

ALGORITHMEN TREFFEN WERKSTOFFE

# Thermoplastische Isolierung in Leistungstransformatoren

ABB hat radiale Distanzstücke aus thermoplastischem Kunststoff für ölgefüllte Transformatoren entwickelt und erfolgreich getestet. Mithilfe des Spritzgussverfahrens und eines neuen flexiblen Gießwerkzeugs wurde eine schnelle und kostengünstige Produktionsmethode entwickelt, um Kunden eine robuste und zuverlässige Alternative zu Pressspan zu bieten.

**Adam Michalik**  
**Renata Porębska**  
Corporate Research Center  
Krakau, Polen

adam.michalik@pl.abb.com  
renata.porebska@pl.abb.com

**Su Zhao**  
**Orlando Girlanda**  
**Harald Martini**  
Corporate Research Center  
Västerås, Schweden

su.zhao@se.abb.com  
orlando.girlanda@se.abb.com  
se.abb.com  
harald.martini@se.abb.com

**Claire Pitois**  
ABB Product Group  
Västerås, Schweden

claire.pitois@se.abb.com

Als einer der weltweit führenden Transformatorenhersteller bietet ABB eine umfassende Palette von Transformatoren, Komponenten und Services, ermittelt individuelle Bedürfnisse und liefert optimale Lösungen.

Ziel des gemeinsamen Projekts war es, einen neuen Werkstoff zum Bau von Distanzstücken für Transformatoren zu finden.

Als Reaktion auf sich verändernde Marktbedingungen erweitert ABB ihre Produktfamilie von Transformatoren und investiert in Neuerungen, Produkt- und Prozessverbesserungen →1. Zurzeit ist das Unternehmen dabei, die Eignung neuer Werkstoffe für Transformatorkomponenten zu untersuchen und Produktionsprozesse neu zu definieren, um bestmögliche Produkte zu entwickeln →2.



—  
01 In ABB-Leistungstransformatoren stecken das Wissen und die Erfahrung von über 100 Jahren.

### Radiale Distanzstücke – klein, aber bedeutend

Radiale Distanzstücke gehören zu den wichtigsten Isolationskomponenten typischer ölgefüllter Transformatoren mit Scheibenwicklungen. Diese relativ kleinen Elemente sitzen mitten in den Transformatorwicklungen und sichern den richtigen Abstand zwischen den einzelnen Wicklungsscheiben →2. Die Distanzstücke müssen eine konstante mechanische Belastung aushalten, die aus der Presskraft resultiert, und – im Falle

