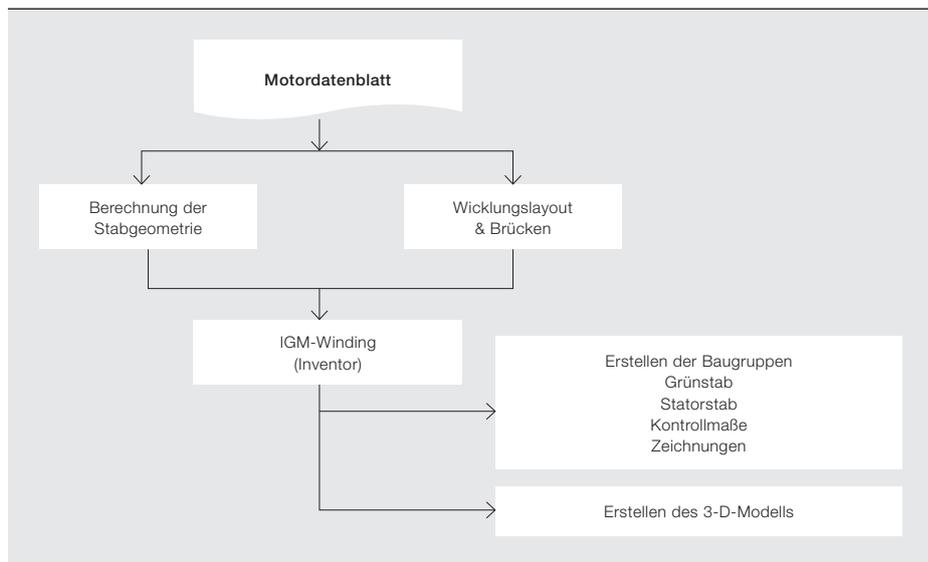


Die dritte Dimension

3-D-Wicklungsdesign für getriebelose Mühlenantriebe

MACARENA MONTENEGRO-URTASUN, GIOVANNI CANAL, JAN POLAND, AXEL FUERST – Getriebelose Mühlenantriebe werden individuell nach Kundenvorgaben gefertigt und sind somit nicht von der Stange zu haben. Laut IEEE sind 33% aller an großen Motoren im normalen Betrieb beobachteten Ausfälle und die damit verbundenen exorbitanten Stillstandkosten auf die Statorwicklung zurückzuführen. ABB hat eine 3-D-Wicklungsdesignphilosophie eingeführt, die es ermöglicht, verschiedene Wicklungslayouts zu evaluieren und zu vergleichen und somit eine solide Basis für Analysen und die Wahl der richtigen Lösungen zu schaffen. Das Ergebnis sind reduzierte Fertigungskosten, eine schnellere Installation vor Ort, kürzere Reparaturzeiten und eine geringere Gefahr von konstruktionsbedingten Wicklungsausfällen.



Im Jahr 1969 lieferte ABB den ersten getriebelosen Mühlenantrieb (Gearless Mill Drive, GMD) – einen 8.600 PS starken Motor für eine Kugelmühle – an Lafarge Cement in Frankreich. Seitdem sind GMD-Systeme immer größer und leistungstärker geworden. Außerdem werden sie in immer größeren Höhen – bis über 4.000 m – eingesetzt, wo extreme Umwelt- und Randbedingungen die Lebensdauer eines GMD auf die Probe stellen. Unter diesen anspruchsvollen Bedingungen funktionieren nur die besten Wicklungsdesigns problemlos.

Optimales Design mit IGM-Winding

Beim aktuellen Designansatz für GMDs werden zunächst dreidimensionale GMD-Modelle durch Parametrisierung entwickelt und dann zweidimensionale Fertigungszeichnungen erstellt. Die Parameter werden aus den Spezifikationsdaten des Motors berechnet. Anschließend wird automatisch ein 3-D-Modell erzeugt. Dieses Modell bildet die Grundlage für die detaillierte Konstruktion und numerische Simulationen.

