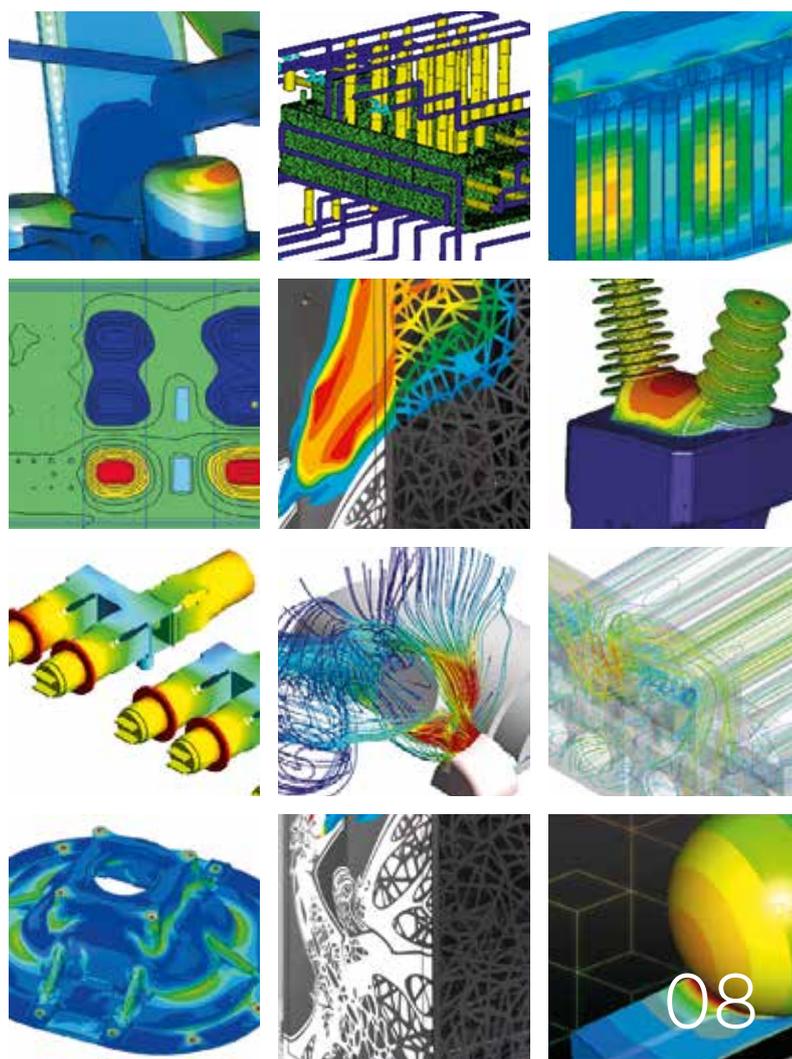


review

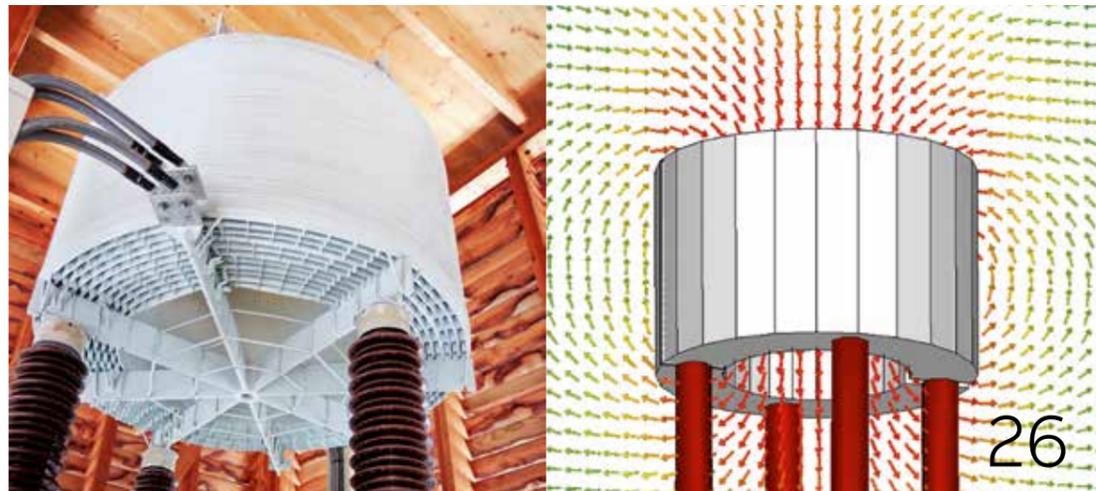
02|2019 de

Digitale Zwillinge und Simulationen



42

- 06 – 69 Digitale Zwillinge und Simulationen
- 70 – 77 Produktivität



Digitaler HVDC-Light®-Zwilling



Engineering von Prozessmodulen



Untersuchung von Störlichtbögen

Angeschlossene Analysen



05 Editorial

Digitale Zwillinge und Simulationen

- 08 Die Welt der Simulation
- 14 Digitale Zwillinge in der Edge
- 20 Elektrothermische Simulationen
- 26 Digitaler HVDC-Light®-Zwilling
- 34 Angeschlossene Analysen
- 42 Simulationen leicht gemacht
- 47 Fortschrittliche Simulationen
- 52 Digitale Avatare für Antriebsstränge
- 58 Überwachung rotierender Maschinen
- 64 Untersuchung von Störlichtbögen

Produktivität

- 72 Engineering von Prozessmodulen

Buzzwords entschlüsselt

- 78 Cloud-, Edge- und Fog-Computing

79 Impressum

Stellen Sie sich vor, Sie hätten einen digitalen Zwilling in einer virtuellen Welt, in der Sie Entscheidungen testen, Überraschungen vorhersehen und so Ihr Leben optimal gestalten könnten. ABB nutzt dieses Konzept für die Entwicklung, den Betrieb und die Wartung kritischer Anlagen und im Servicebereich. Lesen Sie, welche realen Ergebnisse Simulationen in der virtuellen Welt liefern können.

EDITORIAL

Simulationen und digitale Zwillinge



Liebe Leserin, lieber Leser,

beim Thema Digitalisierung geht es häufig um Vorteile im laufenden Betrieb. Doch Digitalisierung und künstliche Intelligenz können schon lange vor der Inbetriebnahme eines Systems genutzt werden – etwa bei der Spezifikation, Konstruktion, Fertigung und Konfiguration.

Simulationen verkürzen Analysen und Designzyklen und sorgen für bessere Ergebnisse, indem sie die Untersuchung einer größeren Zahl von Varianten ermöglichen. Künstliche Intelligenz unterstützt die Erstellung von Simulationsmodellen und die Erkennung von Trends. Und Simulationsergebnisse sind nicht mehr in geschlossenen Umgebungen „gefangen“, sondern können problemlos für andere Zwecke genutzt werden. Digitale Zwillinge erleichtern dies, indem sie wichtige Daten und Verhaltensweisen digital widerspiegeln. So können verschiedene Vorgänge von der Konfiguration bis zur Zustandsüberwachung und -vorhersage vereinfacht werden. Falls erforderlich können die Daten sogar durch Augmented Reality ergänzt und auf mobilen Geräten zur Unterstützung von Entscheidungen vor Ort genutzt werden.

Ich hoffe, diese Ausgabe der ABB Review bietet Ihnen einige interessante Einblicke in die sich rasant entwickelnde Welt der Simulationen.

Bazmi Husain
Chief Technology Officer

Digitale Zwillinge und Simulationen



Was lässt sich in einer praktisch grenzenlos variablen virtuellen Testumgebung alles erreichen? Fortschrittliches Produktdesign, iterative Verbesserungen auf Basis der Nutzung, Performance-Management und Simulationen von außergewöhnlichen Ereignissen sind nur einige Möglichkeiten. Die KI nutzt Simulationsalgorithmen und die Leistungsfähigkeit digitaler Zwillinge – in der Edge und in Echtzeit, um schneller und besser zu lernen und bessere Lösungen zu finden.

- 08 Die Welt der Simulation
- 14 Digitale Zwillinge und Echtzeit-KI in der Edge
- 20 Besseres thermisches Design durch elektrothermische Simulationen
- 26 Digitaler HVDC-Light®-Zwilling erleichtert das EMV-Design
- 34 Performance-Management von Solaranlagen mit angeschlossenen Analysen
- 42 Simulationen leicht gemacht
- 47 Fortschrittliche Produktgestaltung und -fertigung durch 3D-Druck
- 52 Digitale Avatare für Antriebsstränge
- 58 Neue Wege bei der Zustandsüberwachung rotierender Maschinen
- 64 Untersuchung von Störlichtbögen

DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

Die Welt der Simulation

Simulationen und digitale Zwillinge revolutionieren unser Denken im Hinblick auf die Entwicklung und den Einsatz von Produkten.

Marek Florkowski
Daniel Szary
 ABB Corporate Research
 Krakau, Polen

marek.florkowski@
 pl.abb.com
 daniel.szary@pl.abb.com

Andreas Moglestue
 ABB Review
 Baden-Dättwil,
 Schweiz

andreas.moglestue@
 ch.abb.com

Der Pythagoras zugeschriebene Satz „Alles ist Zahl“ ist heute aktueller denn je. Zahlen ermöglichen es uns, physische Größen wie Positionen, Temperaturen, Durchflussmengen, Feldstärken und viele andere zu erfassen und zu verarbeiten. Es gibt eine Vielzahl raffinierter Methoden, mit denen wir die physische Welt mithilfe von Zahlen messen bzw. beschreiben können. Mit dem Computerzeitalter ist ein neues und äußerst vielseitiges Werkzeug hinzugekommen: die Simulation.

Simulationen ermöglichen den Rückschluss auf Daten, die nicht direkt gemessen werden können. So ist es z. B. möglich, die Temperatur tief im Inneren eines Objekts aus Messungen der Oberflächentemperatur und dem physikalischen Verständnis der Vorgänge innerhalb des Objekts abzuleiten. Dabei ist die Unzugänglichkeit eines Messpunkts nicht auf die räumliche Dimension beschränkt. Die gewünschten Daten können auch in der Zukunft oder in einem System liegen, das physisch noch gar nicht existiert.

Produktentwickler haben mehr Spielraum für Innovation, können wesentlich mehr Varianten und Kombinationen testen und unorthodoxe Methoden ausprobieren.

Im Vergleich zu physischen Tests ermöglichen Simulationen enorme Zeit- und Kosteneinsparungen und helfen dabei, Ressourcenverschwendung und potenziell gefährliche Situationen zu vermeiden. Physische Labortests sind in der Regel mit einer erheblichen Verzögerung verbunden, da Prüfmuster und -anordnungen vorbereitet und gebaut werden müssen. Hinzu kommen Einschränkungen hinsichtlich der Möglichkeiten und Kapazitäten des Labors und eine mangelnde Flexibilität im Hinblick auf

späte Änderungen. Wenn bei einem Designprozess mit zahlreichen Iterationen vor jeder Iteration die Ergebnisse der vorangehenden Prüfung abgewartet werden müssen, kann dies erheblich Zeit kosten.

Neben Zeit- und Kosteneinsparungen ermöglichen Simulationen auch die Untersuchung einer wesentlich größeren Bandbreite von Varianten. Produktentwickler haben mehr Spielraum für Innovation, können wesentlich mehr Varianten und Kombinationen testen und unorthodoxe Methoden ausprobieren. Das Ergebnis ist eine optimierte Lösung.

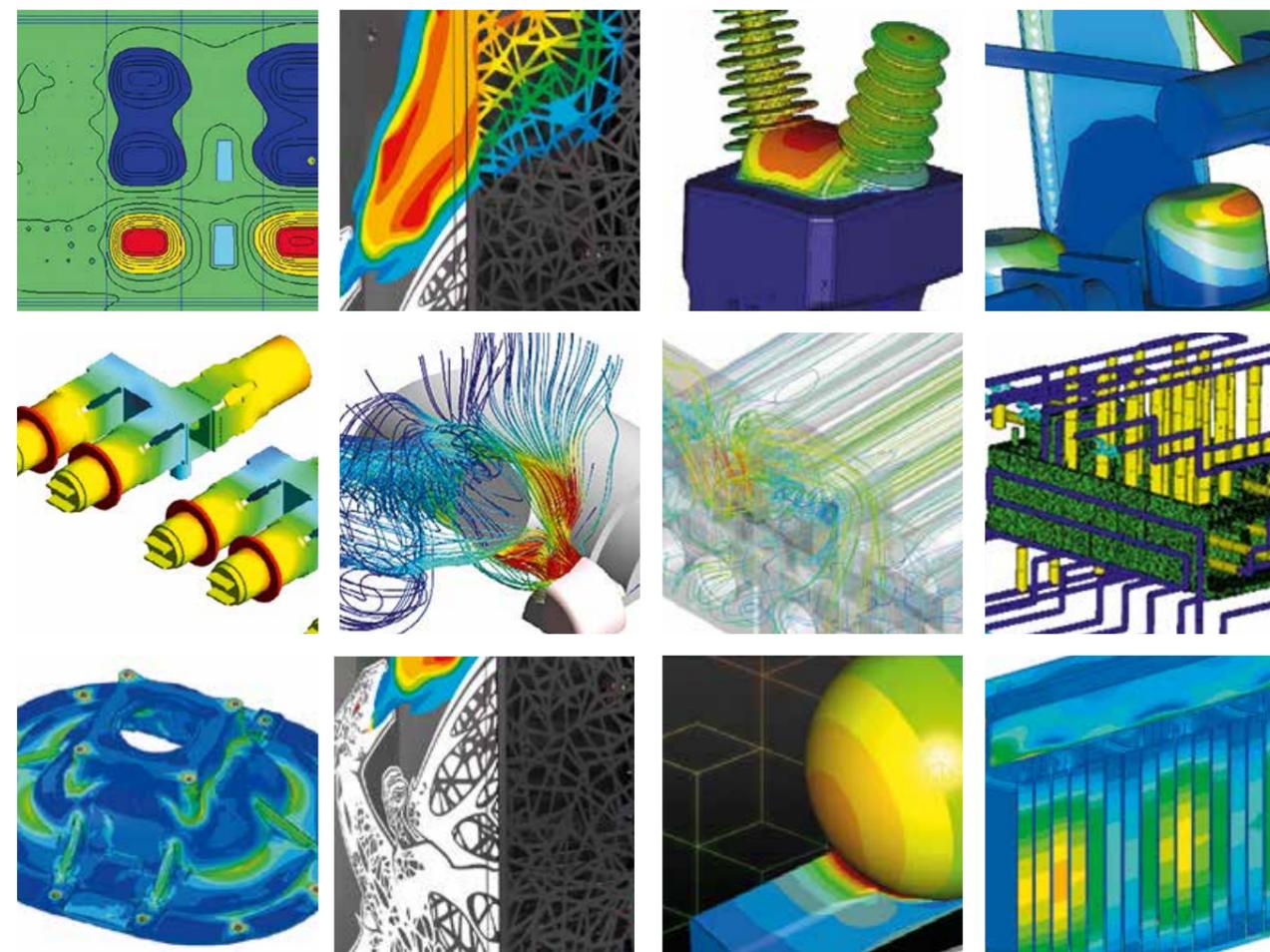
In einigen Fällen stellen Simulationen die einzige Möglichkeit zur Verifizierung eines Designs dar, wenn physische Tests – z. B. seismische Prüfungen im großen Maßstab – nicht machbar sind.

Heute lassen sich nahezu alle Aspekte des Produktlebenszyklus wie Fertigung, virtuelle Tests, Transport, normaler Betrieb, Alterung, raue Umgebungsbedingungen, extreme Situationen (Erdbeben, Lichtbögen, Blitzschläge, Überlasten usw.) simulieren.

Simulationen bei ABB

ABB macht umfassenden Gebrauch von Simulationen im Rahmen der Produktentwicklung. Dabei decken die Simulationen eine große Bandbreite von Feldern wie Elektromagnetismus, Thermodynamik, Mechanik, Fluidodynamik und Werkstoffwissenschaft ab. Zudem sind immer mehr Simulationen in der Lage, mehrere dieser Bereiche zu verbinden und nicht nur die Gesamtheit der Effekte, sondern auch die Kopplungen und Wechselwirkungen zwischen ihnen zu erfassen. Solche Simulationen werden als Multiphysik-Simulationen bezeichnet.

Im Jahr 2013 widmete die ABB Review bereits eine Ausgabe dem Thema Simulation →1. Ein Blick in das Heft zeigt, wie sich dieser Bereich inzwischen weiterentwickelt hat. Möglichkeiten, die damals als wünschenswert und futuristisch galten, sind heute



erprobte und bewährte Bestandteile der Simulations-Werkzeugpalette. Die vorliegende Ausgabe der ABB Review bringt das Bild auf den neuesten Stand und wirft einen Blick auf zukünftige Entwicklungen.

Fortschritte in der Simulation

Zu den Haupttreibern für den Fortschritt in der Simulation gehören die Zunahme der Rechenleistung und -geschwindigkeit, sinkende Kosten sowie eine höhere Benutzerfreundlichkeit. Was vor 25 oder 30 Jahren noch ein umfangreicher, rechenintensiver Auftrag war, kann heute problemlos in weniger als einer halben Stunde (plus Erstellung des Modells) berechnet werden. Neben der allgemein höheren Geschwindigkeit sind heutige Simulationen in der Lage, eine größere Zahl von Variablen zu berücksichtigen, was die Genauigkeit der Simulation insgesamt erhöht.

Neben der Hardware und den Kosten haben sich auch die Rollen der Simulationsingenieure stark verändert. Anfänglich mussten erfahrene Ingenieure viel Zeit in die Erstellung von Modellen und die Einrichtung der Simulationen investieren. Mittlerweile sind das Wissen

Zu den Haupttreibern gehören die Zunahme der Rechenleistung und -geschwindigkeit, sinkende Kosten sowie eine höhere Benutzerfreundlichkeit.

und die Computerkenntnisse – aber auch die Automatisierung und die Tools selbst – so weit fortgeschritten, dass viele dieser Aufgaben problemlos von Nachwuchskräften oder Studenten erledigt werden können. Dies bedeutet aber nicht, dass die Fähigkeiten nicht mehr gefragt sind. Vielmehr können sich Simulationsexperten nun auf das Interpretieren der Ergebnisse und das Beraten bei Designentscheidungen konzentrieren →2.

Jahr für Jahr werden Simulationen immer einfacher in der Anwendung. Diese „Demokratisierung“ ermöglicht den Einsatz von Simulationen in immer mehr Bereichen.

Feedback aus der physischen Welt

Die ausgefeilteste Simulation ist wertlos, wenn die Ergebnisse die Vorgänge in der realen Welt nicht angemessen widerspiegeln. Das Vertrauen in Simulationen wird durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit physischen Tests und praktischer Erfahrung gestärkt. Eine gute Simulationsmethode zeichnet sich durch eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse mit Laborprüfungen aus →3.

—
Eine gute Simulationsmethode zeichnet sich durch eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse mit Laborprüfungen aus.

Multiphysik-Simulationen

Eine Simulation muss die Phänomene, die in einem physischen Objekt oder System auftreten, digital widerspiegeln. Wie in der realen Welt wirken oft mehrere physikalische Effekte gleichzeitig auf ein Objekt. Betrachtet man z. B. eine Anlage ausschließlich unter elektrischen Gesichtspunkten, ist die Bestimmung eines optimalen Kabelquerschnitts relativ einfach. Berücksichtigt man aber weitere Phänomene wie thermische Effekte oder mechanische Schwingungen, kann es sein, dass die scheinbar optimale Lösung neu beurteilt werden



01

muss. Folglich sollten Simulationen Effekte aus verschiedenen physikalischen Bereichen (Elektrik, Mechanik, Thermodynamik) abbilden.

Häufig spielt auch die wechselseitige Abhängigkeit dieser Effekte eine Rolle. So muss zur Simulation eines Lichtbogens nicht nur die Dynamik des Plasmas, sondern auch das elektromagnetische Verhalten, die Wärmeerzeugung und Abkühlung simuliert werden. Alle diese Phänomene sind miteinander verknüpft. So hat die lokale Leitfähigkeit des Plasmas Einfluss auf die erzeugte Wärme, während sich die daraus resultierenden Temperaturen wieder auf die Leitfähigkeit auswirken. Die Wärme beeinflusst zudem die Bewegung und Verteilung des Plasmas im Raum, was wiederum die lokale Leitfähigkeit verändert usw. Die Einflüsse sind also eng miteinander verzahnt, sodass die jeweiligen Berechnungen parallel ablaufen und Informationen miteinander austauschen müssen.



02

—
01 Die Ausgabe 3/2013 der ABB Review zum Thema Simulation sorgte für viel positive Resonanz.

—
02 Die Interpretation der Ergebnisse ist ein wichtiger Teil des Simulationsprozesses.

—
Fußnote
1) Siehe auch „Digitaler Zwilling – praktisch identisch?“ in der ABB Review 2/2018, S. 94–95.

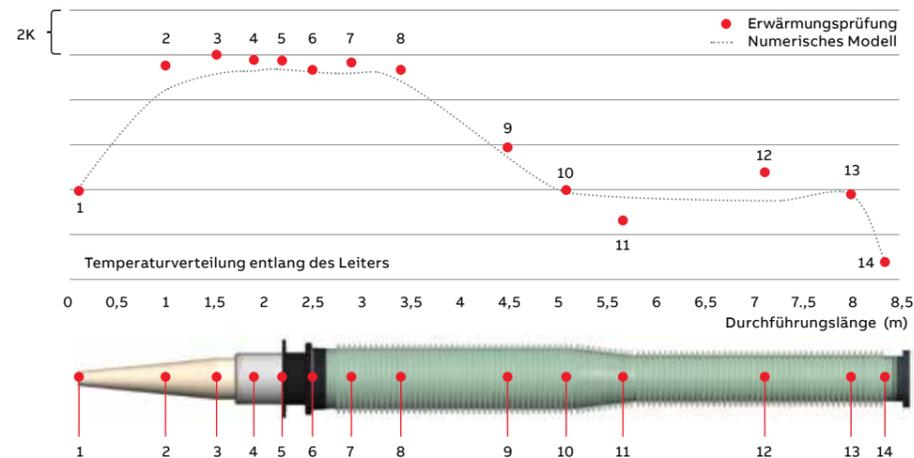
Bevor es Simulationen gab, basierten Designentscheidungen häufig auf Erfahrungen, die von Beobachtungen gestützt wurden. Heute ermöglichen Simulationen ein viel genaueres Verständnis dessen, was innerhalb von Phänomenen wie Lichtbögen passiert.

Digitale Zwillinge

Eine Simulation erfordert einige grundlegende Daten zu einem Gerät oder System. Werden verschiedene Simulationen für dasselbe Produkt durchgeführt, lässt sich die Effizienz der Berechnung durch die gemeinsame Nutzung relevanter Daten erhöhen. So kann nicht nur die wiederholte manuelle Erzeugung inkompatibler Eingaben vermieden werden, die Daten können auch für eine Vielzahl weiterer Zwecke in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus genutzt werden – z. B. für die Systemintegration, Diagnose, Vorhersage oder erweiterte Services. Dazu wird ein virtuelles Abbild des betreffenden

—
Simulationen ermöglichen ein viel genaueres Verständnis dessen, was innerhalb von Phänomenen wie Lichtbögen passiert.

Geräts oder Systems erstellt, das den Zugang zu den Daten und die Verifizierung von Eigenschaften vereinfacht. Diese strukturierte Sammlung von Daten und Algorithmen bildet den sogenannten digitalen Zwilling des Geräts¹.



03

Ein digitaler Zwilling kann als einheitliches Repository für alle relevanten Daten zu einem Gerät – von CAD-Informationen und Dokumentationen über Betriebs- und Servicehistorien bis hin zu Betriebsstunden und anderen wichtigen Informationen – fungieren. Darüber hinaus lassen sich Simulationsalgorithmen integrieren, die einem Systemkonfigurator oder -bediener sagen können, ob ein geplanter Vorgang das Gerät überlasten oder bestimmte Grenzen überschreiten würde. So kann es z. B. sein, dass ein informierter Bediener oder Anlagenmanager sich aus betrieblichen Gründen dafür entscheidet, eine höhere Temperatur zuzulassen, auch wenn dies das Serviceintervall oder die Lebensdauer des Geräts verkürzen würde. Solche Daten können mit nur einem Klick abgefragt werden. Durch Augmented Reality lässt sich die Usability eines solchen Tools weiter erhöhen (ein Techniker betrachtet Objekte durch die Kamera seines Smartphones, und die Bilder werden automatisch mit Erläuterungen versehen oder mit interaktiven Informationen überlagert).

Abfragetools dieser Art können nicht nur an Arbeitsplätzen und auf mobilen Geräten genutzt, sondern auch direkt in die nächste Generation von Bedienoberflächen für Leitsysteme eingebettet werden, sodass sie ständig zur Verfügung stehen und ohne jegliche manuelle Datenübertragung auskommen.

Neben einzelnen Geräten können auch für größere Prozesse und Systeme (z. B. eine Gruppe kollaborierender Maschinen in einer Fabrik) digitale Zwillinge erstellt werden, die dann aus den digitalen Zwillingen der einzelnen Komponenten bestehen und Daten zu deren Konfiguration und Interaktion

enthalten. Zudem können digitale Zwillinge die Schnittstellen zwischen Geräten abbilden und somit die Systemkonfiguration, das Testen und die Fehlerbehebung unterstützen.

Tools und Methoden für die Simulation

ABB nutzt eine Mischung aus kommerziellen, Open-Source- und selbst entwickelten Tools für die Simulation. Die Wahl des Werkzeugs hängt dabei vom jeweiligen Problem ab, und zu wissen, welches Tool sich wofür am besten eignet, ist Teil der Simulationskompetenz.

Das Modell für die Simulation wird auf der Grundlage von Designinformationen (z. B. CAD-Daten) erstellt. Faktoren wie Randbedingungen, Lasten usw. werden ebenfalls berücksichtigt. Die Erstellung dieser Daten wird zu einem gewissen Grad bereits durch Automatisierung unterstützt.

Ein digitaler Zwilling kann als einheitliches Repository für alle relevanten Daten zu einem Gerät fungieren.

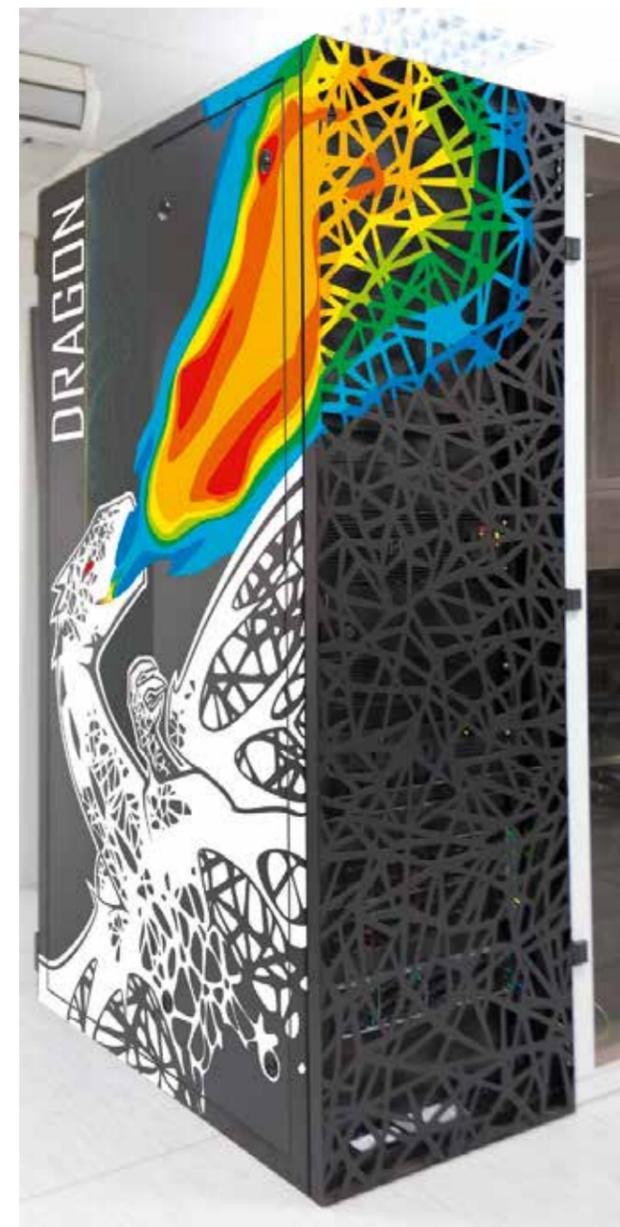
Die Tatsache, dass die Anwendung solcher Tools immer einfacher wird, hat zu einer „Demokratisierung“ der Simulation geführt.

Die erforderliche Rechenleistung ist abhängig von der Art der Simulation. Während für die elektrothermische Analyse einer kompletten

03 Vergleich von simulierten und gemessenen Temperaturen an einem Leiter.

04 Einige rechenintensive Simulationen erfordern Hochleistungsrechner wie diesen.

Mittelspannungs-Schaltanlage (etwa 50 Millionen Zellen in einem Finite-Volumen-Gitter) ein Hochleistungsrechner erforderlich sein kann →4 (die besagte Simulation läuft 24 Stunden lang auf 160 Kernen), reicht bei einfacheren Modellen oder anderen Anwendungen schon ein guter Laptop aus. So wurde eine Berechnung der elektrischen Feldemissionen um ein Kraftwerk (90 m x 150 m) mit einer Gittergröße (in den interessantesten Bereichen) von 2 cm auf einem Laptop in etwa zwei Stunden durchgeführt. Bei Netzberechnungen kann ein einziger Simulationslauf bereits binnen weniger Sekunden ein Ergebnis mit angemessener Qualität liefern.



04

Bei der Simulation geht es um viel mehr als das Ersetzen von Labortests oder das Beschleunigen der Produktentwicklung.

Künstliche Intelligenz (KI) spielt bei Simulationen eine zunehmend wichtige Rolle, z. B. bei der Erstellung der Modelle und bei der Erkennung und Interpretation von Phänomenen. Eine Stärke der KI liegt in der Optimierung der Datenkorrelation. So kann KI z. B. erkennen, welche Parameter die größte Auswirkung auf die Optimierung haben, und Designvarianten vorschlagen, die einem Optimum näher kommen.

Simulationen und 3D-/4D-Druck

Die bisher beschriebenen Simulationen werden typischerweise deutlich vor oder unabhängig von der Fertigung oder Anwendung durchgeführt und gelten daher nicht als Echtzeit-Vorgänge. Ein Beispiel, bei dem Simulationen in Echtzeit ablaufen müssen, ist der 3D- und 4D-Druck (ein 4D-Objekt ist ein dreidimensionales Objekt mit zusätzlicher eingebetteter Funktionalität). Eine parallel zum Drucken laufende Simulation kann z. B. dazu dienen, Parameter während des Druckens zu korrigieren. So können etwa temporäre, durch den Druckvorgang verursachte Temperaturunterschiede kompensiert werden.

Das Optimum finden

Bei der Simulation geht es um viel mehr als das Ersetzen von Labortests oder das Beschleunigen der Produktentwicklung. Da es viel einfacher ist, eine Simulation laufen zu lassen, als einen Test einzurichten, ist es möglich, eine viel größere Anzahl von Simulationen durchzuführen und somit eine breite Palette von Varianten zu untersuchen – einschließlich außergewöhnlicher und experimenteller Ideen. Dadurch, dass sie den Nutzer nicht von Anfang an auf eine Lösung beschränkt, eröffnet die Simulation neue Möglichkeiten nicht nur im Produktdesign, sondern auch im Hinblick auf Fertigungsprozesse, Geschäftsentscheidungen, Prüfung und Verifizierung und Serviceleistungen. So können Entwickler mit verschiedenen Geometrien und Ideen experimentieren und Parameter in mehreren Iterationen verfeinern. Mit anderen Worten, Simulation fördert die Kreativität.

In der vorliegenden Ausgabe der ABB Review werden einige ausgewählte Beispiele für Simulationen aus dem ABB-Konzern vorgestellt. •

DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

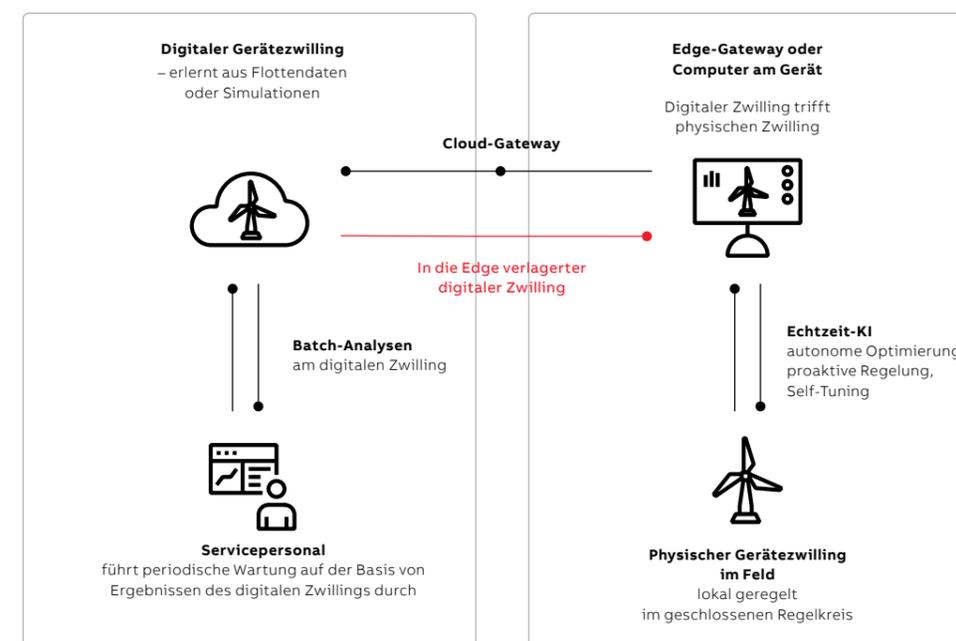
Digitale Zwillinge und Echtzeit-KI in der Edge

Cloudbasierte digitale Zwillinge bieten bedeutende Vorteile. Der Einsatz eines in der Cloud trainierten digitalen Zwillings in der Edge eröffnet jedoch neue Möglichkeiten für autonome Systeme wie neuartige Echtzeit-Anwendungen künstlicher Intelligenz (KI) auf der Basis maschineller Lernverfahren.



—
Titelbild: Ein digitaler Zwilling in der Edge kann sich durch Selbstlernen kontinuierlich entwickeln und gleichzeitig für die Synchronisation und Aktualisierung seines Gegenstücks in der Cloud sorgen. Die Verlagerung des digitalen Zwillings in die Edge bietet völlig neue Möglichkeiten und Vorteile für Industrien und Versorgungsunternehmen. Zu den Umgebungen, die von dieser Technologie profitieren können, gehören Kraftwerke wie das hier gezeigte.

—
01 Der digitale Zwilling wandert in die Edge, näher an seinen physischen Zwilling. Der digitale Zwilling wird auf dem Edge-Gateway oder am Gerät ausgeführt und mithilfe von Selbstlernverfahren entwickelt.



01



Mithun P. Acharya
ABB Corporate Research
Raleigh, NC, USA

mithun.acharya@
us.abb.com

Mirasoul J. Mousavi
Ehemaliger ABB-
Mitarbeiter

Ein digitaler Zwilling ist ein digitales Abbild eines physischen Betriebsmittels (physischer Zwilling), der zu verschiedenen Zwecken – z. B. zur Simulation des Verhaltens des physischen Betriebsmittels – genutzt werden kann. Ein Performance-Modell eines Solarwechselrichters ist z. B. ein digitaler Zwilling, der das Leistungsverhalten des Wechselrichters darstellt.

Die Verlagerung des digitalen Zwillings in die Edge ermöglicht neue Echtzeit-KI-Anwendungen.

Je nach Anwendungsfall kann es für das betreffende Betriebsmittel, den Prozess oder das System mehr als einen digitalen Zwilling geben. Diese Kombinierbarkeit der digitalen/physischen Zwillinge bietet ein hohes Maß an Flexibilität bei der Definition, Entwicklung, Zusammenstellung und Nutzung von Zwillingen für Echtzeit-Anwendungen im IoT (Internet of Things) wie Edge-Computing und Edge-Analysen. In diesem Fall bezieht sich der Ausdruck „Edge“ auf Software oder Hardware, die beim Kunden installiert ist, wie Edge-Gateways, Prozessdatenspeicher (Historians), Anlagengeräte und Controller.

Digitaler Zwilling in der Edge

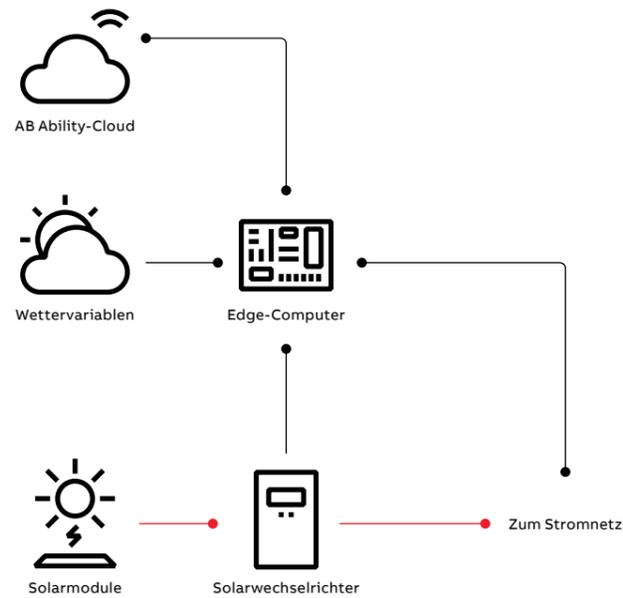
Der digitale Zwilling befindet sich normalerweise in der Cloud und wird dort mit Daten von Feldgeräten oder Simulationen „gefüttert“.

Digitale Zwillinge werden verwendet, um vergangene und zukünftige Betriebsabläufe zu verstehen und mithilfe von maschinellen Lernverfahren zur Zustandsüberwachung, Anomalieerkennung und Ausfallprognose entsprechende Vorhersagen zu treffen. So können digitale Zwillinge z. B. für die (vorausschauende) Instandhaltung des dazugehörigen physischen Betriebsmittels genutzt werden.

Welche neuen Anwendungen wären möglich, wenn man den digitalen Zwilling in die Edge und damit näher an sein physisches Gegenstück verlagern würde?

