

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05H2021 - R&D BESCHLEUNIGER (TOSCA)

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt
Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Herbert De Gerssem
E-Mail: degersem@temf.tu-darmstadt.de
Förderkennzeichen: 05H21RDRB2
Förderzeitraum: 01.07.2021 - 30.06.2024
Zuwendung: 276.054,34 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: mueller@temf.tu-darmstadt.de
Zusätzlicher Name: Wolfgang Müller

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	1		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	5		
Andere Veröffentlichungen:	11		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	2		
Masterarbeiten:	2		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 28.10.2024 09:31 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Institut für Teilchenbeschleunigung und Elektromagnetische Felder, TU Darmstadt
Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. Herbert De Gersem
Verbund:	TOSCA
Thema:	Finite-Elemente-Analysen für Hochtemperatur-supraleitende Magnete

Zusammenfassung

Die computergestützte Feldsimulation von supraleitenden Magneten ist durch die Multi-Skalen-Eigenschaft der Magnete selbst sowie den hoch nichtlinearen und multi-physikalischen Phänomenen des so genannten Quenchphänomens, der mit der Supraleitung einhergeht, eine große Herausforderung für existierende Simulationssoftware. Dies ist noch stärker der Fall für Hochtemperatur-supraleitende Magnete und Spulen, welche etwa in Beschleunigeranlagen der nächsten Generation oder in Fusionskraftwerken zur Anwendung kommen sollen. Ziel dieses Teilprojektes war es daher, maßgeschneiderte Verfahren für die effiziente Feldsimulation supraleitender Magnete zu entwickeln.

Verschiedene Ansätze wurden hierbei hauptsächlich verfolgt, die sich als erfolgreich dargestellt haben, um supraleitende Magnete und Dünnschicht-Bandleiter, wie sie bei den modernen Hochtemperatur-supraleitenden Magneten verwendet werden, zu simulieren: Im ersten Ansatz wird eine quasi-dreidimensionale Diskretisierung benutzt, um insbesondere die Quenchausbreitung in langen Magneten effizient zu simulieren. Im zweiten Ansatz wurde die seit den 1990er bekannte Methode des reduzierten magnetischen Vektorpotentials verbessert und erweitert, sodass sie auch komplexe Magnetisierungseffekte auflösen kann und dabei das Originalverfahren erheblich bezüglich Rechenzeit und Rechenressourcen übertrifft. Im dritten Ansatz wurden dünne Strukturen zu einem Blockmaterial homogenisiert und ihr physikalisches Verhalten anhand von neuronalen Netzwerken approximiert.

