

# Bessere Synchrotron-Magnete durch simulationsbasierte Optimierung

Während die numerische Optimierung von kontinuierlichen Parametern supraleitender Magnete basierend auf elektromagnetischen Feldsimulationen trotz hoher Rechenzeitanforderungen schon fast alltäglich ist, stellt die für ein optimales Design notwendige, simultane Berücksichtigung auch diskreter Parameter und der damit verbundene, hohe zusätzliche Rechenaufwand enorme Schwierigkeiten dar. Eine neue, methodische Vorgehensweise zu deren Überwindung wird vorgestellt und zur Entwicklung von besonders leistungsfähigen, supraleitenden Magneten für das neue internationale Beschleunigerzentrum FAIR erfolgreich angewendet.

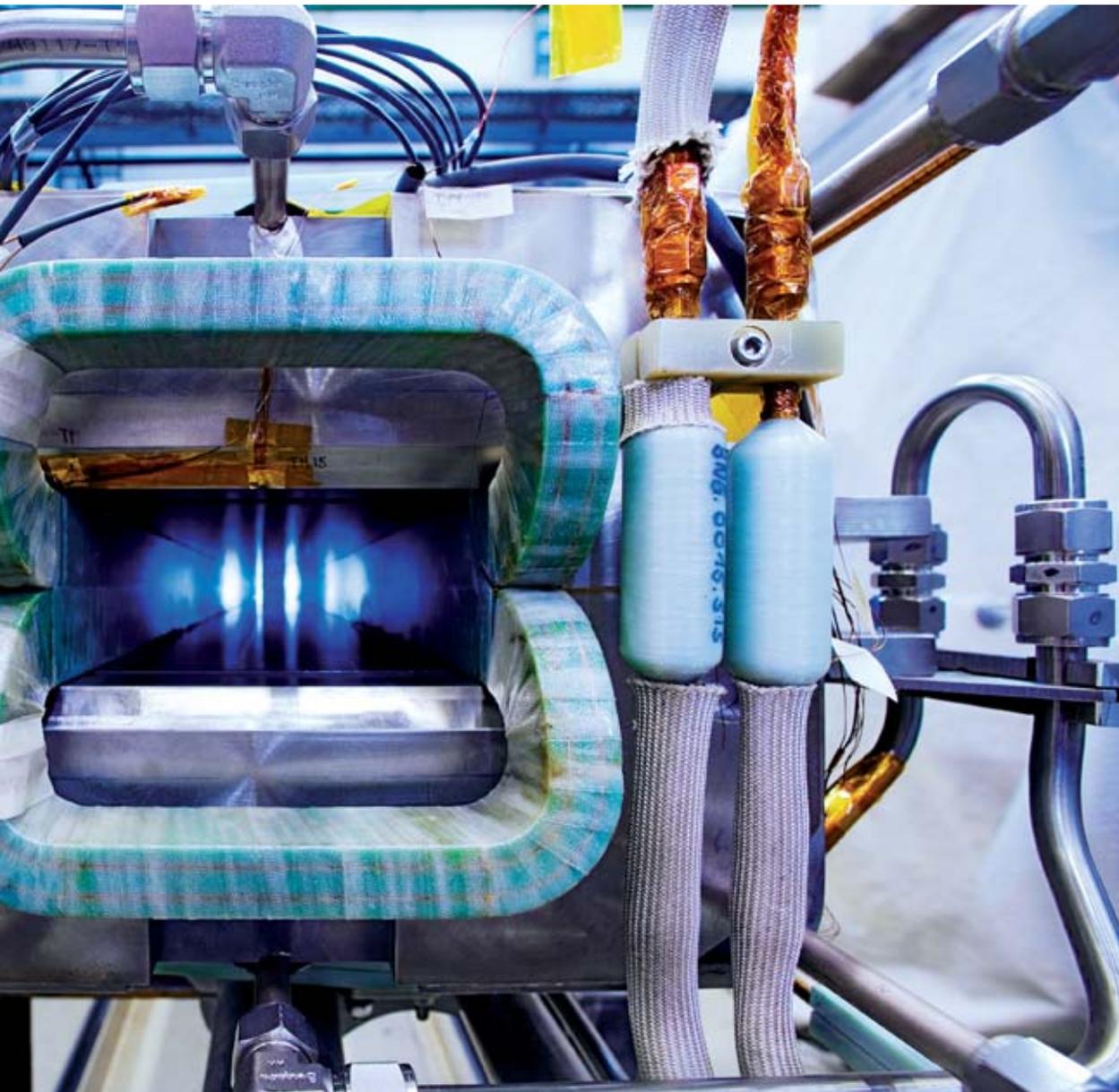
## ► Simulation Based Optimization for Improved Synchrotron Magnets