Während Edge-Geräte in der Vergangenheit hauptsächlich zur Datenerfassung und für einfache Berechnungen genutzt wurden, werden durch Edge-Computing fortschrittlichere Berechnungen und cloudgestützte Analysen möglich, die eine schnellere und lokalisierte Entscheidungsfindung in der Edge unterstützen →1. Die Verlagerung des digitalen Zwillings in die Edge ermöglicht neue Echtzeit-KI-Anwendungen durch:

- Geringere Analyselatenz: In einigen Fällen sind die Umlaufzeiten zur Cloud nicht akzeptabel. Mit digitalen Zwillingen, die ihre Funktion in der Edge ausführen, sind Anwendungen möglich, die Latenzen von unter einer Sekunde erfordern. So können z. B. Geräteschutzfunktionen einschließlich Absperrfunktionen sofort aktiviert werden, wenn durch die Analysen des digitalen Zwillings eine Gefahr erkannt oder vorhergesagt wird.



02

- Closed-Loop-Integration von Analysen und lokaler Steuerung: Vom digitalen Zwilling generierte Analysen können auf die lokale Steuerung einwirken und umgekehrt. Dies ermöglicht proaktive Regelungsanwendungen für einen autonomen Betrieb. So könnte z. B. eine prognostizierte kritische Anomalie ohne menschliches Zutun entschärft werden.
- Schnellere Evolution des digitalen Zwillings: Mithilfe von Verfahren wie Online Machine Learning (maschinelles Lernen aus Datenströmen) und Reinforcement Learning (bestärkendes Lernen) in Echtzeit kann der digitale Zwilling kontinuierlich selbst lernen und sich entwickeln. Dies wiederum ermöglicht einen optimierten Systembetrieb und Geräte mit Self-Tuning-Funktionen. Ein mit dem Stromnetz verbundenes energietechnisches Gerät kann, indem es von seinem digitalen Zwilling in der Edge lernt und diesen entwickelt, optimale Betriebs- oder Regelparameter für eine maximale Ausgangsleistung ableiten, ohne die Netzstabilität zu beeinträchtigen.

Die Ausführung des digitalen Zwillings in der Edge statt in der Cloud hat auch betriebswirtschaftliche Vorteile:

- Reduzierte Hosting-Kosten für die Cloud: Sämtliche Daten zur Speicherung und Analyse in die Cloud zu senden, kann teuer werden.
- Die Datenvorverarbeitung reduziert das in die Cloud übertragene Datenvolumen.
- Sensible Daten müssen nicht in die Cloud übertragen werden.
- Größere Robustheit: Analysen können auch durchgeführt werden, wenn der digitale Zwilling getrennt ist.

Welche Möglichkeiten digitale Zwillinge in der Edge bieten, soll im Folgenden anhand von drei Anwendungsfällen veranschaulicht werden.

Performance-Tracking einer Solaranlage in Echtzeit

Smarte Solarwechselrichter können bestimmte Systemdienstleistungen wie Spannungs- und Frequenzregelung, Leistungsfaktorkorrektur und Blindleistungsregelung für das Stromnetz bereitstellen. Diese erweiterten Funktionen können dabei helfen, Schwankungen in Angebot und Nachfrage aufgrund intermittierender erneuerbarer Energiequellen und elastischer Lasten zu glätten. Um die Fähigkeiten smarter Wechselrichter in einer Solaranlage nutzen zu können, muss die Ausgangsleistung der Anlage (um etwa 10 %) reduziert werden, sodass bei Bedarf genügend Reserve für die Regelungsvorgänge zur Verfügung steht.

Der Schlüssel zur Gewährleistung eines bestimmten Regelbereichs bei entsprechender Leistungsreduktion ist die Schätzung der verfügbaren Spitzenleistung (Available Peak Power, APP). Diese Größe muss bei jedem Aktualisierungszyklus der Regelung (typischerweise unter 4 s) geschätzt und kommuniziert werden. Der Algorithmus zur Schätzung der APP berücksichtigt die Sonneneinstrahlung, die Strom- und Spannungscharakteristik der Photovoltaik-Module, die Modultemperaturen, die Wirkungsgrade der Wechselrichter sowie andere Größen. Die Genauigkeit der APP-Schätzung ist entscheidend für die Regelgenauigkeit der Anlage, insbesondere beim Hochregeln.

Die Ausführung des digitalen Zwillings in der Edge hat auch betriebswirtschaftliche Vorteile.

In die Cloud integrierte maschinelle Lernfunktionen und physikalisch basierte Modelle ermöglichen die Modellierung der APP mithilfe historischer Daten der gesamten Wechselrichterflotte. Von diesen Modellen kann dann ein digitaler Zwilling abgeleitet und auf die ABB-Solarwechselrichter übertragen werden, um bei Bedarf und in Echtzeit Edge-Analysen in Synergie mit der Cloud durchzuführen. Um zu zeigen, wie der digitale Zwilling in der Edge mit gestreamten Wechselrichterdaten zur Schätzung der Wechselrichterleistung in Echtzeit genutzt werden kann, wurde ein Proof-of-Concept-Demonstrator in einer Python-Umgebung realisiert. Das System verwendet Felddaten von einer Solaranlage und ein Edge-Computing-Gerät ähnlich einem Raspberry Pi →2.

— 02 Edge-Computing zur Modellierung und Verfolgung der Performance eines Solarwechselrichters.

— 03 Regelung der Ausgangsleistung eines Wechselrichters im Netzdienstleistungsmodus. Der negative Reservewert bei t = 96 ist ein Artefakt der Datenerfassung.

Das Testobjekt war ein einphasiger 2,5-kW-Wechselrichter auf einem Schulgelände in den USA. Ein Streaming-Programm speist die Datenrahmen in den Estimator und stellt die Ergebnisse auf einem Datenvisualisierer dar.

→3 zeigt ein hypothetisches Beispiel für die Einrichtung des Wechselrichters für Netzdienstleistungen. In diesem Fall wird die Ausgangsleistung ständig auf 10 % unter der APP geregelt, um genügend Reserve zum Hochregeln zu lassen. Als APP wird die erwartete Leistung zu einem beliebigen Zeitpunkt verwendet. Diese Schätzung dient als Sollwert für das nächste Dispatch- oder Regelintervall. Verändert sich die Sonneneinstrahlung, ändert sich auch die APP, um eine angemessene Reserve für die lokale Regelung zu gewährleisten.

Echtzeit-Überwachung der physischen Transformatorsicherheit

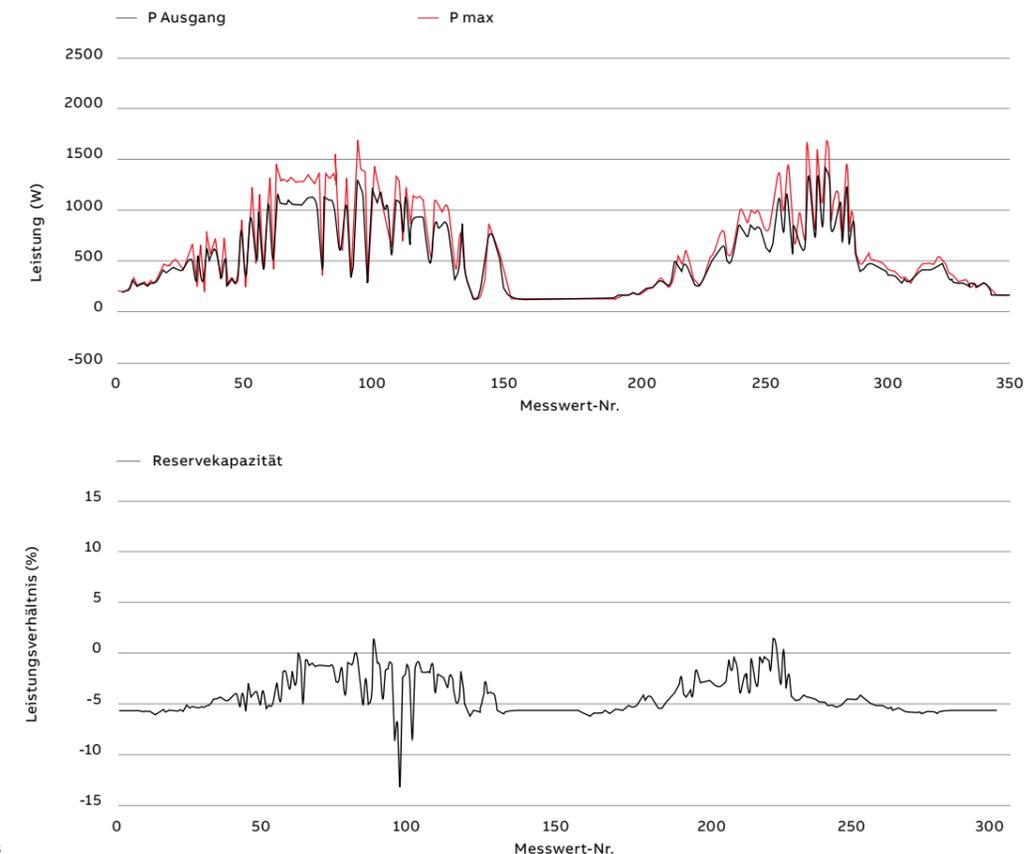
Bei diesem Anwendungsfall wird die physische Sicherheit eines großen Leistungstransformators mithilfe eines digitalen Zwillings in der Cloud modelliert, der in der Edge genutzt wird, um die physische Sicherheit des Transformators in Echtzeit zu überwachen. Durch die Verbesserung der physischen Sicherheit von Schaltanlagen und Transformatoren kann eine kritische Schwachstelle gestärkt werden, die die Netzstabilität

gefährdet. ABB hat einen mehrschichtigen Ansatz zur Resilienz von Transformatoren entwickelt, der eine Erkennung und -beurteilung von Schlageinwirkungen in Echtzeit beinhaltet.

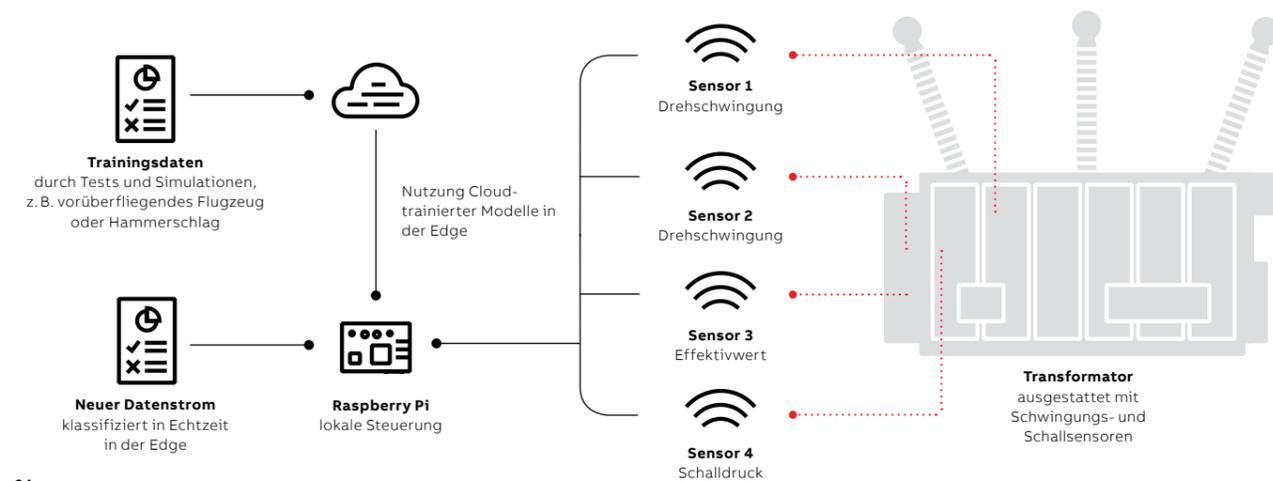
Die bei diesem Experiment gewonnenen Erkenntnisse können dabei helfen, die Performance der Analysen mit den Anforderungen der Anwendung in Einklang zu bringen.

Zunächst werden mithilfe kontrollierter Experimente unter Verwendung von drei Schwingungs- und einem Schallsensor am Transformator maschinelle Lernmodelle entwickelt und in der Cloud trainiert, um eine physische Schlageinwirkung auf einen Transformator als harmlos oder katastrophal zu klassifizieren.

Die trainierten Modelle, die den digitalen Zwilling der physischen Sicherheit des Transformators darstellen, werden am Transformator in der Edge genutzt, um physische Schlageinwirkungen, die von Sensoren registriert werden, in Echtzeit zu melden und entsprechende Reaktionen darauf zu ermöglichen.



03



04

Anders als bei konventionellen Datenanalyseverfahren, bei denen die Daten zuerst gespeichert und später analysiert werden, geht es bei Streaming-Analysen darum, in Bewegung befindliche Datenströme mithilfe von maschinellen Lernverfahren und anderen Datenverarbeitungsmethoden zu analysieren. So ermöglichen Streaming-Analysen eine sofortige Reaktion auf bestimmte Auslöser und eine Verringerung der Datenvolumen.

Ein wichtiger Aspekt bei Streaming-Analysen ist die Geschwindigkeit, mit der ein Edge-Prozessor Streaming-Daten aufnimmt und unter Verwendung eines maschinellen Lernmodells das gewünschte Ergebnis liefert (Klassenlabel oder Regression). Dieses wichtige Leistungsmerkmal wurde hier mithilfe der Sensordaten (52.000 Messwerte pro Sekunde) quantifiziert. Da es schwierig ist, diese Datenrate in eine Cloud-Engine zu streamen, ist dieser Anwendungsfall hervorragend geeignet, um zu verstehen, wie schnell schnell genug ist und wo Engpässe das Echtzeitverhalten beeinträchtigen können →4. Die bei diesem Experiment gewonnenen Erkenntnisse können dabei helfen, die Performance der Analysen mit den Anforderungen der Anwendung in Einklang zu bringen.

Die Modellentwicklung (k-Means-Clustering-Algorithmen und Entscheidungsbaum-Klassifikatoren) erfolgte in einer Python-Umgebung. Implementiert wurde das Modell mithilfe eines Raspberry Pi stellvertretend für einen Einplatinen-Edge-Computer.

Das Ziel bestand darin, das maschinelle Lernmodell auf den eingehenden Datenstrom anzuwenden. Die Ausgabe des Modells war die Klasse der Schlageinwirkung: gutartig (z. B. ein überfliegendes Flugzeug) oder böseartig (z. B. ein Hammerschlag).

Bei den Experimenten zu diesem repräsentativen Anwendungsfall schwankte die Performance merklich zwischen einer virtuellen Linux-Maschine mit acht Kernen (2,1 GHz), die stellvertretend für ein Highend-Gateway eingesetzt wurde, und einem Quad-Core-Raspberry Pi 3 Model B (1,2 GHz). Gleiches galt für den Übergang von einer reinen Datenaufnahme zur Anwendung des Modells auf neue Daten (Scoring). Sehr wahrscheinlich lässt sich die Performance durch Codeoptimierung verbessern, wobei aber die Größenordnung des Unterschieds zwischen Überwachungs- und Scoring-Modus für zeitkritische Anwendungen von entscheidender Bedeutung wäre.

Dies ist ein weiteres Beispiel für die synergetische Nutzung von Edge- und Cloud-Technologien für Analysen und maschinelle Lernverfahren.

Semiautonome Beurteilung des elektrischen Systems einer Anlage

Bei diesem Anwendungsfall wurde die Sicherheit in einer Lebensmittel- und Getränkeanlage mithilfe eines digitalen Zwillings und Bilderkennung in der Cloud modelliert. Mithilfe von Bildern (gefährliche und ungefährliche Szenarien) der Anlage von vergangenen Sicherheitsbeurteilungen wurden DCNNs (Deep Convolutional Neural Networks) in der Cloud trainiert, um elektrische Gefahren automatisch zu erkennen. Diese neuronalen Netzwerke können dann auf Smartphones des Bedienpersonals oder an Videokameras im Produktionsbereich zur Echtzeit-Gefahrenerkennung eingesetzt werden →5.

- 04 Streaming-Analyse von vibroakustischen Sensordaten zur Überwachung der physischen Sicherheit von Transformatoren.
- 05 Deep-Learning-Framework zur Gefahrenerkennung.

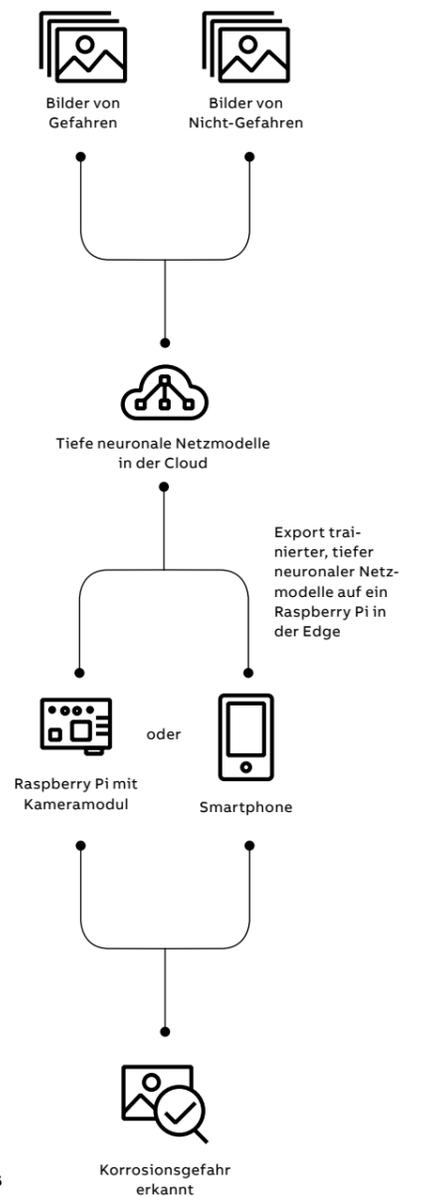
Deep Learning ist das neueste Werkzeug in der Palette der Lernverfahren für künstliche Intelligenz (KI). Nach bahnbrechenden Erfolgen im Training von Algorithmen und im Hinblick auf die Fehlerraten im Jahr 2017 erstmalig in aller Munde, kann Deep Learning auch auf einen digitalen Zwilling in der Edge angewendet werden, um elektrische Gefahren und Gefahren für die Lebensmittelsicherheit zu erkennen.

Während Deep Learning schon länger bekannt ist und für Anwendungen auf Cloud-Ebene wie Bilderkennung, maschinelle Sprachverarbeitung und Spracherkennung vielfach eingesetzt wird, ist die Anwendung in der Edge – insbesondere angesichts der Rechenanforderungen – noch recht neu.

Als Gefahrenkategorie wurde Korrosion gewählt, da diese das Problem Nummer eins in Lebensmittel- und Getränkefabriken darstellt und ABB hierfür über eine angemessene Menge an Trainingsdaten (mit Hunderttausenden von Trainingsvariablen) verfügte. Mithilfe von Google TensorFlow und Keras-Bibliotheken wurden verschiedene Deep-Learning-Netze trainiert. Wie bei Analyseprojekten üblich, spielte die Menge und Qualität der Trainingsdaten eine bedeutende Rolle für die Genauigkeit der Klassifizierungsergebnisse. Eine Genauigkeit von 90 % im besten Fall zeigt, welches Potenzial der Einsatz maschineller Intelligenz bietet. Zum Vergleich: Die menschliche Erkennungsrate für Bilder liegt bei 95 %.

Es ist zu erwarten, dass die Ausführung digitaler Zwillinge in der Edge Vorteile für eine Vielzahl von Anwendungen mit sich bringen wird.

Ein Hardware-Demonstrator wurde auf der Basis eines Einplatinen-Computers für 35 USD (Raspberry Pi Model B) realisiert. Die Deep-Learning-Modelle wurden in einem Grafikprozessor-Cluster entwickelt und auf dem Pi für das Echtzeit-Scoring implementiert. Dabei wurde umfassender Gebrauch von Python-Bibliotheken gemacht. Das Experiment hat gezeigt, dass Deep Learning nicht notwendigerweise ein teures und ausschließlich für das Cloud-Computing geeignetes Verfahren ist. Eine Anwendung in der Edge ist durchaus machbar und kann als Grundlage für viele Anwendungsfälle dienen, in denen Bilddaten und andere hochdimensionale Daten eine Rolle spielen. Das oberste Ziel bestand darin, zu zeigen, dass ein trainiertes Modell auf kostengünstige Weise in der Edge eingesetzt werden kann.



05

Diese Errungenschaft ist ein weiteres Beispiel für die synergetische Nutzung von Edge- und Cloud-Technologien für Analysen und maschinelle Lernverfahren.

Fazit

Obwohl sich dieser Artikel schwerpunktmäßig mit der Ausführung digitaler Zwillinge in der Edge befasst, geht es unterm Strich um die Synergie zwischen Edge und Cloud und nicht um die Konkurrenz zwischen beiden. Mit fortschreitender Entwicklung der Edge-Computing-Technologien ist zu erwarten, dass die Ausführung digitaler Zwillinge in der Edge Vorteile für eine Vielzahl von Anwendungen in Bereichen wie Smart Grids, Smart Cities, Smarte Anlagen, Robotik, IoT und Smart Transportation mit sich bringen wird. •

DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

Besseres thermisches Design durch elektrophysikalische Simulationen

Stromnetzkomponenten sollten nicht nur kompakt und effizient sein, sondern auch extremen thermischen Belastungen standhalten können. Um dies zu erreichen, sind digitale Designmethoden unverzichtbar. Jüngste bahnbrechende Entwicklungen auf dem Gebiet der elektrophysikalischen Simulation machen das Verfahren zu einem wertvollen Werkzeug für Konstrukteure von elektrischen Betriebsmitteln.

—
Jörg Ostrowski
Andreas Blaszczyk
 ABB Corporate Research
 Baden-Dättwil, Schweiz

joerg.ostrowski@ch.abb.com
 andreas.blaszczyk@ch.abb.com

—
Boguslaw Samul
Remigiusz Nowak
 ABB Corporate Research
 Krakau, Polen

boguslaw.samul@pl.abb.com
 remigiusz.nowak@pl.abb.com

—
Michael Gatzsche
 ABB, High Voltage Products
 Zürich, Schweiz

michael.gatzsche@ch.abb.com

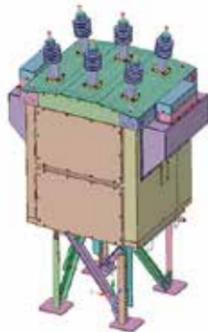
—
Valeri L. Oganezov
 ABB Electrification Products,
 Saint-Laurent,
 Quebec, Kanada

valeri.l.oganezov@ca.abb.com

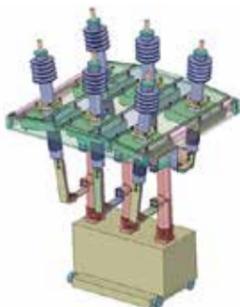
Die Forderung nach einer hohen Kompaktheit und Effizienz sowie die anspruchsvolle und vielfältige Gestalt der heutigen Stromversorgungslandschaft machen die thermische Belastung zu einem kritischen Aspekt bei der Konstruktion moderner Stromnetzkomponenten. Um die thermische Belastung in einer energietechnischen Komponente oder einem energietechnischen System vorherzusagen, scheint es auf den ersten Blick ausreichend, das elektromagnetische Verhalten und die Wärmeübertragungen zu berechnen. Doch für eine erfolgreiche, umfassende Berechnung müssen viele physikalische Effekte berücksichtigt und simuliert werden – eine Aufgabe, die traditionelle heuristische Designansätze überfordert. Daher ist ein digitaler Designansatz erforderlich.

—
 Dank der neuen Tools lässt sich die thermische Belastung in energietechnischen Komponenten mit hoher Präzision und relativ geringem Aufwand vorhersagen.

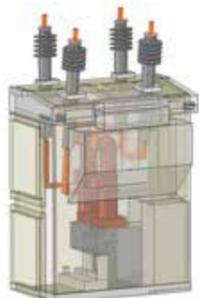
01a



01b



01c



—
 01 Lichtbogenbeständiger MS-Freiluftleistungsschalter.

01a Außenansicht.

01b Innere Komponenten.

01c Vereinfachtes Modell für die thermische Subanalyse.

—
 02 Die Anforderungen an Stromnetzkomponenten wie diesen ABB-Leistungstransformatoren sind enorm. Ein wichtiger Aspekt bei der Konstruktion ist die thermische Belastung, weshalb elektrophysikalische Simulationen ein wertvolles Werkzeug für Konstrukteure von Stromnetzkomponenten darstellen.



02

Neue Werkzeuge für die Simulation und Co-Simulation

Während sich ohmsche Verluste, induktive Verluste und die Wärmeleitung bereits seit einigen Jahren berechnen lassen, können die Verluste an elektrischen Kontakten oder die gemischt konvektiv-turbulent-radiativen Wärmeübertragungsmechanismen an den Oberflächen von Komponenten erst seit Kurzem durch Kopplung von Maxwell- und CFD-Simulationen präzise vorhergesagt werden. Hochentwickelte Mapping-Algorithmen, automatische Gitterverfeinerung und Fehlerkontrolle sind wichtige numerische Begleiter solcher Simulationen. Dank dieser neuen Tools lässt sich die thermische Belastung in energietechnischen Komponenten nun mit hoher Präzision und vergleichsweise geringem Aufwand vorhersagen.

Die Integration großer Teile solcher Simulationen in ein CAD-System, wie es z. B. bei der ABB Simulation Toolbox erreicht wurde, ermöglicht nun die relativ einfache Ausführung komplexer Simulationen. Parametrisierte CAD-integrierte Simulationsmodelle erlauben eine schnelle und genaue Analyse einer Vielzahl möglicher Produktvarianten unter verschiedenen Lasten. ABB gehörte zu den Pionieren dieser CAD-basierten Simulationszwillinge, die beim Engineering in der digitalen Fabrik der Zukunft zum Einsatz kommen werden [1].

Insbesondere entwickelte ABB fortschrittliche, umfassende Methoden für elektrophysikalische Berechnungen, die für die erfolgreiche Konstruktion moderner elektrischer Betriebsmittel von entscheidender Bedeutung sind. Einige dieser Methoden werden bereits von ABB-Produktentwicklern genutzt. Die Wahl der Methode hängt dabei von der Simulationsaufgabe ab. Anhand von drei Beispielen soll im Folgenden die Leistungsfähigkeit und die Flexibilität des Ansatzes veranschaulicht werden.

Gekoppelte Maxwell-CFD-Simulation eines Freiluft-Leistungsschalters

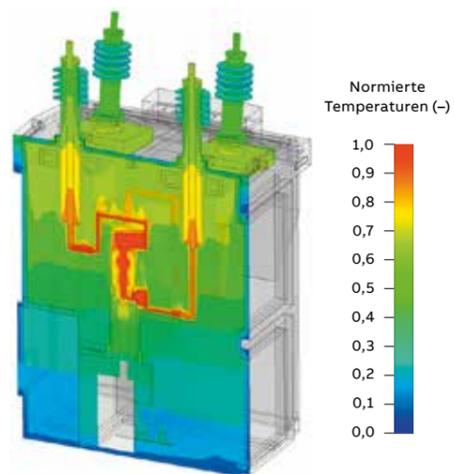
Eine der genauesten und detailliertesten Methoden zur Berechnung elektrophysikalischer Vorgänge basiert auf der bidirektional gekoppelten Maxwell-CFD-Simulation. Dabei werden die elektromagnetischen Leistungsverluste durch einen Finite-Elemente-Löser der Maxwell-Gleichungen und die Wärmeübertragung durch einen CFD-Löser berechnet. Während der Berechnung tauschen die beiden Löser Informationen aus, sodass alle elektrophysikalisch relevanten Effekte berücksichtigt werden können.

Die Verwendung von zwei verschiedenen Gittern für die zwei verschiedenen physikalischen Bereiche ermöglicht eine Auflösung lokaler Phänomene, die sonst nicht möglich wäre. Beispiele für diese Phänomene im Bereich der konvektiven Kühlung sind Skin-Effekte, die die Leistungsverluste nahe an der Oberfläche der Leiter konzentrieren, und dünne turbulente Grenzschichten an der Außenfläche von Festkörpern, die für die Wärmeübertragung an die Umgebung entscheidend sind.

—
 ABB entwickelte Methoden für elektrophysikalische Berechnungen, die für die Konstruktion moderner elektrischer Betriebsmittel von entscheidender Bedeutung sind.

Forscher von ABB haben effektive computergestützte Tools zur Durchführung einer solch hochgradig komplexen Simulation entwickelt. Als Beispiel dient eine dreidimensionale elektrophysikalische Analyse eines lichtbogenbeständigen Mittelspannungs-(MS-)Leistungsschalters für die Freiluftaufstellung →1.

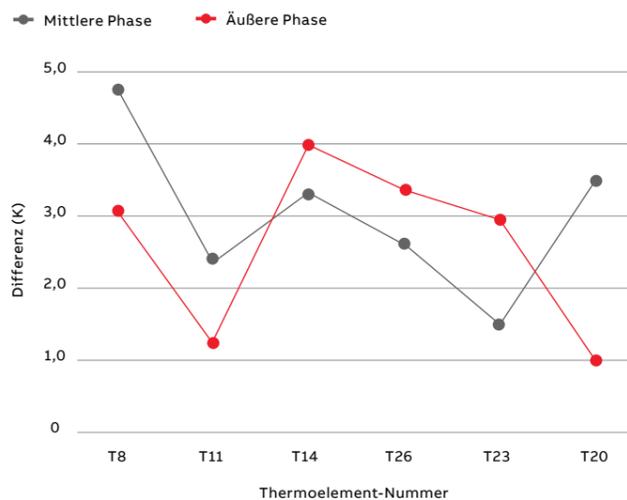
Leistungsschalter gehören zu den wichtigsten Komponenten von MS-Verteilnetzen, da sie ein einwandfreies Schalten unter Last ermöglichen und nachgelagerte Verbraucher und vorgelagerte Netze einschließlich wichtiger Komponenten wie Leistungstransformatoren schützen.



03

Das thermische Verhalten eines Leistungsschalters ist ein entscheidender Faktor für seinen Betrieb. So kann eine Überhitzung im normalen Betrieb die Lebensdauer verkürzen und wichtige Bauteile beschädigen. Ebenso können durch Überlastung verursachte Übertemperaturen die Isolation des Schalters beschädigen und zu einem elektrischen Durchschlag führen.

Eine besondere Herausforderung bestand in der Tatsache, dass eine Zwangskühlung während einer Überlastung des Schalters nicht erlaubt ist, der Schalter aber dennoch zuverlässig zwischen -50 und +40 °C funktionieren muss (der Schalter ist bei extrem niedrigen Temperaturen z. B. für eine Überlast von bis zu 60% ausgelegt). Das thermisch isolierte Gehäuse – ausgelegt gemäß IP43 – verfügt über gut geschützte Lüftungsgitter, die die Luftzirkulation begrenzen und somit die Wirksamkeit der konvektiven Kühlung reduzieren. Dieser Aspekt verkompliziert den Konstruktionsprozess und kann zu mehrfachen Designiterationen und wiederholten Prüfungen führen.



04

Der Simulationsvorgang beinhaltet alle physikalischen Effekte, die während der genormten Wärmeprüfung auftreten.

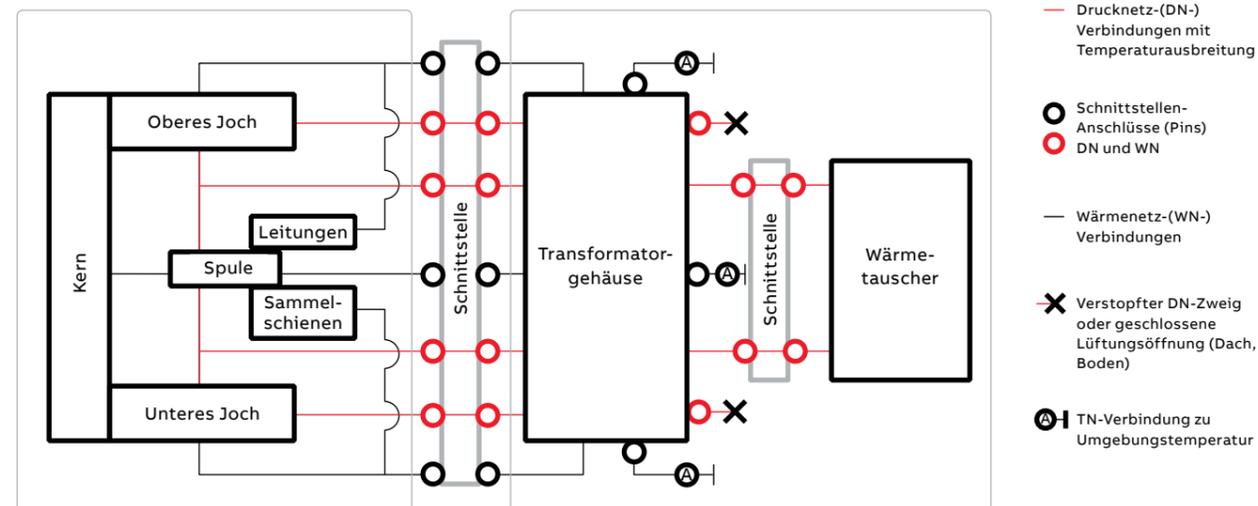
Bei Geräten wie Leistungsschaltern wird das thermische Verhalten durch Erwärmungsprüfungen verifiziert, für die kontrollierte Umgebungsbedingungen, ein physisches Modell des Geräts, eine geeignete Stromversorgung und eine Prüfinfrastruktur (Thermoelemente usw.) erforderlich sind. Bei einer Prüfung kann es dann viele Stunden dauern, bis ein stabiler Zustand erreicht ist. Ein solches Prüfverfahren bleibt für die abschließende Typprüfung eines Geräts zwar unentbehrlich, doch wenn es darum geht, frühe Designvarianten zu testen, von denen einige sowieso verworfen werden, ist es sehr kostspielig.

Computergestützte virtuelle Erwärmungsprüfungen hingegen ermöglichen eine sehr schnelle und kostengünstige Validierung verschiedener Schalterdesigns bei einer Vielzahl von Lasten und Umgebungsbedingungen. Das Simulationsmodell des in →1 dargestellten MS-Leistungsschalters beinhaltet elektromagnetische und thermische (CFD-)Submodelle, die Daten miteinander austauschen. Im elektromagnetischen Modell werden wegen der asymmetrischen Stromlasten und Proximity-Effekte Strompfade aller drei Phasen berücksichtigt, auch wenn das Gerät von der Geometrie her symmetrisch ist. Dank der planaren geometrischen Symmetrie brauchte die Wärmeflussimulation nur für eine Hälfte des Geräts durchgeführt zu werden.

Der komplette Simulationsvorgang beinhaltet alle physikalischen Effekte, die während der genormten Wärmeprüfung auftreten. Was elektrische Verluste, Skin- und Proximity-Effekte angeht, so wurden der Einfluss der Temperatur auf den Materialwiderstand sowie spezifische elektrische Kontaktwiderstände berücksichtigt. Bei den thermischen Berechnungen wurden Turbulenzeffekte in auftriebsgetriebenen Strömungen zusammen mit der Wärmestrahlung berücksichtigt. Andere Einzelheiten wie der Einfluss von Lüftungsgittern auf den Luftaustausch zwischen dem Schalterinneren und der Umgebung wurden ebenfalls berücksichtigt.

Die gekoppelte Simulation ist ein iterativer Prozess, bei dem Daten zwischen den beiden Lösern ausgetauscht wurden, bis eine stabile Temperatur ($\pm 5\%$) erreicht war. Insgesamt waren dazu vier Iterationen erforderlich. Mit einer maximalen Abweichung von 5 K stimmten die Simulationsergebnisse nahezu perfekt mit den Ergebnissen

Aktive Teile: zusammengesetzt „on the fly“ in einem Transformator-Designtool
Kühlsystem: parametrisierte Komponenten, fertig zum Einsatz in einem Transformator-Designtool



05

03 Endgültige Temperaturverteilung in einem MS-Freiluftleistungsschalter.

04 Vergleich der Simulationengenauigkeit mit physischen Messungen.

05 Modulares Netzkonzept, das die aktiven Teile mit den Komponenten des Kühlsystems verbindet.

06 Geschwindigkeitsplot mit den größten Luftströmen (weiße Pfeile) in einem Trockentransformatorgehäuse. Die zweidimensionale axialsymmetrische CFD-Simulation wurde mit einem inneren Lüfter und Lüftungsgittern in den Wänden und dem Dach durchgeführt.

realer Erwärmungsprüfungen überein →3–4. Dieses Beispiel zeigt, wie durch Simulation zuverlässige Ergebnisse erzielt und die Anzahl von Wiederholungen bei realen Tests reduziert werden kann.

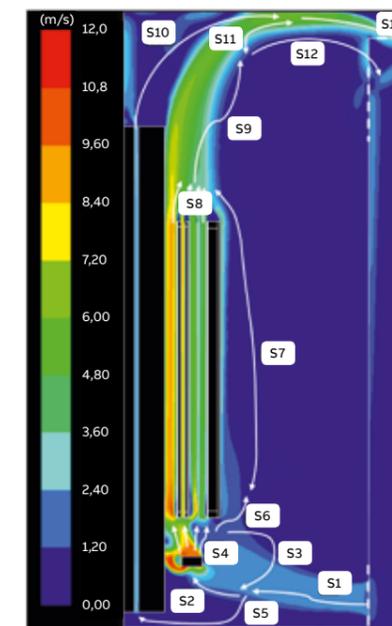
Netzmodell eines Trockentransformators

Die Verwendung der rechenintensiven gekoppelten Maxwell-CFD-Simulation ist nicht immer möglich. Dies gilt besonders für große, komplexe Geräte oder die automatisierte Designoptimierung. In solchen Fällen werden vereinfachte analytische Beschreibungen verwendet. Dies können z. B. thermische Äquivalente zu elektrischen Stromkreisen, die sogenannten Wärmenetze, sein. Solche Netze sind zwar nicht notwendigerweise präzise, aber vom Rechenaufwand her wesentlich effizienter.