Alle entwickelten Verfahren können zukünftig Forscher:innen und Ingenieur:innen weltweit dienen, noch kompliziertere und leistungsstärkere Magneten zu untersuchen und auszulegen. Zudem bilden sie ein Sprungbrett für die Entwicklung von noch akkurateren und effizienteren numerischen Methoden zur Simulation von Hochtemperatur-supraleitenden Magneten und Spulen.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Es sollten numerische Verfahren entwickelt werden, um effiziente Feldsimulationen von Hochtemperatur-supraleitenden Magneten und den dortigen physikalischen Phänomenen zu ermöglichen. Besondere Herausforderung bei der Simulation solcher Magnete sind hierbei die komplexe Geometrie der Spulenwicklungen, die hoch nichtlinearen Effekte der Supraleitung, das multi-physikalisch gekoppelte Verhalten, welches die Berücksichtigung von magnetischen, thermischen und strukturmechanischen Effekten notwendig macht, die starke Diversität der Zeitskalen dieser unterschiedlichen physikalischen Phänomene, und die sowohl geometrische als auch physikalische Multiskalen-Charakteristik von Beschleunigermagneten, insbesondere von Dünnband-Schichtleitern, wie sie für Hochtemperatur-Supraleiteranwendungen üblicherweise verwendet werden.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Seit den 1990er Jahren werden numerische Verfahren entwickelt, die sich speziell mit der Simulation von Beschleunigermagneten befassen. Eine Herausforderung hierbei stellt sowohl die geometrische als auch physikalische Multi-Skalen-Natur der Magnete dar: Einerseits besitzen sie eine geometrisch detaillierte Querschnittsfläche mit hunderten oder gar tausenden von Wicklungen, andererseits sind diese Magnete häufig viel länger, als ihr Querschnitt breit sind, und die physikalischen Phänomene – insbesondere das Quenchphänomen – spielt sich in sehr kleinen Längenskalen ab. Die Anwendung von Standardverfahren zur Feldsimulation würde unter diesen Bedingungen zu einem solch hohen Bedarf an Rechenressourcen führen, dass solche Simulationen gar nicht durchführbar wären. Dies hat in der Vergangenheit erfordert, dass die Magnetmodelle häufig sehr vereinfacht wurden oder nur Teilaspekte in einzelnen Simulationsstudien betrachtet wurden. Die daraus resultierende Ungenauigkeit der Ergebnisse führte wiederum dazu, dass die Sicherheitsmargen für den Betrieb der Beschleunigeranlagen hoch gewählt werden mussten, was zu einem hohen Anteil an unnötigen Ausschaltvorgängen führte. Die Konsequenz ist sowohl eine Verminderung der effektiven Betriebszeit der gesamten Beschleunigermaschine als auch eine Erhöhung der Betriebskosten, da Neustarts von Beschleunigeranlagen energie- und somit kostenintensiv sind.

Dieser Multiskaleneffekt ist in Hochtemperatur-supraleitenden Bandleitern besonders ausgeprägt, was sich aus ihrer Dünnheit und Multischichtstruktur ergibt. Zweidimensionale Simulationen solcher Bandleiter in all ihren Details sind bereits schwierig durchzuführen, doch dreidimensionale Simulationen sind gar nicht mehr anwendbar, da die Diskretisierung jeder Schicht im Bandleiter zu einem inakzeptablen Bedarf an Rechenressourcen führen würde. Das gleiche Problem betrifft auch laminierte Eisenjoche, die gerne für Magnete mit schnellem Feldanstieg genutzt werden, um die Wirbelstromeffekte und einhergehende Verluste zu reduzieren, sowie komplizierte Spulenwicklungen. Es ist daher wichtig, dass entsprechende Multiskalen-Simulationsmethoden entwickelt werden, die mit diesen Herausforderungen umgehen können.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

3.1 Quasi-dreidimensionale Diskretisierungsmethode

Als erstes wurde der Ansatz der quasi-dreidimensionalen (Q3D), hybriden Diskretisierung verfolgt. Das Ziel hierbei war es, die Quenchausbreitung in langen Magneten zu modellieren und simulieren. Daher wurde neben dem magnetischen Feldproblem auch die Wärmeleitung betrachtet und miteinander in

einer magneto-thermischen Problemstellung gekoppelt. In der zweidimensionalen (2D) Querschnittsfläche des Magneten wurden dreieckige finite Elemente (FE) verwendet, während in der eindimensionalen (1D) Längsrichtung des Magneten spektrale Elemente (SE) angewendet werden sollten. Nach Literaturstudien und numerischen Tests haben sich für den SE-Teil der Methode die modifizierten Lobattopolynome hinsichtlich Recheneffizienz und Einfachheit im Gebrauch als optimal erwiesen, und diese wurden sowohl für das thermische als auch magnetische Teilproblem in Verbindung mit linearen FE verwendet.

Die Q3D-Implementierung des thermischen und magnetischen Teilproblems wurde jeweils separat und gekoppelt verifiziert und mit 3D FE-Referenzsimulation verglichen, wobei die Q3D-Methode die 3D-Standardmethode stets an Recheneffizienz übertrifft, während sie eine vergleichbare Rechengenauigkeit erzielt. Schließlich wurde die Q3D-Methode noch um wesentliche Features erweitert wie etwa nichtlineare Materialcharakteristiken, einer Feld-Netzwerk-Kopplung und der Modellierung der asymmetrischen Endwicklungen.