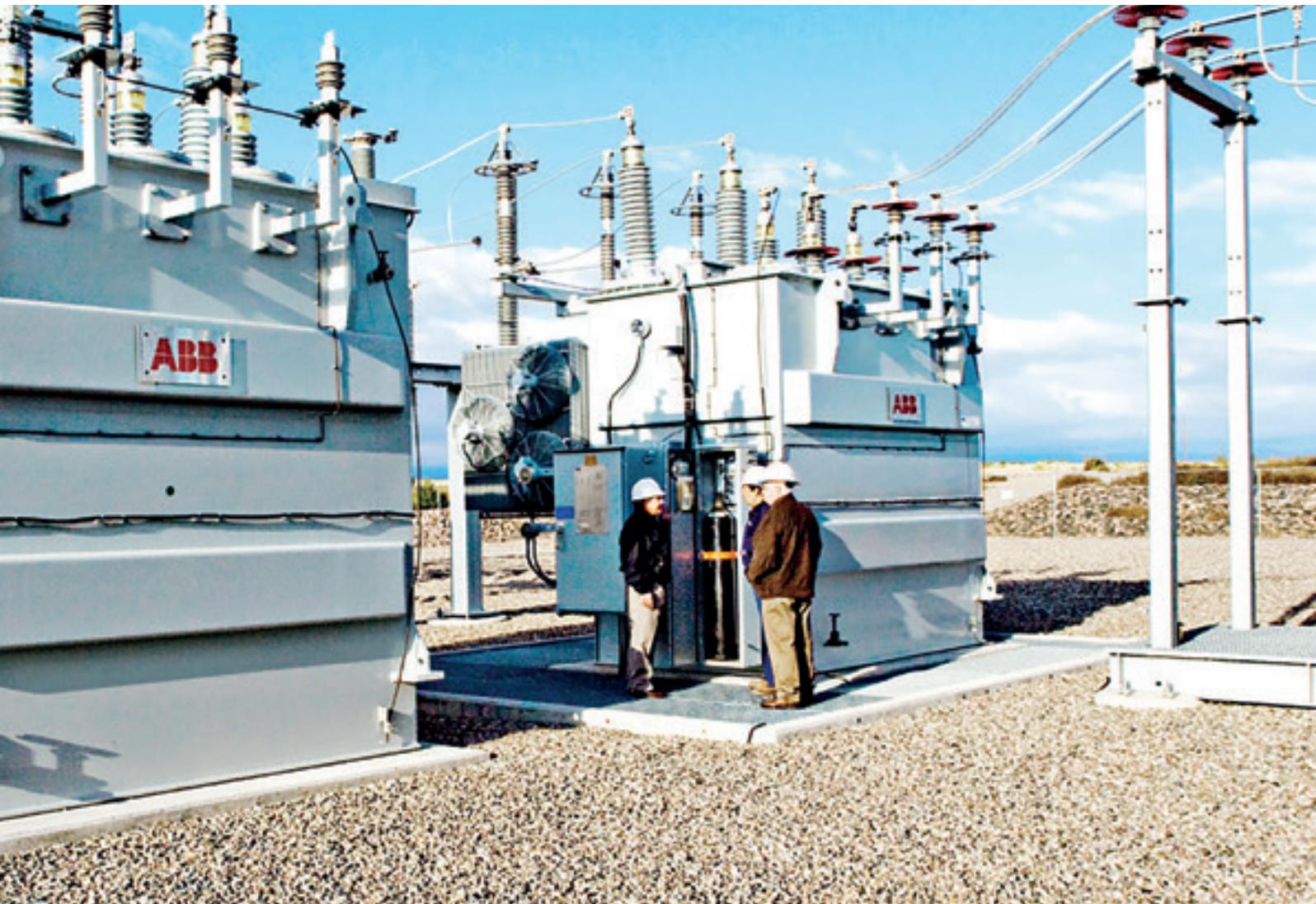
—  
Die Distanzstücke besitzen eine hervorragende Maßbeständigkeit und Zuverlässigkeit, was eine langfristige mechanische Leistungsfähigkeit der Wicklung garantiert.

eines Kurzschlusses – einer zusätzlichen hohen Belastung durch elektrodynamische Kräfte standhalten können. Darüber hinaus müssen sie Betriebstemperaturen von 98 °C bis 110 °C und

kurzzeitigen schnellen Temperaturanstiegen aufgrund möglicher Überlastungen widerstehen. Und zu guter Letzt müssen sie beständig gegen Wechselwirkungen mit dem Transformatoröl sein.

Bisher war Pressspan das Produkt der Wahl für Distanzstücke und andere Isolationskomponenten. Pressspan wurde Mitte des 20. Jahrhunderts entwickelt, ist leicht und eignet sich sehr gut für die besonderen mechanischen und elektrischen Anforderungen von Transformatoren. Aus diesem Grund hielt man die Erforschung und Entwicklung anderer geeigneter Werkstoffe für lange Zeit weder für wirtschaftlich noch für technisch machbar [3]. Heute wird Pressspan in den meisten Transformatortypen von kleinen Verteiltransformatoren bis hin zu großen Leistungstransformatoren eingesetzt. Die einzige Ausnahme bilden Spezialtransformatoren, die extrem hohe Betriebstemperaturen erfordern [4, 5] oder Lösungen mit besonders hohen Sicherheitsanforderungen wie Traktionstransformatoren. In diesen Fällen kommen aufgrund ihrer hohen Festigkeit und nichtleitenden Eigenschaft künstliche Hochleistungswerkstoffe auf Aramidbasis zum Einsatz.