Traditionell wird die Wärmenetzmethode verwendet, um den Temperaturanstieg von Transformatorspulen zu beurteilen [1] →1. Kürzlich haben die Entwickler des ABB-Designtools für Transformatoren das Netzmodell erweitert und Berechnungen des gesamten Kühlsystems ermöglicht [3] →5. Die wärmeerzeugenden aktiven Teile sind über eine vordefinierte Schnittstelle mit dem Kühlsystem verbunden, die die Übertragung von Fluid und Wärme zwischen Komponenten erlaubt. Das Kühlsystem umfasst ein Gehäuse sowie einen externen Wärmetauscher mit einer weiteren

Schnittstelle dazwischen. Die Schnittstellen bieten die Möglichkeit, die implementierten Netzkomponenten miteinander zu kombinieren und eine beliebige Konfiguration nach den Vorgaben des Konstrukteurs festzulegen. Ein Stand-alone-Betrieb des Transformators (ohne Gehäuse) und eine offene Belüftung (als Ersatz für den Wärmetauscher) stehen als Optionen zur Verfügung.

Als Beispiel für die Implementierung einer Komponente ist in →7 ein Drucknetzmodell des Gehäuses eines Trockentransformators dargestellt. Die Netztopologie wurde auf der Grundlage der Luftströme erstellt, die in einer CFD-Berechnung



06

Die Simulationsergebnisse stimmten nahezu perfekt mit den Ergebnissen realer Erwärmungsprüfungen überein.

identifiziert wurden →6. Das CFD-Ergebnis wurde zur Validierung der Genauigkeit des Netzmodells innerhalb des erforderlichen Parameterbereichs verwendet. Typische Parameter sind: die Abmessungen des Gehäuses, Daten der internen Lüfter und der Strömungswiderstand der Lüftungsgitter. Das Netzmodell ist in der Lage, die Kreisläufe im Gehäuse abzubilden. Mit dem vollständigen Modell lässt sich die Erwärmung der Spulen unter Berücksichtigung sämtlicher Details von Wicklung, Kern und Kühlsystem innerhalb von Sekunden berechnen. Dies hilft Konstrukteuren dabei, die erforderlichen Temperaturgrenzen einzuhalten und die Materialkosten zu minimieren.

Simulation der Kurzzeitstromprüfung eines Erdungsschalters

Bei obligatorischen Kurzzeitstromprüfungen wird ein hoher Strom von kurzer Dauer (einige Sekunden) durch ein Gerät geschickt, um einen Kurzschluss zu imitieren und somit die Festigkeit des Geräts zu prüfen. Da solche Prüfungen aufwändig und teuer sind, stellen Simulationen, mit denen sich die

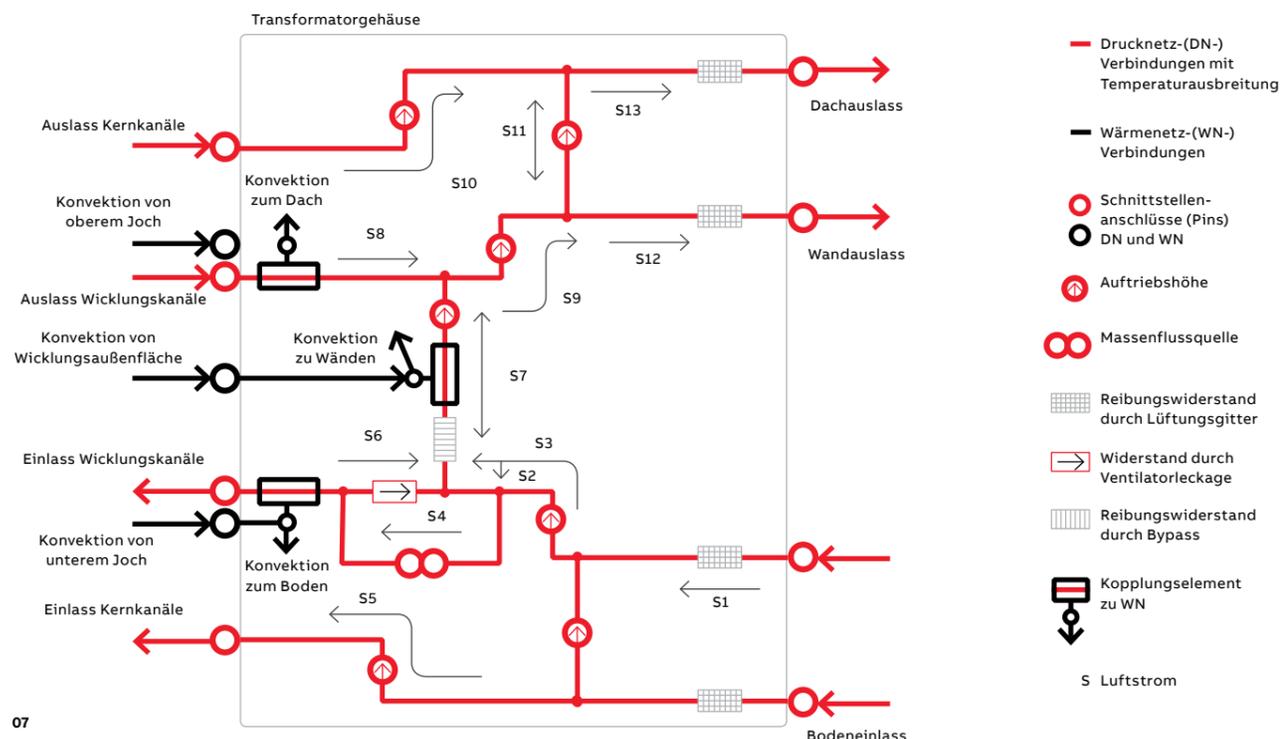
Mit dem vollständigen Modell lässt sich die Erwärmung der Spulen innerhalb von Sekunden berechnen.

Erwärmung im Gerät zuverlässig vorhersagen lässt, eine willkommene Alternative dar.

Eine gekoppelte Maxwell-CFD-Simulation wäre hier übertrieben, da der Wärmefluss vom Gerät in die Umgebung gering ist. Tatsächlich kann der gesamte CFD-Teil als einfache transiente Wärmeleitung in den massiven Teilen des Geräts dargestellt werden. Wesentlich wichtiger für Kurzzeitstromprüfungen ist die elektromagnetische Modellierung. Die wichtigsten Effekte, die hier berücksichtigt werden müssen, sind:

- ohmsche Verluste im Volumen des Geräts,
- Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstands,
- ohmsche Verluste aufgrund elektrischer Kontaktwiderstände an Leitergrenzflächen.

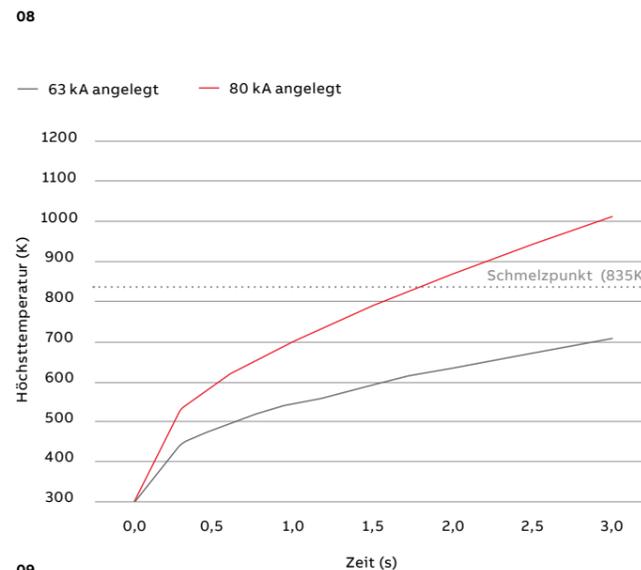
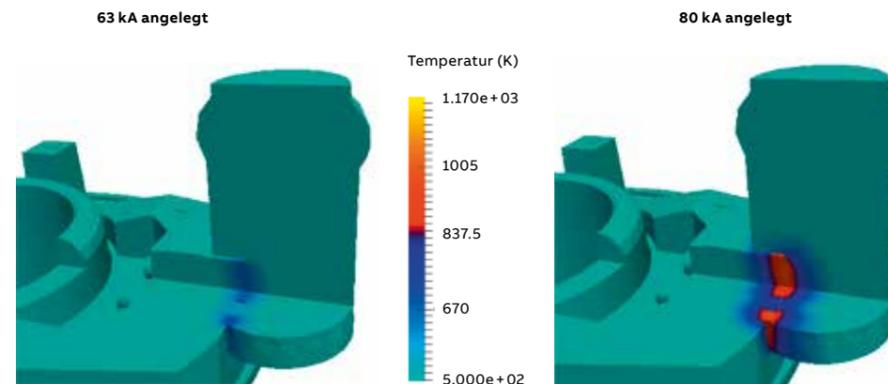
Letzterer Effekt ist der komplizierteste und kann nicht vernachlässigt werden, da diese Verluste bis zu 50 % der Gesamtverluste ausmachen können. Hinzu kommt, dass die Verluste in Schaltern lokal auftreten und nicht über das gesamte Volumen verteilt sind (wie es bei ohmschen Verlusten innerhalb des Materials der Fall ist). Folglich liegen die heißesten und anfälligsten Bereiche in der Nähe der elektrischen Kontakte. Die Modellierung von elektrischen Kontaktwiderständen ist ein multiphysikalisches Thema, das weltweit intensiv untersucht wird.



07 Drucknetz mit Luftströmungszweigen (schwarze Pfeile) gemäß den CFD-Ergebnissen aus →6. Die Temperaturentwicklung sowie das Wärmenetz sind nicht dargestellt (nur die DN/WN-Kopplung).

08 Schnitt durch den heißesten Teil nach 3 s. Alles in Grün oder Blau liegt unter dem Schmelzpunkt (835 K, schwarz). Alles in Rot oder Gelb liegt darüber.

09 Festgestellte Höchsttemperatur während der beiden simulierten Kurzzeitstromprüfungen. Bei einem Prüfstrom von 63 kA wird der Schmelzpunkt (835 K) nicht überschritten. Bei 80 kA wird er nach 1,8 s überschritten.



09

Literaturhinweise

[1] A. Blaszczyk et al.: „Simulation Toolbox – Dielektrisches und thermisches Design von energietechnischen Komponenten“. ABB Review 3/2013, S. 16–21.

[2] R. Nowak et al.: „A 3D electro-thermal simulation of the outdoor medium voltage circuit breaker“. IEEE Transactions on Power Delivery (in Überprüfung).

[3] A. Cremasco et al.: „Network modelling on dry-type transformer cooling systems“. COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 37, Issue 3, 2018.

[4] J. Ostrowski et al.: „Simulation of short time current tests of industrial devices“. Angenommen für SCEE 2018, Springer Series „Mathematics in Industry“.

Bei der Simulation des Erdungsschalters einer gasisolierten Schaltanlage (GIS) wurde von einem konstanten, d. h. temperaturunabhängigen, Kontaktwiderstand ausgegangen [4]. Dies ist die einfachste Darstellung eines Kontakts, bei dem der zunehmende spezifische elektrische (Material-)Widerstand bei Erwärmung durch eine Abnahme des Kontaktwiderstands aufgrund einer Vergrößerung der Kontaktfläche durch Materialerweichung ausgeglichen wird.

Zwei Kurzzeitstromprüfungen, bei denen der Erdungsschalter für 3 s mit Effektivströmen von 63 kA bzw. 80 kA beaufschlagt wird, wurden simuliert und im Labor durchgeführt →8–9.

Der reale Prototyp bestand die Prüfung mit 63 kA, fiel aber bei der Prüfung mit 80 kA nach etwa 2 s aus, was die Simulationsergebnisse recht genau widerspiegelt. Infolgedessen wurde ein neues Design für 80 kA entwickelt.

Modellierung der Zukunft

Elektrothermische Simulationen verbessern sich immer weiter und Co-Simulationen werden immer

Der Prototyp bestand die Prüfung mit 63 kA, fiel aber bei 80 kA nach etwa 2 s aus, was die Simulationsergebnisse recht genau widerspiegelt.

einfacher und leistungsfähiger. Damit werden bessere Modellaufösungen möglich, und Modelle werden die Erfahrungen mit realen Geräten noch genauer abbilden. Aufgrund von Trends wie Digitalisierung, dezentrale Stromerzeugung und überregionale Energieübertragung und bedingt durch die Auswirkungen stark fluktuierender erneuerbarer Energien erfahren elektrische Betriebsmittel zurzeit einen erheblichen Wandel, sodass die leistungsstarken, ausgeklügelten Simulations- und Co-Simulationstools, die sich zurzeit in der Entwicklung befinden, eine gute Verwendung finden werden. •

DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

Digitaler HVDC-Light®-Zwilling erleichtert das EMV-Design

Die validierten Simulationsmodelle von ABB bilden ganze HVDC-Light®-Stationen einschließlich der dazugehörigen Verdrahtung präzise ab. So können während der Konstruktions-, Inbetriebnahme- und Betriebsphasen zuverlässige EMV-Untersuchungen durchgeführt werden – was die Verfügbarkeit erhöht und die Kosten senkt.

Didier Cottet
Bernhard Wunsch
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Schweiz

didier.cottet@ch.abb.com
bernhard.wunsch@ch.abb.com

Göran Eriksson
ABB Corporate Research
Västerås, Schweden

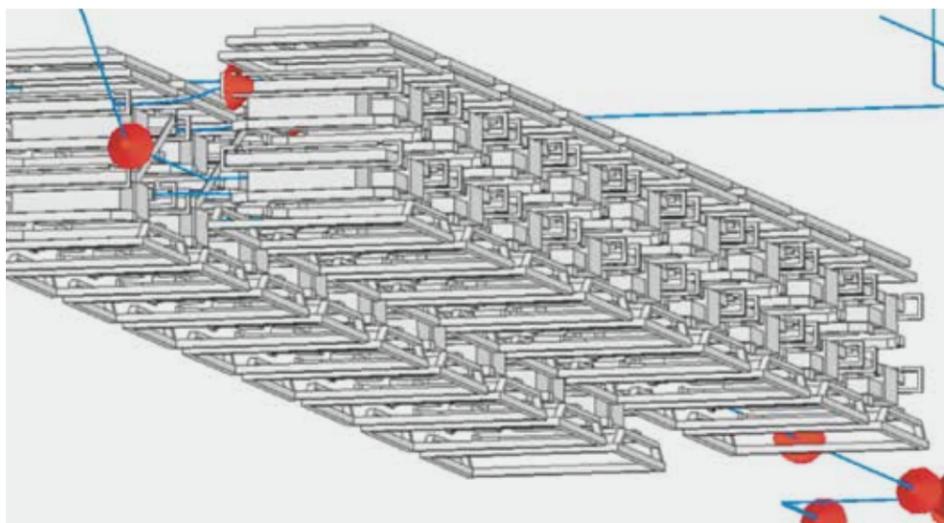
goran.z.eriksson@se.abb.com

Wojciech Piasecki
ABB Corporate Research
Krakau, Polen

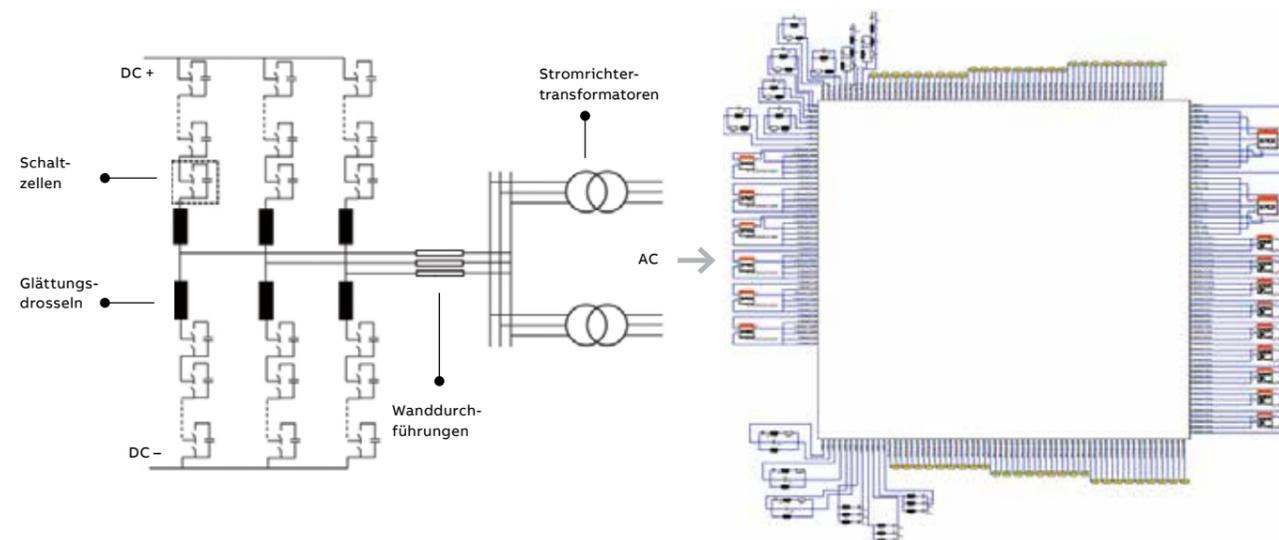
wojciech.piasecki@pl.abb.com

Gustaf Sandberg
Jenny Skansens
ABB Grid Systems, HVDC
Ludvika, Schweden

gustaf.sandberg@se.abb.com
jenny.skansens@se.abb.com



01



02

01 HVDC-Light-Ventilhalle und ihr digitaler 3D-Zwilling in CST.

02 HVDC-Light-Umrichtertopologie und der entsprechende Stromkreis des digitalen Zwillings in CST.

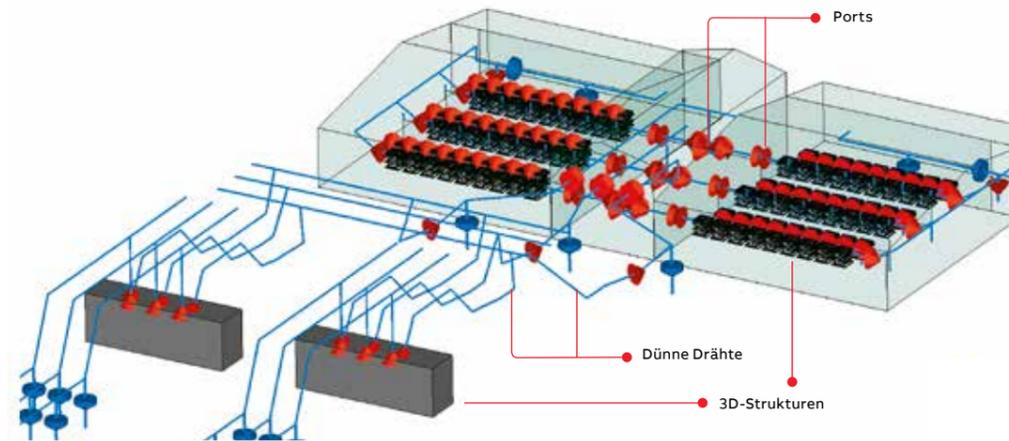
Bei neuen Produkten wird die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bestimmt, um sicherzustellen, dass Komponenten wie empfindliche Elektronik wie vorgesehen in der betreffenden elektromagnetischen Umgebung funktionieren. Gleichzeitig sollten stromführende Geräte keine unzulässigen Mengen an elektromagnetischer Energie abgeben oder andere Komponenten bzw. elektronische Geräte innerhalb einer bestimmten Entfernung stören. Typischerweise wird die elektromagnetische Strahlung an Prototypen in

ABB nutzt Fortschritte auf dem Gebiet der numerischen Methodik zur frühestmöglichen Überprüfung des EMV-Designs bei der Entwicklung von HVDC-Light-Stationen.

speziellen reflexionsfreien Räumen oder Hallräumen gemessen. Heutzutage gibt es große EMV-Prüfeinrichtungen, in denen ganze Flugzeuge Platz finden, doch für HVDC-Light-Stationen oder Mittel- und Hochspannungsanlagen gibt es solche Möglichkeiten nicht. Stattdessen werden aufwändige und kostspielige EMV-Messungen nach der Inbetriebnahme vor Ort durchgeführt. Dies schränkt die Möglichkeiten zur Implementierung konstruktiver Änderungen drastisch ein, wenn bei der Erfüllung der EMV-Anforderungen auftreten. Hinzu kommt, dass vor Ort häufig andere elektromagnetische Störquellen vorhanden sind, die zu stark verzerrten, unzuverlässigen Ergebnissen führen.

ABB, seit über 60 Jahren Pionier der klassischen Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnik (HVDC Classic®), brachte 1997 die selbstgeführte HVDC-Light-Technologie auf den Markt. Zurzeit spielt HVDC Light eine wichtige Rolle im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien, wo sie Übertragungskapazitäten von bis zu 3.000 MW ermöglicht. Als zukunftsorientiertes Unternehmen nutzt ABB Fortschritte auf dem Gebiet der numerischen Methodik zur frühestmöglichen Überprüfung des EMV-Designs bei der Entwicklung von HVDC-Light-Umrichterstationen. Die intelligenten Simulationsmodelle – oder digitalen Zwillinge – von ABB bilden die gesamten Umrichterstationen einschließlich der Ventile, Ventilhalle, Glättungsdrosseln, Wanddurchführungen, Stromrichtertransformatoren, Hochfrequenz-(HF-)Filter und der kompletten Verdrahtung in den Gleich-(DC-) und Wechselstrom-(AC-)Schaltfeldern ab. Digitale elektromagnetische Zwillinge ermöglichen die zuverlässige Durchführung einer Vielzahl von EMV-bezogenen Untersuchungen während der Konstruktions-, Inbetriebnahme- und Betriebsphasen:

- Auswirkung des Schaltens von Halbleitern auf die HF-Störcharakteristik,
- Regelungsalgorithmen und Systemdimensionierung (d. h. Zellenspannung und Bemessungsströme),
- Optimierung und Positionierung von HF-Filtern,
- Designvarianten für Komponenten, Platzierung von Komponenten, Anordnung von Sammelschienen und Kabeln,
- Abschirmwirkung der Gebäudekonstruktion.



03

Stationsmodell – der digitale Zwilling

Im Jahr 2014 startete ABB ein Projekt zur Modellierung einer HVDC-Light-Umrichterstation mithilfe von CST Microwave Studio® (MWS), einer kommerziellen Software für elektromagnetische Full-Wave-Simulationen. CST MWS ermöglicht die dreidimensionale Modellierung von Systemen, Teilsystemen und Komponenten einschließlich Gebäuden und HS-Sammelschienen →1, was besonders für die schnelle und präzise Analyse von Hochfrequenzkomponenten nützlich ist. Stationskomponenten wie Messwandler, Schalter- und Stromrichterfunktionalitäten, Umrichterlogik und Schalter werden in einer speziellen Darstellung mit dem 3D-Modell verbunden, die eine schnelle und genaue Visualisierung der komplexen Modelle ermöglicht →2.

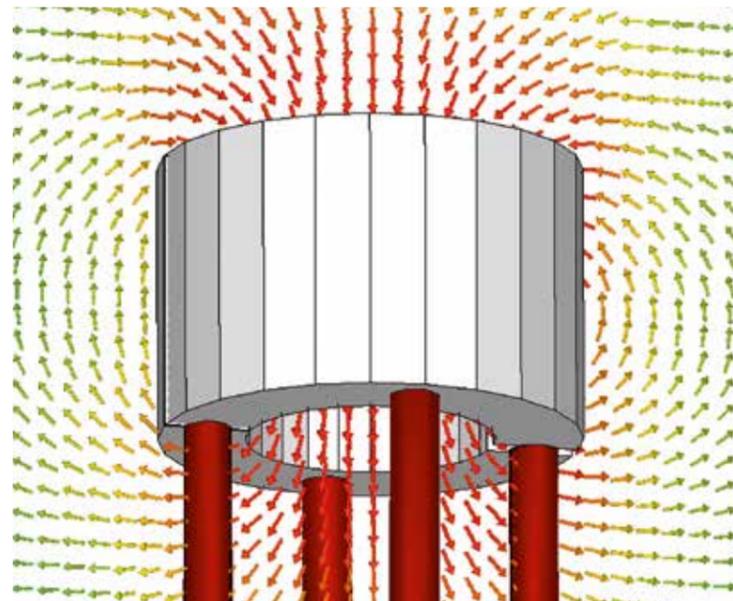
Modellierungsmethodik

Die CST-Simulationsumgebung, die in einen eigenen systematischen Workflow eingebettet ist, besteht aus Prozeduren und Werkzeugen zur Erstellung von Komponentenmodellen für die Vorverarbeitung und die Analyse der Simulationsergebnisse im Rahmen der Nachverarbeitung. Alle Modelle und Teilmodelle können in einer frühen Konstruktionsphase und typischerweise deutlich bevor die physischen Komponenten tatsächlich zur Verfügung stehen erstellt werden – ein entscheidender Vorteil.

Im Jahr 2014 startete ABB ein Projekt zur Modellierung einer HVDC-Light-Station mithilfe von CST Microwave Studio®.



04a



04b



05a



05b



05c

03 3D-Modell einer vollständigen HVDC-Light-Station in CST.

04 Darstellung der hochfrequenten Impedanzen einer Luftdrossel.

04a Reale Luftdrossel.

04b Das simulierte magnetische Feld einer ähnlichen Drossel.

05 Das ABB-Modell wurde durch Hochfrequenzmessungen an Anlagen und Komponenten validiert.

05a Validierung eines HGÜ-Transformators.

05b Nahfeldmessung der EM-Strahlung in einem AC-Schaltfeld.

05c EM-Fernfeldmessung in 200 m Entfernung zur Umrichterstation.

Das Systemmodell der gesamten Station →3 wird an den verschiedenen physischen Stellen angeregt, an denen die tatsächliche HF-Störung erzeugt wird. Eine injizierte Spannungsimpulsfunktion sorgt für die Ausbreitung von HF-Strömen innerhalb der Station. Die resultierende Impulsantwort dieser Zeitbereichssimulation kann in den Frequenzbereich übertragen werden, sodass man ein Breitband-Spektrum der Systemantwort erhält, das für verschiedene Beobachtungspunkte – z. B. H-Feld-Sonden und Stromsonden – ermittelt werden kann. Anschließend können die Impulsantworten mit den tatsächlichen Schaltwellenformen der Umrichter gefaltet und mit dem Modell eines elektromagnetischen Störfelds/-detektors verarbeitet werden. Die Ergebnisse sind direkt vergleichbar mit Werten, die durch Messung der elektromagnetischen Strahlung an einem realen Umrichterstandort ermittelt wurden.

Die Simulationsergebnisse wurden durch umfangreiche Hochfrequenzmessungen auf Komponenten- und Systemebene validiert.

ABB nutzt einen Matrix-Solver für Übertragungsleitungen mit besonderen Funktionen, die für diese Art von Simulation besonders geeignet sind. Die 3D-Modelle unterstützen eine Kombination aus 3D-Strukturen und sogenannten dünnen Drähten (Thin Wires), deren Querschnitte erheblich kleiner

sind als die für gewöhnlich verwendete Gitterelementgröße →3. Darüber hinaus können Komponentenrandbereiche für Öffnungen, Schlitze usw. definiert werden, um eine effektive Simulation der Abschirmeigenschaften von Gehäusen und Wänden, wie sie in Ventilhallen typischerweise installiert werden, zu ermöglichen. Ferner können vereinfachte Stromkreise auf der Basis konzentrierter Elemente (Lumped Circuits) zum 3D-Modell hinzugefügt werden, wo sonst komplexere Stromkreis-Submodelle von Komponenten über benutzerdefinierte Ports angebunden werden können. Hier können Lumped-Circuit-Elemente und komplexe Netzlisten (Netlists) angebunden werden. Durch die Kombination verschiedener Darstellungstypen bestimmter Systemelemente wird die Komplexität reduziert und die Zeiteffizienz der Simulationen erhöht.

Um als leistungsstarkes Tool zu fungieren, müssen Simulationen die hochfrequenten Impedanzen der Komponenten in den AC- und DC-Schaltfeldern der Stationen wie Glättungsdrosseln →4, Stromrichtertransformatoren, Wanddurchführungen und Messwandler präzise abbilden. Detaillierte Informationen über System- und Komponentenmodellierung rechtfertigen deren Verwendung für die Modellierung von Umrichterstationen [1,2].

Validierung

Eine intelligente Modellierung erfordert physische Messungen. ABB hat umfangreiche Hochfrequenzmessungen auf Komponenten- und Systemebene durchgeführt, um die Simulationsergebnisse zu validieren und somit die Eignung des Zwillings zu bestätigen →5. Die gemessene und die simulierte

HF-Störung im Nahfeld (innerhalb des AC-Schaltfelds in der Nähe des HGÜ-Umrichters) →5b und im Fernfeld (in 200 m Entfernung vom AC-Schaltfeld) →5c stimmen im Hinblick auf die Vorhersagbarkeit kritischer Spitzen hervorragend überein →6.

Vorteile beim Design

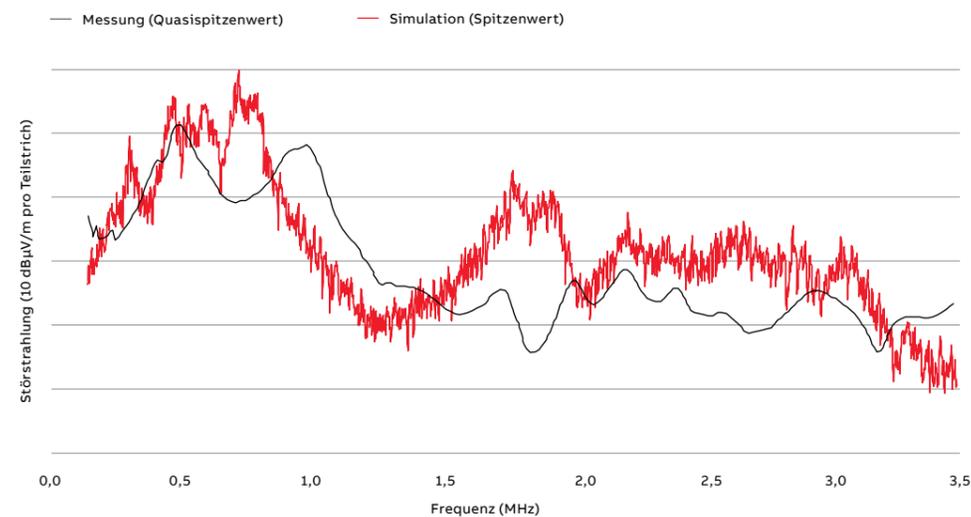
EMV-gerechtes Design und Verhalten wird durch viele Parameter auf Systemebene bestimmt. ABB erfüllt nicht nur sämtliche Anforderungen hinsichtlich EMV, sondern verbessert die elektromagnetische Verträglichkeit. Ein Simulationsmodell bietet Energieversorgungsunternehmen die Möglichkeit, wichtige EMV-Designentscheidungen zu einem frühen Zeitpunkt zu treffen, was die Kosten senkt und Ausfallzeiten reduziert. Dem gegenüber steht die äußerst problematische Aufgabe, Änderungen umzusetzen, nachdem entsprechende Messungen vor Ort durchgeführt wurden. Solche Änderungen – sofern sie überhaupt möglich sind – sind mit hohen

Kosten verbunden und erfordern die Stilllegung des Betriebs während der notwendigen Umbauten.

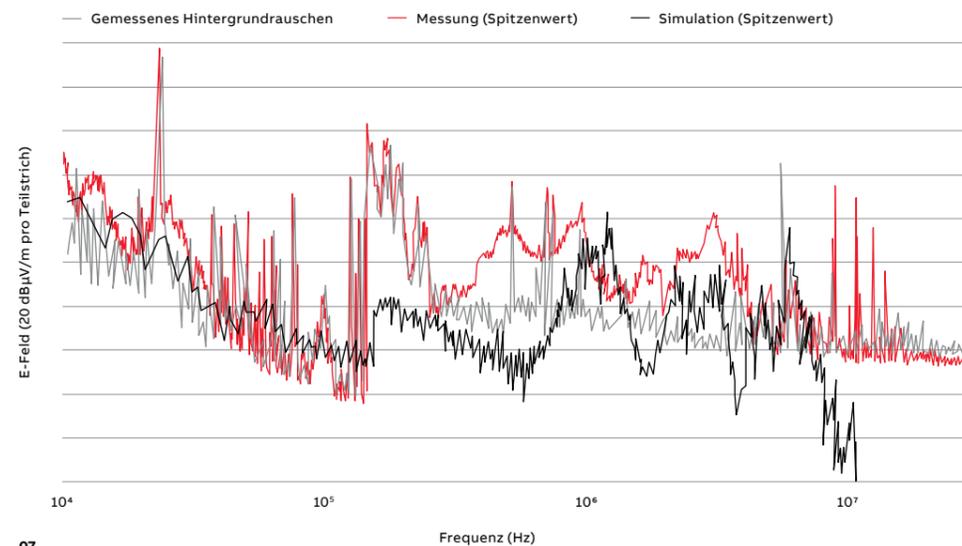
Weitere Anwendungen

Da das EMV-Design auch Aspekte wie Filter, Abschirm- und Schaltverhalten, Stationslayout, Erdungssystem usw. umfasst, nutzt ABB EMV-Simulationsmodelle, um die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit dieser Produkte zu verbessern →7.

Modelle, die ihrem physischen Produkt- oder Anlagenzwilling sehr nahe kommen, erleichtern schnelle Entscheidungen und stellen somit einen Mehrwert dar.



06



07

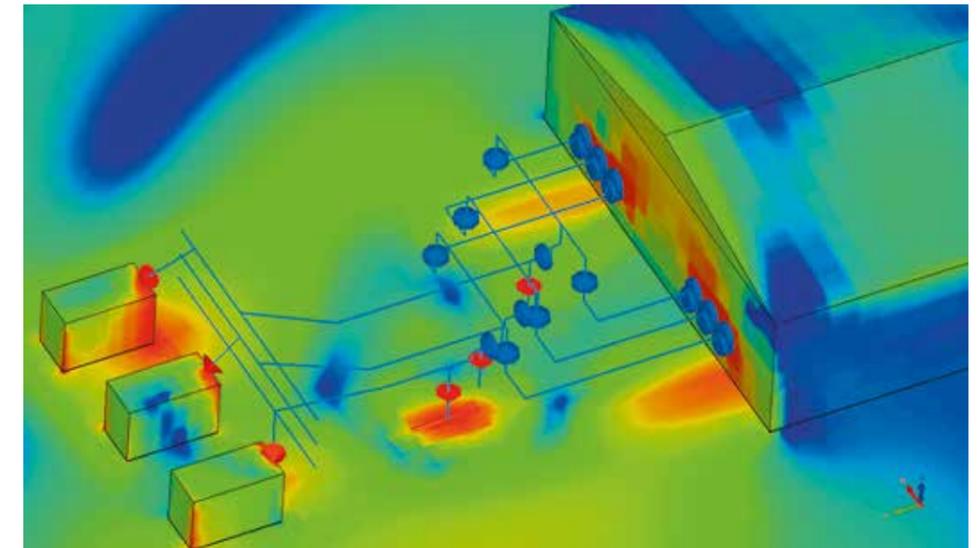
— 06 Vergleich zwischen Nahfeldmessung und Simulation.

— 07 Vergleich von Fernfeldmessungen und Simulationen unter Berücksichtigung des Hintergrundrauschens.

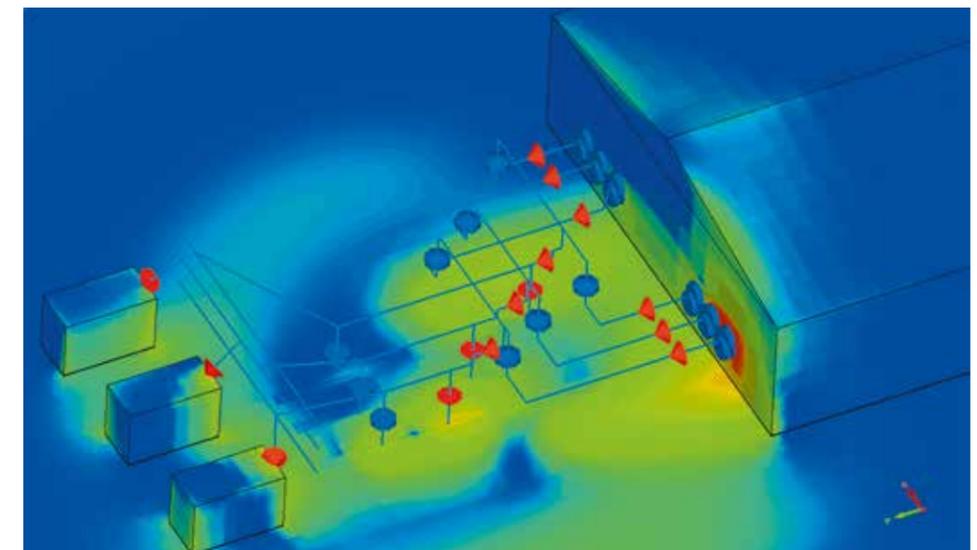
— 08 Prüfung der Magnetfeldverteilungen in einer HGÜ-Umrichterstation.

08a Magnetfeldverteilungen vor Optimierung des HF-Filterkonzepts.

08b Magnetfeldverteilungen nach Optimierung des HF-Filterkonzepts.



08a



08b

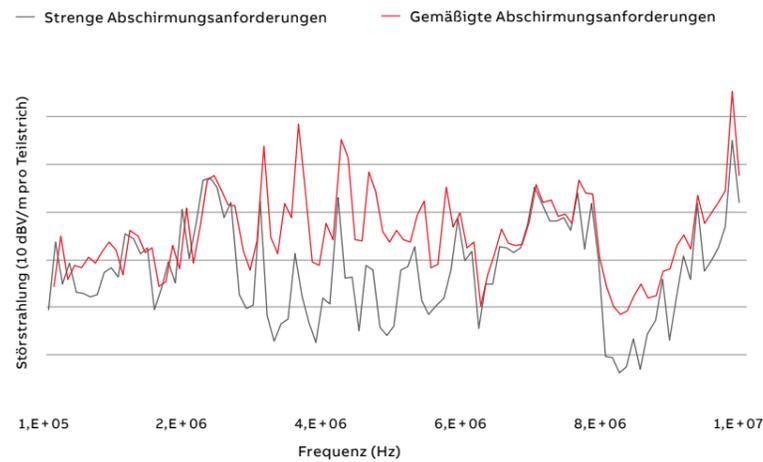
EMV-Filterkonzept

Der Erfolg eines Produkts hängt häufig davon ab, wie schnell das Produkt auf den Markt kommt. EMV-Filter spielen hierbei eine entscheidende Rolle, denn ein bestmögliches Filterkonzept kann Zeit bei der Zertifizierung sparen und die Produktionskosten senken. ABB hat die Optimierung des Filterkonzepts hinsichtlich der Ausstattung und Platzierung von Filtern in einer HGÜ-Umrichterstation untersucht. Dazu wurde eine Filterlösung ohne die Hilfe von 3D-Simulationen entwickelt und das simulierte Magnetfeld bei 5 MHz →8a mit einem Filterkonzept verglichen, das mithilfe eines 3D-Modells erstellt wurde. Die mithilfe des 3D-Modells optimierte Filterlösung wies eine erheblich reduzierte Feldamplitude auf →8b. Ähnliche Reduktionen wurden über den gesamten untersuchten Frequenzbereich festgestellt. In einem Fall konnte mithilfe des 3D-Simulationsmodells nicht nur eine erhebliche Verbesserung der

Ein optimales Filterkonzept kann Zeit bei der Zertifizierung sparen und die Produktionskosten senken.