Damit wurde das Q3D-Simulationsverfahren letztendlich erfolgreich für die Berechnung der Quenchausbreitung innerhalb einer supraleitenden Racetrack-Spule angewandt und es wurden unterschiedliche Güten der Kabelisolationen studiert. Das gesamte Verfahren wurde in einem In-House-Code in Matlab implementiert.

3.2 Methode des reduzierten magnetischen Vektorpotentials

Als nächstes wurde der Ansatz des reduzierten magnetischen Vektorpotentials (RMVP) verfolgt. Der Fokus hierbei liegt mehr bei der magnetischen Feldsimulation und der Quantifizierung der Feldqualität statt auf der Quenchsimulation. Ausgangspunkt war das Originalverfahren aus den 1990er Jahren, das prominenterweise auch in CERNs Software ROXIE Verwendung findet, mit der in der Vergangenheit die Magnete des Large Hadron Collider ausgelegt worden sind. Durch Reformulierung des Originalverfahrens konnte die Auswertung des Biot-Savart-Gesetzes, das ein wesentlicher Bestandteil dieses Ansatzes ist, von dem gesamten Rechengebiet auf einen kleinen Teil des Rechengebiets verschoben werden, wodurch die Recheneffizienz der neuen Methode gegenüber der Originalmethode aus den 1990er Jahren erheblich verbessert werden konnte. Die Implementation dieser aktualisierten RMVP-Methode erfolgte in GetDP und Python, und wurde zudem im Softwarepaket „FiQuS“ am CERN eingebettet, um einen Quadrupolmagneten erfolgreich zu simulieren. Auch Simulationen mit nichtlinearen Materialcharakteristiken (BH-Kurven) und 3D-Modellen wurden erfolgreich durchgeführt.

Weiterhin wurde die aktualisierte RMVP-Methode so erweitert, dass transiente Magnetisierungseffekte berücksichtigt werden können. Konkret wurde eine Multipolentwicklung des Biot-Savart-Gesetzes durchgeführt und der Dipolterm in Betracht gezogen, der das Feld infolge eines magnetischen Dipolmomentes beschreibt. Dieses wurde verwendet, um das Phänomen von supraleitenden Magnetisierungseffekten in Form von Abschirmströmen zu simulieren. Eine Erweiterung auf Magnetisierungseffekte höherer Ordnung ist durch die Zunahme von magnetischen Momenten höherer Ordnung (also Gliedern höherer Ordnung in der Multipolentwicklung des Biot-Savart-Gesetzes) möglich und soll in Zukunft noch verfolgt werden, um etwa auch komplexe Phänomene in Hochtemperatur-Supraleiter-Bandkabeln zu modellieren, für welche zur Zeit noch keine zufriedenstellende Simulationslösungen existieren.

Eine Kombination der Q3D-Diskretisierung mit der RMVP-Methode ist theoretisch möglich und könnte ein möglicher nächster Schritt darstellen, um sogar noch effizientere Simulationen zu ermöglichen.

3.3 Homogenisierung dünner Schichten

Dünne Schichten, sei es in lamellierten Eisenjochen oder in Hochtemperatur-supraleitenden Bandleitern, erzwingen – würde man sie ins Detail modellieren wollen – eine extrem feine

Diskretisierung des Rechengebiets, die wiederum exorbitante Rechenressourcen erfordern würde. Daher wurde als nächstes ein Homogenisierungsmodell für solche Dünnschicht-Modelle entwickelt.