Titelbild

Das fortschrittliche ABB-Designtool IGM-Winding ist ein leistungsstarkes Werkzeug zur Optimierung der Wicklungen von elektrischen Maschinen. Das daraus resultierende höherwertige Produkt spart Kosten, beschleunigt die Installation und senkt das Ausfallrisiko, was besonders an entlegenen Standorten von Vorteil ist.

nen. Der komplexeste Teil hiervon ist das Design der Motorwicklungen.

Ohne die richtigen Werkzeuge sind das Design und die Optimierung von Wicklungen kaum zu bewältigen. Allein die Evaluierung möglicher Wicklungslayouts und die Minimierung der Gefahr von Wicklungsausfällen aufgrund unzureichender Luftstrecken erfordert einen immensen Zeitaufwand. Das Ziel bestand daher darin, ein Tool zu entwickeln, das in der Lage ist, ein parametrisches 3-D-Modell – vom einzelnen Leiterstab bis hin zur kompletten Wicklungsbaugruppe – zu erstellen, das Evaluierungen und Optimierungen der verschiedenen Wicklungslayouts ermöglicht, bevor die beste Lösung für die Fertigung gewählt wird. Die Ausgabe des Tools sind die vollständigen optimierten und geprüften Konstruktionszeichnungen, die für die Wicklungsfertigung und die spätere Qualitätskontrolle erforderlich sind. Das von ABB für diesen Zweck entwickelte Tool heißt „IGM-Winding“.

Drei Phasen, ein Projekt

Das Designtool wurde in den vergangenen zwei Jahren in drei Phasen implementiert. Diese umfassten die Berechnung der Stabgeometrie, die Berechnun-

gen des Wicklungslayouts und das parametrische 3-D-Modell der Wicklung. Als Ausgabe liefert das Tool die Konstruktionszeichnungen für alle zum Bau der Wicklung notwendigen Teile → 1.

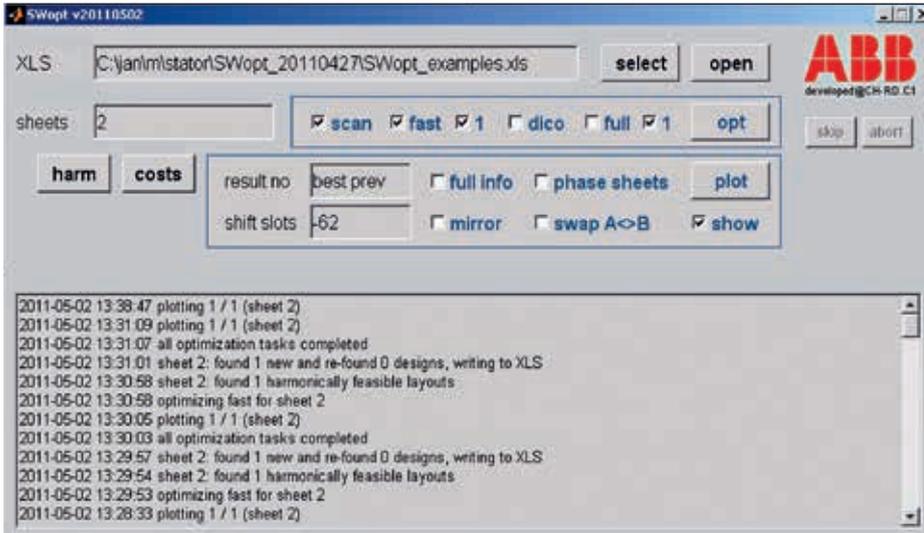
Die Berechnung der Stabgeometrie besteht aus einer kurzen Routine zur geometrischen Berechnung der Statorstäbe. Als Eingaben dienen die Werte aus dem Motordatenblatt.