*While the numerical optimization of continuous parameters of superconductive magnets using electromagnetic field simulation is already almost standard despite the high computational cost involved, recent work has shown that also discrete parameters must be considered simultaneously. The resulting enormous increase in computational costs poses a big challenge. To overcome this a new methodological approach is presented and applied successfully to the design optimization of efficient superconductive magnets for the new accelerator facility FAIR.*

**Thomas Hemker, Herbert De Gersem, Stephan Koch, Oskar von Stryk** • Numerische Verfahren zur Design-Optimierung basierend auf rechenzeitintensiven, technischen Simulationen werden in den ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen häufig angewendet. Diese bieten das Potential der systematischen Berechnung von Designvarianten, die wesentlich leistungsfähiger sind, als diese durch Ausprobieren oder Intuition allein gefunden werden können. Dennoch besitzen die in den jeweiligen Anwendungsbereichen verwendeten Simulationsprogramme in vielen Fällen keine geeigneten Schnittstellen, um effiziente (und meist gradientenbasierte), simulationsbasierte Optimierungsverfahren einzusetzen. Dies liegt daran, dass die häufig über Jahre oder Jahrzehnte entwickelten Simulationsprogramme meist nur als Black-Box angebunden werden können, die für die Eingabe veränderter Werte kontinuierlicher (d. h. reellwertiger) Optimierungsvariablen nur Funktionswerte als Ausgabe liefern. Typischerweise kann ein Optimierungsverfahren hier weder auf interne, strukturelle noch andere, analytische



Informationen und Variablen des untersuchten Systems zugreifen. Darüber hinaus unterliegen die Berechnungsergebnisse solcher Simulationsprogramme häufig noch störenden Einflüssen wie Rauschen, Rundungen oder Unstetigkeiten,