01





02

### **Kunststoff-Alternativen**

Nach dem jahrzehntelangen Einsatz von Pressspan als Grundwerkstoff für Transformatorisierungen ist ABB überzeugt, dass der Fertigungsmarkt bereit für weitere innovative Werkstoffe ist, um dem Kunden eine größere Auswahl zu bieten. Die Verfügbarkeit und rasche Entwicklung von Kunststoffen mit einzigartigen Eigenschaften ebnet den Weg für Anwendungen, die bisher nicht möglich waren. Moderne Kunststoffe zeichnen sich durch verbesserte mechanische und thermische Eigenschaften wie eine hohe thermische Alterungsbeständigkeit (RTI-Wert), eine hohe Wärmeformbeständigkeit und eine hohe Druckfestigkeit aus. Dies macht Kunststoff zu einem potenziellen Kandidaten sowohl für tragende als auch für isolierende Elemente in Transformatoren. Zudem ermöglichen bahnbrechende Neuerungen auf dem Gebiet der Fertigungsverfahren eine einfache und energieeffiziente Produktion, was die Attraktivität von Kunststoff zusätzlich erhöht.

Kunststoffe zeichnen sich allgemein durch eine geringe Wasseraufnahme aus der Umgebungsfeuchtigkeit aus (bei einigen thermoplastischen Sorten liegt die Wasseraufnahme sogar bei unter einem Gewichtsprozent). Dies ist besonders vorteilhaft, da sich Wassermoleküle im Isolierstoff negativ auf die elektrischen Eigenschaften auswirken, was wiederum die Montage der Distanzstücke und Wicklungen beeinträchtigen kann. Aus diesem Grund werden Distanzstücke und

—  
**Beim Einsatz neuer Werkstoffe wie Kunststoff kann auf das Trocknen und Pressen ganz oder teilweise verzichtet werden.**

andere Isolationskomponenten aus Pressspan getrocknet – einmal nach der Wicklungsmontage und ein zweites Mal vor dem Imprägnieren mit Öl [6]. Der Entzug des aufgenommenen Wassers aus den Isolierelementen kann zu Maßänderungen durch Schrumpfen führen. Daher wird ein spezielles Pressverfahren angewandt, um die korrekten Abmessungen der montierten Wicklungen nach dem Trocknen sicherzustellen. Sowohl das Trocknen als auch das Pressen erfordert Zeit, Aufwand und eine beträchtliche Menge Energie [6]. Beim Einsatz neuer Werkstoffe wie Kunststoff kann auf diese Schritte ganz oder teilweise verzichtet werden, wodurch Energie eingespart und die Produktion effizienter gestaltet werden kann.



—  
02 Typische Leistungs-  
transformatorproduktion  
(ABB Monselice, Italien).

—  
03 Schematische  
Darstellung von  
Transformatoren  
mit den inneren  
Wicklungen und  
Isolierungen.