Hierfür wurde das von einer Forschungsgruppe aus der Université de Liège (Belgien) entwickelte Surrogatmodell auf Basis eines neuronalen Netzwerks zur Modellierung von lamellierten Rotoren elektrischer Maschinen erfolgreich für die Anwendung auf lamellierte Eisenkerne von Beschleunigermagneten angepasst und angewandt. Die Wirbelstrom- und Hystereseverluste im Eisenkern wurden hierbei mit einer zufriedenstellenden Genauigkeit angenähert. Das gesamte Verfahren wurde in Kooperation mit CERN und Kooperationspartnern an der Università di Bologna (Italien) erfolgreich für die Simulation von normalleitenden Magneten mit schnellem Feldanstieg angewandt, wie sie für das geplante Myonen-Beschleunigerprojekt am CERN genutzt werden sollen.

Es ist in einem zukünftigen Schritt geplant, dieses Verfahren zur Homogenisierung von lamellierten Eisenkernen auch für die Homogenisierung von Dünnschicht-Bandleitern anzupassen und anzuwenden.

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

Die Zuwendung wurde in Form von Personalmittel verwendet.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Das Ziel dieses Projekts war es, den simulativen Design-Workflow für Hochtemperatur-supraleitende Magnete zu verbessern, insbesondere was die Modellierung der Spulen und die multi-physikalische Simulation angeht. Mit der Entwicklung der Q3D- und RMVP-Methoden wurden große Schritte zur Erfüllung dieses Ziels unternommen: Mit der Q3D-Methode konnte ein effizientes multi-physikalisches Simulationsframework konstruiert werden, das in der Lage ist, die Ausbreitung eines Quenches mittels einer magneto-thermischen Simulation in langen Beschleunigermagneten ausreichend genau und ressourcensparsam zu berechnen. Mit der RMVP-Methode können beliebig komplizierte Spulenwicklungen effizient sowohl in 2D und 3D berücksichtigt werden. Mit der erfolgreichen Homogenisierung laminiertes Eisenkerne mittels neuronaler Netzwerke wurde ein Grundstein für die effiziente Modellierung von Dünnschicht-Bandleitern gelegt. Die Kombination dieser Verfahren miteinander sowie die Berechnung von resultierenden strukturellen Effekten stehen allerdings noch aus und müssen in einem zukünftigen Projekt realisiert werden.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bei supraleitenden Magneten handelt es sich um eine Schlüsseltechnologie sowohl bei Beschleunigermaschinen der nächsten Generation als auch bei der Fusionsenergie, die eine Schlüsselrolle in der globalen Energiewende spielen soll. Daher ist es von höchster Wichtigkeit, die physikalischen Phänomene in solchen Magneten zu verstehen und durch dieses Verständnis nicht nur funktionierende, sondern auch kostengünstige Lösungen zu entwickeln. Bisherige numerische Simulationsmethoden waren nicht in der Lage, hierfür genaue und effiziente Ergebnisse zu liefern, insbesondere was Hochtemperatur-supraleitende Magneten mit Dünnschicht-Bandleitern angeht. Deswegen war die in diesem Teilprojekt geleistete Arbeit, maßgeschneiderte Methoden zur akkuraten und effizienten Berechnung von supraleitenden Magneten zu entwickeln, notwendig und angemessen.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die in diesem Teilprojekt entwickelten numerischen Methoden können für die Auslegung und Optimierung zukünftiger supraleitender Magneten verwendet werden. Die Verfahren können in beliebige Softwarepakete implementiert und damit eingebunden werden, oder es könnten auch völlig neue, losgelöste Simulationssoftwares basierend auf diesen Methoden geschrieben werden, die dann in bestehende Design-Workflows eingebettet werden können.

Während die Q3D-Methode auf Magneten beschränkt ist, die ein hohes Längen-Breiten-Verhältnis aufweisen, ist die RMVP-Methode uneingeschränkt auf alle Magneten anwendbar, wie die Popularität der darauf basierenden Originalmethode aus den 1990er Jahren bereits deutlich macht. Zukünftig soll dieses Verfahren im Softwarepaket „FiQuS“, das am CERN entwickelt wird, eingebunden werden, wodurch die entwickelte Methode der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden wird. Die Kooperation mit dem FiQuS-Team am CERN hat bereits gezeigt, dass das entwickelte RMVP-Verfahren leicht auf existierende Magnetmodelle in der CERN-Datenbank angepasst werden kann.