Die Wicklungslayouts und Brücken werden mithilfe eines von ABB entwickelten Tools berechnet → 2a. Die Jumper können auf verschiedene Weise angeordnet werden,

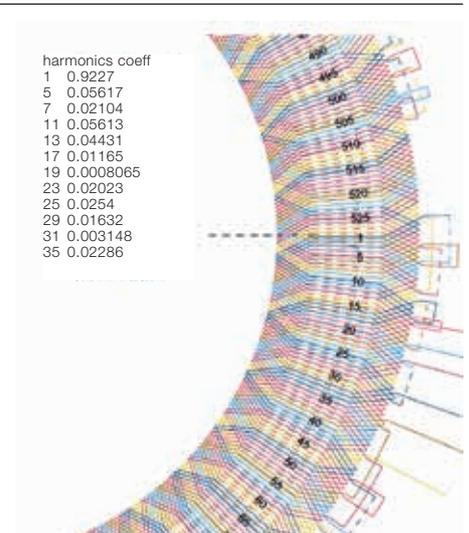
Das Designtool wurde in drei Phasen implementiert: die Berechnung der Stabgeometrie, die Berechnungen des Wicklungslayouts und das parametrische 3-D-Wicklungmodell.

ohne das elektrische Layout des Designs zu beeinflussen → 2b. Ist das endgültige Layout gewählt, muss eine Liste erstellt werden, die festlegt, welche Art von Stab sich in welcher Nut befindet → 2a.

Das in Autodesk Inventor implementierte 3-D-Wicklungstool IGM-Winding nutzt die Werte aus der Berechnung der Stabgeometrie und der Berechnung des Wick-



2a Typisches Dialogfenster



2b Mit dem Tool erstelltes Wicklungslayout

lungslayouts als Eingaben, um das parametrische 3-D-Modell der Wicklung und ihrer Komponenten zu erstellen und zu zeichnen.

Wahl des besten Wicklungslayouts

Die Entscheidung für das beste Wicklungslayout ist ein anspruchsvolles Optimierungsproblem. Da Bruchlochwicklungen (Layouts, bei denen die Anzahl der Nuten kein ganzzahliges Vielfaches der Polzahl multipliziert mit der Anzahl der Phasen ist) aufgrund ihrer günstigen Oberschwingungseigenschaften für gewöhnlich bevorzugt werden, kann nicht jede Spule einfach direkt mit einer benachbarten Spule verbunden werden. Ein gültiges Wicklungslayout muss sogenannte Jumper enthalten, die Lücken zwischen Wickelköpfen überbrücken, die einige Nuten auseinander liegen. Diese Jumper können auf mehr oder weniger günstige Weise platziert werden, wobei das Hauptkriterium die Minimierung der Material- (Kupfer) und Fertigungskosten ist. Tatsächlich ist das Layoutproblem für eine einzelne Phase ein Beispiel für das sogenannte „Problem des Handlungsreisenden“ (engl. Traveling Salesperson Problem, TSP), eines der am häufigsten untersuchten Probleme in der mathematischen Optimierung. Das Ziel ist es, einen Weg zu finden, der genau einmal durch alle Spulen (in TSP-Begriffen: Städte) führt, sodass die Reisekosten (d. h. die Kosten für die Verbinder) minimal bleiben. Das TSP gehört zu einer Klasse von Problemen, die schwer zu lösen sind und dies wohl auch in Zukunft bleiben werden.

In Bezug auf das Wicklungslayout gilt es, ein Problem zu lösen, das noch schwieriger ist als das TSP: Es gibt für jede Phase ein TSP, wobei sich alle Probleme gegenseitig beeinflussen, da alle für das optimierte Layout gewählten Jumper nicht miteinander in Konflikt stehen dürfen. Hinzu kommt, dass die induzierten elektrischen Felder nebeneinander liegender Jumper in Wechselwirkung treten. Es sind also günstige Wechselwirkungen gesucht, bei denen sich die Felder gegenseitig aufheben. Neben der Platzierung der Jumper muss auch über die Zuordnung der Stäbe zu den drei Phasen entschieden werden, was wiederum die Oberschwingungseigenschaften der Wicklung beeinflusst.