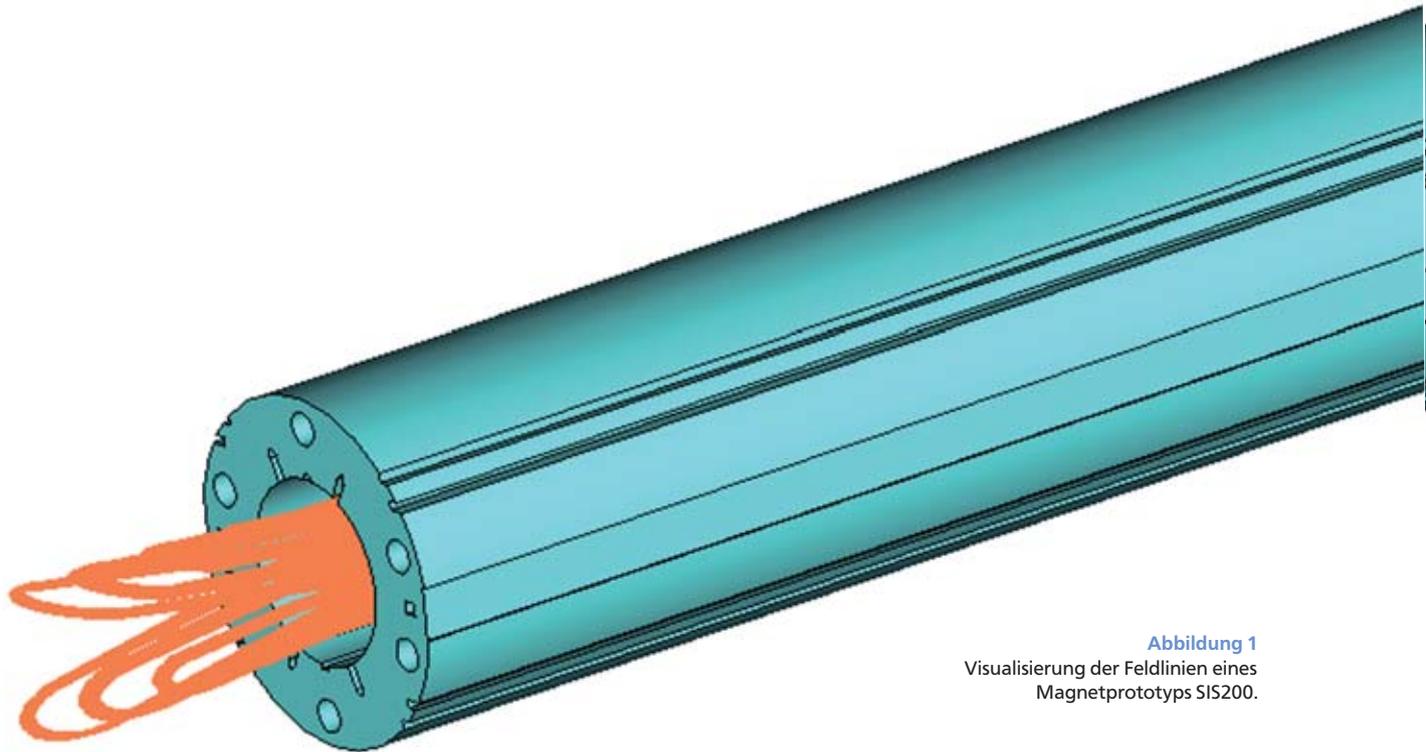


Supraleitender  
Synchron-Magnet  
SIS100 für GSI FAIR.

deren Ursprünge tief in den teilweise hochkomplexen bestehenden Simulationsprogrammen zu suchen sind.

Der Preis für die nur sehr lose Kopplung zwischen Simulationsprogramm und Optimierungsverfahren

sind sehr hohe Rechenzeiten für viele Funktionsauswertungen, d. h. Aufrufe der Simulationsprogramme. Dies wird zusätzlich erheblich erschwert, wenn neben kontinuierlichen auch diskrete (d. h. ganzzahlige oder binäre) Optimierungsvariablen



**Abbildung 1**  
Visualisierung der Feldlinien eines  
Magnetprototyps SIS200.

simultan mit berücksichtigt werden müssen, da diese die Qualität des Ergebnisses wesentlich beeinflussen, denn für diese Nicht-Standard-Problemlösungen existieren bisher keine effizienten Optimierungsverfahren. Daher werden am Fachgebiet SIM Optimierungsverfahren entwickelt, die die effiziente Optimierung kontinuierlicher und diskre-

ter Entwurfsparameter bei hochgradig rechenintensiven Simulationsprogrammen ermöglichen.

#### **Entwicklung supraleitender Synchrotron-Magnete**

Unter Führung des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung wird das neue internationale Beschleunigerzentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) als Erweiterung der bisherigen Anlagen nahe Darmstadt entstehen. Dabei wird das Design der dort zum Einsatz kommenden, neu entwickelten Synchrotron-Magnete wesentlich für die Leistungsfähigkeit der Anlage sein.

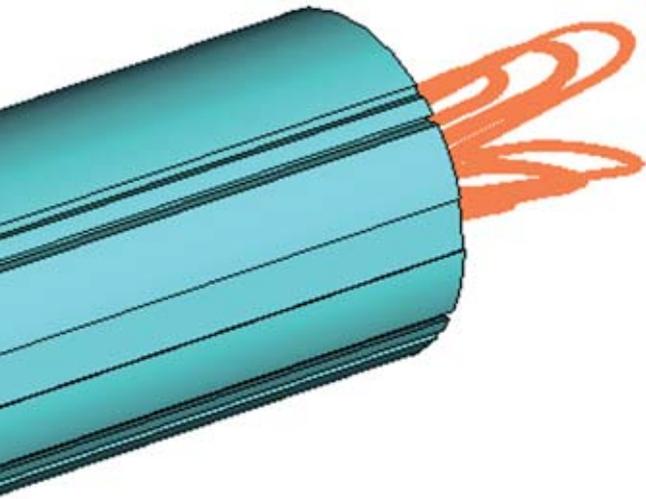
Die Qualität eines solchen supraleitenden Magneten kann durch Untersuchung des elektromagnetischen Feldes bestimmt werden, wobei hier die berechnete Homogenität des Magnetfeldes im Zentrum des Magneten als Maß dient. Um potentielle Designs für die Magneten zu entwickeln und noch vor dem Bau eines Magneten bewerten zu können, werden komplexe Simulationsmethoden eingesetzt. Zunächst wird ein CAD-Modell erstellt, das die geometrischen Ei-

#### **Literatur**

2007: T. Hemker, H. De Gerssem, O. von Stryk, T. Weiland, Mixed-Integer Nonlinear Design Optimization of a Superconductive Magnet, In: IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 6, pp. 1110-1113