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

Es sind uns keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

9 Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

1. L. A. M. D'Angelo, D. Moll, A. Vitrano, N. Marsic, E. Schnaubelt, M. Wozniak, H. De Gersem und B. Auchmann: "Efficient Reduced Magnetic Vector Potential Formulation for the Magnetic Field Simulation of Accelerator Magnets". In: *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 60, no. 3, 2024. DOI: 10.1109/TMAG.2024.3352113.
2. L. A. M. D'Angelo, Y. Späck-Leigsnering and H. De Gersem: "Quasi-3D Magneto-Thermal Quench Simulation Scheme for Superconducting Accelerator Magnets". In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, no. 6, 2022. DOI: 10.1109/TASC.2022.3159302.
3. L. A. M. D'Angelo and H. De Gersem: "Quasi-3D Magnetic Field Simulation of Superconducting Devices with Translational Symmetry". In: *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 15, 2021. DOI: 10.1049/smt2.12033.
4. J. Bundschuh, L. A. M. D'Angelo and H. De Gersem: "Quasi 3-D Spectral Wavelet Method for a Thermal Quench Simulation". In: *Journal of Mathematics in Industry*, vol. 11, no. 17, 2021. DOI: 10.1186/s13362-021-00113-8.
5. L. A. M. D'Angelo, J. Christ and H. De Gersem: "Quasi-3D Discretization of Thermal Hot-Spot Propagation in Superconducting Models". In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 4, 2020. DOI: 10.1109/TASC.2020.2966952.

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

1. L. A. M. D'Angelo and H. De Gersem: "Modeling Screening Currents in a Reduced Magnetic Vector Potential Formulation with Higher-Order Magnetic Moments". In: *14th International Computational Accelerator Physics Conference (ICAP 2024)*. Seeheim, Germany, October 2024.
2. L. A. M. D'Angelo and H. De Gersem: "Modeling Screening Currents in a Reduced Magnetic Vector Potential Formulation with Higher-Order Magnetic Moments". In: *5th International Conference on Computational Engineering (ICCE 2024)*. Darmstadt, Germany, September 2024.
3. L. A. M. D'Angelo and H. De Gersem: "Modeling Screening Currents in a Reduced Magnetic Vector Potential Formulation with Higher-Order Magnetic Moments". In: *21st International IGTE Symposium 2024 (IGTE 2024)*. Graz, Austria, September 2024.
4. L. A. M. D'Angelo, D. Moll, E. Schnaubelt, A. Vitrano, M. Wozniak, N. Marsic and H. De Gersem: "Efficient Reduced Magnetic Vector Potential Formulation for the Magnetic Field Simulation of Superconducting

- Magnets". In: *28th International Conference on Magnet Technology (MT28)*. Aix-en-Provence, France, September 2023.
5. L. A. M. D'Angelo, Y. Späck-Leigsnering and H. De Gersem: "Quasi-3D Quench Simulation of Superconducting Magnet Coils". In: *28th International Conference on Magnet Technology (MT28)*. Aix-en-Provence, France, September 2023.
 6. L. A. M. D'Angelo, Y. Späck-Leigsnering and H. De Gersem: "Quasi-3D Method for Quench Simulation of Superconducting Coils". In: *24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2023)*. Kyoto, Japan, May 2023.
 7. L. A. M. D'Angelo, Y. Späck-Leigsnering and H. De Gersem: "Quasi-3D Magneto-Thermal Quench Simulation of Superconducting Magnet Coils". In: *Kleinheubacher Tagung 2022*. Miltenberg, Germany, September 2022.
 8. L. A. M. D'Angelo, Y. Späck-Leigsnering, H. De Gersem, N. Marsic, B. Auchmann, S. Schöps, M. Maciejewski and J. Smajic: "A Reduced Vector Potential Formulation for Superconducting Accelerator Magnets". In: *20th International IGTE Symposium 2022 (IGTE 2022)*. Graz, Austria, September 2022.
 9. L. A. M. D'Angelo and H. De Gersem: "Quasi-3D Magneto-Thermal Quench Simulation of Superconducting Magnets". In: *27th International Conference on Magnet Technology (MT27)*. Fukuoka, Japan, November 2021.
 10. L. A. M. D'Angelo and H. De Gersem: "Quasi-3D Magnetic Field Simulation of Superconducting Devices with Translational Symmetry". In: *European Consortium for Mathematics in Industry 2021 (ECMI)*. Wuppertal, Germany, April 2021.
 11. L. A. M. D'Angelo, J. Christ and H. De Gersem: "Quasi-3D Thermal Simulation of Quench Propagation of Superconducting Magnets". In: *26th International Conference on Magnet Technology (MT26)*. Vancouver, Canada, September 2019.