Die Aufgabe der Optimierung des Wicklungslayouts wird in gebräuchliche mathematische Optimierungsframeworks wie die gemischt-ganzzahlige Programmierung (MIP) und Constraint-Programmierung (CP) übertragen. Die MIP-Formulierung bietet den Vorteil, dass alle Designkriterien (in stückweise linearisierten Versionen) im Framework berücksichtigt werden können. Allerdings nutzen MIP-Löser üblicherweise eine Branch-and-Bound-Strategie mit einem Suchbaum, was bis zum Erreichen der erwiesenen Optimalität viel Rechenzeit in Anspruch nehmen kann. CP hingegen ist ein anderer Ansatz, bei dem die Suche nach guten Wicklungslayouts von den Randbedingungen (Constraints) des Problems (die geometrischen Konflikte der Jumper) gelenkt wird. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es häufig sehr schnell



sehr gute Lösungen liefern kann, allerdings ohne Garantie einer globalen Optimalität.

3-D-Wicklungsdesign

Der erste Schritt im 3-D-Wicklungsdesignprozess ist die Erstellung der 3-D-Wicklungsbaugruppe, d. h. ein kompletter Sta-

lungslayouts. Dies hilft beim Vergleich von Varianten und ermöglicht die automatische Erstellung sämtlicher Konstruktionszeichnungen.

Ist das Wicklungslayout gewählt, folgt im 3-D-Designprozess die Integration der Wicklung in das Gehäuse → 4. Dieser

Schritt ist entscheidend für die Validierung des Designs – insbesondere für GMDs, die in großen Höhen eingesetzt werden – und zur Bestätigung aller erforderlichen Abstände für die Installation bzw. Einstellung kritischer

Das TSP gehört zu einer Klasse von Problemen, die schwer zu lösen sind und dies wohl auch in Zukunft bleiben werden.

tor, bei dem die gesamte Anzahl von Nuten mit dem entsprechenden Oberstab (OS) und Unterstab (US) gefüllt ist. Für diesen ersten Schritt muss eine 3-D-Stabbaugruppe erstellt werden, die den Stab sowie alle dazugehörigen Elemente (d. h. verschiedene Laschen, Z-Verbindungen und Isolierkappen) beinhaltet. Da sie geometrisch unterschiedlich sind, wird dies sowohl für den Ober- als auch den Unterstab durchgeführt → 3.

Sobald die OS- und US-Baugruppen erstellt sind, beginnt das Tool automatisch damit, jede Nut der 3-D-Wicklungsbaugruppe mit dem entsprechenden Stabtyp zu füllen. Danach entspricht die 3-D-Wicklungsbaugruppe einer parametrischen 3-D-Darstellung des Wicklungslayouts.

Normalerweise können mehrere elektrische Wicklungslayouts mit verschiedenen Jumperkombinationen für ein Design erstellt werden. Die größte Innovation von IGM-Winding ist die Fähigkeit zur dreidimensionalen Parametrisierung der Wick-

Elemente in der Maschine durch genaue Messung.

Das Layout der Anschlussstäbe wird in das Gehäuse eingebettet → 5. Dies ist der einzige Teil des Designs, der manuell erfolgt. Dabei wird die bestmögliche Führung auf der Grundlage der Biegewinkel, der Länge der Stäbe und der Lage des Anschlusskastens berücksichtigt.