2009: T. Hemker, Derivative Free Surrogate Optimization for Mixed-Integer Nonlinear Black Box Problems in Engineering, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 10, Nr. 797, VDI Verlag

2009: S. Koch, J. Trommler, H. De Gerssem, T. Weiland, Modeling Thin Conductive Sheets Using Shell Elements in Magnetoquasistatic Field Simulations, In: IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 3, pp. 1292-1295



genschaften des Synchrotron-Magneten beschreibt. Die optimale Platzierung der Spulenwicklungen ist grundlegend für die Qualität des daraus resultierenden Magnetfeldes und damit auch für die korrekte Funktion des Synchrotrons. Die Modellierung ist automatisiert, durch die Übergabe von diskreten und reellwertigen Parameterwerten wird das Modell des Magneten bereits vollständig beschrieben. Für die spätere Einbindung an ein numerisches Optimierungsverfahren ist dies essentiell.

Auf Basis des CAD-Modells wird ein Gitternetzmodell des Magneten erstellt, das für die numerische Simulation der elektromagnetischen Felder per Finite-Elemente-Methode benötigt wird. Die Design-Parameter des geometrischen Modells ermöglichen so direkten Einfluss auf die Qualität des Feldes als Ergebnis der numerischen Simulation zu nehmen. Jede neue Variation der Design-Parameter erfordert eine weitere, sehr rechenzeitintensive Simulation. Zu deren Reduktion wird die Simulation zunächst auf eine repräsentative 2D-Simulation des Magnetquerschnitts angewendet, von dem aus Symmetriegründen nur ein Viertel simuliert werden muss. Durch aktuelle Entwicklung bei den Simulationsverfahren und bessere Ausnutzung paralleler Hochleistungsrechnerarchitekturen durch effiziente verteilte Prozesse können künftig auch komplexere 3D-Strukturen für eine simulationsbasierte Optimierung berücksichtigt werden.

### Gemisch diskret-kontinuierliche Optimierungsaufgaben

Die besondere Schwierigkeit des Optimierungsproblems liegt darin, dass reellwertige (wie die geometrischen Positionen der einzelnen Spulen) und ganzzahlige Optimierungsvariablen (wie die Anzahl der Wicklungen pro Spule) simultan berücksichtigt werden müssen, um möglichst effizient ein möglichst gutes Magnetdesign durch Betrachtung strukturell unterschiedlicher Magnetmodelle bestimmen zu können. Die separate, numerische Lösung von einzelnen, rein kontinuierlichen Optimierungsproblemen für jede mögliche Ausprägung der ganzzahligen Optimierungsvariablen wäre mit exorbitant hohen Rechenaufwand verbunden.

Für eine effiziente Durchführung der numerischen Optimierung werden die aus den Simulationsberechnungen resultierenden Funktionsauswertungen durch sukzessive verbesserte Surrogat-Funktionen ersetzt, die mit Hilfe von stochastischen Approximationsverfahren erstellt werden. Die resultierenden Ersatz-Optimierungsprobleme können dann unter Berücksichtigung der hier geltenden, rein geometrischen Beschränkungen für das Magnetdesign besonders effizient gelöst werden. Die Surrogat-Funktionen liefern mathematische Ableitungsinformationen mit, so dass effiziente, gradientenbasierte Optimierungsverfahren angewendet werden können. Dies ist möglich, da die Surro-

#### Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik

Prof. Dr. Oskar von Stryk  
Tel. 06151/16-4899  
E-Mail: [stryk@sim.tu-darmstadt.de](mailto:stryk@sim.tu-darmstadt.de)  
[www.sim.tu-darmstadt.de](http://www.sim.tu-darmstadt.de)