Leistungsfähigkeit, sondern auch eine Reduzierung der Kosten erzielt werden. Vor allem aber ermöglicht der Detaillierungsgrad der 3D-Simulation die Erkennung möglicher zukünftiger EMV-Probleme – eine Vorhersagbarkeit der Leistungsfähigkeit ist also möglich.

Im schnelllebigen Umfeld von Angeboten und Projekten müssen Entscheidungen für neue Lösungen häufig sehr kurzfristig getroffen werden. Modelle, die ihrem physischen Produkt- oder Anlagenzwilling sehr nahe kommen, erleichtern



09

schnelle Entscheidungen und stellen somit einen Mehrwert für ein Unternehmen dar.

Viel Wert ist auch die korrekte, effiziente und frühzeitige Konstruktion und Aufstellung von Gebäuden. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Abschirmung. Gebäude verhindern, dass elektromagnetische Strahlung, die von den Stromrichterventilen ausgeht, direkt nach außen gelangt. Bei einem HGÜ-Umrichtergebäude sind Durchführungen, Türen, Lüftungen usw. einerseits für die Funktion des Umrichters erforderlich, andererseits reduzieren sie die Abschirmwirkung des Gebäudes, da sie Öffnungen im EMV-Schirm bzw. faradayschen Käfig darstellen. Metallische Wandverkleidungen, z. B. überlappende Sandwichplatten mit ästhetischer, praktischer Oberflächenbehandlung, sind normalerweise nicht elektrisch verbunden. Ein scheinbar kleines Fenster kann die Abschirmwirkung eines ansonsten perfekt konstruierten Gebäudes um ein Vielfaches mindern. Zurzeit bieten 3D-Simulationsmodelle die beste Möglichkeit zur frühzeitigen Optimierung der Abschirmungsanforderungen und Ableitung praktischer Details, um die Gefahr von kostspieligen und zeitaufwändigen nachträglichen Änderungen vor Ort zu reduzieren. Die Abschirmungsanforderungen können zudem einen erheblichen Einfluss auf die Störstrahlung haben →9.

Dementsprechend hat ABB zwei Simulationsmodelle zur Abschirmung der Ventilhalle berechnet: eines mit strengen Anforderungen und eines mit

gemäßigten Anforderungen →9. Der Abstand zwischen den Schrauben stellt die elektrische Verbindung zwischen den Wandplatten dar →10. Bei strengen Abschirmungsanforderungen ist dieser Abstand um ein Vielfaches geringer als bei gemäßigten Anforderungen. Die größten Unterschiede finden sich oberhalb einer Frequenz von etwa 2–3 MHz →9. Diese Ergebnisse, zusammen mit EMV-Anforderungen und fundierten Kenntnissen über die Anfälligkeit von Ausrüstung für Störungen in der Nähe eines Kraftwerks können Energieversorgern dabei helfen, bessere Entscheidungen hinsichtlich der Abschirmungsanforderungen zu treffen.

3D-Simulationsmodelle bieten die beste Möglichkeit zur frühzeitigen Optimierung, um die Gefahr von kostspieligen und zeitaufwändigen nachträglichen Änderungen zu reduzieren.

Obwohl sich die hier beschriebenen Modellierungsbeispiele auf HGÜ-Anwendungen beziehen, ist die EMV-Simulationsmethodik auch auf andere Mittel- und Hochspannungsanwendungen von ABB wie FACTS, SVC Light® und Rail SVC Light® anwendbar.

09 Vergleich der Störstrahlung bei strengen und gemäßigten Anforderungen an die Abschirmung einer Ventilhalle.

10 Wand einer Ventilhalle. Der Abstand zwischen den Schrauben bestimmt die elektrische Verbindung der Wandplatten und variiert je nach Strenge der Anforderungen.

Als Unternehmen, das sich der Innovation im Energiesektor verschrieben hat, arbeitet ABB kontinuierlich an innovativen Technologien wie den hier beschriebenen digitalen Zwillingen für HVDC Light, um die Konzeption, Realisierung und Weiterentwicklung von Produkten nachhaltig zu verändern. Die Optimierung der elektromagnetischen Verträglichkeit ist ein Aspekt, mit dem ABB dabei hilft, die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit wichtiger Komponenten und Systeme zu erhöhen. •

Danksagung

Dieser Beitrag wäre nicht möglich gewesen ohne die Ideen, den Einsatz und das Engagement des gesamten Projektteams und aller Beteiligten. Der besondere Dank der Autoren gilt Filip Grecki, Arne Schröder, Pawel Kryczynski, Szymon Piela, Magdalena Ostrogorska, Celine Tigga und Olof Andersson.

Die Technologie der digitalen Zwillinge wird die Konzeption, Realisierung und Weiterentwicklung von Produkten nachhaltig verändern.

Literaturhinweise

[1] D. Cottet et al.: „Electromagnetic modeling of high voltage multi-level converter substations“. Proceedings of the Asia-Pacific International Electromagnetic Compatibility (APEMC) Symposium, Singapur, 14.–17. Mai 2018.

[2] B. Wunsch et. al.: „Broadband models of high voltage power transformers and their use in EMC system simulations of high voltage substations“. Proceedings of the Asia-Pacific International Electromagnetic Compatibility (APEMC) Symposium, Singapur, 14.–17. Mai 2018.



DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

Performance-Management von Solaranlagen mit angeschlossenen Analysen

Kürzlich hat ABB mehrere Forschungsinitiativen durchgeführt, die sich mit der Nutzung von digitalen Zwillingen für das Asset-Performance-Management befassen. Dabei wurden Verfahren für Assets mit kurzen und langen Historien entwickelt. Die Analysen und Tools werden nun produktisiert und für das Zustands- und Performance-Management von Anlagen eingesetzt.

—
Karen Smiley
Xiao Qu
Travis Galoppo
K. Eric Harper
Alok Kucheria
Mithun P. Acharya
Frank Tarzanin
 ABB Corporate Research
 Raleigh, NC, USA

karen.smiley@us.abb.com
 xiao.qu@us.abb.com
 travis.galoppo@us.abb.com
 eric.e.harper@us.abb.com
 alok.kucheria@us.abb.com
 mithun.acharya@us.abb.com
 frank.tarzanin@us.abb.com

Dieser Artikel behandelt ausgewählte Elemente der Arbeit, die bei ABB kürzlich im Rahmen mehrerer Forschungsinitiativen zur Nutzung digitaler Zwillinge im Asset-Performance-Management durchgeführt wurde. Zuerst wird ein Ansatz für „agile Analysen“ beschrieben, der die Erstellung nützlicher Analysen zum Funktionszustand (Health) und zur Leistungsfähigkeit (Performance) von neuen Geräten oder Materialien ermöglicht, für die noch keine umfangreichen Überwachungs-, Betriebs-

—
Avatare bzw. Zwillinge bieten einen Mehrwert in verschiedenen Szenarien wie Planung, Implementierung, Betrieb und Instandhaltung.

oder Umweltdaten vorliegen. Im Anschluss wird eine laufende Initiative vorgestellt, bei der es darum geht, einen umfangreichen cloudbasierten Bestand von Daten für Solarwechselrichter und -anlagen zu nutzen, um neue Analysen zum Zusammenhang zwischen Ereignissen und dem Wetter sowie zu Benchmarking-, Prognose- und Self-Service-BI-Zwecken zu realisieren. (Self Service-BI steht für „Self Service Business Intelligence“ und bedeutet die eigenständige Erstellung von Analysen und Berichten durch den Anwender). Diese Analysen und Tools werden zurzeit produktisiert und zur internen Nutzung sowie zur Nutzung durch Kunden für das Zustands- und Performance-Management von Anlagen bereitgestellt.

Asset-Performance-Management (APM)

Die effiziente Erhaltung des Funktionszustands und der Leistungsfähigkeit kritischer langlebiger Betriebsmittel, sogenannter Assets, ist entscheidend für den Erfolg. Analysen spielen eine zunehmend wichtige Rolle, wenn es darum geht, den Funktionszustand und die Performance von Assets zu verstehen und zu optimieren. Aktives APM bietet Kunden die Möglichkeit, ihr Bewusstsein für den Zustand und die Performance ihrer Assets zu erhöhen. Dies wiederum ermöglicht ihnen, von einer kostspieligen reaktiven Instandhaltung auf risikobasierte Managementmethoden umzuschwenken, die die Performance optimieren und die Nettokapitalrendite (RONA) maximieren. Während es viele Möglichkeiten gibt, den Zustand eines Assets zu quantifizieren, spiegeln die meisten Algorithmen das Ausfallrisiko (Risk of Failure, RoF) und die Restnutzungsdauer (Remaining Useful Life, RUL) wider. Allerdings geben diese Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs) keinen Aufschluss über einen Rückgang der Performance (Degradation), der die Produktion und Rendite schon lange vor einen Ausfall bzw. dem Ende der Lebensdauer beeinträchtigen kann. Dementsprechend erfordert ein umfassendes Management der Asset-Performance auch Analysen, die die Produktivität und die Degradation quantifizieren.

Digitale Zwillinge für APM

Vernetzte Assets bilden die Grundlage für einen koordinierten Ansatz, der Betriebstechnik (Operational Technology, OT) und Informationstechnik (IT) miteinander verbindet. Digitale Avatare oder



01

—
 01 Analysen auf der Basis digitaler Zwillinge ermöglichen die Erkennung eines allmählichen oder unweatherbedingten Leistungsrückgangs von Solaranlagen und die rechtzeitige Verhinderung von Produktionsverlusten. Solche Analysen und Tools für das Zustands- und Performance-Management von Assets nutzen die Verfügbarkeit großer Datenmengen.

digitale Zwillinge, die OT- und IT-Daten miteinander verschmelzen, sind so etwas wie Abbilder realer Objekte, mit denen Modelle von Geräten kombiniert werden können. Dazu müssen sie keine exakten Klone sein, es genügt, wenn sie die wichtigsten Verhaltensweisen des betreffenden Assets widerspiegeln. Diese digitalen Avatare oder Zwillinge ermöglichen eine schnellere Erstellung von analytischen Modellen, die Asset-Metadaten und Betriebsdaten (z. B. Telemetrie und Ereignisse) mit Daten zur Umgebung (z. B. Wetter, Sonneneinstrahlung, Blitzschlag, Betriebsbedingungen) integrieren, um eine Beschreibung und das Management der Asset-Performance auf Geräte- und Anlagenebene zu ermöglichen. Die Avatare bzw. Zwillinge bieten einen Mehrwert in verschiedenen Szenarien einschließlich der Planung, Implementierung, Betrieb und Instandhaltung. Ein bedeutender Vorteil ist die sichere und nicht-invasive Untersuchung von „Was-wäre-wenn“-Szenarien – z. B. um zu simulieren, wie sich Maßnahmen zur Verbesserung des Zustands oder der Produktion auf die Geräte und das System auswirken würden.

Performance-Analyse für Solaranlagen

Der Anteil der erneuerbaren Energien steigt weltweit, um eine zuverlässige und nachhaltige Ener-

gieversorgung zu gewährleisten. Seit über 13 Jahren entwickelt und fertigt ABB eine breite Palette von Solarwechselrichtern für Photovoltaik-(PV-)Anwendungen, die die Bedürfnisse von privaten und kommerziellen Anlagen ebenso wie von Solarkraftwerken und Mikronetzen abdecken [1]. Im Jahr 2017 lag die Gesamtleistung der

—
Ein bedeutender Vorteil ist die sichere und nicht-invasive Untersuchung von „Was-wäre-wenn“-Szenarien.

weltweit installierten Solarwechselrichter von ABB bei über 26 GW. Um Analysen der Anlagen und des Betriebs durch angeschlossene Systeme („angeschlossene Analysen“) zu ermöglichen, werden diese Wechselrichter immer intelligenter und lassen sich immer leichter in komplexe und intelligente Umgebungen integrieren →1.

Die ABB Ability™ Aurora Vision Plant Management Plattform [2] ergänzt das Angebot der ABB-Wechselrichter um eine cloudbasierte Lösung für das Management von PV-Anlagen →2.



02

Aurora Vision sammelt automatisch Überwachungsdaten von Solarwechselrichtern und anderen Geräten und ermöglicht einen hochgradig interaktiven Echtzeit-Zugriff auf wichtige Leistungs- und Betriebskennzahlen zur Optimierung der Performance von Wechselrichtern und zur Unterstützung von betriebswirtschaftlichen Entscheidungen. Die in den vergangenen 13 Jahren gesammelten Überwachungsdaten umfassen über 250.000 Geräte in Solaranlagen rund um den Globus →4.

Für Solaranlagen können die PV-Module, Wechselrichter, Zähler, Umweltmessstationen, Energiespeicher sowie das Anlagennetz und das Versorgungsnetz mit digitalen Zwillingen modelliert werden. Diese „Fassaden“ bieten Zugang zu Messungen, Schätzungen und Analyseergebnissen auf der Grundlage von Betriebserfahrungen und eines fundierten Verständnisses der Physik und der Technik der zugrunde liegenden Systeme.

Asset-Zustand und -Performance verstehen
Vorhersagen des Asset-Verhaltens, der Produktion, von Ereignissen, RoF, RUL usw. spielen eine zunehmend wichtige Rolle, wenn es darum geht, den wahren Zustand eines Assets zu verstehen und dessen Wertschöpfung zu maximieren. Die drei wichtigsten, miteinander verbundenen Konzepte sind Degradation, RoF und RUL →3. Degradation des physischen oder logischen Zustands eines Assets verkürzt die RUL und erhöht das RoF, kann aber durch Instandhaltungsmaßnahmen zur Verbesserung der Produktion und Performance vor dem Ausfall oder Lebensdauerende verringert werden.

Mithilfe eines digitalen Zwillinges können Asset-Daten analysiert werden, um die Produktion, den Zustand und die Degradation zu charakterisieren, die RUL zu schätzen, das RoF zu quantifizieren und die möglichen Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen zu überprüfen. Die Analysen

können vorausschauend eingesetzt werden, um vorbeugende Instandhaltungsentscheidungen zu unterstützen oder um Ausfälle, die bereits aufgetreten sind, besser zu verstehen.

Klassifizierung von Analysealgorithmen
Um die Wahl der Analyseverfahren in Abhängigkeit von den verfügbaren Daten zu unterstützen, wurden die relevanten Algorithmen entsprechend den drei Konzepten klassifiziert. RUL-Algorithmen wurden z. B. unter den Überschriften „direkt beobachtete Zustandsprozesse“, „indirekt beobachtete Zustandsprozesse“ und „Machine-Learning-basiert“ gruppiert, während RoF-Algorithmen in die Kategorien „Ausfallverfolgung“, „Symptomüberwachung“ und „Meldung erkannter Fehler“ eingeteilt wurden. Darüber hinaus können noch viele weitere Arten von analytischen Algorithmen von Nutzen sein. So ist die Erkennung von Anomalien ein wichtiger Aspekt für die Erweiterung von Modellen zur Ausfallvorhersage, während Vorhersagen für ein proaktives Lastmanagement äußerst nützlich sein können. Diese Arten von Algorithmen wurden ebenfalls klassifiziert. Einige der detaillierten Klassifizierungen sind in →5–6 dargestellt.

Klassifizierung und Mapping verfügbarer Daten
Datentypen, Volumen und Varianten spielen für eine effektive Anwendung dieser Algorithmen eine entscheidende Rolle. Stehen z. B. keine Telemetrie- oder Ereignisdaten mit ausreichender zeitlicher Auflösung zur Verfügung, sind bestimmte RoF-Algorithmen, die auf der Früherkennung von Anomalien basieren, nicht anwendbar. Die Prüfung der „Bereitschaft“ von Daten für eine Analyseanwendung kann wertvolle Erkenntnisse für die Wahl der zu verwendenden Algorithmen liefern.

— **Analysen können vorausschauend eingesetzt werden, um vorbeugende Instandhaltungsentscheidungen zu unterstützen.**

→7 zeigt ein Beispiel von einem von ABB entwickelten Tool zur Bestimmung der Datenverfügbarkeit im Hinblick auf die Datenanforderungen für eine Klasse von analytischen Algorithmen. Das Verständnis dieser Beziehungen ermöglicht eine effiziente Entwicklung neuer Asset-Analysen auf eine agile, iterative Weise, die den Nutzen der verfügbaren Daten maximiert. Zusätzlich wurden verschiedene Datenimputationsstrategien zur Behandlung fehlender Werte katalogisiert und mithilfe neuraler Netze von bisherigen Vorhersageerfahrungen „gebort“. Diese Methoden helfen dabei, einige

- 02 ABB Ability Vision Plant Viewer für mobile Geräte.
- 03 Zusammenhänge zwischen Degradation, RoF, RUL und Instandhaltung.

Einschränkungen hinsichtlich der Vollständigkeit oder Qualität der Daten bei der Entwicklung neuer Algorithmen für die Analyse und das Management des Zustands und der Performance von Assets zu kompensieren.

Intracloud-Analysearchitektur
Die Bestimmung und Verschmelzung weiterer Datentypen erwies sich als äußerst nützlich für die Erstellung digitaler Zwillinge von Solarwechselrichtern und -anlagen. Die Aurora Vision-Überwachungsplattform liefert bereits eine Vielzahl von Metadaten über Solaranlagen und die darin verwendete Ausrüstung und unterstützt das Streamen von Telemetrie- und Ereignisdaten, die an die Cloud gesendet werden [3]. Einige Anlagen verfügen zudem über Umweltmessstationen, die Daten zum Wetter und zur Sonneneinstrahlung aufzeichnen →4. Diese Daten wurden durch Wetter-, Blitzschlag- und Sonneneinstrahlungsmessungen von anlagenfernen Quellen ergänzt [4–6]. So konnte die Reichweite der Wetterdaten erweitert werden, indem eine anlagenferne Quelle nützliche Daten für 50 % der Anlagen lieferte, in denen keine Wetterstationen vor Ort zur Verfügung standen.

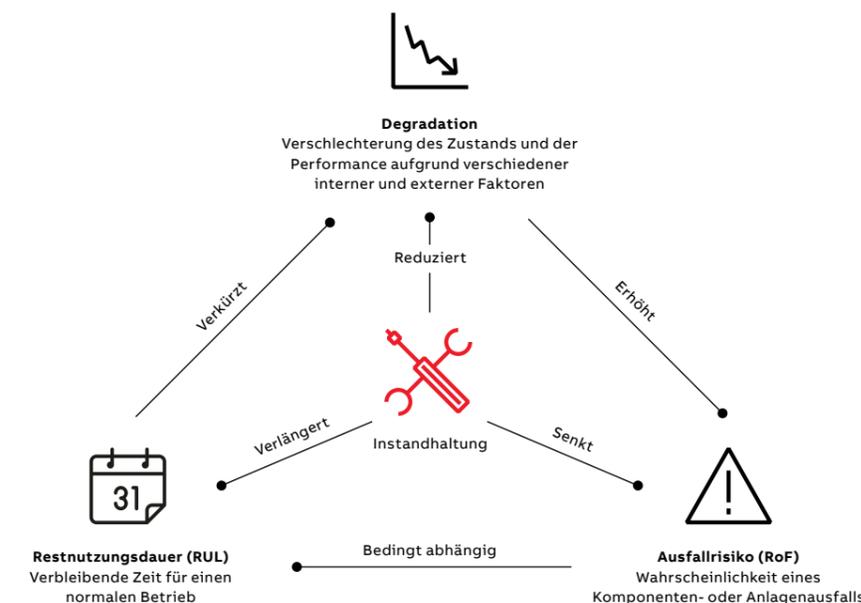
Ergänzende textuelle, numerische und komplexe Daten wurden von weiteren, innerhalb und außerhalb von ABB zur Verfügung stehenden Systemen erfasst [7]. Die Einbindung von Freitext ermöglicht den Einsatz von maschinellen Sprachverarbeitungsverfahren (Natural Language Processing, NLP), um ein besseres Verständnis der Abfolge

von Ereignissen zu schaffen, ganz gleich, ob diese Ereignisse von Kunden gemeldet oder automatisch von Aurora Vision-System protokolliert werden.

Die Kombination dieser Daten mit den Telemetrie- und Ereignisdaten ermöglichte neue Analysen zum Vergleich und zur Vorhersage der Wechselrichter-Performance und führte zu einem besseren Verständnis der Auswirkungen von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und den Ertrag von Solarwechselrichtern. Ebenso half der erweiterte digitale Zwilling der Solaranlage bei der Entwicklung neuer Analysen, die neue Einblicke in die Anlagenperformance bieten. So ist ABB z. B. durch die Verknüpfung von Ausfallarten aus Feldberichten mit Telemetriedaten wie Gerätealarmen,

— **Die Bestimmung und Verschmelzung weiterer Datentypen erwies sich als äußerst nützlich für die Erstellung digitaler Zwillinge.**

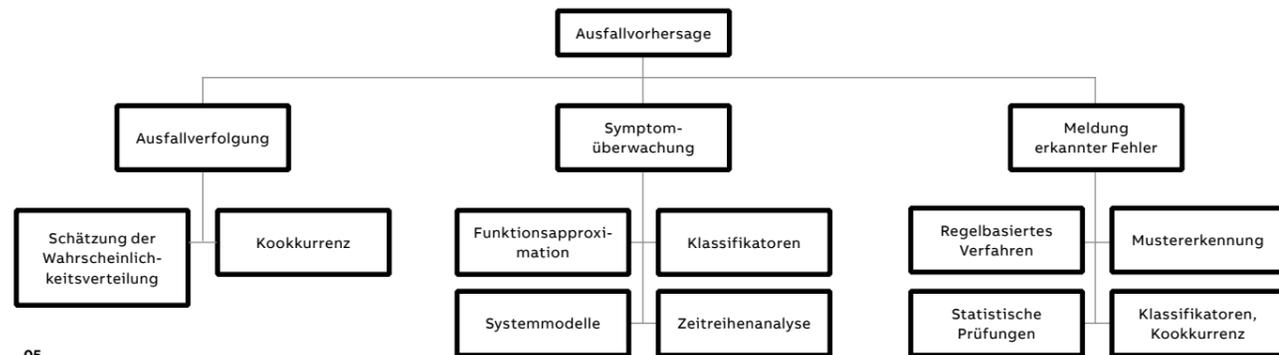
Temperaturen und Umgebungsbedingungen in der Lage, kategorisierte Komponentenausfälle mit den im Feld beobachteten Anzeichen in Zusammenhang zu setzen. Dies wiederum ermöglicht frühzeitige Warnungen oder Vorhersagen, wann eine bestimmte Ausfallrate überschritten werden könnte.



03



04



05

— 04 Einige Solaranlagen verfügen über Umweltmessstationen, die Wetterdaten und die Sonneneinstrahlung aufzeichnen.

— 05 Klassifizierung von RoF-Algorithmen.

— 06 Klassifizierung von RUL-Algorithmen.

Der erweiterte digitale Zwilling half bei der Entwicklung neuer Analysen, die neue Einblicke in die Anlagenperformance bieten.

Wetteranalysen

Die Verschmelzung dieser unterschiedlichen Daten erhöht die Vielseitigkeit und Leistungsfähigkeit der Performance-Analysen. So verbessern Wetterdaten von anlagenfernen Quellen die Erkennung anomaler Werte von anlageninternen Umweltmessstationen. →8 zeigt einen Vergleich der gemessenen täglichen Gesamtsonneneinstrahlung im Jahr 2016 aus zwei Datenquellen – einer anlageninternen Umweltmessstation und einem anlagenfernen Sensor. Diese Analyse zur Anomalieerkennung trug zur Verbesserung von cloudbasierten, edgebasierten oder hybriden Analysen für die Schätzung und/oder Vorhersage der Stromerzeugung auf der Basis von Wetterdaten bei. Dies wiederum ermöglicht eine bessere Erkennung einer allmählichen oder plötzlichen Verschlechterung der Performance von PV-Modulen oder Wechselrichtern, die die Erzeugungsleistung der Solaranlage beeinträchtigen kann.

Diese Erkenntnisse bieten Betreibern von Solaranlagen oder Servicemitarbeitern wertvolle Hilfestellung bei der Beurteilung des RoF und der RUL und der Einleitung geeigneter

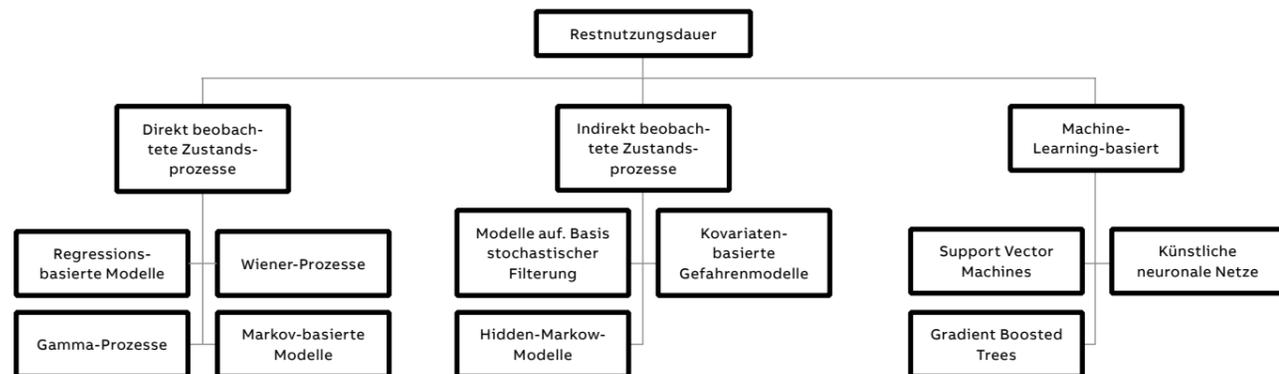
Maßnahmen. Kurzfristige Maßnahmen können z. B. Vorbereitungen auf Unwetter sein. Auf längerfristige Sicht können solche Erkenntnisse dabei helfen, präventive Maßnahmen wie die Installation zusätzlicher Blitzschutzsysteme oder die Erstellung genauerer Investitions- und Instandhaltungspläne zu rechtfertigen.

Visuelle „Self-Service“-Analysen

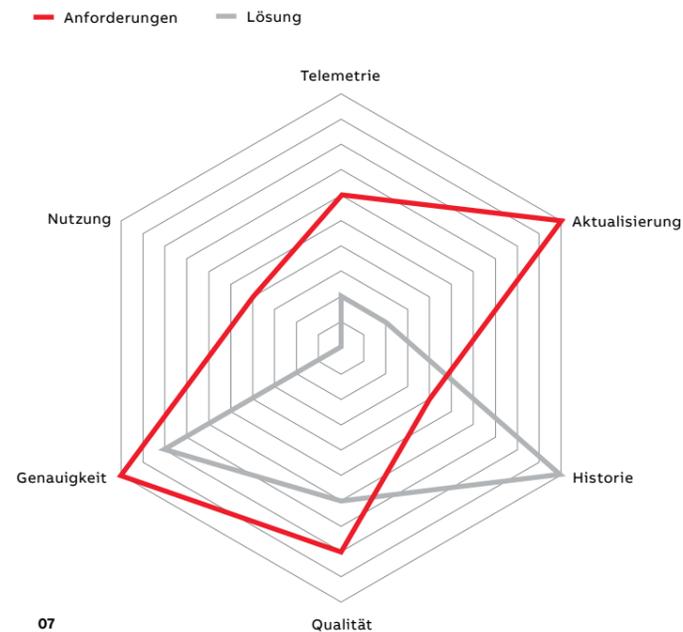
Im Bereich der visuellen Analysen dienen Self-Service-BI-Tools der Veranschaulichung verschiedener Daten – einschließlich Metadaten, Telemetriedaten und Ereignisdaten – mithilfe von Grafiken, Karten und Diagrammen. Die BI-Tools können automatisch mehrere Datenquellen und -typen über gemeinsame Felder miteinander verbinden. Die Informationen können durch interaktive Filter und Auswahlmöglichkeiten einfach an verschiedene Nutzeranforderungen und -interessen angepasst werden, wobei alle für ein Diagramm gewählten Eigenschaften automatisch in Echtzeit auf andere Artefakte angewendet werden. Diese Funktionen helfen Eigentümern und Betreibern von Solaranlagen dabei, Anomalien visuell zu identifizieren und auf effiziente und effektive Weise weitere Einblicke zu erhalten.

Konkreter Nutzen der Arbeiten

Zu den Errungenschaften des Projekts gehören neue Algorithmen zum Vergleich und zur Vorhersage der Performance und der Zuverlässigkeit von Solarwechselrichtern; Prototypen für visuelle Self-Service-BI-Anwendungen; Edge-Algorithmen



06



zur Schätzung der AC-Ausgangs- und DC-Eingangsleistung in Echtzeit; automatisierte Diagnosetools für Serviceingenieure zur Analyse von Ereignissen, Telemetriedaten und Freitext-Kundenkorrespondenz sowie neue KPIs, die ABB-Kunden dabei helfen, ihre Solaranlagen besser zu verstehen (und deren Wertschöpfung zu erhöhen). Darüber hinaus demonstrierte das Projekt den synergetischen Wert einer an ABB Ability ausgerichteten Intracould-Analysearchitektur, die die Nutzung sich ergänzender interner und externer Datenquellen ermöglicht. Ferner wurde gezeigt, dass Umweltdaten den wirtschaftlichen Nutzen der Analysen erhöhen können. Diese Funktionalitäten werden nun in das ABB-Portfolio von Überwachungs- und Asset-Performance-Lösungen für Solaranlagen integriert.

Eine frühzeitige Ausfallvorhersage verschafft wertvolle Vorlaufzeit für Instandhaltungsmaßnahmen bzw. zur Beschaffung und Installation eines Ersatzgeräts.

Um den potenziellen wirtschaftlichen Nutzen dieser Analysen zu veranschaulichen, stellen wir uns eine industrielle Solaranlage mit zehn Solarwechselrichtern vom Typ TRIO vor. Mithilfe von Analysen auf der Basis digitaler Zwillinge kann ein allmählicher oder unweatherbedingter Leistungsrückgang innerhalb der Anlage (der eventuell durch einfaches Reinigen behoben werden kann) rechtzeitig erkannt werden. So lässt sich ein Erzeugungsverlust verhindern, der vielleicht erst Tage oder Wochen später aufgefallen wäre.

Ein unerwarteter Ausfall eines Wechselrichters in einer Anlage mit zehn Wechselrichtern bedeutet, dass etwa 10 % der Erzeugungsleistung der Anlage verloren gehen. Dies kann für den Betreiber zu empfindlichen Strafen für die Nichteinhaltung von Erzeugungsverpflichtungen führen. Eine frühzeitige Vorhersage von Ausfällen durch Analysen verschafft dem Betreiber wertvolle Vorlaufzeit zur Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen und – falls notwendig – zur Beschaffung und Installation von Ersatzteilen oder eines Ersatzgeräts. Der tatsächliche monetäre Nutzen ist situativ und lässt sich auf der Grundlage der Vorlaufzeit, der Tatsache, ob eine einsatzbereite Reserve in der Anlage zur Verfügung steht, der Vermeidung von mehrfachen Servicefahrten zur Beschaffung der richtigen Ersatzteile und Faktoren wie Vertragsstrafen und dem Wert der Elektrizität in der Region berechnen.

07 Beispiel eines Spinnennetzdiagramms zur Datenbereitschaft.

08 Vergleich von Messungen der täglichen Gesamtsonneneinstrahlung von anlageninternen und anlagenfernen Wetterstationen zur Erkennung von Anomalien.

Literaturhinweise

[1] ABB-Solarwechselrichter. Informationen unter: <http://new.abb.com/power-converter-inverters/solar>

[2] ABB Ability™ Aurora Vision Plant Management Plattform. Informationen unter: <http://new.abb.com/power-converter-inverters/solar/monitoring-and-communication/aurora-vision-plant-management-plattform>

[3] M. P. Acharya et al.: „Digitale Zwillinge und Echtzeit-KI in der Edge“. ABB review 2/2019, S. 14–19.

[4] Earth Networks. <https://www.earthnetworks.com>

[5] The Weather Company. <https://www.ibm.com/weather>

[6] ABB Ability™ Velocity Suite. Informationen unter: <http://new.abb.com/enterprise-software/energy-portfolio-management/market-intelligence-services/velocity-suite>

[7] Salesforce. <https://www.salesforce.com>

Stehen weniger historische Daten zur Verfügung, kann die Erstellung digitaler Zwillinge mithilfe der agilen Analysetools beschleunigt werden.

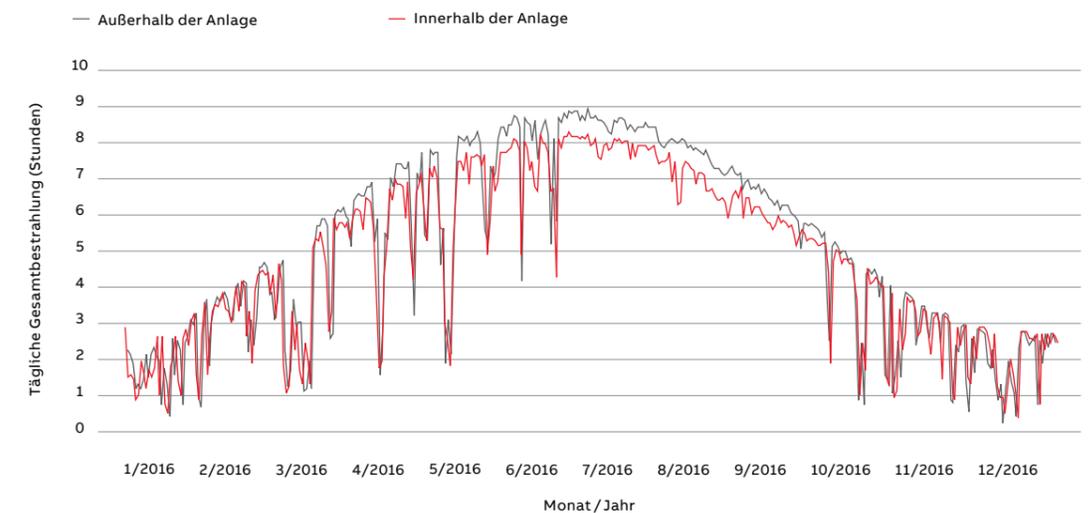
Stehen große Mengen unterschiedlicher Daten zur Verfügung, ist vieles möglich. Doch die Daten sind nicht kostenlos. Die Installation der erforderlichen Instrumentierung sowie die Erfassung, Speicherung und Übertragung der Daten sind mit Investitions- und Betriebskosten verbunden. Stehen weniger historische Daten zur Verfügung, kann die Erstellung von digitalen Zwillingen für neue Arten von industriellen Assets in einem APM-System durch Nutzung der Algorithmen- und Datenkategorien und der dazugehörigen agilen Analysetools beschleunigt werden. Darüber hinaus unterstützen

diese Tools die Kosten-Nutzen-Bewertung von möglichen analytischen Strategien für neuere Asset-Typen.

Alles in allem ermöglicht die Verwendung von digitalen Avataren bzw. digitalen Zwillingen für das APM von Solaranlagen also eine Vielzahl von Analysen und Tools, die Betreibern von PV-Anlagen vielfältige Vorteile bieten. •

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei den Mitgliedern des Forschungsteams James Ottewill, Marcin Firla, David Cox, Karl Severin, Imtiaz Ahmed, Hang Xu, Melwin Jose und Rohini Kapoor für ihre wertvollen Beiträge. Außerdem danken wir Filippo Vernia, Emanuele Figliolia, Antonio Rossi, Ronnie Pettersson, Siri Varadan, CJ Parisi und vielen anderen für ihre tatkräftige Unterstützung. Unser Dank gilt ferner dem ABB Ability Velocity Suite Team, Earth Networks und The Weather Company für die großzügige Bereitstellung ergänzender Wetterdaten im Rahmen des Projekts.



DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

Simulationen leicht gemacht

Leistungsstarke Tools wie Computer-Aided-Engineering (CAE) und numerische Strömungsberechnungen (CFD) ermöglichen die schnelle Erstellung virtueller Prototypen. Doch aufgrund der Komplexität dieser Tools ist ihre Nutzung meist auf erfahrene Anwender beschränkt. Ein wichtiger Treiber für Innovationen ist die Demokratisierung von Technologie. Vor diesem Hintergrund hat ABB drei halbautomatisierte Plattformen eingeführt, die darauf ausgelegt sind, eine schnelle, einfache und zuverlässige numerische Modellierung zu ermöglichen. Die neuen Tools senken die Kosten für die Prototyperstellung und ermöglichen das Testen Dutzender Designvarianten in einem akzeptablen Zeitrahmen.

01



Photo fig. 01: gorodenkoff. istockphoto.com

01 Die neueste Simulationssoftware von ABB nutzt numerische Strömungsberechnungen, um Turbulenz-, Strahlungs- und Auftriebseffekte sowie die Auswirkungen geometrischer Details abzubilden.

02 StudyTrafo erzeugt Simulationsmodelle auf Grundlage der eingegebenen mechanischen Abmessungen von Transformatorcomponenten wie Kern- und Jochpresselemente, Wicklungen, Kessel und Abschirmung.