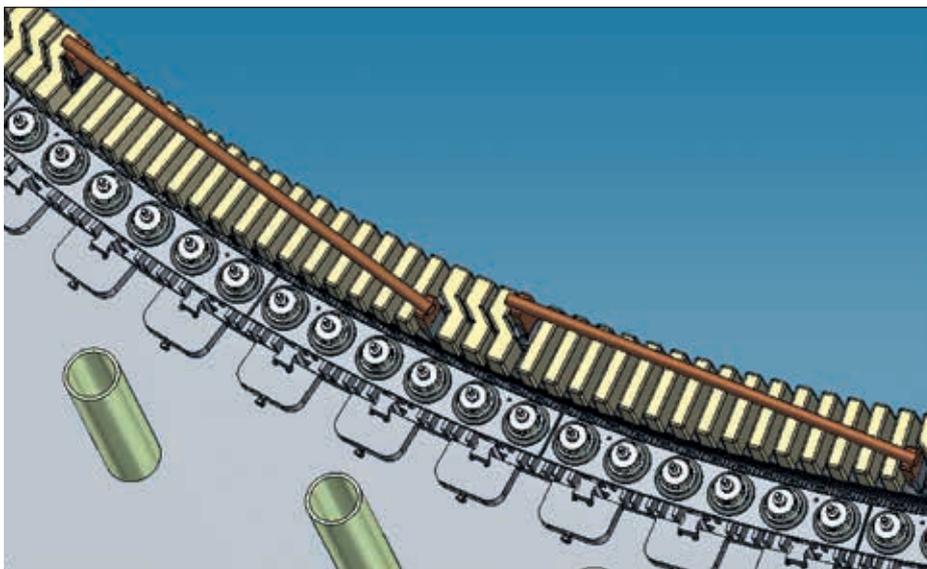
IGM-Winding Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche von IGM-Winding bestimmt die allgemeinen Softwareeinstellungen. Während des Prozesses erzeugt das Programm die Protokolle der Schritte und die Zeichnungen. Diese werden unter „Info“ und „Log“ gespeichert und können in eine CSV-Datei exportiert werden. Die Funktion „Green Bar“ erzeugt zwei Zeichnungen – den sogenannten „grünen“ Stab (Stab ohne Hauptisolation) und den konsolidierten Stab. Diese Zeichnungen werden zu Beginn des Designprozesses benötigt und werden zur Herstellung der Roebelstäbe an den Kupferlieferanten übermittelt.

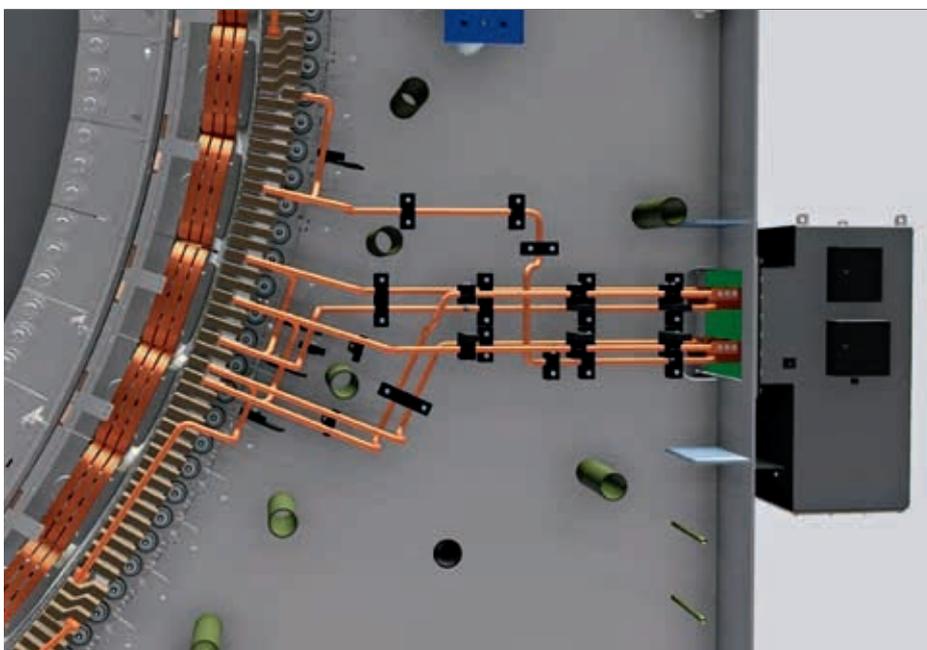
Die Fähigkeit von IGM-Winding zur dreidimensionalen Parametrisierung hilft beim Vergleich von Varianten und ermöglicht die automatische Erstellung von Konstruktionszeichnungen.

Die Aufgabe der Optimierung des Wicklungslayouts wird in gebräuchliche mathematische Optimierungsframeworks übertragen.

4 Integration der Wicklung in das Gehäuse



5 Mit dem Anschlusskasten verbundene Phasenstäbe. Aufgrund des begrenzten Platzes müssen diese sorgfältig konstruiert werden.