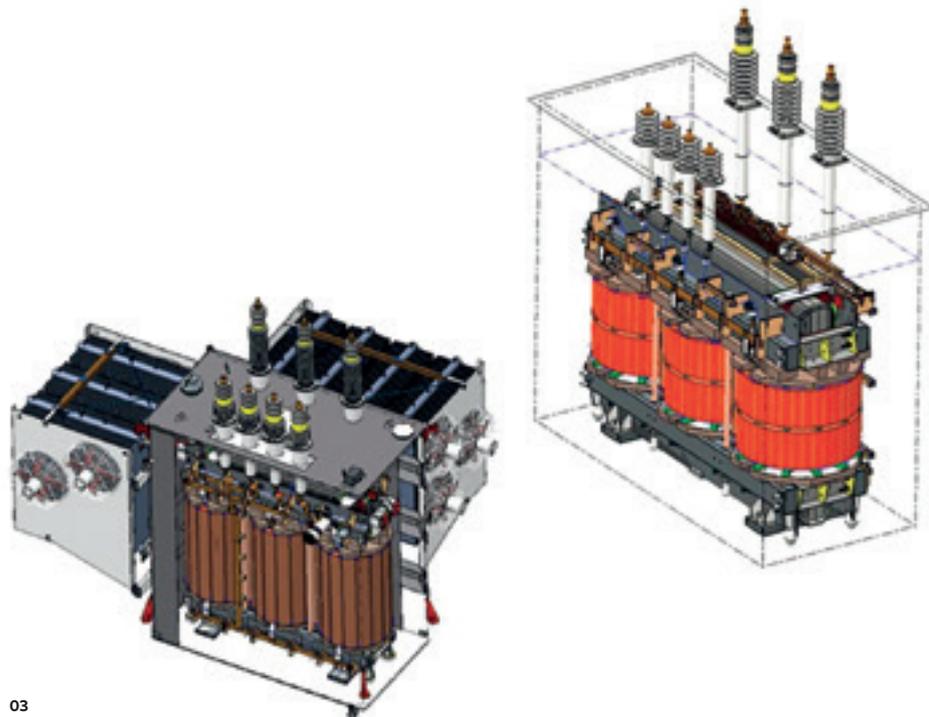
Mit über 100 Jahren Erfahrung in der Entwicklung und Fertigung von Transformatoren an mehreren Standorten ist sich ABB bewusst, dass Transformatorkunden aus der Energie-, Eisenbahn- und anderen Branchen auf dem wettbewerbsintensiven Markt von heute auf das Know-how und das Fachwissen von ABB vertrauen, wenn es um das Thema Isolierung geht. Kunststoffe mit herausragenden thermischen Eigenschaften und einer vernachlässigbaren Wasseraufnahme wären ein idealer Werkstoff für radiale Distanzstücke, wobei ein schlanker Produktionsprozess möglich wäre und der erste Trocknungsschritt und eventuell das Pressen ganz oder teilweise entfallen könnte. Aus der daraus resultierenden Effizienzsteigerung und Kostensenkung könnten sich echte Einsparungen für Kunden ergeben, die nach alternativen Distanzstücken suchen.

—  
Das Verhalten von Transformatoren mit Distanzstücken aus Thermoplast wurde erfolgreich unter schwierigsten Betriebsbedingungen verifiziert.

### Thermoplaste

Im Jahr 2011 initiierten mehrere ABB-Forschungszentren ein gemeinsames Projekt mit dem Ziel, einen Werkstoff für den Bau von Distanzstücken zu finden, der neue funktionale Möglichkeiten bietet und somit für Kunden eine interessante Alternative zum Einsatz von Pressspan in Leistungstransformatoren darstellt. Außerdem suchten die Teams nach einer schnelleren, zuverlässigeren und kostengünstigeren Produktionsmethode, die eine hohe Präzision der produzierten Elemente sicherstellt.

Aufgrund ihrer molekularen Struktur, die ein wiederholtes Schmelzen und Umformen erlaubt, bieten sich thermoplastische Kunststoffe als idealer Isolierstoff für Leistungstransformatoren an. Thermoplaste werden zunehmend für verschiedene elektrische Niederspannungsprodukte und neuerdings auch im Mittel- und Hochspannungsbereich eingesetzt, wo sie bei Gehäusen von Eingießpolteilen das herkömmliche Epoxidharz ersetzen, um mechanischen Halt und elektrische Isolierung zu bieten.



03

Angesichts der Vielzahl verschiedener Sorten wurden überraschend wenige Thermoplaste auf ihre Einsetzbarkeit in Leistungstransformatoren untersucht. Die durchgeführten Tests bestätigten jedoch die hervorragenden Eigenschaften der Kunststoffe wie etwa

—  
**Transformatoren, die auftrags- und anforderungsspezifisch konstruiert und optimiert werden, benötigen einen flexiblen Fertigungsprozess.**

ein stabiles mechanisches Verhalten unter Lastbedingungen und selbst bei Überlast, chemische Verträglichkeit bzw. Beständigkeit gegen Degradation durch Wechselwirkung mit Öl, geringe Feuchtigkeitsaufnahme und eine erwartungsgemäß hohe elektrische Festigkeit. Anschließend wurden einige Distanzstücke aus Thermoplast hergestellt, in Wicklungstapeln installiert und getestet →4, 5a. Dabei zeigten sie eine hervorragende Maßbeständigkeit und Zuverlässigkeit, was eine langfristige mechanische Leistungsfähigkeit der Wicklung garantiert →5b.