Boguslaw Samul
Andrzej Kobierski
Janusz Duc
ABB Corporate Research
Krakau, Polen

boguslaw.samul@pl.abb.com
andrzej.kobierski@pl.abb.com
janusz.duc@pl.abb.com

Jaydeep Deshpande
ABB Power Grids, Dry
Transformers
Raleigh, NC, USA

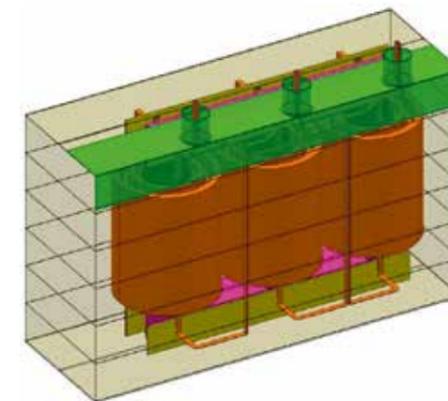
jaydeep.deshpande@us.abb.com

Jan Westerlund
ABB Motors and
Generators Technology
Helsinki, Finnland

jan.westerlund@fi.abb.com

Dietrich Bonmann
ABB Power Grids, Power
Transformers
Bad Honnef, Deutschland

dietrich.bonmann@de.abb.com



02

Eine der Schlüsselfragen bei der Entwicklung elektrischer Geräte ist, inwieweit sie in der Lage sind, Produktions- und Betriebskosten zu senken. Während einerseits die Forderung besteht, das Gewicht, die Größe und die Komplexität solcher Geräte zu reduzieren, müssen sie andererseits robust, erschwinglich und effizient sein. Wie können Konstrukteure unter diesen Umständen in einer möglichst kurzen Zeit den bestmöglichen Mittelweg für eine bestimmte Anwendung finden?

Die Antwort auf diese Frage ist komplex, da z. B. die mögliche Reduzierung der Größe eines elektrischen Geräts von verschiedenen Faktoren wie elektrischen Abständen (Isolationseigenschaften) und dem Wärmemanagement des Geräts abhängt. Doch die Bestimmung der elektrischen und thermischen Eigenschaften durch physische Tests ist normalerweise teuer und zeitaufwändig.

Allerdings stehen leistungsstarke Werkzeuge zur Verfügung, die den Konstrukteuren dabei helfen können, immer mehr Eigenschaften eines Geräts schon in der Entwicklungsphase zu visualisieren, zu quantifizieren und genau vorherzusagen. So können z. B. mithilfe von CAE-Tools (Computer-Aided-Engineering) wie FEM (Finite-Elemente-Methode) und CFD (Computational Fluid Dynamics) die Kosten und Testzeiten erheblich reduziert werden, da sie die Erstellung virtueller Prototypen und die Analyse Dutzender Varianten in relativ kurzer Zeit ermöglichen → 1. Dank modernster Simulationssoftware und der zunehmenden Leistungsfähigkeit von Hochleistungsrechnern können komplette Geräte auf virtuelle Weise mit einer Genauigkeit getestet werden, die nur um wenige Prozentpunkte von realen Tests abweicht.

Drei Hürden

Das bedeutet aber nicht, dass damit ein Zeitalter fehlerloser virtueller Produkttests angebrochen ist. Konstrukteure haben noch immer mit drei bedeutenden Hürden zu kämpfen: die Kosten für die Software, die Kosten für die Hochleistungsrechner und eine häufig mangelnde Vertrautheit mit der Erstellung von Simulationsmodellen und der Einrichtung von Gleichungslösern (Solvem). Doch auch hier stehen Lösungen zur Verfügung: So kann teure kommerzielle Software häufig durch Open-Source-Programme ersetzt werden. Statt lokalen Hochleistungsrechnern können Cloud-Lösungen genutzt werden, und die Modellerstellung und Solvereinrichtung kann in manchen Fällen durch

spezielle Software mit vordefinierten Vorlagen und Einstellungen vorgenommen werden, die keine Änderung durch den Nutzer erfordern. In dieser sich entwickelnden Landschaft steht Ingenieuren nun eine benutzerfreundliche Bedienschnittstelle mit klaren Optionen zur Verfügung, die ihnen Ergebnisse in Berichtsform bereitstellt. Dieser Ansatz, der auch als „Demokratisierung der Simulation“ bezeichnet wird, ermöglicht statt einer Handvoll Spezialisten für numerische Berechnungen nahezu jedem Ingenieur die Nutzung eines solchen Systems.

CAE-Tools (Computer-Aided-Engineering) wie FEM (Finite-Elemente-Methode) und CFD (Computational Fluid Dynamics) reduzieren Kosten und Testzeiten.

Wie unterstützt ABB diesen Trend zu erschwinglichen Simulationswerkzeugen, die auch Kunden einen Mehrwert bieten? Im Folgenden sollen drei halbautomatisierte Tools vorgestellt werden, die von ABB für den Einsatz in der Produktentwicklung konzipiert wurden.

StudyTrafo

Die Verifizierung des Designs und die Optimierung der magnetischen Abschirmung sind wichtige Aspekte bei der Herstellung von Transformatoren, denn es gilt, die in den Metallteilen des Trafos unter Einwirkung von Magnetfeldern erzeugten Streuverluste zu reduzieren. Die Erstellung entsprechender numerischer Modelle erfordert fundierte Kenntnisse auf dem Gebiet der Simulationssoftware, Fertigkeiten in der 3D-Modellierung und Erfahrung in der Auswertung der Ergebnisse – alles Fähigkeiten, die normalerweise nur für tägliche Anwender von Simulationspaketen, aber nicht unbedingt für Elektrokonstrukteure relevant sind. Vor diesem Hintergrund hat

ABB StudyTrafo entwickelt, ein halbautomatisiertes Tool zur Vorhersage von Hotspots, das für Simulationsexperten ebenso wie für gelegentliche Nutzer geeignet ist.

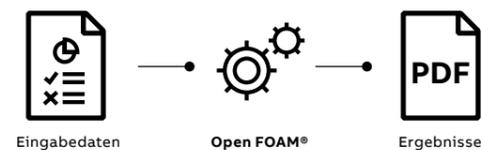
Die Bedienoberfläche des Tools ermöglicht eine einfache und schnelle Generierung von Simulationsmodellen auf der Grundlage der eingegebenen mechanischen Abmessungen der Transformator-komponenten wie Kern- und Jochpresselemente, Wicklungen, Kessel und Abschirmung →2. Die Simulationsmodelle werden in einer kommerziellen Software für elektromagnetische und thermische Berechnungen mithilfe von integrierten 3D-Primitiven wie Blöcken, Zylindern usw. und geometrischen Operationen generiert.

Randbedingungen und Simulationseinstellungen werden den generierten Modellen automatisch zugewiesen. Sämtliche Parameter werden auf der Grundlage Dutzender getesteter Exemplare kleiner, mittelgroßer und großer Leistungstransformatoren, die von ABB weltweit gefertigt wurden, statistisch angepasst. Eine speziell für solche Berechnungen vorgesehene Werkstoffbibliothek wurde von ABB-Wissenschaftlern mithilfe von Labormessungen entwickelt.

StudyTrafo ermöglicht die komplette Optimierung eines Transformator-Designs innerhalb eines Tages.

StudyTrafo ist in C# geschrieben, und Eingabedaten können manuell eingegeben oder direkt aus einem Designsystem importiert werden →4. Letzteres ermöglicht eine sofortige Erstellung von Simulationsmodellen. Das Ergebnis ist eine relativ kurze Simulationszeit, die es Ingenieuren erlaubt, die komplette Optimierung eines Transformator-Designs innerhalb eines Tages durchzuführen. Die Endergebnisse werden in Form einer Tabelle dargestellt, die die Verteilung der Verluste und die Höchsttemperaturwerte zeigt.

Die Methodik ist praktisch und kostengünstig. Im Vergleich zu anderen verfügbaren Tools und Analysemethoden für die Berechnung von Streuverlusten ist die Standardabweichung



zwischen den gemessenen und berechneten strukturellen Verlusten um den Faktor zwei geringer. Darüber hinaus beschränkt sich der Nutzen von Computersimulationen nicht auf Kosten- und Zeiteinsparungen für einzelne Transformatoreinheiten, sondern ermöglicht auch ein besseres Verständnis der physikalischen Vorgänge während des Betriebs. Ferner bietet der Ansatz die Möglichkeit, verschiedene Lösungen durch Simulation zu testen, was wiederum zu verbesserten Designs mit niedrigeren Streuverlusten und einer höheren Effizienz führt.

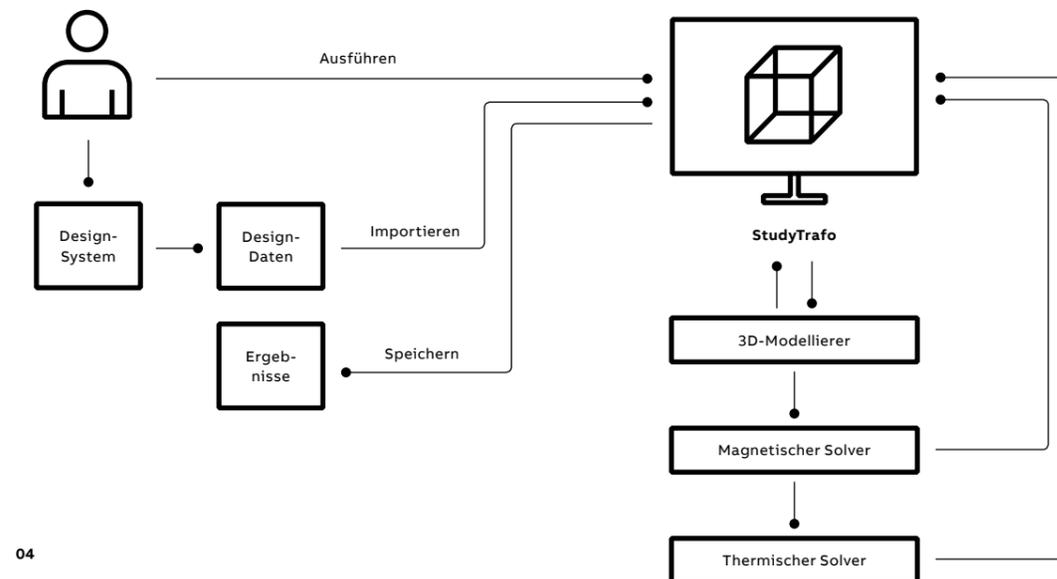
CFD für MCCU

MCCU-CFD ist ein halbautomatisiertes Tool zur Durchführung experimenteller numerischer Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) von Elektromotoren →5, das als Bestandteil der MCCU (Multiphysics Cascaded Controlling Unit) entwickelt wurde. Die Software bietet die Möglichkeit, verschiedene physikalische Phänomene, die von F&E-Ingenieuren häufig zur Untersuchung des Betriebs von Elektromotoren verwendet werden, zu steuern und zu automatisieren. So kann z. B. untersucht werden, wie sich eine Veränderung der Abmessungen oder der Betriebsparameter auf die approximierten Motorleistung auswirkt.

MCCU integriert mehrere Tools in einer einzigen Bedienoberfläche, auf die über eine Webseite zugegriffen werden kann. Das Ziel des Tools ist es, F&E-Ingenieuren die Möglichkeit zu bieten, die Erstellung kompletter CFD-Simulationen auf der Grundlage vordefinierter Parameter zu automatisieren.

Mit dem MCCU-CFD-Tool können Nutzer mit einem Klick eine CFD-Simulation eines Motors durchführen. Die Eingaben für die Simulation, zu denen die Abmessungen und Betriebsparameter des Motors gehören, liefert die ADEPT-Software, eine umfassende Designumgebung für Elektromotoren.

Das Tool erzeugt ein repräsentatives 3D-Modell eines Motors, das sich zur Durchführung einer Luftströmungssimulation oder einer gekoppelten thermischen und Luftströmungssimulation mithilfe eines Open-Source-Programms wie OpenFOAM eignet →3. Sobald die Skripte die Erzeugung der Finite-Volumen-Gitter für die Aktivteile und den Luftraum abgeschlossen haben, sorgen sie für die richtige Zuweisung der Materialeigenschaften, Wärmequellen und Randbedingungen zu allen Motorkomponenten. Ist ein Modell fertiggestellt, wird die Simulation auf einem Server berechnet, bis ein stabiler Zustand erreicht ist. Am Ende des Simulationsvorgangs erfolgt eine automatische Nachverarbeitung unter Verwendung einer



03 MCCU-CFD sammelt Simulationsergebnisse in Form von Bildern, Diagrammen und Tabellen und erstellt einen Bericht für den Nutzer.

04 Die Bedienoberfläche von StudyTrafo ermöglicht eine schnelle und einfache Erzeugung von Simulationsmodellen.

05 MCCU bietet F&E-Ingenieuren die Möglichkeit, die Erstellung kompletter CFD-Simulationen auf der Grundlage vorgefertigter Parameter zu automatisieren.

Software wie ParaView. MCCU-CFD sammelt Simulationsergebnisse in Form von Bildern, Diagrammen und Tabellen und erstellt daraus einen Bericht, der dem Benutzer übermittelt wird.

DryFOAM

Trockentransformatoren sind konstruktionsbedingt äußerst empfindlich gegenüber Temperaturveränderungen. Aufgrund des Kühlmediums (Luft) und der Tatsache, dass die Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion erfolgt, ist ihr Wärmeverhalten schlechter als das von flüssigkeitsgefüllten Transformatoren. Daher ist es für die Optimierung des Designs von Trockentransformatoren unerlässlich, dass dem Konstrukteur zuverlässige Werkzeuge für thermische Berechnungen zur Verfügung stehen.

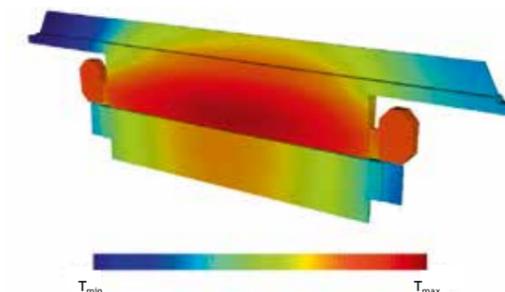
Das Ziel von MCCU-CFD ist es, die Erstellung kompletter CFD-Simulationen auf der Grundlage vordefinierter Parameter zu automatisieren.

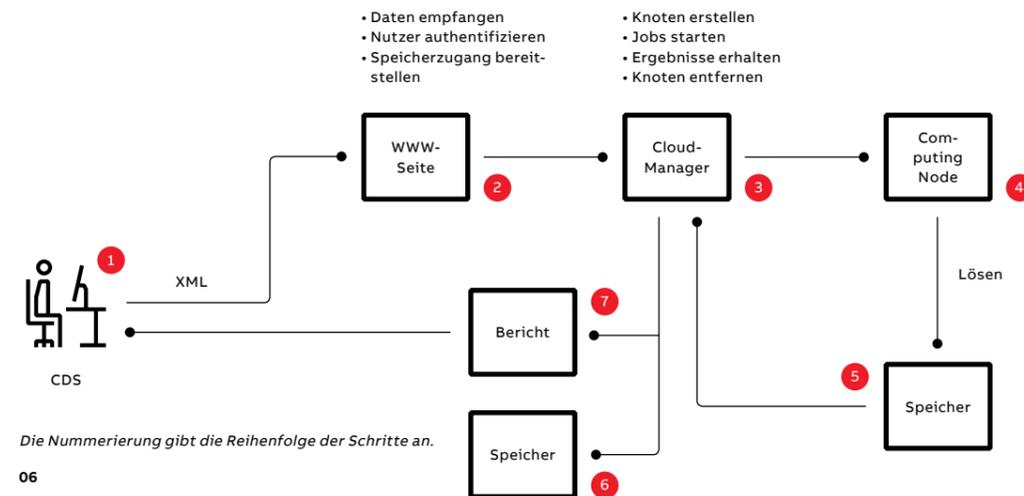
Diese können von vereinfachten Lumped-Mass-Systemen bis hin zu sehr filigranen Netzmodellen reichen. Numerische Strömungsberechnungen gehen über die Beschränkungen von Modellen mit gemittelten Parametern hinaus und bieten die Möglichkeit, die Auswirkungen von Turbulenzen, Strahlung, Auftrieb und geometrischen Merkmalen in Trockentransformatoren abzubilden.

Seit dem Aufkommen des Cloud-Computings sind die Rechenkosten so niedrig wie nie zuvor

und stellen für ein numerisches Analysesystem wie CFD keinen Engpass mehr dar. In der Vergangenheit verhinderten die Kosten für eine kommerzielle Lizenzierung häufig eine verbreitete Nutzung verfügbarer Plattformen. In dieser neuen Landschaft konkurriert OpenFOAM als Open-Source-Alternative mit kommerziellen Softwarepaketen. Mit OpenFOAM lassen sich Simulationen auf mehrere Rechenressourcen verteilen, sodass eine hohe Rechenleistung zu geringen Kosten erreicht werden kann →6. Für eine sich wiederholende Aufgabe wie die Konstruktion eines Transformators stellt eine automatisierte Plattform auf der Basis von OpenFOAM eine gute Lösung für genaue thermische Berechnungen dar.

DryFOAM („Dry“ für Trockentransformator und „FOAM“ für OpenFOAM) geht zurück auf einen Workshop im Jahr 2016 unter dem Titel „Thermal Issues on Electrical Machines“. Der Erfahrungsaustausch in den Bereichen Open-Source-Computing, Wärmemanagement, Entwicklung von Simulationssoftware und neue Verfahren des Cloud-Computing führte 2017 zu einem IT-Projekt mit folgenden Zielen:





— 06 Mit OpenFOAM lassen sich Simulationen auf mehrere Rechenressourcen verteilen, sodass eine hohe Rechenleistung zu geringen Kosten erreicht werden kann.

- Bereitstellung eines einfachen und zuverlässigen Tools zur Durchführung von Fluidströmungs- und thermischen Simulationen von Trockentransformatoren
- Nutzung von Open-Source-Technologien, um die Betriebskosten möglichst gering zu halten
- Nutzung von Cloud-Computing (Microsoft Azure), um die Rechenkosten zu reduzieren
- Einfache Gestaltung der Lösung, sodass sie von jedem Ingenieur in einem Trockentransformatorenwerk genutzt werden kann, und zwar unabhängig von seinem Hintergrundwissen im Bereich Thermofluiddynamik.

DryFOAM beginnt mit einer einzigen universellen Eingabedatei, die auch vom Common Design System (CDS) von ABB für die Konstruktion von Transformatoren verwendet wird. Das System extrahiert automatisch die geometrischen Parameter wie Wicklungs-, Kern- und Gehäuseabmessungen, Lasten (Verluste) und Randbedingungen (Umgebungstemperatur). Octave-Skripte (ein weiteres Open-Source-System ähnlich der kommerziellen Software Matlab) übernehmen dann die Erstellung eines axialsymmetrischen repräsentativen 2D-Modells eines Transformators einschließlich Kern, Wicklungen, Kühlkanälen, Gehäuse, Lüftungsöffnungen und dem Luftraum um das Gerät.

Finite-Volumen-Gitter werden entsprechend den Anforderungen von CFD-Methoden erzeugt, sodass die notwendige Qualität der Elemente und die Details der Grenzschichten für die Berechnung der wandnahen Strömungen bei natürlicher und erzwungener Konvektion sichergestellt sind. Und schließlich sorgt der DryFOAM-Workflow für die Zuweisung der Wärmequellen, Materialeigenschaften, Randbedingungen und Solvereinstellungen. Ist das Modell fertiggestellt, beginnt DryFOAM mit den Berechnungen und erstellt einen Bericht, sobald der Solver eine stabile Lösung gefunden hat.

Die automatisierte Berichterstellung ist eines der Hauptmerkmale von DryFOAM, da dies die Kommunikation der Ergebnisse in einem für alle Konstrukteure lesbaren Format erleichtert. Dabei wird die Komplexität der Simulation abstrahiert, und den Konstrukteuren werden die wichtigsten Informationen zum Wärmeverhalten von Kern und Wicklung angezeigt. So kennen sie nicht nur die durchschnittlichen Wicklungstemperaturen, sondern auch die Temperaturen und die Lage der Heißpunkte. Ein Bericht kann anschließend heruntergeladen oder im System gespeichert werden.

Die automatisierte Berichterstellung von DryFOAM erleichtert die Kommunikation der Ergebnisse in einem für alle Konstrukteure lesbaren Format.

Von der Implementierung her ist DryFOAM vollständig containerisiert und kann daher auf einem Laptop, Arbeitsplatzrechner oder in der Cloud genutzt werden. Cloudlösungen scheinen besonders vielversprechend, da eine vordefinierte Cloud-Benutzeroberfläche für DryFOAM die Datensicherheit gewährleistet und ein schnelles und einfaches Eingeben und Hochladen von Dateien, Herunterladen von Berichten sowie die Online-/Live-Darstellung von Parametern zur Stabilität der Lösung bei verschiedenen Iterationen ermöglicht. In seiner derzeitigen Form ermöglicht die DryFOAM-Software 2D-Berechnungen von zwei Konstruktionsarten, doch es gibt Pläne für detailliertere 3D-Berechnungen, die die Simulation von anderen Transformatortypen wie Resibloc- oder Traktionstransformatoren ermöglichen. Vor allem aber kann das Gerüst des Tools problemlos für die Simulation anderer ABB-Produkte angepasst werden. •

DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

Fortschrittliche Produktgestaltung und -fertigung durch 3D-Druck

ABB kombiniert neueste Fortschritte auf dem Gebiet der numerischen Software mit additiver Fertigungstechnik, um leistungsstarke Lösungen für den 3D-Druckprozess zu entwickeln, die das Design wichtiger Komponenten verbessern und gleichzeitig die Gesamtkosten reduzieren.

— 01 Der Einsatz leichter und leistungsstarker Lackierroboter ermöglicht eine Senkung der Betriebskosten. Entscheidend ist ein leichter Mischer am Ende des Roboterarms.



— **Lukasz Matysiak**
Tomasz Nowak
Robert Sekula
Dariusz Bednarowski
ABB Corporate Research
Krakau, Polen

lukasz.matysiak@pl.abb.com
tomasz.nowak@pl.abb.com
robert.sekula@pl.abb.com
dariusz.bednarowski@pl.abb.com

— **Frederic Tholence**
Erik X. Johansson
ABB Corporate Research
Västerås, Schweden

frederic.tholence@se.abb.com
erik.x.johansson@se.abb.com

— **Peter Schuster**
ABB Technology Center
Uster, Schweiz

peter.schuster@ch.abb.com

01

In den vergangenen zehn Jahren wurden rasante Fortschritte auf dem Gebiet der additiven Fertigung, die auch als AM (Additive Manufacturing) oder 3D-Druck bezeichnet wird, erzielt. Ziel dieser Verfahren ist die Herstellung von Bauteilen durch schichtweisen Materialauftrag [1]. Je nach Verfahren werden dabei verschiedene Kombinationen von Ausgangswerkstoffen und Wärmequellen

genutzt, um Komponenten aus Metall oder Kunststoff herzustellen. Ein bedeutendes Beispiel ist die Familie der Schmelzschichtverfahren (Fused Deposition Modeling oder Fused Filament Fabrication). Dabei werden Objekte durch selektiven Auftrag eines geschmolzenen thermoplastischen Polymers aufgebaut. Im Gegensatz dazu stehen pulverbasierte Verfahren,

bei denen Metall- oder Kunststoffpulver auf einer Grundplatte aufgebracht und anschließend mit einem Laserstrahl geschmolzen oder direkt der Wärmeeinflusszone zugeführt wird.

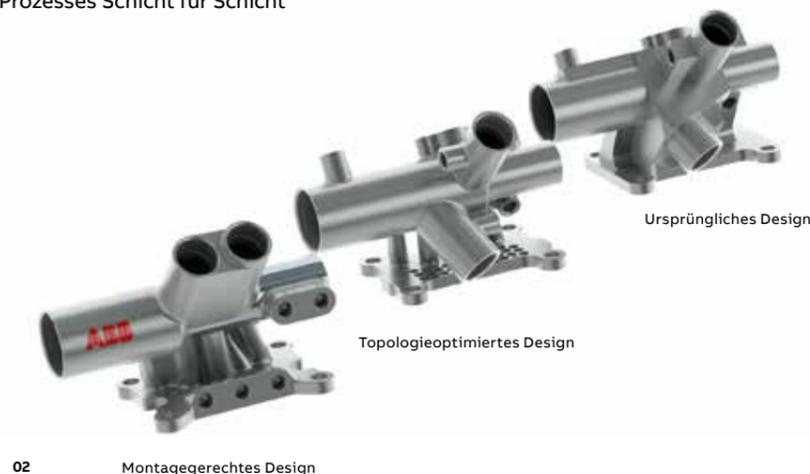
Dank dieser Fortschritte bietet die additive Fertigung Herstellern ein hohes Maß an gestalterischer Freiheit und ermöglicht es ihnen, per 3D-Druck Baugruppen aus vielfach integrierten Teilen zu fertigen.

ABB hat Engineering-Tools und Simulationen evaluiert, um festzustellen, in welchen Fällen AM-Anwendungen einen besonderen Kundennutzen bieten.

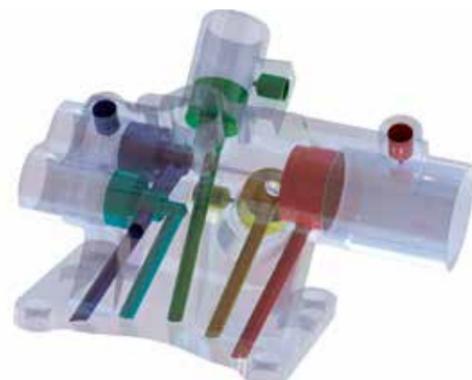
Gleichzeitig sind die Verfahren jedoch mit einer inhärenten Komplexität verbunden, die einen umfassenderen Einsatz der additiven Fertigung verhindern. So stellen z. B. die Produktgeometrie und Materialstrukturen, die während des AM-Prozesses definiert werden, komplexe Randbedingungen dar. Hinzu kommt, dass das Material, das während des Prozesses Schicht für Schicht

aufgetragen wird, durch den Prozess selbst beeinflusst werden kann. So können die kombinierten Auswirkungen von rascher Erstarrung, gerichteter Abkühlung und Phasenübergängen durch wiederholte Temperaturwechsel das Gefüge des aufgebrauchten Materials negativ beeinflussen. Außerdem kann es sein, dass die hergestellten Teile aufgrund ihrer Porosität die an sie gestellten mechanischen Anforderungen nicht erfüllen. Aufgrund der thermomechanischen Eigenschaften des Prozesses kann es durch thermisch induzierte Restspannungen und Verformungen zu erheblichen Ungenauigkeiten in den Abmessungen kommen [2].

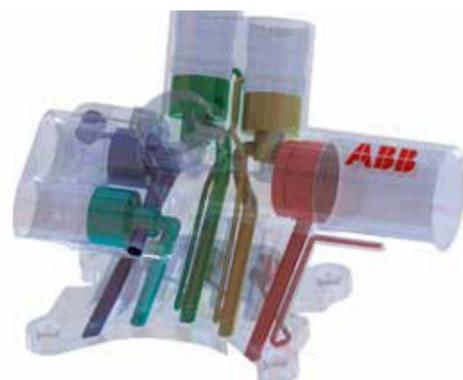
Numerische Engineering-Tools, z. B. Softwarepakete für Finite-Elemente-Analysen, sind in der Lage, kritische physikalische Phänomene aufzudecken. Dies hilft Ingenieuren dabei, den Zusammenhang zwischen Produktdesign, Prozesseinstellungen, Werkstoffgefüge und physikalischen Eigenschaften der 3D-gedruckten Produkte zu verstehen. Darüber hinaus sind numerische Tools äußerst effektiv für die parametrische und topologische Optimierung, wobei es darum geht, das Gewicht der Komponente zu reduzieren und die Druckzeit zu optimieren.



02 Montagegerechtes Design



03a



03b

—
02 Designphasen für einen leichten Lackmischer. Alle Steuerlufteinlässe befinden sich auf einer Seite (links).

—
03 Vergleich der inneren Kanäle.

03a Ursprüngliches Design.

03b Montagegerechtes Design.

—
04 Die Optimierungsalgorithmen lieferten verschiedene Designkonzepte.

04a Verschiedene Designkonzepte.

04b Simulation des Formfüllprozesses.

04c Gegossenes Demonstrationsmuster eines Unterarms für einen Industrieroboter.

Fallstudien von ABB

ABB hat verschiedene Engineering-Tools und numerische Simulationen in drei Fallstudien evaluiert, um festzustellen, in welchen Fällen AM-Anwendungen neben einer größeren Gestaltungsfreiheit einen besonderen Kundennutzen bieten. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die vermeintlichen Nachteile der additiven Fertigung – lange Druckzeiten und hohe Kosten – gelegt:

- Metall-3D-Druck eines komplexen Mischers für Lackierroboter
- Topologieoptimierung und sogenannte hybride Fertigung eines Demonstrationsmusters für einen Roboterarm
- AM-basierte Herstellung von Spritzgusswerkzeugen.

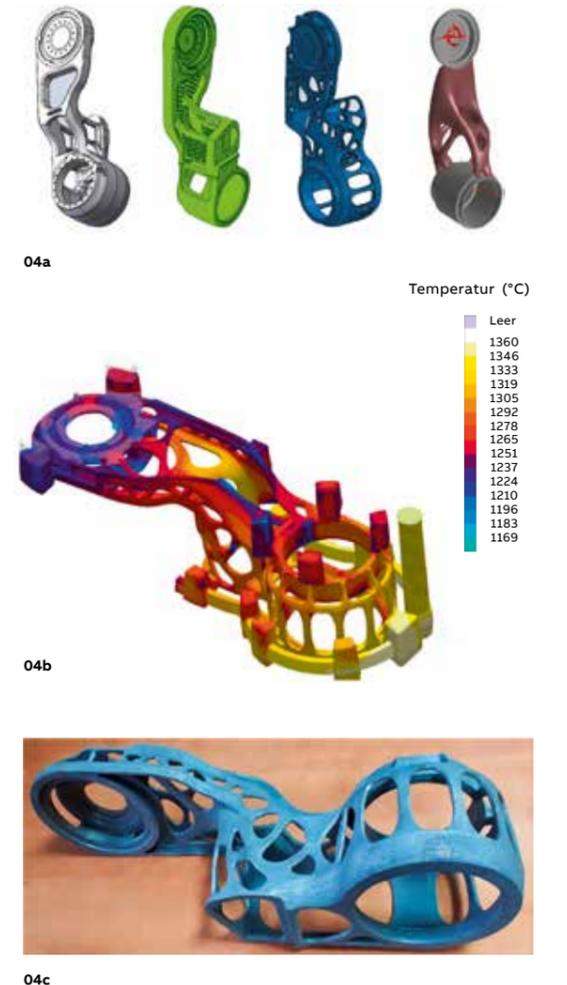
Metall-3D-Druck eines Mischers

Bei Industrierobotern wirken sich leichte Konstruktionen positiv auf die Zykluszeit, Genauigkeit, Handhabungskapazität und den Energieverbrauch des Roboters aus. So würde bei einem Lackierroboter besonders das Zerstäubmodul am Ende des Arms von einer Gewichtsreduzierung profitieren →1. Darüber hinaus könnten AM-Verfahren weitere Vorteile wie eine einfachere Montage, leichtere Reinigung und eine höhere Robustheit der Komponenten mit sich bringen.

Die Aufgabe des Mischers ist es, zwei Bestandteile des Lacks (Harz und Katalysator) unmittelbar vor der Zerstäubung zu mischen. Traditionell wird der Mischer durch konventionelle CNC-Bearbeitung aus einem Block aus rostfreiem Stahl gefertigt. Da die Innenseite des Mischers aus einem komplexen Netz aus Röhren besteht, ist die Herstellung teuer und mit langen Lieferzeiten und erheblichem Materialverlust verbunden. So werden etwa 88 % des anfänglichen Stahlblocks bei der Herstellung zerspannt.

Bei der additiven Fertigung erhöht jedes unnötige Hinzufügen von Material das Gewicht und die Kosten des fertigen Teils, d. h. es kommt darauf an, möglichst leichte Strukturen zu drucken. Eine Gewichtsoptimierung wird für gewöhnlich durch Optimierung der Topologie erreicht. Dazu werden zunächst die Belastungen ermittelt, die im Betrieb auf die Komponenten wirken. Daraus leitet dann die Optimierungs-Engine die Dichte der einzelnen Elemente ab, die zur Gewährleistung der strukturellen Steifigkeit der jeweiligen Komponente erforderlich ist. Die daraus resultierende Dichtekarte der Komponente kann dann zur Erstellung einer typischen bionischen Struktur oder einer leichten Gitterstruktur verwendet werden.

ABB hat erfolgreich gezeigt, dass sich die additive Fertigung besonders zur Herstellung von komplexen Formen dieser Art eignet. Die leichteste Version des Mischers besitzt sowohl bionische als auch wabenförmige Merkmale →2. Das Gesamtgewicht wurde um



04c

sagenhafte 43 % reduziert, während die Funktionalität und strukturelle Steifigkeit erhalten blieben.

Jedes unnötige Hinzufügen von Material erhöht das Gewicht und die Kosten des fertigen Teils, d. h. es kommt darauf an, möglichst leichte Strukturen zu drucken.

Als Nächstes wurde der Mischer überarbeitet, um den Druckprozess zu verbessern und die CNC-Nachbearbeitung zu erleichtern. Mithilfe einer speziellen Computersoftware wurde die Ausrichtung der Komponente während des Druckvorgangs optimiert. Das Volumen der erforderlichen Stützstrukturen (d. h. Materialabfall), die Druckzeit, die Verformung, der Umfang und die Einfachheit der Nachbearbeitung sowie die Anzahl der auf eine Grundplatte passenden Teile wurden mit dem Ziel evaluiert, die Teilequalität und -kosten zu verbessern.



05

Die Druckzeit wurde um 10 % verkürzt, während das Volumen der erforderlichen Stützstrukturen um den Faktor sechs verringert werden konnte.

Später wurde das Design des Mischers modifiziert, um die Montage zu erleichtern →2. Im Gegensatz zu herkömmlichen Fertigungsverfahren, bei denen die Form innenliegender Kanäle auf gerade Löcher beschränkt ist, bietet die additive Fertigung die Möglichkeit, gekrümmte Kanäle herzustellen, die frei in der Komponente verlaufen. So konnte der Verlauf der Luftkanäle im Mischer so umgelegt werden, dass sich alle Pilotventile für die Druckluft auf derselben Seite befinden →3. Das Ergebnis ist eine einfachere Montage und eine rationellere CNC-Nachbearbeitung.

Prototypen der neuen Mischergeneration wurden mithilfe des selektiven Laserschmelzverfahrens (SLM) hergestellt, wobei eine erhebliche Gewichtsreduktion, Vereinfachung der Montage und Verringerung des Materialabfalls erreicht werden konnte. Die Lieferzeit für die Komponenten wurde von drei Monaten auf nur drei Wochen verkürzt.

Alles in allem profitieren ABB-Kunden von einem optimierten Mischerdesign, das eine Verbesserung der Roboterleistung ermöglicht.

Topologieoptimierung eines Roboterarms

Die Hauptvorteile der AM-Technologie (Designfreiheit, einfache Fertigung komplexer Teile, Drucken nach Bedarf) relativieren sich schnell, wenn es darum geht, Roboterkomponenten im 3D-Druckverfahren herzustellen (z. B. Aluminiumarme, für die nur eine begrenzte Zahl von Werkstoffen verfügbar sind, Komponenten mit geringer Größe, hohe Produktionskosten und lange Druckzeiten). Im Gegensatz dazu sind klassische Methoden wie das Gießen äußerst effizient und auf Komponenten praktisch jeder Größe anwendbar. Aus diesem Grund hat ABB die Möglichkeit einer hybriden Fertigungsstrategie untersucht. Zuerst wurde der

Unterarm eines Industrieroboters topologisch optimiert [3,4], um verschiedene Designalternativen zu erhalten →4a–4b.

Dann wurde eine Sandform im 3D-Druck hergestellt, die anschließend als Werkzeug zur Herstellung der Komponente im klassischen Gießverfahren verwendet wurde. Damit entwickelte ABB ein völlig neues Konzept für den Roboter-Unterarm, das die bisherigen Einschränkungen additiver Fertigungstechnik überwindet.

Das daraus resultierende Demonstrationsmuster →4c. ist das Ergebnis einer einzigartigen Mischung dreier unterschiedlicher Technologien: die generative Gestaltung, die Ingenieuren dabei hilft, Konzepte aus Freiformen zu entwickeln; die additive Fertigung, mit der das Modell (das Werkzeug) anstatt der eigentlichen Komponente hergestellt wird, und das Metallgießen, bei dem die Vorstellung des Konstrukteurs mithilfe einer 3D-gedruckten Form und einer festen, aber dennoch leichten Metalllegierung umgesetzt wird.

Auf diese Weise hat ABB gezeigt, dass es profitabler sein kann, ein Werkzeug mithilfe von additiven Fertigungsverfahren herzustellen und dieses dann in herkömmlichen Fertigungsprozessen einzusetzen.

AM-basierte Spritzgusswerkzeuge

Die additive Fertigungstechnik hat zur Entwicklung von 3D-Druckern mit immer höherer Auflösung, Geschwindigkeit und Präzision geführt und neue Werkstoffe für Spritzgießverfahren hervorgebracht. Infolgedessen haben sich mehrere AM-Anbieter mit dem direkten 3D-Druck von Formnestern (Kavitäten) für das Spritzgießen [5, 6] befasst, die ohne anschließende Bearbeitung in einen Formrahmen aus Metall eingesetzt werden können →5.

Die 3D-gedruckten Kavitäten aus Polymer sind preisgünstiger (für gewöhnlich 50 bis 70 %) als Metallwerkzeuge bei deutlich kürzeren Vorlaufzeiten (Tage).

Es kann profitabler sein, ein Werkzeug mithilfe von AM-Verfahren herzustellen und dann in herkömmlichen Fertigungsprozessen einzusetzen.

Leider eignen sich 3D-gedruckte Polymerformen aufgrund derzeitiger technischer Einschränkungen am besten für Spritzgießaufträge mit bis zu 100 Schüssen (je nach Materialart und Komplexität der Form). Zu den weiteren Einschränkungen

05 3D-gedruckte Polymerform, bereit für den Spritzgießprozess.

06 Vereinfachte, bei den thermischen Simulationen analysierte 2D-Geometrie. Das Berechnungsmodell basiert auf Symmetrie.

07 Vergleich der Zykluszeiten für verschiedene Gießformkonzepte.

Literaturhinweise

[1] Wohlers Report 2016: „3D Printing and Additive Manufacturing – State of the Industry“. Wohlers Associates Inc., USA, 2016.

[2] B. Stucker: „Physics-Based Simulation: Accelerating Innovation in Additive Manufacturing“, 12th Intl. Conf. Additive Manufacturing and 3D Printing. Nottingham, UK, 2017.

[3] Y. Saadlaoui et al. (2017): „Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes“. Journal of Manufacturing Systems Vol. 43, Part 1, S. 178–186.