Vor dem Erzeugen weiterer Zeichnungen muss die Funktion „Create Assemblies“ ausgeführt werden. Sie erstellt alle 3-D-Modelle der unterschiedlichen OS- und US-Baugruppen (M01, M02 usw.) und deren verschiedenen Elementen.

Die Funktionen „Stator Bar“ und „Stator Bar Control Dimensions“ erzeugen die Zeichnungen der verschiedenen Stabtypen in einem Wicklungslayout und deren jeweilige Kontrollmaße für die Stabherstellung. Diese Zeichnungen sind äußerst wichtig für die Herstellung der Biegewerkzeuge, die Stabfertigung und die Qualitätskontrolle.

Die Funktion „Create 3-D Model“ erzeugt die 3-D-Wicklungsbaugruppe.

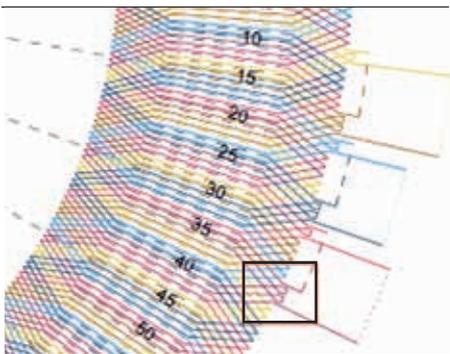
Optimierungspotenzial

Sind alle Informationen erfasst und die verschiedenen möglichen Wicklungslayouts definiert, kann die Optimierung erfolgen. Die Leistungsfähigkeit von IGM-Winding zeigt sich am Beispiel einer Maschine mit 540 Nuten und 36 Polpaaren.

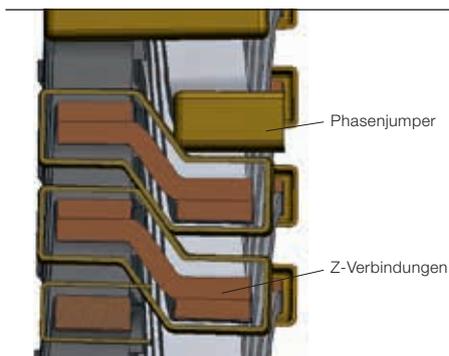
Auf den ersten Blick erscheint das Wicklungslayout recht einfach – keine Jumper in der Statorwicklung, nur die Phasenjumper im Bereich der Anschlussstäbe. Eine Detailansicht zeigt die Phasenjumper, Anschlussstäbe und Z-Verbindungen → 6.

Der markierte Bereich in der Abbildung ist rechts daneben in der Draufsicht dargestellt → 7. Aus der 3-D-Darstellung ergeben sich zwei Regionen, in denen es beim Bau der Isolierkappen über den Stabverbindungen an der Wicklung zu Konflikten kommen wird: Der Raum zwischen der Isolierkappe des Anschlussstabs und der daneben liegenden Z-Verbindung ist konstruktiv nicht machbar. Gleiches gilt zwischen der Isolierkappe des Phasenjumpers und der benachbarten Z-Verbindung. Aufgrund des fehlenden Platzes kann diese Wicklung nicht mit Z-Verbindungen gebaut werden. Für eine alternative Lösung müssen der Mindestabstand zwischen den Verbindungen und die Mach-