Das Temperaturverhalten wurde ebenfalls erfolgreich getestet. Aufgrund der hohen Temperaturbeständigkeit ist die Gefahr eines thermischen Versagens im Hinblick auf den Wicklungsheißpunkt deutlich geringer. Somit trägt der Einsatz von Distanzstücken aus Thermoplast zur Robustheit und Widerstandsfähigkeit von Transformatoren bei.

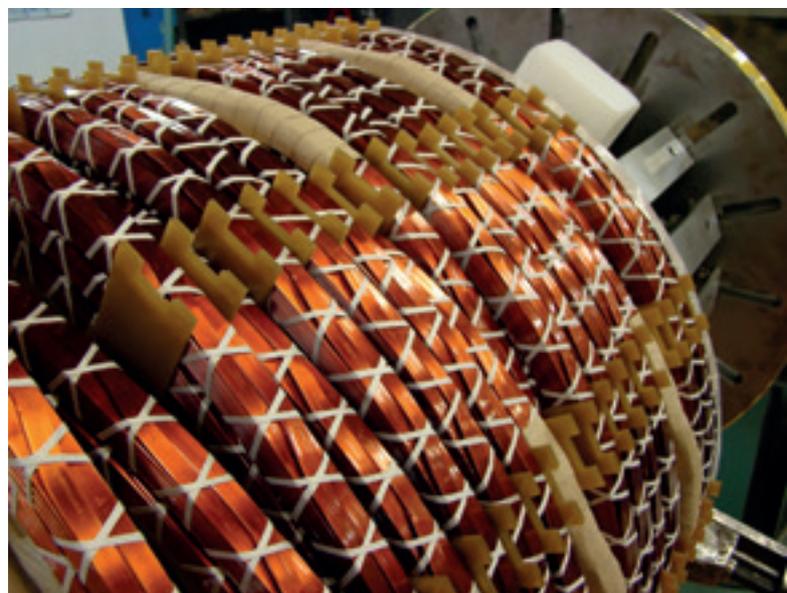
### Effizienter Prozess

Gesucht wurde eine Produktionsmethode, die schnell genug ist, um die erforderliche Zahl von Distanzstücken (mehrere Tausend pro Transformator) zu liefern, und flexibel genug, um – je nach Transformator und Kundenanforderungen – veränderliche Größen und kurze Reaktionszeiten zu ermöglichen. Außerdem sollte der Fertigungsprozess eine ausgezeichnete Präzision, Homogenität und Reproduzierbarkeit gewährleisten.

Man entschied sich für das Spritzgussverfahren, das üblicherweise zur Verarbeitung von Thermoplasten verwendet wird. Die Vielzahl der zu produzierenden Größen stellte jedoch eine technische Herausforderung dar. Das Spritzgussverfahren kommt vornehmlich bei der Massenproduktion von Objekten mit einer festen Geometrie zum Einsatz. Dabei wird flüssiger Kunststoff in den Hohlraum (Kavität) eines Gießwerkzeugs mit bestimmten Abmessungen eingespritzt, d. h. es kann nur eine bestimmte Objektgröße mit einem Gießwerkzeug hergestellt werden. Für Transformatoren, die auftrags- und anforderungsspezifisch konstruiert und optimiert werden, ist jedoch ein flexibler Fertigungsprozess hinsichtlich der Größe der Wicklungen und Distanzstücke erforderlich. Um dies zu gewährleisten, entwickelte ABB ein spezielles Gießwerkzeug →6.



04a



04b

—  
04 Durch die Erweiterung der Palette von Isolationsprodukten sorgt ABB dafür, dass Kunden die passenden Distanzstücke zur Verfügung stehen.