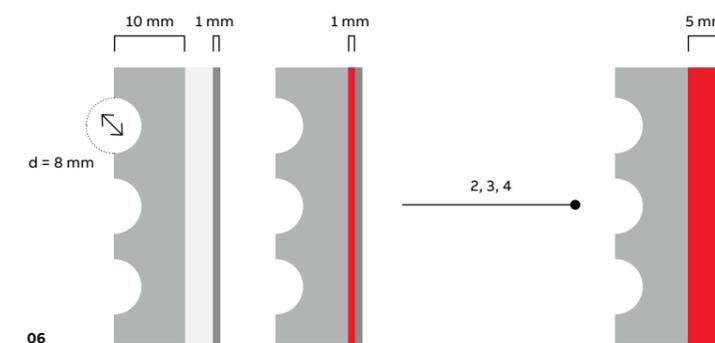
[4] M. K. Thompson et al. (2016): „Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints“. Manufacturing Technology Vol. 65, Issue 2, S. 737–760.

[5] R. A. Harris et al. (2002): „Selection of mould design variables in direct stereolithography injection mould tooling“. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 216, No. B4, S. 499–505.

[6] G. V. Salmoria et al. (2008): „Rapid manufacturing and rapid tooling of polymer miniaturized parts using Stereolithography“. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 30, No. 1, S. 7–10.

gehören die Auswahl von Thermoplasten, die verwendet werden können, hohe Rohmaterialkosten für den 3D-Druck und lange Zykluszeiten beim Spritzgießen (15- bis 20-mal länger als mit Metallkavitäten) aufgrund der geringen thermischen Leitfähigkeit der für den 3D-Druck verwendeten Polymere.

Um diese Einschränkungen zu überwinden, hat ABB einen völlig neuen Ansatz entwickelt, bei dem im 3D-Druck lediglich eine Schale hergestellt wird, die anschließend mit einem Werkstoff mit höherer thermischer Leitfähigkeit gefüllt wird. Die Dicke der 3D-gedruckten Schale ist der zentrale Aspekt bei der Konstruktion, wenn es darum geht, die widersprüchlichen Anforderungen unter einen Hut zu bekommen: Eine geringe Dicke bedeutet eine kurze Zykluszeit, wohingegen eine größere Dicke für eine gute mechanische Stabilität sorgt. Der Einfluss der Schalendicke auf die Zykluszeit (Kühleffizienz) wurde durch Strömungsberechnungen mit ANSYS Fluent untersucht →6. Dabei wurde die Dicke der Schalenwand (von 1 bis 5 mm) und des massiven Teils (Polymer und Stahl) betrachtet. Die berechneten Oberflächentemperaturen der Kavität für analysierte Szenarien während des ersten Zyklus und während stabiler Zyklen →7 zeigen, welchen extremen Einfluss die Schalendicke schon beim ersten Zyklus auf die Kühleffizienz hat. Nach Erreichen stabiler Prozessbedingungen ist die Zykluszeit für massive Polymerkavitäten etwa 15-mal länger als bei Kavitäten aus Stahl. Dank dieser wichtigen Erkenntnis und eines optimierten Designs konnte die Kühlzeit um den Faktor vier bis sieben verkürzt werden. Daraus ergibt sich eine Zykluszeit, die nur zwei- bis dreimal länger ist als bei Stahlformen – ein hervorragendes Ergebnis.



06

Fallstudie	1. Zyklus (s)	Stabiler Zyklus (s)
Stahlform	10	11,5
Vollständig 3D-gedrucktes Modell & 5 mm Schale	44	171
2 mm Polymerschale & Füllmaterial mit höherer Wärmeleitfähigkeit	33	40

07

Ausblick

Die additive Fertigung und ihre technologischen Vorzüge verändern die Art und Weise, wie Produkte gestaltet und hergestellt werden können. Dabei ist die Technologie ausgereift genug, um in puncto Werkstoffeigenschaften, geometrische Abmessungen, Material- und Prozesskosten mit traditionellen subtraktiven Fertigungsprozessen bzw. Produktionstechnologien wie dem Spritzgießen zu konkurrieren. Es ist davon auszugehen, dass die Entwickler und Anbieter von Simulationssoftware, AM-Maschinen und Werkstoffen weiter daran arbeiten werden, ihren Kunden noch benutzerfreundlichere automatisierte Lösungen anzubieten. Kunden werden von einer größeren geometrischen Freiheit und Flexibilität profitieren, was wiederum leichte Strukturen und hervorragende mechanische Eigenschaften bei der funktionalen Integration und Konsolidierung von Komponenten ermöglicht.

Die additive Fertigung und ihre technologischen Vorzüge verändern die Art und Weise, wie Produkte gestaltet und hergestellt werden können.

Ein weiterer Trend, den ABB zurzeit untersucht, sind numerische Multiphysik-Simulationen des eigentlichen 3D-Druckvorgangs einschließlich der thermomechanischen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Partikeln und Schichten des gedruckten Objekts (aus Metall- und Polymerpulver). Die Ergebnisse der Simulationen werden präsentiert, sobald die entsprechenden Tests und umfangreichen Verifizierungsverfahren abgeschlossen sind. •

DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

Digitale Avatare für Antriebsstränge

Ein digitaler Zwilling ist eine nahezu identische Kopie eines physischen Geräts. Um die Möglichkeiten der Digitalisierung jedoch voll auszuschöpfen, ist ein digitales Abbild wünschenswert, das mehr kann als das physische Original. Ein solcher „digitaler Avatar“ interagiert auf eine Art und Weise mit der digitalen Welt, wie es sein physisches Gegenstück nicht kann.

—
Piotr Lipnicki
Daniel Lewandowski
 ABB Corporate Research
 Krakau, Polen

piotr.lipnicki@pl.abb.com
 daniel.lewandowski@pl.abb.com

—
Diego Pareschi
 ABB BV
 Rotterdam, Niederlande

diego.pareschi@nl.abb.com

—
Enrico Ragaini
Gabriele Perrone
 ABB S.p.A.
 Bergamo, Italien

enrico.ragaini@it.abb.com
 gabriele.perrone@it.abb.com

Die moderne Industrie hat mit einer Vielzahl von Herausforderungen zu kämpfen. Vor allem geht es darum, eine hohe operative Leistungsfähigkeit zu sichern, die Effizienz zu steigern und die Profitabilität zu verbessern. Kurzum, es muss mehr mit weniger Aufwand und größerem Profit produziert werden – und das auf umweltfreundliche Weise.

Eine Möglichkeit, diese Ziele zu erreichen, besteht darin, das Potenzial der Digitalisierung zu nutzen – z. B. durch die Erstellung „digitaler Zwillinge“. Ein digitaler Zwilling ist eine Mischung aus Daten und Intelligenz, die die Anordnung, den Kontext und die Natur eines physischen Systems repräsentiert – einschließlich einer Schnittstelle, die Erkenntnisse über den vergangenen und gegenwärtigen Betrieb vermittelt und Prognosen ermöglicht.

—
 Um die Möglichkeiten der Digitalisierung voll auszuschöpfen, ist ein digitales Abbild erforderlich, das zusätzliche Fähigkeiten bietet.

Doch das Konzept des digitalen Zwillings hat seine Grenzen. Die Herausforderung besteht darin, die physische Version einer Instanz noch authentischer in der digitalen Welt zu repräsentieren. Es stehen viel mehr Informationen

zur Verfügung als die, die direkt mit dem jeweiligen Gerät, System, Modell oder der Anlage verbunden sind. Bei der Interaktion mit dem Nutzer wird z. B. eine Vielzahl digitaler Informationen verschiedener Art erzeugt und genutzt: Echtzeitmessungen, Modelle, 3D-Grafiken, Benutzerhandbücher, Bedienernotizen, Serviceanweisungen – dies sind alle Aspekte des Objekts, die ebenfalls wichtig sein könnten. Um die Möglichkeiten der Digitalisierung voll auszuschöpfen, ist ein digitales Abbild erforderlich, das zusätzliche Fähigkeiten zu denen des physischen Objekts bietet. Dies ist der digitale Avatar. Ein digitaler Avatar ist ein digitales Objekt, das in der digitalen Welt beheimatet ist und das physische Objekt repräsentiert, aber in der Lage ist, auf eine Art und Weise in der digitalen Welt zu interagieren, wie es sein physisches Gegenstück nicht kann →1.

Die Daten, aus denen ein digitaler Avatar besteht, können als ein bestimmtes System, z. B. ein digitaler Antriebsstrang, gruppiert und klassiert werden.

Digitaler Antriebsstrang

Ein digitaler Antriebsstrang (ABB-Produktname Digital Powertrain) ist eine Suite von Lösungen zur Digitalisierung, z. B. von Verdichtersystemen, die in der Öl-, Gas- und chemischen Industrie eine entscheidende Rolle spielen. Das Konzept des digitalen Antriebsstrangs umfasst Geräte, Software und Services. Digital-Powertrain-Lösungen nutzen die Vorteile der Konnektivität und Datenanalyse in Kombination mit Branchenwissen. Jeder physische Antriebsstrang einschließlich

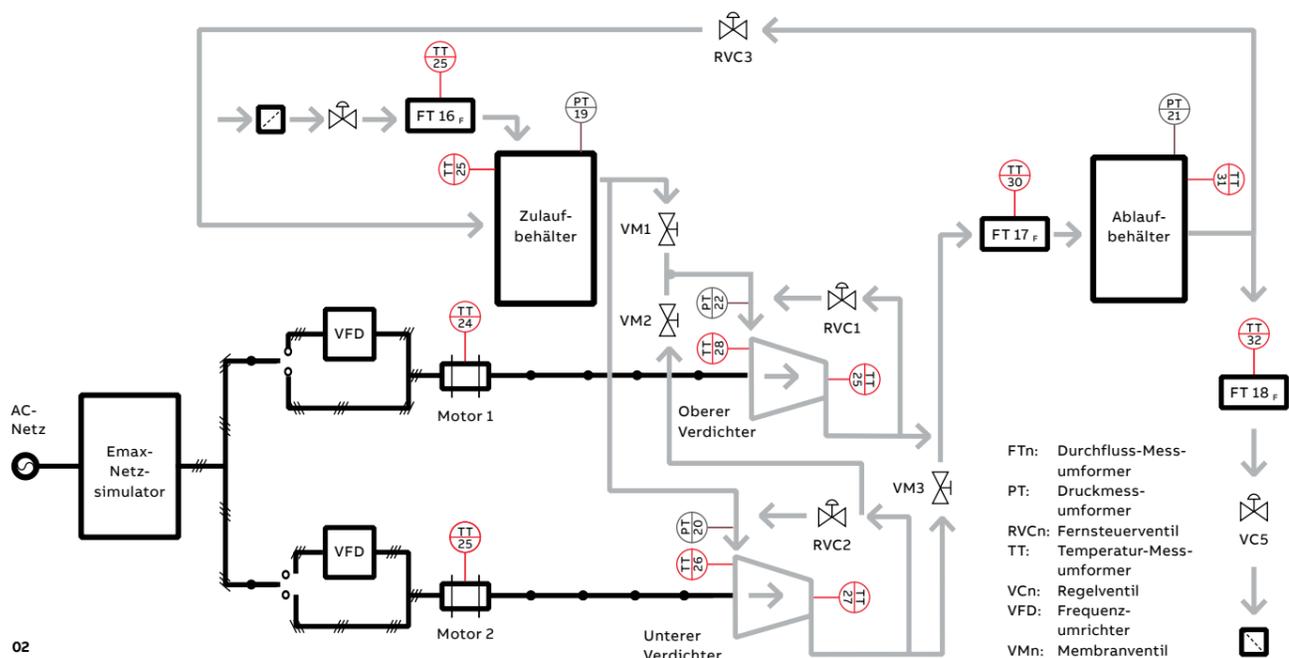


01

—
 01 Verdichter gehören zu den kritischen Komponenten in Öl-, Gas- und chemischen Prozessen. Durch Erweiterung des digitalen Zwillingskonzepts zum „digitalen Avatar“ eines Verdichterantriebsstrangs kann ein umfassendes digitales Gegenstück erstellt werden, das die Erfahrungen mit Verdichtern in der realen Welt besser widerspiegelt.

seiner Komponenten wie Frequenzumrichter, Motoren, Lager und Zielanwendungen wie Pumpen und Verdichter kann Daten an die Cloud senden, die dem Bedienpersonal dann auf einem einfachen Dashboard angezeigt werden. Auf einer weiteren Stufe können Zustandsüberwachungs- und vorausschauende Wartungsservices genutzt werden, um Support- oder Reparaturempfehlungen auf Basis der fortschreitenden Beanspruchung und des tatsächlichen Verschleißes abzugeben.

—
 Das Konzept des digitalen Antriebsstrangs umfasst Geräte, Software und Services.



02

ORKAN

Als eines der führenden Unternehmen auf dem Gebiet der digitalen und technologischen Innovation entwickelt ABB intelligente Konzepte, die durch Designreviews, Simulationen mit fortschrittlichen Modellen und umfassende Experimente unter streng kontrollierten Bedingungen – insbesondere in relativ kleinen Prüfanordnungen – verifiziert werden. Eine solche Anlage ist der Verdichterprüfstand ORKAN →2. ORKAN ermöglicht die Evaluation von Konzepten verschiedener Art im Zusammenhang mit digitalen Antriebssträngen →3.

Der Prüfstand wird z. B. genutzt, um den Einfluss von elektrischen Störungen auf die Prozessstabilität zu untersuchen und Lösungen zum Schutz gegen solche Störungen zu entwickeln. In den vergangenen Jahren wurde der Prüfstand erfolgreich zur Entwicklung und zum Testen verschiedener Lösungen zur Behandlung von Netzstörungen und elektrischen und mechanischen Problemen genutzt. Zudem können Regelungsverfahren – z. B. zur grundlegenden Prozessregelung, Saugdruckregelung, Enddruckregelung und Pumpverhütungsregelung – auf dem Prüfstand untersucht und robuste Lösungen für betriebliche Eventualitäten entwickelt werden.

Die Ausstattung des Prüfstands umfasst ABB-Geräte wie Niederspannungs-Frequenzumrichter vom Typ ACS880 und ACS850, zwei Asynchron-

motoren, einen Controller vom Typ AC800 PEC, SPS (speicherprogrammierbare Steuerungen) vom Typ AC500 High Performance und AC500 CMS (Condition Monitoring System), einen Emax Sace-Leistungsschalter (mit zusätzlichem Raspberry Pi-Datenlogger) sowie eine Vielzahl von Durchfluss-, Druck- und Temperatursensoren. Die Einbindung einer ABB ServicePort-Anwendung ermöglicht die Darstellung, Abfrage und Verfolgung aller wichtigen Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs), um eine maximale Leistungsfähigkeit der Verdichter und der beteiligten Prozesse sicherzustellen →4.

Der Prüfstand dient dazu, den Einfluss von elektrischen Störungen auf die Prozessstabilität zu untersuchen und entsprechende Lösungen zu entwickeln.

Fallbeispiel

Der ORKAN-Prüfstand verfügt über die grundlegenden Elemente eines digitalen Zwillings – und über zusätzliche Aspekte, die einen digitalen Avatar ausmachen: Dokumentenmanagement, Modellierung, Simulation, 3D-Darstellung, Datenmodell, Visualisierung, Modellabgleich und Analysen.

— 02 Rohrleitungs- und Instrumentierungsschema des ORKAN-Prüfstands.
— 03 Verdichterprüfstand ORKAN.

Dokumentenmanagement

Die Versionsverwaltung erfolgt mithilfe der Open-Source-Software Git. Es wird ein vollständiger Satz von Bedienungsanleitungen verwaltet, und Serviceaufzeichnungen stehen in Form von Datenprotokollen, Ereignisprotokollen und Berichten zur Verfügung.

Schwerpunkte der Modellierung sind die Zustandsüberwachung sowie das Energie- und Prozessmanagement.

Modellierung

Die Modellierung basiert auf analytischen Prozessmodellen sowie dynamischen elektrischen und mechanischen Modellen des Verdichtersystems. Die Genauigkeit der Modellierung wurde durch Simulationen und Messungen verifiziert. Der Schwerpunkt der Optimierung liegt auf der Prozessregelung mit modellprädiktiver Pumpverhütungsregelung für Verdichtersysteme – einschließlich T2S-Funktionalität (Time to Surge). Der Diagnoseteil basiert auf Algorithmen und Analysen, die sowohl die rotierenden Maschinen als auch den Prozess umfassen. Die Diagnosen sind auf verschiedenen Ebenen (vom Sensor und Überwachungsgerät bis hin zum Gateway und zur Cloud) implementiert. Schwerpunkte der Modellierung sind die Zustandsüberwachung sowie das Energie- und Prozessmanagement.

Simulationen

Der Simulationsteil besteht aus zwei Hauptelementen: der Designsimulation und der Simulation des Durchsatzes des Verdichtersystems. Erstere nutzt detaillierte Simulationsmodelle, zur Untersuchung von Sollwertveränderungen, Störungen, Fehlerarten und Geräuschen. Letztere ermöglicht die Simulation und Evaluierung einer Durchsatzoptimierung für Verdichtersysteme (Lastteilung, Serienbetrieb, Pumpverhütung usw.) im normalen Betrieb und bei verschiedenen Fehlerzuständen. Die Simulationen werden anschließend durch Versuche verifiziert.

3D-Darstellung

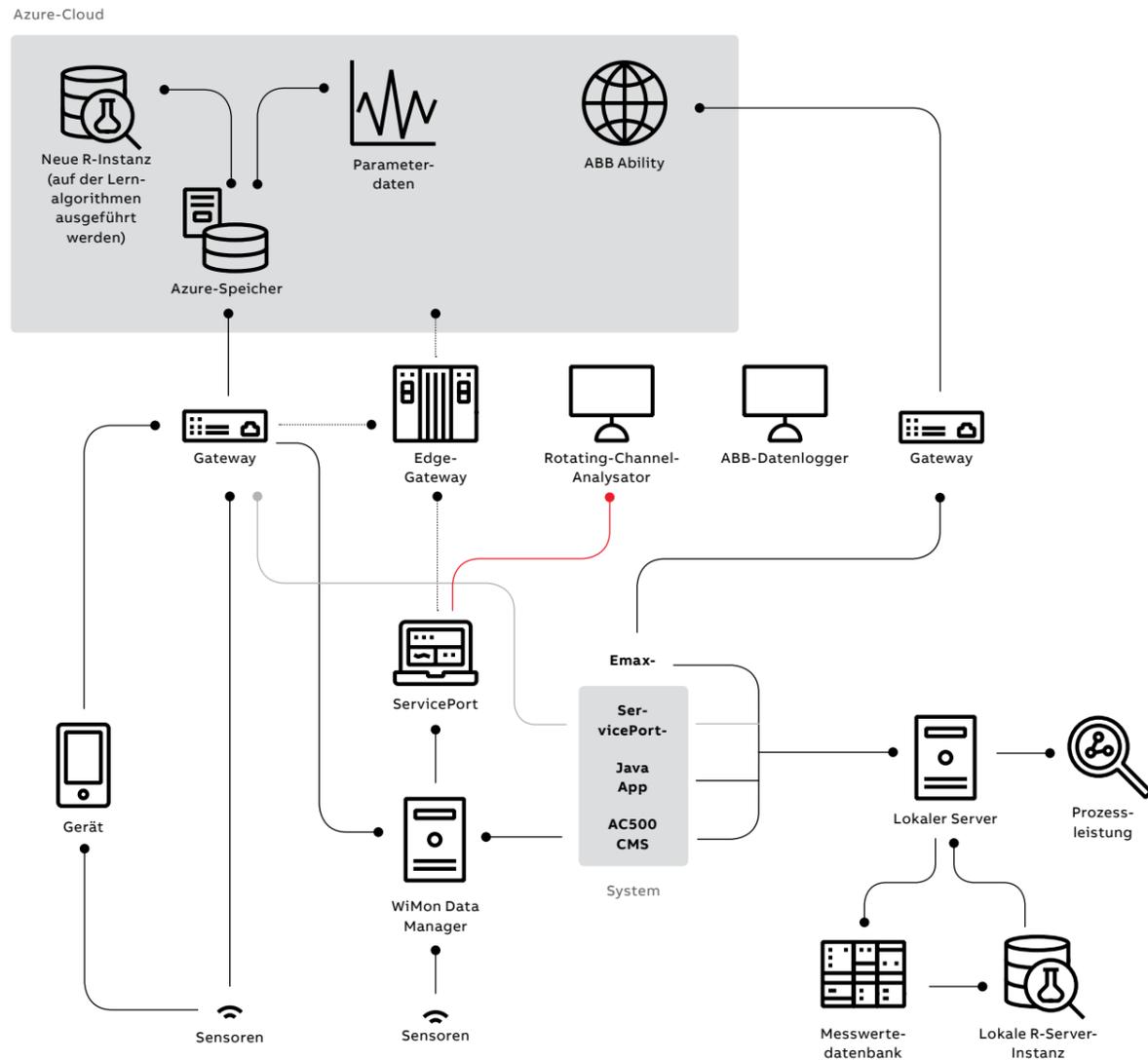
Die 3D-Darstellung basiert auf Konstruktionszeichnungen von ABB-eigenen und Drittanbieterkomponenten.

Datenmodell

Das Datenmodell nutzt Engineering-Daten zu Sensoren, Mess- und Regeleinrichtungen sowie anderen Geräten bis hin zum Gateway und zur Cloud. Das Datenmodell ist für verschiedene Aufgaben wie Regelung, Verarbeitung, Diagnose, Zustandsüberwachung und Analysen ausgelegt. Als Eingabedaten dienen Produktionsdaten (Durchfluss, Druck usw.) und Betriebsdaten wie Verfügbarkeit, Performance, Qualität, Gesamtanlageneffektivität (OEE) usw. Die verwendeten Servicedaten stammen aus verschiedenen Quellen wie ServicePort, Java-Apps, Emax, der AC500 CMS, der ABB Niederspannungs-Verteilanlage usw. →5,6.



03



04

Visualisierung

Die digitale Darstellung erfolgt in Form von Diagrammen, Kennlinien und Zeitreihendaten, die durch die Simulationen generiert werden.

Die Cloud-Architektur wurde zusammen mit Microsoft entwickelt, um ein Höchstmaß an Performance, Zuverlässigkeit und Sicherheit zu gewährleisten.

Die Anzeige des Betriebszustands basiert auf dem Echtzeit-Datenstrom (von der Bedienstation) und hat eine ähnliche Form. Der Funktionszustand wird anhand von Alarmen und Meldungen (auf der lokalen App, dem Gateway oder der Cloud) angezeigt.

Modellabgleich

Der Abgleich der digitalen Simulationsdaten mit den realen Messungen erfolgt auf der Grundlage einer Echtzeit-Evaluierung in Bezug auf die Regelung, den Prozess, die Diagnose und die Überwachung.

Analysen

Der Schwerpunkt der Analysen ist die Verifizierung von Algorithmen auf der Basis von Modellen, Simulationen und Messungen. Die Analysen generieren eine Reihe von KPIs, darunter betriebliche KPIs auf Basis der prozesstechnischen, elektrischen, mechanischen und regelungstechnischen Daten und KPIs zum Betriebsmittelzustand auf der Basis detaillierter Service-/Diagnosedaten – implementiert im neuen ServicePort Rotating Equipment Analyzer Channel.

Alle oben genannten Punkte können in eine mit ORKAN verbundene Cloud-Plattform wie ABB Ability™ Electrical Distribution Control System (EDCS), eine cloudbasierte Plattform

zur Überwachung, Optimierung und Steuerung elektrischer Systeme, integriert werden. EDCS ist Teil des ABB Ability-Portfolios und basiert auf einer modernen Cloud-Architektur zur Erfassung, Verarbeitung und Speicherung von Daten, die in Zusammenarbeit mit Microsoft entwickelt wurde, um ein Höchstmaß an Performance, Zuverlässigkeit und Sicherheit zu gewährleisten.

Der digitale Avatar eröffnet neue Felder

Digitale Zwillinge sind insofern begrenzt, als dass sie „nur“ ein digitales Abbild eines Objekts und seines Echtzeit-Verhaltens sind. Der digitale Avatar, wie er hier am Beispiel des ORKAN-Prüfstands beschrieben wurde, ist hingegen ein größeres Konzept. Digitale Avatare sollten nicht nur so interagieren können wie digitale Zwillinge, sondern auf eine erweiterte Weise, mit einer breiteren Palette von digitalen Partnern und unter verschiedensten Umständen. Im Prinzip geht es darum, den analytischen Algorithmen der digitalen Avatare so viele Informationen und so viele Instanzen wie möglich verfügbar zu machen.

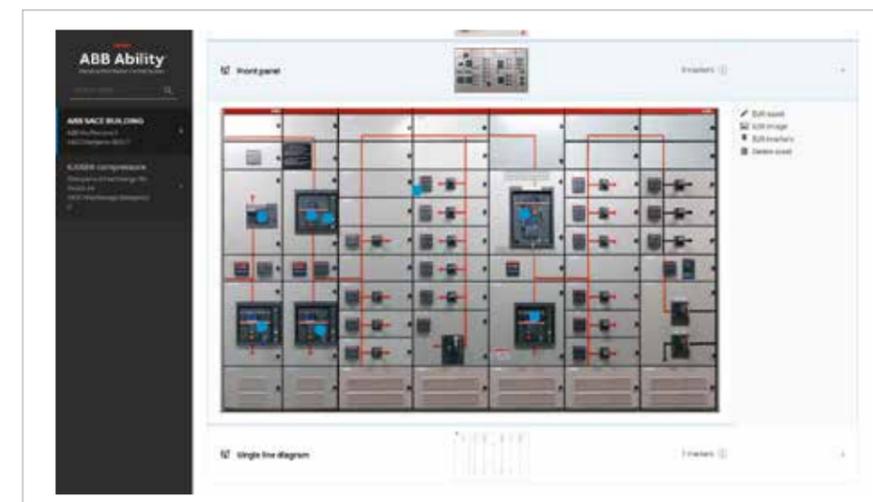
Das Konzept eröffnet neue Anwendungsfelder für praktisch umsetzbare Erkenntnisse, Analysen und informierte Entscheidungen.

Der ORKAN-Prüfstand dient dazu, den digitalen Antriebsstrang eines Verdichters für Öl- und Gasanwendungen zu veranschaulichen. Doch in dieser einzigartigen Testumgebung kommen so viele Produkte und Technologien von ABB zum Einsatz, dass sie als generelle Prüfumgebung für Digitalisierungskonzepte gesehen werden kann. Das Konzept des digitalen Avatars eröffnet viele neue Anwendungsfelder für praktisch umsetzbare Informationen, Analysen und informierte Entscheidungen und weist der modernen Industrie den Weg zur Erfüllung immer anspruchsvollerer Aufgaben.

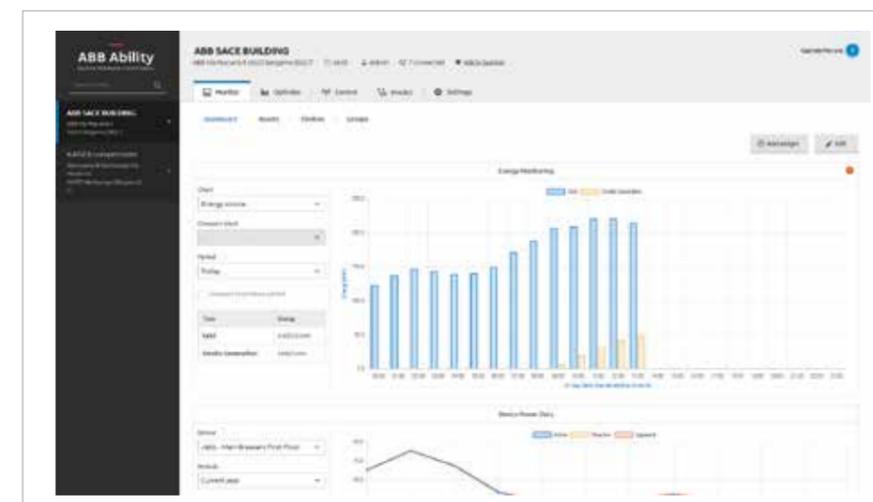
04 Funktionsübersicht des Verdichterprüfstands ORKAN.

05 ABB Electrical Distribution Control System – Ansicht 1.

06 ABB Electrical Distribution Control System – Ansicht 2.



05

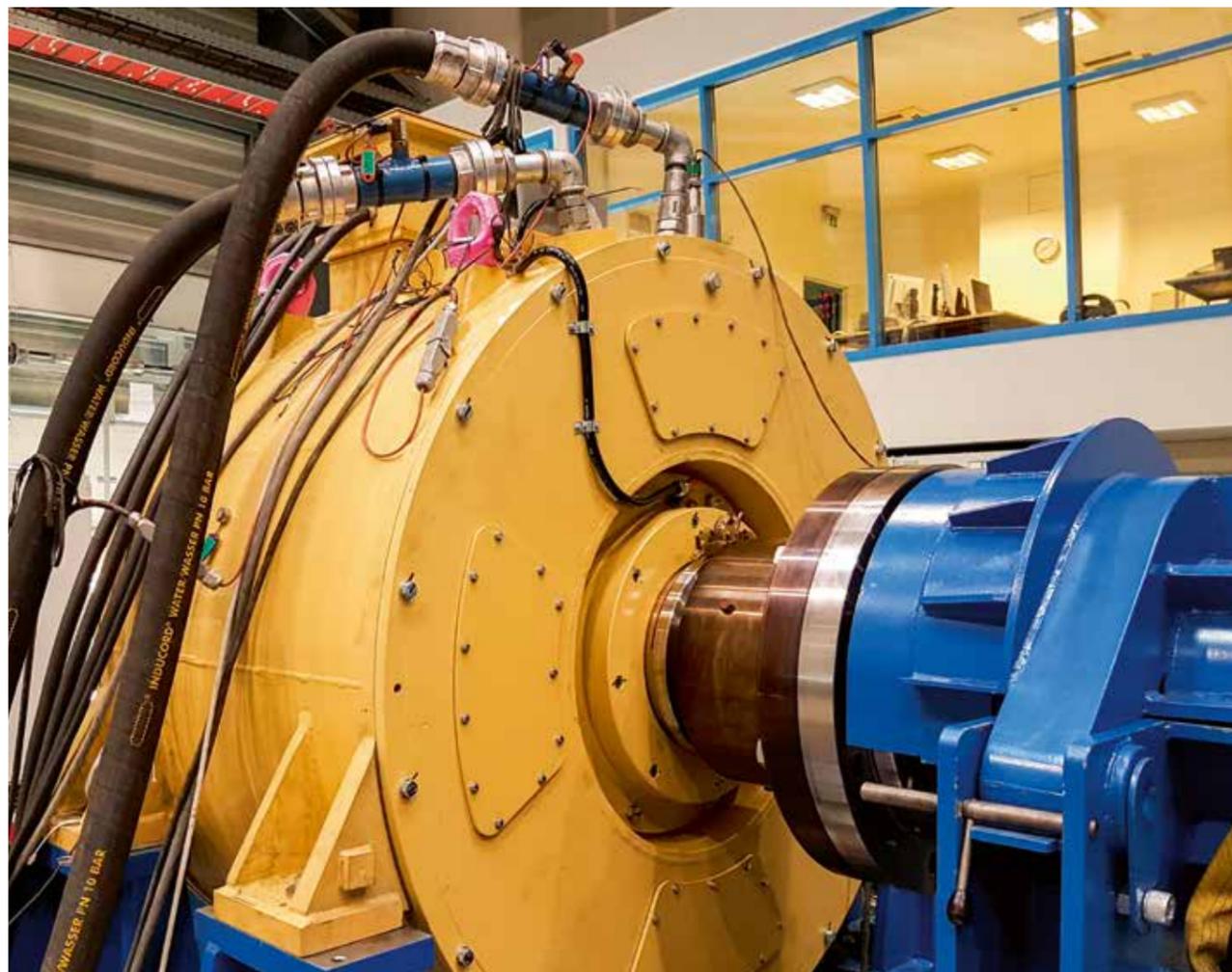


06

DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

Neue Wege bei der Zustandsüberwachung rotierender Maschinen

Normalerweise werden nur die wichtigsten rotierenden Maschinen in einer Anlage zu Wartungszwecken kontinuierlich überwacht. In einer Pilotanlage hat ABB nun auch weniger kritische Maschinen mit einer Lösung ausgestattet, die auf kostengünstigen Sensoren und maschinellem Lernen basiert und eine kostengünstige, aber fortschrittliche Überwachung ermöglicht.



01 Die kostengünstige Ausweitung der Zustandsüberwachung und vorausschauenden Wartung von rotierenden Maschinen auf weniger kritische Einheiten ermöglicht Kunden einen effizienteren Betrieb ihrer Anlagen.

02 Zustandsüberwachungsarchitektur für nicht-kritische rotierende Maschinen. Einige Aspekte der Architektur können je nach Anlage variieren (z. B. verwenden nicht alle Anlagen WirelessHART- oder Bluetooth-Verbindungen).

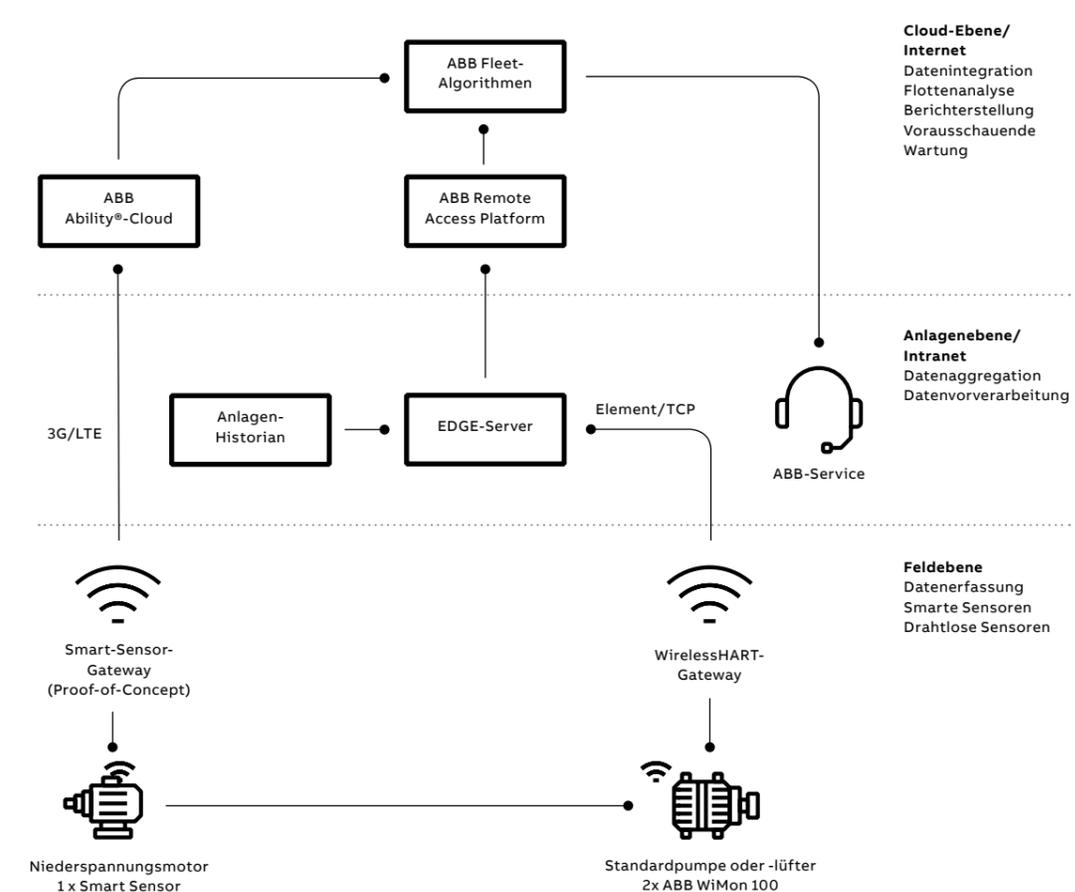
Ralf Gitzel
Benedikt Schmidt
Arzam Kotriwala
Ido Amihai
Guruprasad Sosale
 ABB Corporate Research
 Ladenburg, Deutschland
 ralf.gitzel@de.abb.com
 benedikt.schmidt@de.abb.com
 arzam.kotriwala@de.abb.com
 ido.amihai@de.abb.com
 guruprasad.sosale@de.abb.com

James Ottewill
 ABB Corporate Research
 Krakau, Polen
 james.ottewill@pl.abb.com

Marco Heese
 ABB Automation GmbH
 Mannheim, Deutschland
 marco.heese@de.abb.com

Diego Pareschi
 ABB B.V.
 Rijswijk, Niederlande
 diego.pareschi@nl.abb.com

Subanatarajan Subbiah
 Ehemaliger ABB-Mitarbeiter



02

In einer typischen Industrieanlage werden normalerweise nur die wichtigsten rotierenden Maschinen einer Zustandsüberwachung und vorausschauenden Wartung unterzogen. Weniger kritische Betriebsmittel werden aus Kostengründen häufig nur so gut es geht analysiert.

Ein frühzeitiges Eingreifen, das die Notwendigkeit einer korrektiven Wartung reduziert, ist kostengünstiger als der Weiterbetrieb bis zum Ausfall.

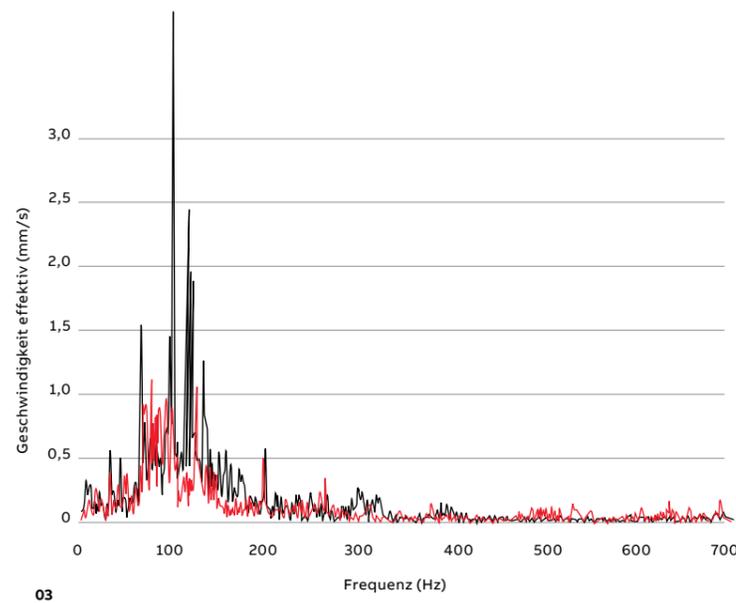
Um zu untersuchen, wie eine Überwachung, Diagnose und Ausfallvorhersage für weniger kritische, aber vielfach genutzte rotierende Maschinen wie Motoren oder Pumpen realisiert werden kann, hat ABB eine 30-monatige Studie an einer Pilotanlage bei einem Kunden durchgeführt, die mit kostengünstiger Sensortechnik und einer Software mit maschinellen Lernfähigkeiten wurde,

die mit Zustandsindikatoren (Key Condition Indicators, KCI) arbeitet →1. Hierzu wurden mehrmals am Tag Vibrationsdaten von insgesamt 30 Pumpen erfasst. Die relevanten Daten wurden von einem Netz aus IoT-Geräten (Internet of Things) erfasst und anschließend analysiert.