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

1. L. A. M. D'Angelo: „Quasi-3D Quench Simulation of Superconducting Accelerator Magnets“. Dissertation. TU Darmstadt, Germany, March 2023.
2. D. Moll: „Transient Finite-Element Simulations of Fast-Ramping Muon-Collider Magnets“. Master's Thesis. TU Darmstadt, Germany, 2023.
3. J. Bundschuh: „Quasi-3D Quench Simulation Using a Spectral Wavelet Method“. Master's Thesis. TU Darmstadt, Germany, 2020.
4. J. Christmann: „Thermal Modeling and Uncertainty Quantification for Superconducting Cables“. Bachelor's Thesis. TU Darmstadt, Germany, 2020.
5. J. Christ: „Quasi-3D Thermal Simulation of Quench Propagation of Superconducting Magnets“. Bachelor's Thesis. TU Darmstadt, Germany, 2020.

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger:	Institut für Teilchenbeschleunigung und Elektromagnetische Felder, TU Darmstadt
Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. Herbert De Gersem
Verbund:	TOSCA
Thema:	Finite-Elemente-Analysen für Hochtemperatur-supraleitende Magnete

1. Ziel und Inhalt des Projektes

Die computergestützte Feldsimulation von supraleitenden Magneten ist durch die Multi-Skalen-Eigenschaft der Magnete selbst sowie den hoch nichtlinearen und multi-physikalischen Phänomenen des so genannten Quenchphänomens, der mit der Supraleitung einhergeht, eine große Herausforderung für existierende Simulationssoftware. Dies gilt insbesondere für die modernen Hochtemperatur-supraleitende Magnete, wie sie beispielsweise in zukünftigen Teilchenbeschleunigern und Fusionskraftwerken eingesetzt werden sollen. Ziel dieses Teilprojektes war es daher, maßgeschneiderte Verfahren für die effiziente Feldsimulation supraleitender Magnete zu entwickeln.

Unterschiedliche Ansätze wurden hierbei verfolgt, welche alle das Ziel hatten, eine effizientere Simulation mit einem niedrigeren Bedarf an Rechenressourcen und Rechenzeit zu ermöglichen, die nichtsdestotrotz zu genauen Rechenergebnissen führt.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Im ersten betrachteten Ansatz wird die Symmetrie der Magnetgeometrie ausgenutzt und zweidimensionale finite Elemente mit eindimensionalen spektralen Elementen kombiniert. Dies mündet in einer so genannten quasi-dreidimensionalen Diskretisierung, die es erlaubt, die Magnetgeometrie auf die Querschnittsfläche zu reduzieren und dabei dennoch physikalische Effekte in Längsrichtung zu berücksichtigen. Insbesondere das Quenchphänomen kann mit einer solchen Methode effektiv dargestellt und dessen Ausbreitung effizient simuliert werden. Es zeigt sich, dass dieses Verfahren hinsichtlich der Rechenzeit eine Standard-Finite-Elemente-Methode signifikant übertrifft, während eine ausreichend gute Ergebnisgenauigkeit erzielt wird. Je größer das Verhältnis zwischen Länge und Breite des Magneten ist, desto höher ist der Gewinn an Rechenzeit und -ressourcen der quasi-dreidimensionalen Methode gegenüber dem Standard-Verfahren.