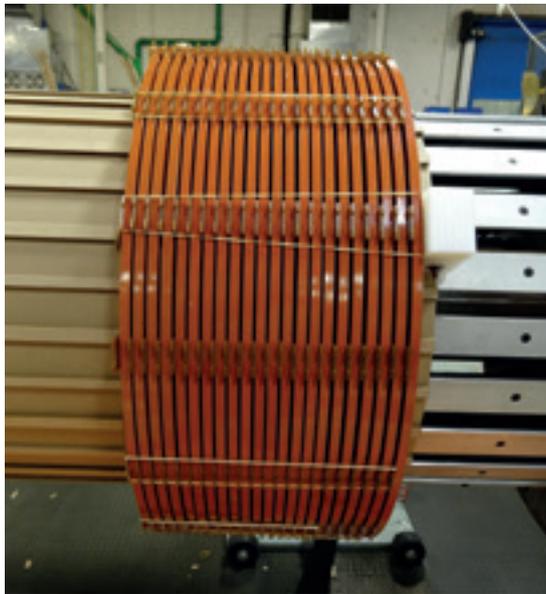
04a Distanzstücke aus Thermoplast.

04b Die Kunststoff-Distanzstücke bieten zusätzlichen Halt und elektrische Isolierung für den Wicklungsstapel.

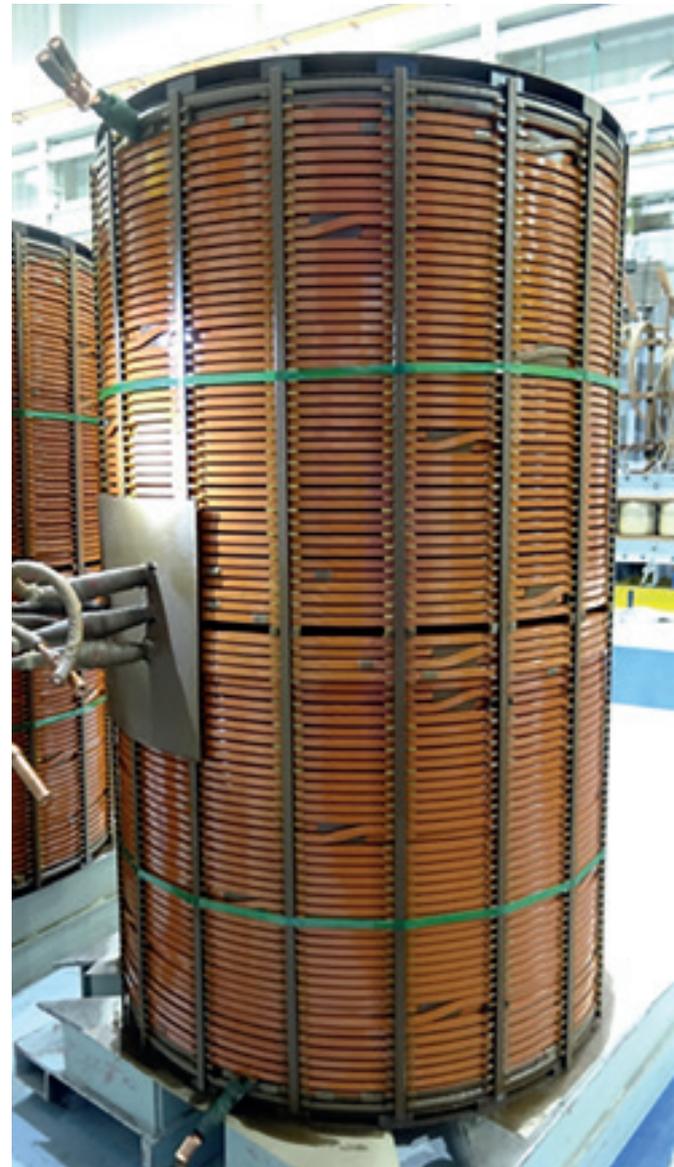
—  
05 Die installierten Distanzstücke sorgen für Stabilität.

05a Montage der Wicklungsstapel mithilfe von Distanzstücken aus Thermoplast.

05b Einsatzbereite Transformatorwicklung.



05a



05b

Das modulare Werkzeug verfügt über verstellbare Wände und ermöglicht eine stufenlose Veränderung der Länge des Distanzstücks, sodass alle erforderlichen Größen für Leistungstransformatoren abgedeckt werden. Darüber hinaus besitzt das Werkzeug mehrere Kavitäten, was die gleichzeitige Fertigung mehrerer Distanzstücke pro Einspritzzyklus in weniger als einer Minute erlaubt.

