche Angaben
-

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)
-

18. Kurzfassung
Das Projekt KIRA fokussiert sich auf die Nutzung von KI-basierten Verfahren zur Optimierung und Regelung elektrischer Antriebsstränge in Fahrzeugen, um Effizienz, Ausnutzung, Geräuschentwicklung zu verbessern,

Die AVL SET GmbH hat sich in diesem Teilvorhaben auf die Verbesserung der Antriebsmodellierung fokussiert, die den zentralen Teil des PHiL-basierten AVL Inverter Testsystems darstellt. Das Ziel dabei war, das Testsystmem speziell auf die Prüfung von KI-basierten oder KI-optimierten Traktionsinvertern vorzubereiten. Hierzu wurden nachfolgende Punkte während des Forschungsprojekts bearbeitet:

- Steigerung der Emulationsqualität durch Berücksichtigung von Eisenverlustmechanismen und Kupferverlusten sowie Erhöhung des Spannungsbereichs
- Optimierung der Emulationsqualität durch Integration eines thermischen Modells
- Erweiterung des magnetischen Modells der Asynchronmaschine zur präziseren Emulation nichtlinearer und frequenzabhängiger magnetischer Effekte

19. Schlagwörter
Inverter, Emulation, KI, Eisenverluste, Antriebsmodellierung

20. Verlag -	21. Preis -

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title Project name: AI methods for optimized control of electric traction drives Acronym: KIRA Sub-project: Further development of power electronics test benches for inverters with AI-based control algorithms	
4. author(s) (family name, first name(s)) Merath, Stefan Winzer, Patrick Dr	5. end of project July 2024
	6. publication date planned
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) AVL SET GmbH Spinnerei 8 88239 Wangen im Allgäu Germany	9. originator's report no. -
	10. reference no. 19I21030
	11. no. of pages 42
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi) 11019 Berlin	13. no. of references 6
	14. no. of tables 14
	15. no. of figures 29
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	

18. abstract

The KIRA project focuses on the use of AI-based methods for the optimization and control of electric powertrains in vehicles to improve efficiency, utilization and noise development,

In this sub-project, AVL SET GmbH focused on improving drive modeling, which is the central part of the PHiL-based AVL inverter test system. The aim was to prepare the test system specifically for testing AI-based or AI-optimized traction inverters. To this end, the following points were addressed during the research project:

- Increasing the emulation quality by taking iron loss mechanisms and copper losses into account and increasing the voltage range
- Optimization of the emulation quality by integrating a thermal model
- Extension of the magnetic model of the asynchronous machine for more precise emulation of non-linear and frequency-dependent magnetic effects

19. keywords Inverter, emulation, AI, iron losses, drive modeling	
20. publisher -	21. price -