Im zweiten betrachteten Ansatz werden die Spulenwicklungen des Magneten als eindimensionale Linienströme approximiert und ihr magnetisches Verhalten über das Gesetz von Biot-Savart berechnet. Diese Teillösung des Problems beschreibt dabei zunächst nur das

magnetische Verhalten der Spulenwicklungen im Freiraum und berücksichtigt noch nicht die Randbedingungen des vorliegenden Problems oder andere Materialien wie etwa das Eisenjoch des Magneten. Diese werden in separaten Teilproblemen mit einer Standard-Finite-Elemente-Methode unter Berücksichtigung des zuvor berechneten Freiraumverhaltens der Spulenwicklungen simuliert. Alle berechneten Teillösungen ergeben in ihrer Summe dann das tatsächliche magnetische Feldverhalten des Magneten.

Dieses Verfahren, welches in einer frühen Form bereits in den 1990er Jahren Anwendung fand, nennt sich Reduzierte-Magnetische-Vektorpotential-Methode und wurde in diesem Teilprojekt einerseits durch eine Reformulierung der physikalischen Gleichungen hinsichtlich der Rechenzeit verbessert, andererseits um die Möglichkeit erweitert, auch komplexe supraleitende Magnetisierungseffekte durch eine Multipolentwicklung des Biot-Savart-Gesetzes in effizienter Weise in Betracht zu ziehen. Durch diese Maßnahmen übertrifft die entwickelte Methode hinsichtlich der Rechenzeit und -ressourcen signifikant das alte Verfahren.

Im dritten Ansatz wurden neuronale Netzwerke verwendet, um ein Surrogatmodell für laminierte Eisenkerne zu erhalten. Dieses ermöglichte es, die einzelnen Eisenlamellen, welche im Falle einer vollständigen dreidimensionalen Diskretisierung zu exorbitant hohem Rechenbedarf führen würden, als homogenisiertes Blockmaterial zu betrachten, dessen physikalisches Verhalten ausreichend genau von einem neuronalen Netzwerk vorhergesagt wurde. Dieses Verfahren soll in einem zukünftigen Schritt ebenfalls für die Modellierung von Hochtemperatur-supraleitenden Dünnschicht-Leitern verwendet werden, um für diese ebenso eine effiziente Berechnungsweise zu ermöglichen.

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

Die in diesem Teilprojekt entwickelten Ansätze haben zu Simulationsverfahren geführt, die die effiziente Simulation von supraleitenden Magneten ermöglicht. Verglichen mit den alternativen Standardverfahren sind erhebliche Verbesserungen sowohl in der Rechenzeit als auch in den Rechenressourcen erreicht worden. Auf diese Weise bieten die entwickelten Verfahren maßgeschneiderte und effiziente Lösungen für die Feldsimulation von supraleitenden Magneten.

Im Falle der aktualisierten und erweiterten Reduzierten-Magnetischen-Vektorpotential-Methode konnte eine Zusammenarbeit mit dem CERN erzielt werden: Das entwickelte Verfahren wurde in das freie Open-Source-Softwarepaket „FiQuS“, welches Teil des CERN-STEAM-Frameworks ist (<https://steam.docs.cern.ch/tools/figus/>), hineingeführt und soll in naher Zukunft veröffentlicht und so Forscher:innen und Ingenieur:innen weltweit kostenfrei zur Verfügung gestellt werden.

Eine Veröffentlichung des quasi-dreidimensionalen Diskretisierungsverfahren wird innerhalb des Softwarepakets „Pyrit“ (<https://git.rwth-aachen.de/jonas.bundschuh/pyrit-wiki>) angestrebt, sodass dieses zukünftig ebenfalls Forscher:innen und Ingenieur:innen verwendet und weiterentwickelt werden kann.