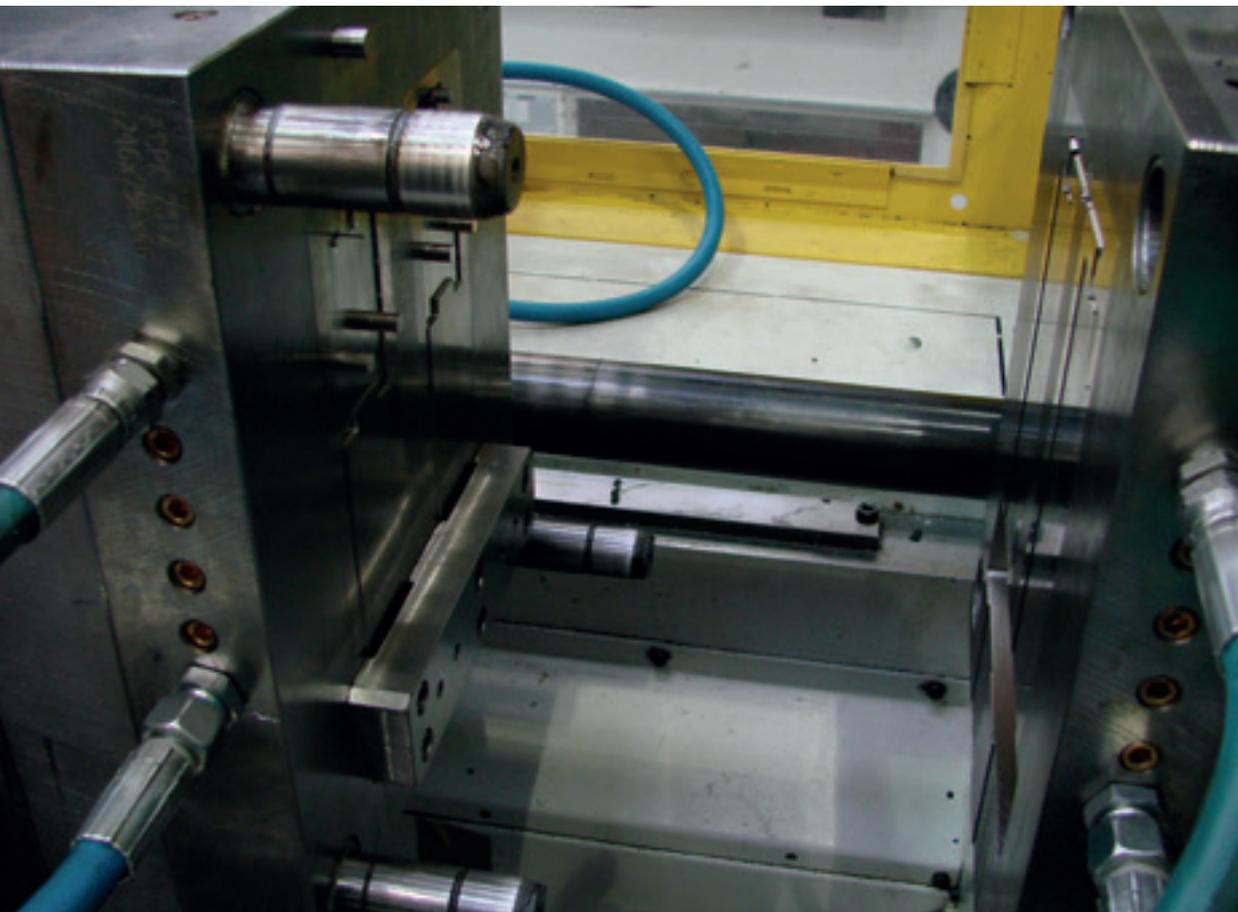
—  
**ABB entwickelte ein spezielles Gießwerkzeug, das eine stufenlose Veränderung der Länge des Distanzstücks ermöglicht.**

Simulationsexperten von ABB unterstützten die Entwicklung mit ihrem Wissen und ihrer Erfahrung auf dem Gebiet der multiphysikalischen Simulation, wodurch die üblichen Iterationen nach dem „Trial-and-Error“-Verfahren eliminiert werden konnten und der Designprozess beschleunigt wurde.