Hintergrund und Motivation

Die Überwachung des Zustands von industriellen Betriebsmitteln wie Motoren oder Pumpen kann dabei helfen, kritische Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und ungeplante Stillstände oder Schäden zu vermeiden. Ein frühzeitiges Eingreifen, das die Notwendigkeit einer Instandsetzung reduziert, ist im Endeffekt kostengünstiger, als eine Maschine bis zum Ausfall einfach weiter zu betreiben. Aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten werden solche Zustandsüberwachungssysteme zurzeit jedoch vorwiegend für kritische Betriebsmittel eingesetzt.

Eine typische Prozessanlage – z. B. im Bereich Chemie oder Pharma – enthält eine Vielzahl von nicht-kritischen Motoren, die Pumpen antreiben. Obwohl hier die Ausfallkosten erheblich geringer sind als bei kritische Maschinen, hätte ein kostengünstiges



03

System zur frühzeitigen Fehlererkennung Vorteile. So können durch die frühzeitige Erkennung von Fehlern nicht nur weitere Schäden verhindert werden, eine rechtzeitige Diagnose von Problemen hilft auch dabei, die zur Reparatur des Betriebsmittels erforderliche Zeit zu verkürzen.

Architektur der Gesamtlösung

Die Zustandsüberwachungsarchitektur für die nicht-kritischen Maschinen in der Pilotstudie umfasst drei Ebenen →2:

- Feldebene – mit den Sensoren, die zur Erfassung der Daten mit den Betriebsmitteln verbunden sind
- Anlagenebene - schließt die anlagenweite Aggregation und Aufbereitung der Sensordaten ein
- Ebene der Datenintegrationsplattform (z. B. der Cloud oder einer anderen Plattform) – hier erfolgt die Analyse der Flottendaten z. B. zu Benchmarking-Zwecken, für die vorausschauende Wartung und die Berichtserstellung

Ebene 1: Feldebene

Die Feldebene umfasst die sensorbasierte Datenerfassung einschließlich der Übertragung der erfassten Daten. Betrachtet werden die Standardkomponenten der rotierenden Ausrüstung einer kommerziellen Prozessanlage wie Niederspannungsmotoren und Pumpen. Für die Studie wurden alle beteiligten Komponenten zur Erfassung von Vibrationsdaten mit einem kommerziellen drahtlosen Zustandsüberwachungssystem vom Typ ABB WiMon 100 ausgerüstet. Das WiMon-System besteht aus einem Vibrationssensor (Beschleunigungsmesser) zur Erfassung der Vibrationen und einem Temperatursensor zur Erfassung der Oberflächentemperatur der rotierenden Maschine. WiMon-Systeme nutzen eine Meshed-Network-Technologie,

was die Datenübertragung in der Anlage vereinfacht. Darüber hinaus wurden die Niederspannungsmotoren mit einem ABB Ability™ Smart Sensor ausgestattet, der herkömmliche Motoren in intelligente, drahtlos vernetzte Geräte verwandelt.

Die Datenerfassung im WiMon-System kann entsprechend den Anforderungen des Nutzers konfiguriert werden. Typischerweise werden stündlich ein aggregierter Wert der effektiven Geschwindigkeit in mm/s und die tatsächliche Oberflächentemperatur in °C als Zeitreihendaten gespeichert. Für eine detaillierte Vibrationsanalyse wird alle sechs Stunden das Rohsignal vom Beschleunigungsmesser über eine Abtastzeit von 700 ms erfasst und eine schnelle Fourier-Transformation des erfassten Rohsignals berechnet. Aus dem daraus resultierenden Frequenzspektrum können einzelne Komponenten des Vibrationssignals bei bestimmten Frequenzen extrahiert und weiter analysiert werden.

Ebene 2: Anlagenebene

Das vom WiMon-System gebildete Meshed Network ist mit einem WirelessHART-Gateway verbunden. Das Gateway verbindet die Sensordatenerfassung mit dem Anlagennetzwerk, wodurch die Daten für verschiedene Analysen auf Anlagenebene zur Verfügung stehen. In der realisierten Architektur werden die erfassten Signaldaten im Prozessdatenspeicher (Historian) der Anlage gespeichert und im in der Anlage installierten ABB Edge-Server verarbeitet.

Ebene 3: Datenintegrationsplattform

Die ABB Remote Access Plattform ermöglicht die Übertragung der Signaldaten auf die Datenintegrationsplattform. Ein bedeutender Vorteil dieser Plattform – neben ihrer bemerkenswerten Rechenleistung – ist die Möglichkeit zur Erfassung von Daten aus mehreren Anlagen.

Sind mehrere Anlagen angebunden, können Flottendatenanalysen durchgeführt werden, um verschiedene Standorte und Regionen zu vergleichen.

Sind mehrere Anlagen angebunden, können auf der Plattform Flottendatenanalysen durchgeführt werden, um verschiedene Standorte und Regionen zu bewerten und zu vergleichen. Ein Zustandsüberwachungsalgorithmus ermöglicht die Verarbeitung aller erfassten Daten und erlaubt den Fernzugriff auf die Analyseergebnisse von verschiedenen Standorten aus.

03 Beispiel für das Frequenzspektrum einer normalen und einer beschädigten Pumpe.

04 Das Konzept des prädiktiven Modellierungsansatzes.

Diagnose: Analysen und Zustandsindikatoren

Der Nutzen eines Zustandsüberwachungssystems hängt von seiner Fähigkeit ab, dem Nutzer präzise, aussagekräftige und praktisch umsetzbare Informationen zu liefern. Aus Vibrationsdaten lassen sich bestimmte Kennzahlen berechnen, die einem Wartungsmanager dabei helfen, geeignete Maßnahmen zu bestimmen, um eine weitere Verschlechterung des Zustands eines Betriebsmittels zu verhindern. So zeigt sich eine Unwucht in einer rotierenden Maschine z. B. in einer erhöhten Vibration bei der Drehfrequenz. In dem hier beschriebenen Szenario werden Daten zum Frequenzspektrum an eigens von ABB entwickelte Algorithmen übergeben, um KICs für verschiedene Fehlerarten (z. B. Lagerfehler oder Kavitation) zu berechnen, die an einer rotierenden Maschine auftreten können →3.

Ein KCI ist ein Zahlenwert, der den Schweregrad einer festgestellten Fehlerart angibt. Folgende KICs können zur Überwachung mithilfe von Vibrationsdaten ermittelt werden:

- Schaufelprobleme: Bei der Überwachung von Pumpen weisen bestimmte Spitzen im Frequenzspektrum auf Schäden an den Schaufeln der Pumpe hin. Dieser KCI gibt an, wie ausgeprägt diese kritischen Spitzen sind.
- Strömungsturbulenzen: Dieser KCI weist auf Unregelmäßigkeiten in der Flüssigkeitsströmung durch eine Pumpe hin. Turbulenzen können selbst das Problem oder ein Anzeichen für Probleme sein.
- Spiel: Bei rotierenden Maschinen wird die zentrale Welle häufig von den Lagern in Position gehalten, damit sich die Drehachse nicht verändert. Übermäßiges Spiel, das typischerweise durch Lagerverschleiß verursacht wird, führt zu einer horizontalen und vertikalen Bewegung der Welle, was wiederum schnell weitere Schäden nach sich ziehen kann. Dieser KCI gibt an, ob und in welchem Ausmaß die Maschine von diesem Problem betroffen ist.
- Versatz: Bei rotierenden Maschinen müssen alle Komponenten fluchtend ausgerichtet sein. Durch Transportschäden oder Unregelmäßigkeiten beim Betrieb kann es zu Abweichungen von der idealen Ausrichtung kommen. Wie übermäßiges Spiel kann auch Versatz zu Folgeschäden sowie zu einer reduzierten Leistungsfähigkeit führen.
- Unwucht: Idealerweise sind alle rotierenden Elemente einer Maschine ausgewuchtet, d. h. deren Masse ist in allen Richtungen gleichmäßig verteilt. Zu einer Unwucht kommt es z. B., wenn am Laufrad einer Pumpe an einer Schaufel ein Stück Material klebt. Dies sorgt dafür, dass eine zusätzliche Kraft auf die Lager wirkt.
- Kavitation: Kavitation ist ein bekanntes Problem im Zusammenhang mit Pumpen. Werden auf eine Flüssigkeit Kräfte ausgeübt, sodass es zu schnellen Druckveränderungen kommt, können sich kleine Niederdruckblasen bilden. Aufgrund

des höheren Drucks um sie herum können diese implodieren und die Pumpe beschädigen. Dieser KCI zeigt das Auftreten solcher kavitationsbedingten Implosionen an.

Zustandsvorhersage durch maschinelles Lernen

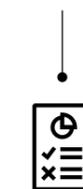
Um den zukünftigen Funktionszustand der Betriebsmittel vorherzusagen, wurde ein neuronales Netz als maschinelles Lernmodell trainiert. Die Vorhersage bzw. Prognose basiert auf KICs und anderen Informationen zum jeweiligen Betriebsmittel und deren Veränderungen im Laufe der Zeit. Ausgehend von den bisherigen KCI-Werten

Der Nutzen eines Zustandsüberwachungssystems hängt von seiner Fähigkeit ab, präzise, aussagekräftige und praktisch umsetzbare Informationen zu liefern.

Ct-n, ..., Ct-1 prognostiziert das neuronale Netz die zukünftigen Werte Ct+1 und Ct+n, wobei n für das „Vorhersagefenster“ steht. Überschreitet der prognostizierte Wert eines Betriebsmittels einen bestimmten Schwellenwert, erfolgt eine Mitteilung an den verantwortlichen Asset-Manager, dass das Betriebsmittel inspiziert werden sollte →4.



Messungen vom Gerät



Datenverarbeitung und KCI-Berechnung



Modellanpassung an aktuelle Daten



04 Vorhersagen zukünftiger Daten



05



06

Der Schwellenwert für einen schlechten Betriebsmittelzustand kann entweder auf der Basis branchenüblicher Standards oder datengestützt festgelegt werden. Im zweiten Fall wird eine große Menge von KCI-Werten an ein anderes maschinelles Lernmodell übergeben, das in der

Der maschinelle Lernansatz von ABB erwies sich als äußerst effektiv bei der Vorhersage von Verschlechterungen des Funktionszustands von Betriebsmitteln.

Lage ist, die Daten auf der Grundlage dieser Werte in einzelne Klassen zu kategorisieren. Unabhängig vom Schwellenwert erwies sich der maschinelle Lernansatz von ABB als äußerst effektiv bei der Vorhersage von Verschlechterungen des Funktionszustands von Betriebsmitteln, die für diese Art von Betriebsmittel zu etwa 90 % erkannt wurden (die genauen Werte waren abhängig vom verwendeten KCI und zusätzlichen Faktoren wie der Größe des Vorhersagefensters).

einzelne Klassen zu kategorisieren. Unabhängig vom Schwellenwert erwies sich der maschinelle Lernansatz von ABB als äußerst effektiv bei der Vorhersage von Verschlechterungen des Funktionszustands von Betriebsmitteln, die für diese Art von Betriebsmittel zu etwa 90 % erkannt wurden (die genauen Werte waren abhängig vom verwendeten KCI und zusätzlichen Faktoren wie der Größe des Vorhersagefensters).

Anwendungsszenarien

Auf der Basis der zuvor beschriebenen Architektur und der für die Diagnose und Prognose entwickelten Analytik wurde ein Lösungsprototyp erstellt, der Asset-Manager und Wartungspersonal gleichermaßen unterstützen soll →5–6.

Die Ergebnisse der Diagnose werden dem Nutzer als aktueller Betriebsmittelstatus dargestellt. Drei verschiedene Empfehlungen sind möglich: „Laufen lassen“, „Abwarten und beobachten“ und „Maßnahmen erforderlich“. Als prognostizierter Status ist entweder „Laufen lassen“ oder „Maßnahmen erforderlich“ möglich. Die folgenden Abschnitte beschreiben die möglichen Szenarien und zeigen, wie die entwickelte Technologie den Nutzer bei seinem weiteren Vorgehen unterstützt →7.

05 Dashboard mit einer Übersicht über die mit dem Zustandsüberwachungssystem ausgestatteten Betriebsmittel.

06 Dashboard mit ausgewählten Betriebsmittelstatus und einer Übersicht der Fehlerarten.

07 Mögliche Szenarien mit den entsprechenden Maßnahmen und dem Nutzen für den Kunden.

Szenario 1

Bei dem einfachsten Szenario, in dem das Betriebsmittel normal funktioniert und keine Schäden prognostiziert werden, lautet der aktuelle Status ebenso wie die beiden prognostizierten Status „Laufen lassen“. Es müssen keine unnötigen zeitbasierten Wartungsmaßnahmen vorgenommen werden.

Szenario 2

In diesem Szenario weist das Betriebsmittel Anzeichen eines Schadens auf, aber nicht eines bevorstehenden Ausfalls. Daher wird dem Nutzer im Feld „Aktueller Status“ empfohlen, das Betriebsmittel weiter laufen zu lassen, während die Felder für die 1- und 2-wöchige Prognose „Maßnahmen erforderlich“ zeigen. Dem Nutzer wird vorgeschlagen, die Sensordaten genau zu prüfen und geeignete Maßnahmen zu treffen. Die Diagnosealgorithmen zeigen den erkannten Schaden an. Bei einem Versatz würde das System dem Nutzer z. B. vorschlagen, eine Neuausrichtung vorzunehmen, anstatt das Betriebsmittel vollständig abzubauen. So wird der Aufwand auf wirklich erforderliche Wartungsmaßnahmen konzentriert.

Szenario 3

Bei diesem Szenario weist das Betriebsmittel Anzeichen eines erheblichen Schadens auf, die zwar nicht so gravierend sind, dass es sofort abgeschaltet werden muss, aber gravierend genug, dass sich eine Überwachung seines Zustands empfiehlt. Die Felder für die ein- und zweiwöchige Prognose zeigen „Maßnahmen erforderlich“ als Empfehlung. Dem Nutzer wird vorgeschlagen, die Sensordaten zum Betriebsmittel genau zu prüfen und geeignete Maßnahmen auf Grundlage der jeweiligen Fehlerarten zu treffen. Die Diagnosealgorithmen zeigen den erkannten Schaden an. Bei Schaufelproblemen würde das System dem Nutzer z. B. empfehlen, eine Wartung durchzuführen, bei der das Betriebsmittel evtl. abgebaut werden muss. Dies hilft dem verantwortlichen Asset-Manager dabei, rechtzeitig Ersatzteile zu beschaffen und den

Wartungsaufwand so zu koordinieren, dass die Stillstandszeit minimiert wird.

Szenario 4

In diesem Fall zeigt das Betriebsmittel Symptome eines erheblichen Schadens, der in den nächsten zwei Wochen oder später ein beträchtliches Maß erreichen könnte. Da der aktuelle Status auf keinen verheerenden Schaden schließen lässt, lautet die Empfehlung, das Betriebsmittel weiter laufen zu lassen. Die Analyse auf der Grundlage historischer und aktueller Daten führt zu der 2-wöchigen Prognose „Maßnahmen erforderlich“. Vorgeschlagen wird eine genauere Analyse der Sensordaten in Form eines Fingerprint-Reports. Dies hilft dem verantwortlichen Asset-Manager dabei, eine informierte Entscheidung über die Planung eventueller erforderlicher Wartungsmaßnahmen zu treffen.

Erkenntnisse und Ausblick

Die Entwicklung dieses Prototyps für eine vorausschauende Wartungslösung hat zu mehreren wichtigen Erkenntnissen geführt:

- Datenvorbereitung ist ein wichtiger Aspekt, der häufig nicht hinreichend berücksichtigt wird.
- Werden neue Daten periodisch von den Sensoren erfasst, ist besonders auf Datenkonsistenz zu achten, falls z. B. ein Sensor versetzt oder ersetzt wurde.
- Das Management von und der Umgang mit Live-Daten ist mit besonderen Herausforderungen verbunden.

ABB hat sich dieser Herausforderungen angenommen und durch Kombination von Branchenwissen mit maschinellen Lernverfahren eine zuverlässige und robuste Zustandsüberwachungslösung für nicht-kritische rotierende Maschinen entwickelt. Beim Einsatz der Lösung in einer realen Kundenanwendung hat sich gezeigt, dass die betreffenden KCIs für einen Zeitraum von bis zu zwei Wochen genau vorhergesagt werden konnten. •

Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Aktueller Status: Laufen lassen	Aktueller Status: Laufen lassen	Aktueller Status: Abwarten & beob.	Aktueller Status: Laufen lassen
1-wöchige Prognose: Laufen lassen	1-wöchige Prognose: Maßn. erforderl.	1-wöchige Prognose: Maßn. erforderl.	1-wöchige Prognose: Laufen lassen
2-wöchige Prognose: Laufen lassen	2-wöchige Prognose: Maßn. erforderl.	2-wöchige Prognose: Maßn. erforderl.	2-wöchige Prognose: Maßn. erforderl.
Schaufelprobleme: -	Schaufelprobleme: -	Schaufelprobleme: Erkannt	Schaufelprobleme: -
Versatz: -	Versatz: Erkannt	Versatz: -	Versatz: -
Unwucht: -	Unwucht: -	Unwucht: -	Unwucht: -
Vorgeschlagene Maßnahme Keine vorbeugende Instandhaltung am betreffenden Betriebsmittel durchführen	Vorgeschlagene Maßnahme Asset-Ansicht und KCIs zu Fehlerarten prüfen	Vorgeschlagene Maßnahme Asset-Ansicht und KCIs zu Fehlerarten prüfen	Vorgeschlagene Maßnahme ABB Fingerprint-Report anfordern Instandhaltungsmaßnahmen und -personal vorbereiten
Nutzen Spart und/oder reduziert Instandhaltungskosten	Nutzen Verhindert unerwünschte Instandhaltungsmaßnahmen (z. B. Entfernen der Pumpe zur Reparatur, nur Neuausrichtung der Maschine)	Nutzen Frühzeitiges Planen notwendiger Instandhaltung und Verhindern von Stillständen oder Totalschäden	Nutzen Frühzeitiges Planen der Instandhaltung

07

DIGITALE ZWILLINGE UND SIMULATIONEN

Untersuchung von Störlichtbögen

Störlichtbögen in Schaltanlagen sind ein seltenes, aber gefährliches Ereignis. ABB hat eine Lichtbogen-Simulationsplattform eingeführt, die drei Simulationstools für Gasströmungen beinhaltet und mit der die Störlichtbogenfestigkeit eines Produkts geprüft werden kann.

01 Die neue Störlichtbogen-Simulationsplattform von ABB bietet Konstrukteuren die notwendigen Werkzeuge, um die Auswirkungen von Lichtbögen in Schaltanlagen zu minimieren.

Lichtbögen, die unbeabsichtigt zwischen spannungsführenden Leitern in elektrischen Systemen entstehen, können hoch energetisch sein. Dabei können Plasmen mit Temperaturen von weit über 10.000 °C entstehen, die zu einer schnellen und heftigen Explosion des Gases führen →1. So setzt ein Störlichtbogen mit einem Kurzschluss-Spitzenstrom von 25 kA und einer Dauer von einer Viertelsekunde eine ähnliche Energiemenge frei wie 2 kg Dynamit [1]. Dabei wirken mechanische und thermische Belastungen, die Personen gefährden und schwere Schäden an Geräten und Gebäuden anrichten.

Durch Simulation des Temperatur- und Druckanstiegs in einem virtuellen Prototyp kann die Störlichtbogenfestigkeit eines Produkts untersucht werden.

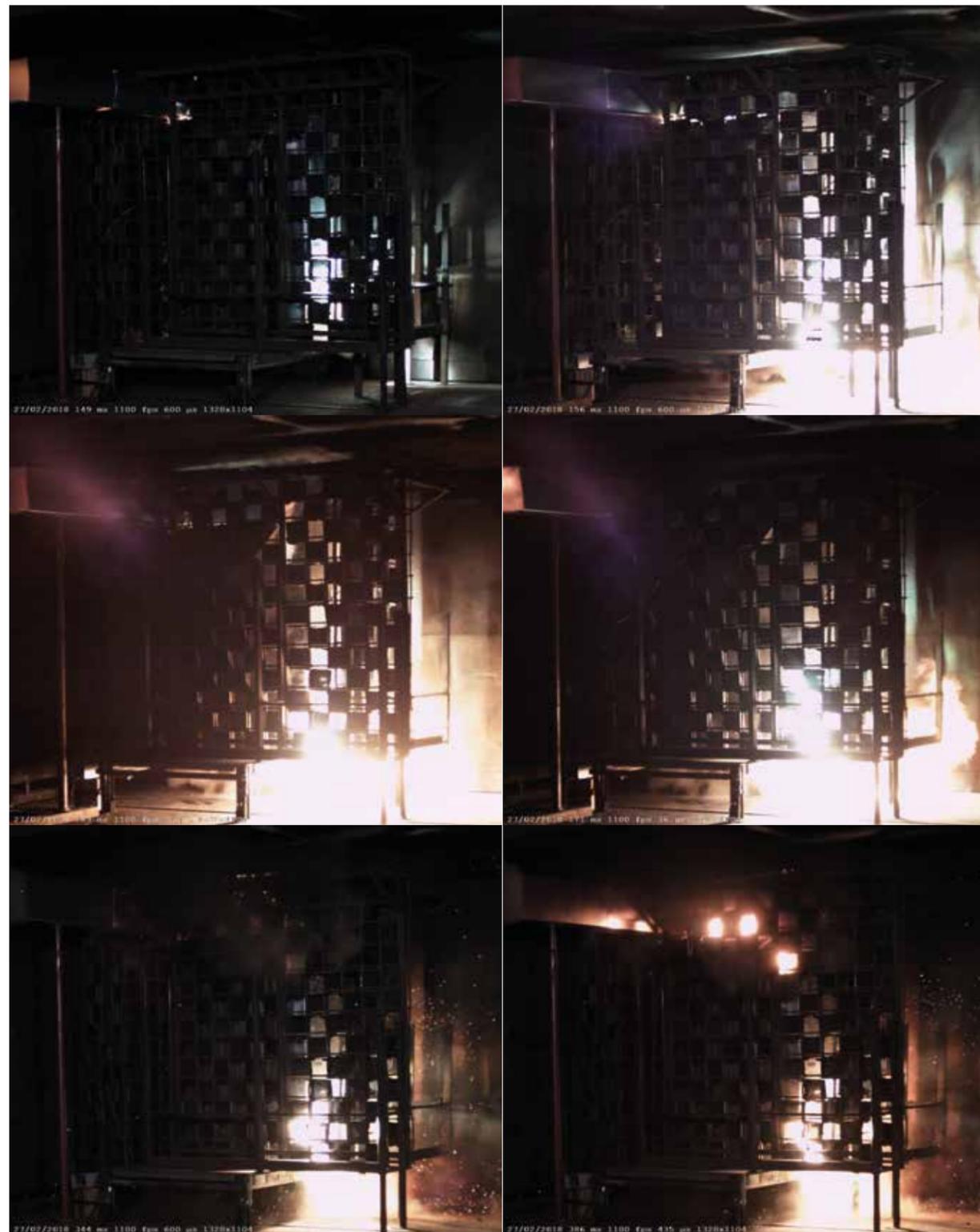
Um die schädlichen Auswirkungen eines Störlichtbogens zu mindern, muss die entstehende Gasdruckwelle mithilfe von Durchführungen und Auspuffkanälen in Puffervolumen oder nach draußen geleitet werden. Zusätzlich werden Druckregleinrichtungen (Pressure Control Devices, PCDs) wie

Marley Becerra
Ulf Sand
ABB Corporate Research
Västerås, Schweden

marley.becerra@
se.abb.com
ulf.sand@se.abb.com

Jörg Lehmann
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Schweiz

joerg.lehmann@
ch.abb.com



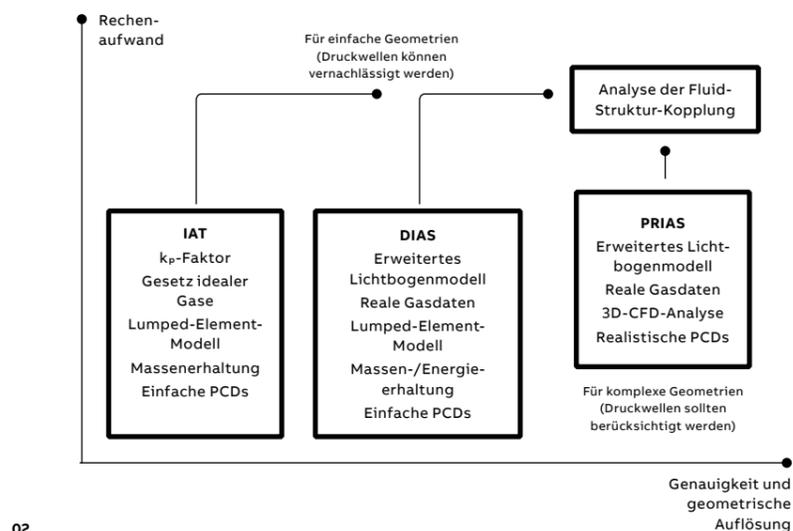
Öffnungen, Metallgitter, Berstklappen oder -scheiben verwendet, um das Gas abzukühlen, den Gasstrom umzulenken und den maximal zulässigen Druck zu begrenzen.

Produkte, die darauf ausgelegt sind, Personen gegen Störlichtbögen zu schützen, sind normalerweise als lichtbogenfest gekennzeichnet. Lichtbogenfeste Produkte werden nach bestimmten Normen (z. B. IEC 62271-200 und IEEE C37.20.7) geprüft, um sicherzustellen, dass sie Überdrücken standhalten können und heiße Gase im Fehlerfall von Personen weggleiten. Jedoch ist die Typprüfung solcher Produkte sehr teuer und zeitaufwändig.

Computersimulationen von Störlichtbögen

Computersimulationen des Temperatur- und Druckanstiegs in einem virtuellen Prototyp können dazu genutzt werden, die Störlichtbogenfestigkeit eines Produkts zu untersuchen. Bei entsprechender Validierung ist dieser Ansatz ein wertvolles und kostengünstiges Werkzeug für Fälle, in denen Prüfungen nicht machbar sind, in frühen Phasen der Produktentwicklung oder zur Prüfung von Änderungen eines bereits bestehenden Designs. Darüber hinaus kann eine solche Simulation genutzt werden, um Bereiche in der Anlage zu bestimmen, in denen der Druck im Falle eines Störlichtbogens kritische Werte übersteigt, und um entsprechende PCDs und Durchführungen/Auspuffkanäle zu positionieren und zu dimensionieren. Ferner können die Berechnungen die Eingabedaten (Kräfte) für mechanische Analysen zur Bestimmung potenzieller struktureller Schäden durch Störlichtbögen und für virtuelle Produkttests liefern.

Gemäß CIGRE [1] lassen sich die physikalischen Vorgänge in Störlichtbögen auf unterschiedliche Weise, d. h. mithilfe von Grundmodellen bzw. erweiterten Modellen oder mithilfe von numerischen Strömungsberechnungen (Computational Fluid Dynamics, CFD) berechnen. Alle Modelle benötigen den Strom durch und die Spannung über dem Störlichtbogen als Eingabe, sie unterscheiden sich aber in der Komplexität, Vorhersagekraft und im Simulationsaufwand.



02

Entscheidend sind hierbei die Annahmen, die hinsichtlich folgender Aspekte zur Vereinfachung herangezogen werden:

- **Lichtbogendarstellung:** Der Störlichtbogen wird grundsätzlich als einfache Wärmequelle unter Verwendung des empirischen Anpassungsfaktors k_p dargestellt. Dieser repräsentiert den Netto-Anteil der elektrischen Lichtbogenenergie, der direkt zum Druckanstieg führt [1]. Alternativ kann der Lichtbogen mithilfe von Energie- und Massequellen sowie verschiedener physikalischer Vorgänge (z. B. Strahlung, Metallverdampfung usw.) modelliert werden.
- **Gaseigenschaften:** Die thermodynamischen Eigenschaften des Gases werden mithilfe konstanter Werte oder mithilfe temperatur- und druckabhängiger Variablen auf der Basis realer Gasdaten beschrieben.
- **Geometrie:** Die Räume, die im Fehlerfall das Gas enthalten, können als nicht-dimensionale Volumenzonen mit konzentrierten Parametern (Lumped-Element-Beschreibung) oder als dreidimensionale (3D-)Zonen entsprechend der realen Geometrie des Geräts modelliert werden.
- **Strömungsanalyse:** Die Strömung kann mithilfe der Energie- und Massenerhaltung in den Volumen evaluiert werden (wobei die Auswirkungen von Druckwellen vernachlässigt werden). Alternativ kann eine detaillierte räumliche Auflösung mithilfe einer CFD-Analyse erfolgen.
- **PCDs:** PCDs können als einfache Öffnungen mit einem bekannten Strömungseffizienzfaktor dargestellt oder unter Berücksichtigung ihres tatsächlichen Strömungswiderstands (einschließlich der Rotations- oder Translationsbewegung von Klappen und Berstscheiben) in CFD modelliert werden.

ABB hat drei Tools mit unterschiedlicher Genauigkeit, geometrischer Auflösung und unterschiedlichem Rechenaufwand entwickelt.

Um die Anforderungen von internen und externen Kunden zu erfüllen, wurden von ABB drei verschiedene Tools mit unterschiedlicher Genauigkeit, geometrischer Auflösung und unterschiedlichem Rechenaufwand entwickelt. Die allgemeinen Eigenschaften dieser drei Werkzeuge mit den Bezeichnungen IAT (Internal Arc Tool), DIAS (DymoDAT-based Internal Arc Simulations) und PRIAS (Pressure Rise in Internal Arc Simulation) sind in →2 dargestellt. Die Tools ermöglichen eine Beurteilung der Auswirkungen von Störlichtbögen in einem breiten Spektrum von Anwendungen – von schnellen Berechnungen bei der Angebotserstellung für Schaltanlagen und Unterstationen über Untersuchungen von Störlichtbogenereignissen in bereits installierten Anlagen bis hin zur Produktentwicklung.

IAT

IAT ist ein schnelles Simulationstool, das ein Störlichtbogenmodell mit dem empirischen Anpassungsfaktor k_p verwendet und bereits in einer früheren Ausgabe der ABB Review beschrieben wurde [2]. IAT wird als ausführbare Datei zur Installation auf Rechnern mit Microsoft Windows bereitgestellt. Eine Simulation kann durch das Eingeben der entsprechenden Daten in Textfelder

— 02 Überblick über die Störlichtbogen-Simulationstools von ABB.

— 03 Beispiel für die Darstellung der beteiligten Volumen und die sie verbindenden PCDs in DIAS.

auf der grafischen Benutzeroberfläche des Tools eingerichtet und binnen einiger Sekunden auf jedem Computer ausgeführt werden. Das Tool wurde für Störlichtbögen in Luft und SF₆ validiert.

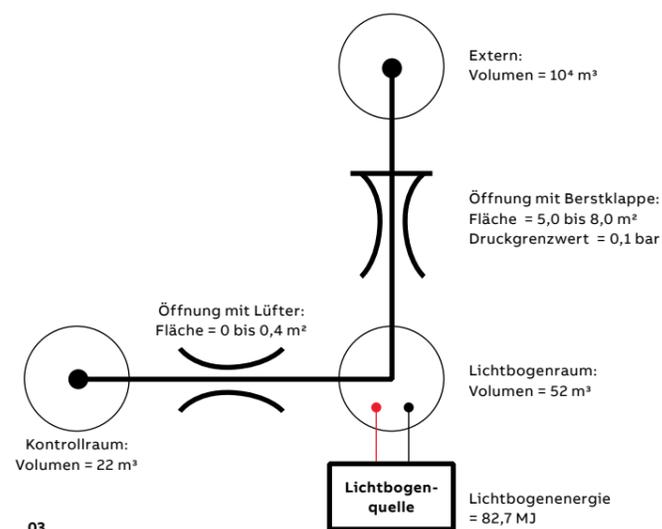
Aufgrund der verwendeten Vereinfachungen bestehen ein paar Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit und der Vorhersagekraft der IAT-Berechnungen. Dies betrifft z. B. die Genauigkeit bei Temperaturen über 6.000 K in Luft und 2.000 K in SF₆ [6]. Da die Volumen bei den Berechnungen auf Lumped-Element-Modellen, ist IAT nicht in der Lage, Druckwellen im Raum zu berechnen, und nutzt stattdessen Durchschnittswerte.

PRIAS ermöglicht die genaue Evaluierung der Strömung unter Berücksichtigung von Druckwellen.

Folglich stößt das Programm bei der Evaluierung von Druckwellen, die sich in länglichen Objekten wie Durchführungen oder Auspuffkanälen bewegen, an seine Grenzen. Zudem ist es nicht in der Lage, die Bewegung von Berstscheiben und Klappen zu berechnen.

DIAS

Dieses Tool ermöglicht eine schnelle Simulation auf der Basis eines erweiterten Lumped-Element-Modells für die Massen- und Energieerhaltung. Sein Kern stammt vom ABB-internen Tool DymoDAT zur Beschreibung des Druckaufbaus beim Betrieb von Hochspannungs-Leistungsschaltern [3]. Zentrales Element des Tools ist ein intern entwickeltes, erweitertes Lichtbogenmodell, das physikalische Modelle der wichtigsten Effekte – wie etwa dem



03

Elektrodenabbrand – enthält. Exotherme Reaktionen zwischen erodiertem Elektrodenmaterial und dem Füllgas werden mithilfe eines realen Modells des Gases bzw. Plasmas berücksichtigt [4]. Folglich ist kein k_p -Faktor als Anpassungsparameter erforderlich, und es wird eine gültige Beschreibung der Gaseigenschaften über einen großen Temperatur- und Druckbereich erreicht. Die Gasströmung zwischen verschiedenen Schotträumen einer Anlage wird mithilfe von Standardbeziehungen der Gasdynamik approximiert und kann durch effektiv reduzierte Strömungsbereiche korrigiert werden. Die Öffnungsdynamik von Berstscheiben und -klappen wird durch Vorgabe einer Öffnungszeit nach dem Erreichen eines bestimmten Überdrucks berücksichtigt. →3.

DIAS erfordert die Installation der kommerziellen Simulationsplattform Dymola, die auch die grafische Benutzeroberfläche zur Eingabe der Modellparameter und Auswertung der Ergebnisse bereitstellt. Die Simulationszeiten liegen auf standardmäßiger Rechenhardware bei etwa einer Sekunde. Die Vorhersagen von DIAS wurden für eine umfassende Reihe von Störlichtbögen in SF₆- und luftgefüllten Anlagen mit Kupfer- oder Aluminiumelektroden validiert.

PRIAS

PRIAS ist ein präzises und komplexes CFD-Simulationstool, das als Ergänzung zu IAT und DIAS vorgesehen ist und sämtliche Strömungsparameter in drei Dimensionen berechnet. Es ermöglicht die genaue Evaluierung der Strömung unter Berücksichtigung von Druckwellen, die mit einem Lumped-Element-Modell nicht berechnet werden können. PRIAS wurde von ABB als eine Reihe von Skripten entwickelt, die auf der Drittanbieter-Software ANSYS Fluent unter Linux laufen. Im Gegensatz zu den anderen Tools benötigt PRIAS eine detaillierte Beschreibung der analysierten Geometrie und PCDs zur Erzeugung des als Eingabe erforderlichen CFD-kompatiblen Gitters. Bis jetzt wurden die Vorhersagen von PRIAS nur für Störlichtbögen in Luft validiert.

Eine Simulation mit PRIAS muss auf einem Hochleistungs-Rechnercluster ausgeführt werden und dauert für gewöhnlich weniger als zwei Tage. Jedoch kann der typische Arbeitsablauf einer Simulation (von der Planung einer Berechnungsaufgabe über die Einrichtung bis hin zur Ausführung) mehrere Tage bis einige Wochen in Anspruch nehmen. Aus diesem Grund ist PRIAS hauptsächlich für anspruchsvolle Simulationen in komplexen Konfigurationen vorgesehen, bei denen Berechnungen auf der Basis von Lumped-Element-Modellen nicht ausreichen oder nicht genau genug sind oder das Verhalten der PCDs im Vorfeld nicht bekannt

ist. Darüber hinaus empfiehlt sich PRIAS für Simulationen in Anlagen mit länglichen Komponenten (wie Durchführungen oder Auspuffkanälen) oder mit mehreren entlang der Peripherie installierten PCDs, bei denen die Auswirkungen von Druckwellen berücksichtigt werden sollten. In diesen Fällen kann PRIAS auch für die kompliziertere Simulation der Fluid-Struktur-Wechselwirkung genutzt werden, die zur Evaluierung von mechanischen Schäden aufgrund von Störlichtbögen erforderlich ist. Ein Beispiel einer Simulation mit PRIAS für eine luftisolierte Mittelspannungs-Schaltanlage mit sich dynamisch bewegenden Berstscheiben ist in →4 dargestellt.