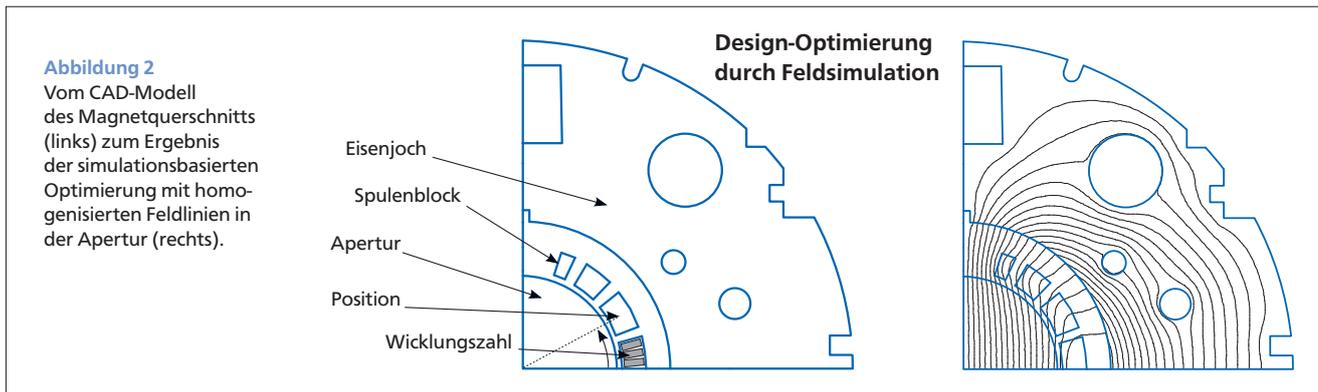
Dr.-Ing. Thomas Hemker  
Tel. 06151/16-4899  
E-Mail: [thomas@hemker.com](mailto:thomas@hemker.com)  
[www.sim.tu-darmstadt.de](http://www.sim.tu-darmstadt.de)

#### Wave Propagation and Signal Processing Research Group, Katholieke Universiteit Leuven

Prof. Dr. Ir. Herbert De Gerssem  
Tel. +32 (0)56 246134  
E-Mail: [Herbert.DeGerssem@kuleuven-kortrijk.be](mailto:Herbert.DeGerssem@kuleuven-kortrijk.be)

#### Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder

Dr.-Ing. Stephan Koch  
Tel. 06151/16-2361  
E-Mail: [koch@temf.tu-darmstadt.de](mailto:koch@temf.tu-darmstadt.de)  
[www.temf.de](http://www.temf.de)



gat-Funktionen auch außerhalb des durch die Simulationsprogramme auswertbaren Bereichs wohl definiert sind, denn zur Berücksichtigung der ganzzahligen Optimierungsvariablen werden diese relaxiert, so dass ein Branch-and-Bound-Verfahren zusammen mit einem nichtlinearen Optimierungsverfahren angewendet werden kann.

Damit eine Lösung des Ersatz-Problems auf das ursprüngliche simulationsbasierte Optimierungsproblem übertragen werden kann, müssen die wesentlichen Charakteristiken mit Hilfe der stochastischen Approximation erfasst worden sein. Dazu werden iterativ genau die Designvarianten numerisch simuliert, die für das Ersatz-Problem schon gute Ergebnisse erzielt haben. Mit Hilfe von Fehlerschätzern wird gewährleistet, dass der Raum für zulässige Designvarianten weiträumig exploriert wird. Auf Basis der so gewonnenen Er-

gebnisse können die Surrogat-Funktionen jeweils genau in den Bereichen sequentiell verfeinert werden, die vielversprechend für gute Designs sind.

#### Optimierte Designs

Durch numerische Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Optimierung unter Berücksichtigung der zusätzlichen diskreten Designparameter keinen höheren Rechenaufwand erfordert, als wenn nur die rein kontinuierlichen Parameter betrachtet werden. Mit Hilfe des auf Surrogat-Funktionen beruhenden Optimierungsansatzes konnten Designvarianten für die Magneten bestimmt werden, die nahe an die theoretisch bestmögliche Homogenität des Magnetfeldes herankommen. Die Übertragung und Anwendung der hierbei entwickelten Optimierungsverfahren auf andere simulationsbasierte Designaufgaben in anderen Bereichen ist möglich.



**Thomas Hemker** forscht auf dem Gebiet der gemischt ganzzahligen Optimierung zur Anwendung bei Simulationsprogrammen, Blackbox-Systemen und in der Robotik.



**Oskar von Stryk** leitet das Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik (FG SIM) am Fachbereich Informatik. Die Forschung in der Robotik wurde mehrfach international ausgezeichnet.



**Herbert De Gersem** forscht auf dem Gebiet der elektromagnetischer Feldberechnungen zur Anwendung in der Beschleunigertechnik und der elektrischen Energietechnik. Er ist mittlerweile an die KU Leuven in Belgien berufen worden.



**Stephan Koch** leitet am Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder an der TU Darmstadt eine Nachwuchsforschergruppe. Seine Forschungsinteressen sind Berechnungsverfahren für elektromagnetische Felder.