Nach Optimierung der Prozessparameter konnten die Dickentoleranzen der Distanzstücke erfolgreich auf  $\pm 0,015$  mm reduziert werden, was eine präzise Fertigung, Reproduzierbarkeit und Homogenität des Prototyps sicherstellte.

#### Tests in Leistungstransformatoren

Umfangreiche Untersuchungen an Transformatoren, die mit Distanzstücken aus Thermoplast ausgestattet wurden, lieferten beispielhafte Ergebnisse. Bisher haben Transformatoren mit Distanzstücken aus Thermoplast sämtliche Stück- und Typprüfungen, einschließlich Erwärmungsprüfungen mit Überlast und dielektrischer Prüfungen, erfolgreich absolviert. Das Verhalten von Transformatoren mit Distanzstücken aus Thermoplast wurde erfolgreich unter schwierigsten Betriebsbedingungen, z. B. bei Netzkurzschlüssen, verifiziert. Vollständige Kurzschlussprüfungen wurden ebenso wiederholt erfolgreich durchgeführt wie Sichtprüfungen der Aktivteile und der einzelnen Wicklungen.



06

—  
06 Am  
Spritzgießwerkzeug  
lässt sich die Länge  
der Distanzstücke  
entsprechend den  
Kundenvorgaben  
einstellen.

—  
**Literaturhinweise**  
[1] IEEE C57.12.00-2015:  
IEEE Standard for General  
Requirements for Liquid-  
Immersed Distribution,  
Power, and Regulating  
Transformers.  
[2] IEC 60076 (2011):  
Power Transformers –  
Part 1-7.  
[3] IEC 6064 (2004):  
Pressboard and press  
paper for electrical  
purposes – Part 1-3.  
[4] IEC 60076-14:2013:  
Power Transformers -  
Part 14: Liquid-immersed  
power transformers  
using high-temperature  
insulation materials.  
[5] IEEE C57.154-2012:  
IEEE Standard for the  
Design, Testing, and  
Application of Liquid-  
Immersed Distribution  
Power, and Regulating  
Transformers Using  
High-Temperature  
Insulation Systems and  
Operating at Elevated  
Temperatures.  
[6] M. J. Heathcote: „The  
J&P Transformer Book: A  
Practical Technology of  
the Power Transformer“,  
12th edition. Newnes,  
Oxford, 1998.

### Blick in die Zukunft

Durch die Erweiterung der Palette von Isolationsprodukten für Leistungstransformatoren um neue Distanzstücke aus Thermoplast sorgt ABB dafür,

—  
Durch die Erweiterung der Palette von Isolationsprodukten sorgt ABB dafür, dass Kunden die passenden Distanzstücke zur Verfügung stehen.

dass Kunden die passenden Distanzstücke für die anspruchsvollen Anforderungen des heutigen Transformatorenmarkts zur Verfügung stehen. Das Produkt wird besonders für Kunden auf dem US-amerikanischen Markt von Interesse sein, wo ABB zellulosefreie Isolierstoffe anbietet. Kombiniert man diese Isolierstoffe mit Distanzstücken aus Thermoplast, kann auf den Trocknungsschritt bei der Montage verzichtet werden.

Die Forschungsteams von ABB nutzen die Verfügbarkeit neuer Werkstoffe zur Entwicklung eines zuverlässigen und kostengünstigen Produkts zur Stabilisierung und elektrischen Isolierung von Transformatorwicklungen. Der Produktionsprozess wurde perfektioniert und vereinfacht, und neue, variable Werkzeuge helfen dabei, den Fertigungsprozess weiter zu rationalisieren. Durch die Beseitigung einiger Produktionsschritte bei gleichzeitiger Erhaltung der Produktqualität und Verbesserung der Zuverlässigkeit kann dem Kunden ein besseres Produkt angeboten werden.

Die Bedeutung, die der Einsatz von Thermoplast für das neue Produkt hat, geht über die Anwendung in Distanzstücken hinaus. Die erfolgreiche Verwendung des Werkstoffs ebnet den Weg für einen breiteren Einsatz moderner Werkstoffe für zukünftige Isolationskomponenten. ●