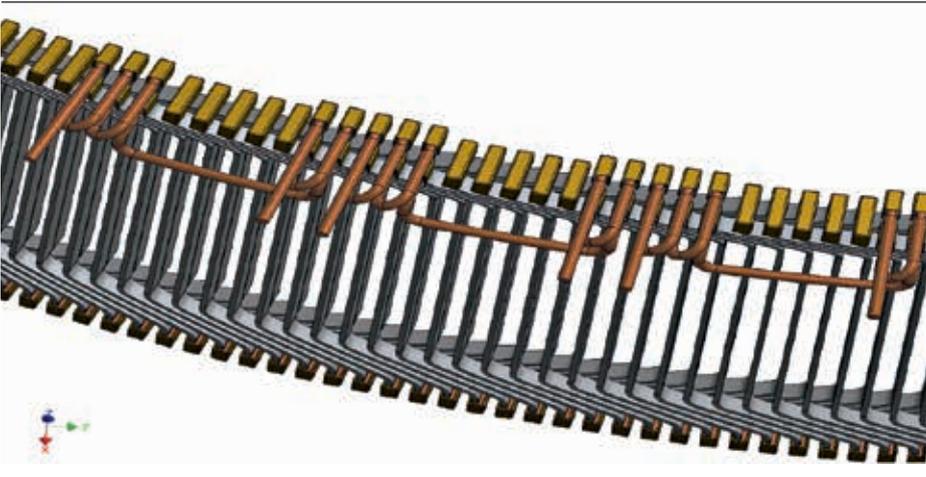
6 3-D-Layout einer Wicklungsbaugruppe.
Der markierte Bereich ist rechts
vergrößert dargestellt.



7 3-D-Ansicht des Wicklungslayouts



8 3-D-Wicklungsbaugruppe



barkeit der Konstruktion und Isolation der neuen Verbindungsgeometrie berücksichtigt werden.

Der Optimierungsprozess kann in jeder Phase des Designs erfolgen. In diesem speziellen Fall geht es hauptsächlich um die konstruktive Machbarkeit des alternativen Teils unter Einhaltung der Mindesttoleranzen und Luftstrecken. Die 3-D-Ansicht eines Wicklungslayouts zeigt ein vollständig anderes Szenario als das zweidimensionale Wicklungslayout → 8. Die Kostenoptimierung – ohne Beeinträchtigung der Qualität oder Leistungsfähigkeit – bezieht sich nicht nur auf die Anzahl der Brücken in einem Wicklungslayout, sondern kann auch auf den Preis einer Z-Verbindung im Vergleich zu einer kleinen gebogenen Brücke bezogen werden. Die Kosten für den zusätzlichen Induktor, der zum Lötens der Z-Verbindung erforderlich ist, entfallen bei der Verwendung einer kleinen Brücke (gleicher Induktor wie für die Anschlussstäbe) ebenso wie die Lötzeit, Platzierung der Anschlüsse, Längen usw. Alle diese Aspekte

sollten bei der Suche nach der bestmöglichen Lösung berücksichtigt werden.

Optimiertes Design, minimierte Risiken

Das einzigartige IGM-Winding-Tool von ABB optimiert das Wicklungslayout einer elektrischen Maschine und hilft den Design- und Konstruktionsteams dabei, die bestmöglichen Entscheidungen auf der Grundlage genauer, parametrisierter 3-D-Modelle zu treffen. Der automatisierte Prozess und die frühzeitige Voraussicht auf kritische Designprobleme ermöglichen die Minimierung der zur Erstellung des Designs und der Zeichnungen erforderlichen Zeit.

Die genaue Vorhersage kritischer Abstände minimiert die Gefahr von Fertigungsproblemen und konstruktionsbedingten vorzeitigen Wicklungsausfällen. Dies gilt besonders für GMDs, die in großer Höhe eingesetzt werden. IGM-Winding wird bei ABB für die Entwicklung der GMD-Designs eingesetzt, kann aber auch für jeden Motor oder Generator verwendet werden.

IGM-Winding optimiert das Wicklungslayout einer elektrischen Maschine und hilft den Design- und Konstruktionsteams dabei, die bestmöglichen Entscheidungen zu treffen.

Macarena Montenegro-Urtasun

Giovanni Canal

Process Automation

Baden-Dättwil, Schweiz

macarena.montenegro-urtasun@ch.abb.com

giovanni.canal@ch.abb.com

Jan Poland

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil, Schweiz

jan.poland@ch.abb.com

Axel Fuerst

ehemals ABB Process Automation

Danksagung

ABB dankt der Mensch und Maschine CAD-LAN

AG für ihre Unterstützung bei diesem Projekt,

insbesondere Peter Voegeli, der eine sehr effiziente

Möglichkeit gefunden hat, die 3-D-Geometrie in

Inventor zu formulieren.