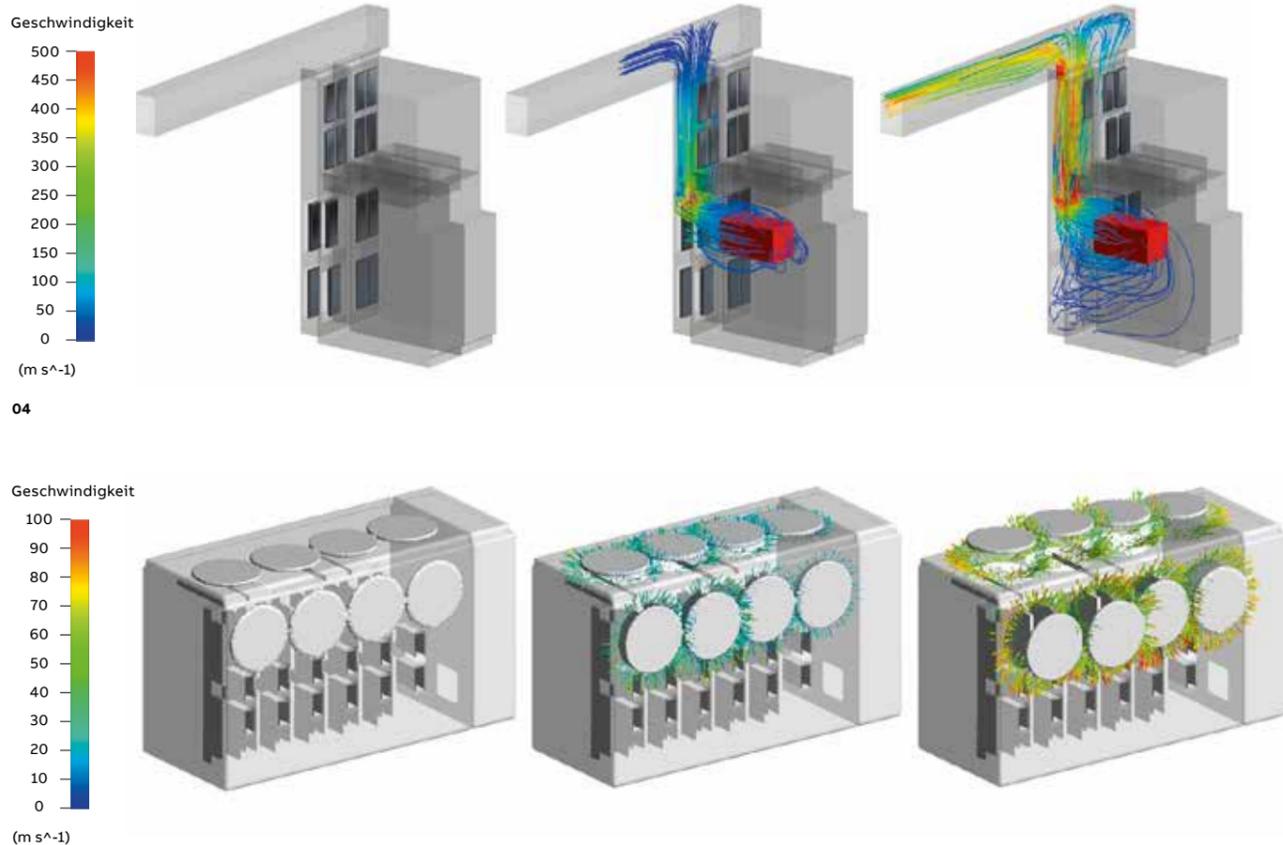
ABB-interne Lichtbogen-Simulationsplattform
Um innerhalb von ABB eine gemeinsame Plattform für die Entwicklung, Archivierung und Nutzung der Lichtbogen-Simulationstools zu schaffen, wurde eine interne SharePoint-Site eingerichtet. Die Plattform ermöglicht zudem die Koordination von Entwicklungstätigkeiten zwischen den Dienstleistern und den Softwareentwicklungsteams. Die Site wird von Spezialisten für Lichtbogensimulationen verwaltet.

Anwendungsbeispiel Alba PL6

Im Jahr 2016 wurde eine detaillierte Untersuchung des Druckaufbaus und der strukturellen Auswirkungen eines Störlichtbogens im Container-Gleichrichter Alba PL6 in Auftrag gegeben. Ziel der Untersuchung war eine Verbesserung des Designs einschließlich der Spezifikation und Positionierung von PCDs. Das Hauptziel bestand darin, einen optimalen strukturellen Aufbau für einen lichtbogensicheren Gleichrichtercontainer zu bestimmen, der eine effektive Druckentlastung nach außen ermöglicht.

Die Untersuchung erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurde mithilfe von DIAS die Gesamtöffnungsfläche der Berstklappen grob, d. h. ohne Berücksichtigung geometrischer Einzelheiten und Strömungsaspekte im Container, bestimmt.

Die berechneten Überdrücke liegen sehr nahe an den Werten, die bei einer Störlichtbogenprüfung am selben Objekt gemessen wurden.



Literaturhinweise

[1] CIGRE WG A3.24: „Tools for simulation of the internal arc effects in HV and MV switchgear“. Electra, 2015.

[2] E. Dullni et al.: „Unter Druck – Simulation des Druckanstiegs in Aufstellungsräumen für Schaltanlagen“. ABB Review 3/2013, S. 54–59.

[3] J. Lehmann et al.: „A Modelica library for High-Voltage AC Circuit-Breaker Modeling“. Proceedings of the 7th International Modelica Conference. Como, 20.–22. September 2009. S. 855–860.

[4] C. Doiron, K. Hencken: „Calculation of thermodynamic and transport properties of thermal plasmas based on the Cantera software toolkit“. Proceedings of the XXII Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases. Greifswald, 15.–19. Juli 2014.

Abschließend folgten Berechnungen mit PRIAS unter Berücksichtigung der detaillierten Strömungs- und Druckbedingungen in den Lichtbogen- und Betriebsräumen des Gleichrichters. Mithilfe dieser Berechnungen wurde dann die Anzahl und Position der zur Minimierung der Überdrücke erforderlichen Berstklappen bestimmt →5.

Die mit PRIAS geschätzten, auf die Wände und andere Oberflächen wirkenden Drücke und Kräfte wurden im nächsten Schritt verwendet, um mithilfe von dreidimensionalen Finite-Elemente-Simulationen (unter Verwendung der ABAQUS Software-suite) die strukturelle Integrität des Systems zu beurteilen. Dabei wurden insbesondere Verschiebungen der Außenwände, plastische Dehnungen, die Belastung der Schweißnähte und die auf Verbindungen wirkenden Kräfte untersucht →6.

Kostengünstig und schnell

Obwohl ein Störlichtbogen ein seltenes Ereignis ist, können die Auswirkungen verheerend und sogar fatal sein. Die hier beschriebenen Simulationstools bieten eine effektive Möglichkeit zum Entwurf von störlichtbogenfesten elektrischen Gehäusen, die die negativen Auswirkungen solcher Ereignisse erheblich reduzieren. Die Tools wurden unter anderem in einem neuen, effizienten Designprozess zur Dimensionierung eines Gleichrichtercontainers mit entsprechenden Druckentlastungseinrichtungen eingesetzt.

Praktische Erfahrungen haben gezeigt, dass die berechneten Überdrücke sehr nahe an den Werten liegen, die bei einer Störlichtbogenprüfung am selben Objekt gemessen wurden. Die Plattform ermöglicht zudem eine äußerst kostengünstige

In einem Fall konnte der Druckanstieg in einer Anlage zu einem Zwanzigstel der Kosten einer physischen Prüfung simuliert werden.

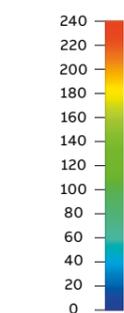
Vorgehensweise. In einem Fall konnte der Druckanstieg in einer überdruckgekapselten Anlage bei einem Störlichtbogen zu einem Zwanzigstel der Kosten einer physischen Prüfung simuliert werden. Zudem kann die Plattform zu einer radikalen Verkürzung der Entwicklungszeit beitragen. In einem Fall half sie bei der Entscheidung zwischen einer kompletten Neuentwicklung und einer Verbesserung des bestehenden Designs, wodurch mehrere Hunderttausend US-Dollar eingespart werden konnten. Und nicht zuletzt bietet die Plattform eine Möglichkeit, einem Kunden binnen sehr kurzer Zeit die Wirksamkeit eines bestimmten Schaltschrank-, Container- oder Raumdesigns zu demonstrieren. •

04 Mit PRIAS simulierte Geschwindigkeits-Stromlinien in einer Schaltanlage zu drei verschiedenen Zeitschritten.

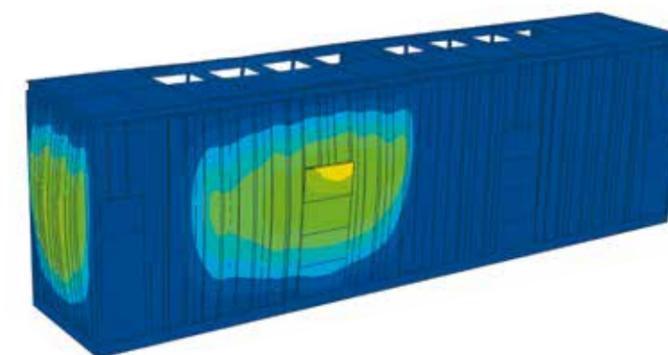
05 Detaillierte PRIAS-Simulation der Berstklappen im Gleichrichter zu drei verschiedenen Zeitschritten.

06 Simulierte strukturelle Verschiebung beim störlichtbogen-induzierten Spitzen-Druck auf Grundlage der mit PRIAS ermittelten Druckverteilung (Flächenmittelwert).

Verschiebung (mm)
(Max = 176 mm)



06



Produktivität



Ein individuelles Design ist der natürliche Feind von Effizienz und Zuverlässigkeit, da es keine einschlägigen Erfahrungen gibt, auf die zurückgegriffen werden kann. Modulare Prozesse hingegen können als solide Bausteine fungieren, die Ingenieuren dabei helfen, die erforderliche Zeit und Variabilität beim Prozessdesign – insbesondere für automatisierte Systeme – drastisch zu reduzieren. Dies ist eine Entwicklung, die auch ABB verfolgt.

MODULARE PROZESSANLAGEN: TEIL 1

Engineering von Prozessmodulen

ABB ist Mitglied eines Konsortiums aus Industrieunternehmen und Universitäten, das Konzepte zur Automatisierung modularer Prozessanlagen entwickelt. Dieser Artikel befasst sich mit der funktionsorientierten Architektur modularer Anlagen – im Gegensatz zur traditionellen messstellenbasierten Architektur. Erste Pilotanwendungen dieses Ansatzes sind Gegenstand eines weiteren Artikels, der in einer zukünftigen Ausgabe der ABB Review erscheinen wird.



01 Moderne Prozessanlagen sind komplexe Gebilde, die neue Engineering- und Betriebskonzepte erfordern. Viele Herausforderungen von Prozessanlagen lassen sich mithilfe eines modularen Prozessautomatisierungsansatzes bewältigen.

02 Engineering-Workflow für modulare Prozessanlagen [1]

03 Architektur des modularen Automatisierungssystems von ABB.

Katharina Stark
Mario Hoernicke
ABB Corporate Research
Ladenburg, Deutschland

katharina.stark@de.abb.com
mario.hoernicke@de.abb.com

Axel Haller
ABB Automation GmbH
Industrial Automation,
Mannheim, Deutschland

axel.haller@de.abb.com

Ralf Jeske
ABB Automation GmbH
Industrial Automation
Minden, Deutschland

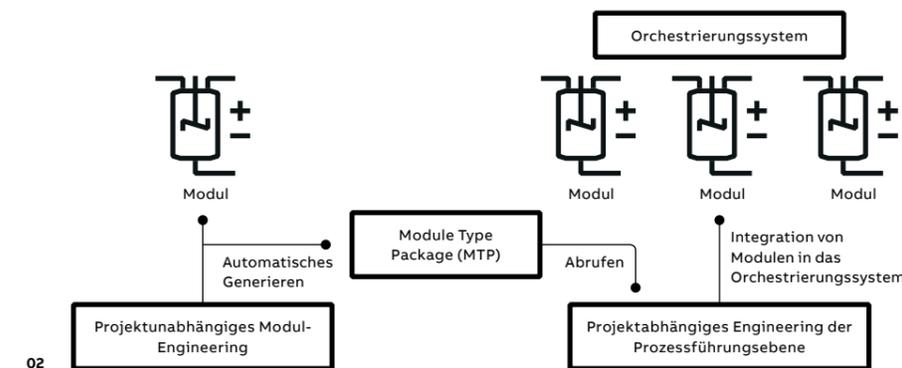
ralf.jeske@de.abb.com

Henry Bloch
Alexander Fay
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

Alexander Wittenbrink
INVITE GmbH
Leverkusen, Deutschland

Torsten Knohl
Bayer AG
Leverkusen, Deutschland

Stephan Hensel
Leon Urbas
Anna Menschner
Technische Universität
Dresden
Dresden, Deutschland



Seit 2014 arbeiten ABB, Bayer, die Technische Universität Dresden, INVITE (eine öffentlich-private Partnerschaft der TU Dortmund und der Bayer Technology Services GmbH) und die Helmut-Schmidt-Universität Hamburg →5 zusammen an der Entwicklung von Konzepten zur Automatisierung modularer Prozessanlagen.

Im Gegensatz zu traditionellen Anlagen werden modulare Anlagen nicht durch messstellenbasiertes Engineering, sondern mithilfe eines funktionsbasierten Ansatzes konzipiert, der mit objekt- oder serviceorientierten Konzepten aus der Softwareentwicklung vergleichbar ist →1. Diese neue Automatisierungssystemarchitektur erfordert neue Engineering- und Betriebskonzepte.

Die Modularisierung von Prozessanlagen gilt als vielversprechender Weg zur Erfüllung zukünftiger Anforderungen.

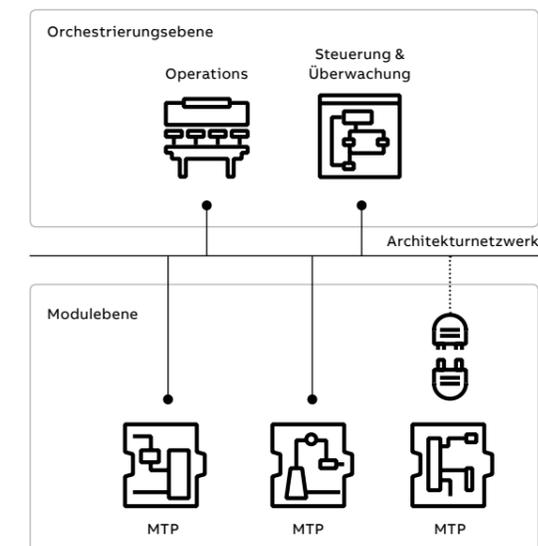
Um diese bereitzustellen, befasst sich das Projekt schwerpunktmäßig mit einer modularen Prozessautomatisierungslösung. Der vorliegende Artikel beschreibt modulare Prozessanlagen und berichtet über die Ergebnisse der Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet. Erste Pilotanwendungen werden in einem weiteren Artikel beschrieben, der in einer zukünftigen Ausgabe der ABB Review erscheinen wird.

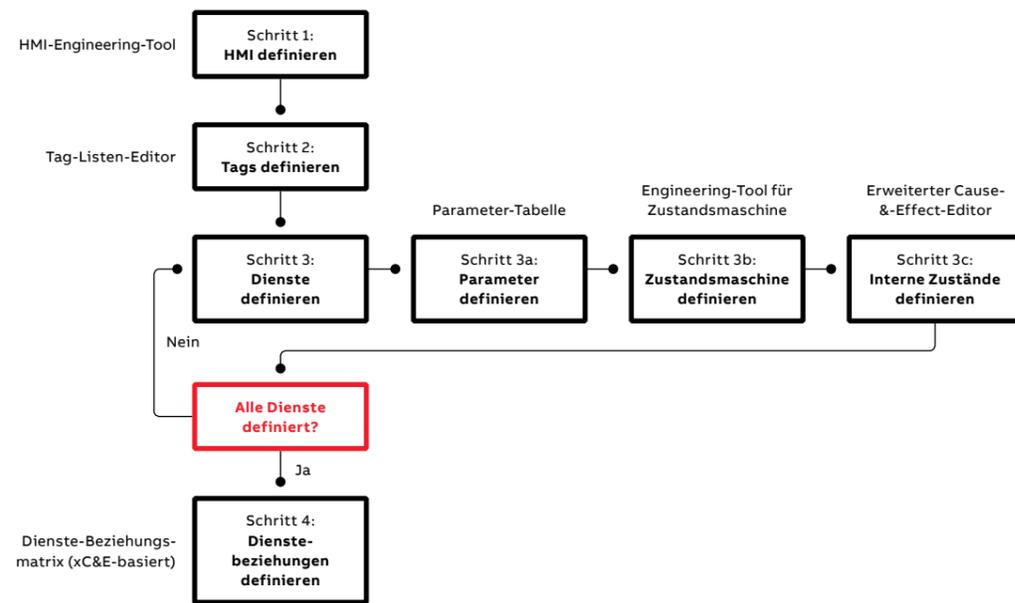
Modulare Prozessanlagen

Die Modularisierung von Prozessanlagen gilt als vielversprechender Weg, um zukünftige Anforderungen der Prozessindustrien – z. B. hinsichtlich einer höheren Flexibilität und der Interoperabilität zwischen Anlagenkomponenten – zu erfüllen. Aus diesem Grund wurden innerhalb der Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der

Prozessindustrie (NAMUR) mehrere Arbeitsgruppen ins Leben gerufen, die in Zusammenarbeit mit dem ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie) Anforderungen und Konzepte für die Automatisierung modularer Anlagen erarbeiten. Das Ziel ist die Definition einer Prozessmodulschnittstelle, des sogenannten Module Type Package (MTP), das eine nahtlose Integration von Prozessmodulen in ein Orchestrierungssystem ermöglicht [1] →2.

Im MTP sind die erforderlichen Automatisierungsschnittstellen für die Kommunikation zwischen dem Modulautomatisierungssystem und dem übergeordneten Orchestrierungssystem spezifiziert. Das MTP dient zur Identifizierung der Funktionalität und der Kommunikationsschnittstellen eines modularen Automatisierungssystems und ist somit der Schlüssel zu dem von modularen Anlagenarchitekturen versprochenen geringen Engineering-Aufwand.





04

Umfang des Forschungsprojekts

Bei dem Forschungsvorhaben mit ABB-Beteiligung war jeder Projektpartner für einen bestimmten Teil des Projekts verantwortlich: Die Universitäten trafen die Technologieauswahl und erarbeiteten Konzepte, auf deren Grundlage ABB den Prototyp entwickelte und mithilfe des ABB Extended Automation System 800xA und des ABB Freelance PLS (Prozessleitsystems) in die ABB-Toollandschaft integrierte. In Zusammenarbeit mit INVITE wurde mithilfe des Prototyps ein Pilot auf der Grundlage einer Bayer-Anlage realisiert, um zu zeigen, dass die Gesamtkonzepte den gegebenen Anforderungen entsprechen.

Durch Steuerung der Dienste in der richtigen Reihenfolge wird sichergestellt, dass die integrierten Module zusammenarbeiten.

Der Prototyp führte zur Entwicklung eines Produkts, das für ein modulares Automatisierungssystem genutzt werden kann [2]. Der Input, der in die Arbeitsgruppen der NAMUR, des ZVEI und des VDI/VDE weitergetragen wurde, legte die Grundlage für die Richtlinie VDI/VDE/NAMUR 2658 „Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie“, in der das MTP beschrieben ist.

Modulare Automatisierungsebenen

Ein modulares Automatisierungssystem besitzt zwei Ebenen – die Modulebene und die Orchestrierungsebene. Die Modulebene entspricht einem kleinen Controller oder einer SPS, die die Logik eines einzelnen Prozessmoduls ausführt. Die Orchestrierungsebene hingegen integriert und kombiniert die Prozessmodule zu einer Prozessanlage. Für jede Ebene wurden unterschiedliche Automatisierungssysteme gewählt, wobei ein Netzwerk die Ebenen miteinander verbindet →3.

Eine Besonderheit modularer Prozessanlagen im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen ist, dass die Module nicht auf der Grundlage von Tags orchestriert werden. Jedes Modul stellt eine Reihe von gekapselten Prozessfunktionen – sogenannte Dienste – bereit, die von einem übergeordneten Prozessleitsystem orchestriert werden können. Jeder Dienst beschreibt eine Prozessfunktion wie z. B. Mischen, Dosieren oder Erwärmen. Durch Steuerung der Dienste in der richtigen Reihenfolge wird sichergestellt, dass die integrierten Module zusammenarbeiten und die Anforderungen der betreffenden Anlage erfüllen.

Auch das Engineering ist anders. Zunächst werden die Modultypen entwickelt. Diese Modultypbeschreibungen können später in das Leitsystem integriert werden, wobei Instanzen daraus erstellt werden. Durch Wiederverwendung von Modulen desselben Typs kann der Engineering-Aufwand für die Anlage drastisch reduziert werden →6.

04 Vorgesehener Engineering-Workflow für ein Modul.

05 Die Hemut-Schmidt-Universität in Hamburg ist einer der Partner, mit denen ABB an Konzepten zur Automatisierung modularer Prozessanlagen zusammenarbeitet. (Foto: Helmut-Schmidt-Universität)

06 Durch Wiederverwendung von Modulen desselben Typs kann der Engineering-Aufwand bei der Automatisierung von Prozessanlagen drastisch reduziert werden.



05

Das MTP erleichtert die Integration der Module. Zwar kamen bei der Pilotanwendung nur ABB-Komponenten zum Einsatz, doch auch eine Integration von Drittanbieter-Modulen wäre problemlos möglich. Das System entspricht vollständig der Richtlinie VDI/VDE/NAMUR 2658 Blatt 1–3 [3–5].

Die Kommunikation zwischen der Modulebene und der Orchestrierungsebene erfolgt per OPC UA. Dabei verfügt jedes Modul über einen OPC-UA-Server, der die Dienste und Tags des Moduls für das Leitsystem bereitstellt.

Durch Wiederverwendung von Modulen desselben Typs kann der Engineering-Aufwand drastisch reduziert werden.

Das Leitsystem fungiert als OPC-UA-Client, der sich mit den OPC-UA-Servern der Module verbindet und diese nutzt, um die erforderlichen Befehle an die Module zu kommunizieren.



06

Für die Modulebene, auf der typischerweise nur wenige I/Os gesteuert werden müssen, kann ein kleineres Automatisierungssystem wie ein Controller vom Typ Freelance AC700F oder die B&R X20-Familie eingesetzt werden.

Für die Orchestrierungsebene wurde das System 800xA gewählt. In einem ersten Schritt dient das System 800xA der Visualisierung, Steuerung und Überwachung der modularen Anlage. Mit fortschreitender Entwicklung der MTP-Spezifikation – und des System 800xA – können die neuen Funktionalitäten (wie Alarm- und Eventmanagement oder Information- und History-Management) einfach hinzugefügt werden.

Modulebene

Die Modulebene repräsentiert die Funktionen, die die Prozessanlage benötigt, um ihren Zweck zu erfüllen. Sie wird aus den erforderlichen Modultypen zusammengesetzt, die vom Ingenieur gewählt werden können.

In einem ersten Schritt erfolgt das Engineering der Module. Das Modultyp-Engineering ist herstellernerutral und basiert auf der Richtlinie [3–6]. Später, nach Abschluss des Engineerings, wird das erforderliche Automatisierungssystem gewählt.

Modultyp-Engineering

Das Engineering der Modultypen erfolgt entsprechend den verschiedenen, im MTP beschriebenen Aspekten. Zurzeit sind folgende Aspekte innerhalb der Community (teilweise) definiert:

- Definition der Kommunikation mit einem Modul [3]
- Definition von Bedienbildern (HMIs, Human-Machine-Interfaces) für Module [4]
- Definition von Tags für Module [5]
- Definition von Diensten für Module [6]

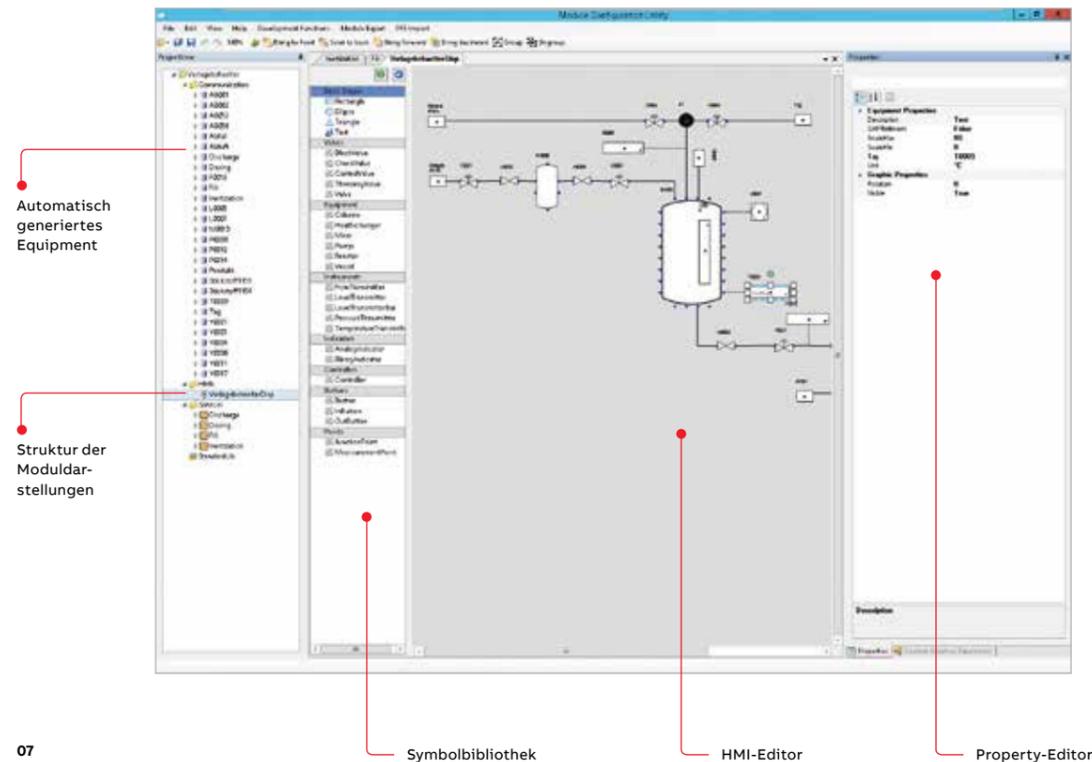
In Zukunft wird die Richtlinie weitere Aspekte wie Alarmmanagement und Sicherheit beinhalten, die

derzeit noch nicht definiert sind. Dennoch sollten die allgemeinen Konzepte auch für diese Aspekte anwendbar sein.

Für das Modultyp-Engineering ist ein Top-Down-Ansatz in vier Schritten vorgesehen →4. Anders als beim Engineering herkömmlicher Anlagen werden die Bedienbilder (HMIs) zuerst konzipiert.

— In Zukunft wird die Richtlinie weitere Aspekte beinhalten, die derzeit noch nicht definiert sind.

Das HMI umfasst Symbole und Linien, die das Anlagenequipment und den Prozessfluss darstellen →7. Während der Definition der Symbole und der Zuordnung von eindeutigen Bezeichnungen in Form von Tag-Namen wird die Tag-Liste mit dem verwendeten Prozessequipment automatisch generiert. Nach Erstellung des HMI enthält die Tag-Liste alle erforderlichen Tags, sodass die Tag-Parameter festgelegt werden können →8. Dies erfolgt in einem Tag-Listen-Editor ähnlich wie bei einer Tag-Liste für eine herkömmliche Anlage.



07

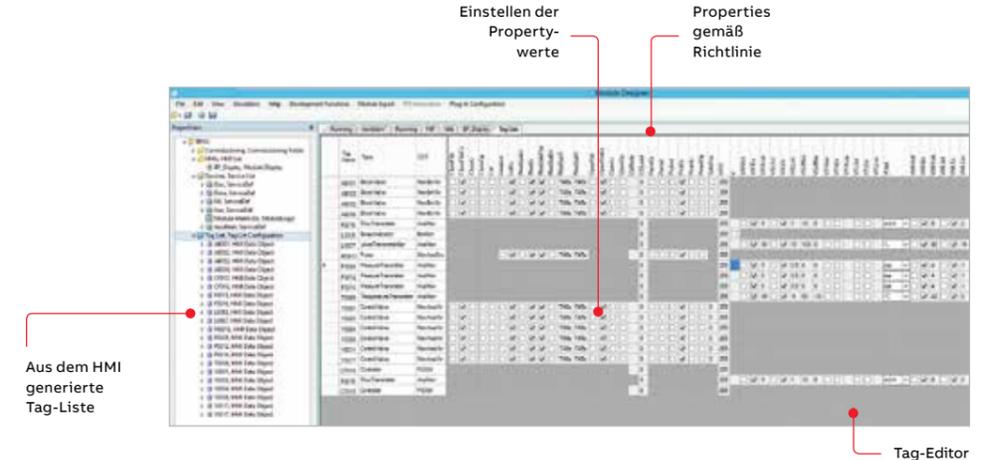
Symbolbibliothek

HMI-Editor

Property-Editor

— 07 HMI-Editor für ein Modul.

— 08 Tag-Editor für ein Modul.



08

Literaturhinweise

[1] J. Bernshausen et al.: „NAMUR Module Type Package – Definition“. atp edition 1–2/2016, S.72–81

[2] „Weltweit erste kommerzielle modulare Automatisierungslösung von ABB“. Verfügbar unter: <https://new.abb.com/news/detail/5032/weltweit-erste-kommerzielle-modulare-automatisierungslösung-von-abb>

[3] VDI Verein Deutscher Ingenieure: „VDI/VDE/NAMUR 2658 Blatt 1: Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie – Allgemeines Konzept und Schnittstellen“. Januar 2018

[4] VDI Verein Deutscher Ingenieure: „VDI/VDE/NAMUR 2658 Blatt 2 (Entwurf): Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie – Modellierung von Bedienbildern“

[5] VDI Verein Deutscher Ingenieure: „VDI/VDE/NAMUR 2658 Blatt 3 (Entwurf): Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie – Bibliothek für Datenobjekte“

[6] VDI Verein Deutscher Ingenieure: „VDI/VDE/NAMUR 2658 Blatt 4 (Entwurf): Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie – Modellierung von Moduldiensten“

Im dritten Schritt werden die Dienste des betreffenden Modultyps definiert. Jeder Dienst erfüllt eine Prozessfunktion des Moduls, wobei ein Modul über einen oder mehrere Dienste verfügen kann, um seine(n) Prozessschritt(e) bzw. Teil eines Prozessschritts zu erfüllen.

— Mithilfe dieser Methode kann ohne jeglichen manuellen Aufwand vollständig funktionsfähige Software generiert werden.

Auf der Grundlage der für einen Modultyp festgelegten Informationen kann die Automatisierungslogik für das Zielsystem (hier Freelance) und das MTP automatisch generiert werden.

Für Freelance werden mehrere Codefragmente generiert, die in ein Freelance-Projekt importiert und sofort auf einen Controller heruntergeladen werden können.

Aus der Dienstdefinition kann die Automatisierungslogik für Freelance generiert werden. Für jeden Dienst wird eine Zustandsmaschine erstellt, die die im Editor definierten Zustände implementiert. Zur Definition der im jeweiligen Zustand auszuführenden Logik kann ein erweiterter Cause-&-Effect-Editor (xC&E) verwendet werden, um das Dienstverhalten festzulegen.

Die Zustandslogik wird automatisch generiert und kann nach dem Import sofort und ohne manuellen Aufwand ausgeführt werden. Da das Modul-HMI auf der Prozessorchestrierungsebene (Process Orchestration Layer, POL) dargestellt wird, ist die Generierung eines HMI für das Modulautomatisierungssystem nicht notwendig. Das Modulautomatisierungssystem besteht lediglich aus der Steuerung für die Feldgeräte und den Diensten.

Mithilfe dieser Methode kann ohne jeglichen manuellen Aufwand vollständig funktionsfähige Software für das Automatisierungssystem generiert werden.

Die Zukunft der modularen Automatisierung

Die hier beschriebenen Verfahren zur Automatisierung modularer Prozessanlagen reduzieren den Engineering-Aufwand drastisch. Das Projekt hat wertvollen Input für die Standardisierung des MTP geliefert, und die aus dem Projekt resultierenden Softwarelösungen werden die Anwendung dieses Ansatzes auf modulare Prozessanlagen in weiten Teilen der Industrie erleichtern. Währenddessen wird sich die Forschung mit weiteren Aspekten modularer Automatisierungssysteme wie Alarmmanagement, höherwertige Regelungskonzepte, Modul-zu-Modul-Kommunikation, Änderungsmanagement sowie der Simulation und dem Testen modularer Anlagen befassen. Diese Themen werden die Zukunft der Prozessindustrie bestimmen. •



BUZZWORDS ENTSCHLÜSSELT

Cloud-, Edge- und Fog-Computing

Im achten Teil unserer Reihe „Buzzwords entschlüsselt“ lichten wir den Nebel und erklären die Begriffe Cloud-, Edge- und Fog-Computing sowie deren Bezug zu ABB Ability™.



Christopher Ganz
Group Technology Management
Zürich, Schweiz

christopher.ganz@ch.abb.com

Früher fand der größte Teil der industriellen Datenverarbeitung – das „Computing“ – lokal, d. h. in Recheninfrastrukturen in unmittelbarer Nähe zum Prozess statt. Dazu mussten die jeweiligen Geräte wie Roboter, Steuerungen und Sensoren über eine erhebliche integrierte Rechenleistung verfügen. Mit dem Aufkommen der Cloud wurde es möglich,

Die ABB Ability-Plattform bietet die Möglichkeit, komplexe Digitalisierungslösungen in der Edge zu implementieren.

die Datenverarbeitung in leistungsstarke Rechenzentren zu verlagern und die lokalen Anforderungen zu reduzieren. Diese Entwicklung wurde dadurch unterstützt, dass lokale Geräte wie Smartphones oder Tablets zwar mobiler wurden, aber weniger Daten speichern und verarbeiten konnten.

Dennoch ist eine vollständige Verlagerung der Daten und deren Verarbeitung von der Anlage in die Cloud nicht immer gut. Da ist z. B. das Problem der Latenz: Prozesssensoren steuern häufig Aktuatoren, die schnell reagieren müssen, damit der Prozess richtig läuft. Außerdem sollte alles, was notwendig

ist, um einen Prozess sicher und stabil zu halten, am besten prozessnah ausgeführt werden. Ein weiterer Aspekt ist die Bandbreite, die durch die Übertragung großer Datenmengen belegt wird. Auch der Datenschutz kann ein Grund sein, die Daten dort zu lassen, wo sie sind.

Diese Überlegungen haben zur Entstehung des Begriffs „Edge-Computing“ geführt, wobei „Edge“ sich auf den Rand der Cloud bezieht. Aber ist das nicht genau das gleiche wie vor dem Aufkommen der Cloud? Die Antwort lautet „nein“, denn Edge-Computing ist lokale Datenverarbeitung im Kontext einer Cloud-Umgebung →1.

ABB Ability
Als Kernelement der Digitalstrategie von ABB ist die ABB Ability-Plattform darauf ausgelegt, alle digitalen Komponenten – vom einzelnen Gerät über das Automatisierungssystem und die Software auf Anlagen- und Unternehmensebene bis hin zur Cloud – zu umfassen. Die ABB Ability-Plattform bietet die Möglichkeit, komplexe Digitalisierungslösungen mithilfe der Automatisierungsprodukte von ABB in der Edge zu implementieren und diese mit einer Optimierung auf Anlagenebene zu kombinieren. Darüber hinaus sorgt ABB Ability für die notwendige Konnektivität dieser Produkte mit der Cloud, um eine umfassende Kollaboration innerhalb des Ökosystems eines Kunden zu ermöglichen.

01 Auf der Hannover Messe 2017 präsentierte B&R (ein Unternehmen des ABB-Konzerns) die Orange Box. Das Edge-Gerät ermöglicht es, Daten von bisher unverbundenen Maschinen zu erfassen und zu analysieren und sie mit minimalem Aufwand fit für die Smart Factory zu machen. Ein Controller sammelt über I/Os oder eine Feldbusverbindung Betriebsdaten von beliebigen Maschinen. Aus diesen Daten erzeugen sogenannte mapps Kennzahlen wie die Gesamtanlageneffektivität (OEE), die angezeigt und mit OPC UA auch an übergeordnete Systeme übertragen werden können.

Foto Abbildung 01: MediProduction, istockphoto.com; Seite 79 unten: Franck-Boston, istockphoto.com



01

Vorteile der Cloud

Manchmal ist die Entscheidung zwischen Edge- oder Cloud-Computing eine Frage der Implementation. Ein bestimmender Faktor ist die Skalierbarkeit. Hier bietet die Cloud Vorteile hinsichtlich Infrastruktur, Plattformfunktionalitäten oder der Bereitstellung von Software als Service (SaaS). Rechenressourcen können dynamisch zur Verfügung gestellt werden, was bei stark variierendem Bedarf ideal ist. Kollaboration ist ein weiterer Aspekt – wenn z. B. Daten zwischen Unternehmen ausgetauscht werden sollen.

Durch die Bereitstellung von Funktionalitäten „als Service“ auf der Cloud-Ebene in Kombination mit einer Edge-Installation vor Ort können Vorteile der Cloud auf die Anlage übertragen werden. Dies ermöglicht auch Geschäftsmodelle mit cloudbasierten Services für Edge-Komponenten. So können z. B. Leistungskennzahlen (KPIs) zu Benchmarking-Zwecken in der Edge berechnet werden, während Analyse, Vergleich und Visualisierung in der Cloud erfolgen. Der Kunde liefert die Daten und erhält die Benchmark-Ergebnisse als Service. Analytik und Optimierung können auf ähnliche Weise realisiert werden.

Fog-Computing

Einige Aufgaben können entweder in der Cloud oder in der Edge durchgeführt werden. Voraussetzung hierfür ist eine vollständige Portabilität der Software zwischen Cloud und Edge. Softwarefunktionalität kann in der Cloud oder vor Ort angeboten werden. Diese Dualität setzt voraus, dass die Infrastruktur vor Ort einer Cloud an der Edge entspricht. Dies wird auch als „Fog-Computing“ bezeichnet. •



Impressum

Editorial Board

Bazmi Husain
Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Adrienne Williams
Senior Sustainability
Advisor

Christoph Sieder
Head of Corporate
Communications

Reiner Schoenrock
Technology and Innovation

Roland Weiss
R&D Strategy Manager
Group R&D and Technology

Andreas Moglestue
Chief Editor, ABB Review
andreas.moglestue@ch.abb.com

Herausgeber

Die ABB Review wird herausgegeben von ABB Group R&D and Technology.

ABB Switzerland Ltd.
ABB Review
Segelhofstrasse 1K
CH-5405 Baden-Dättwil
Schweiz
abb.review@ch.abb.com

Die ABB Review erscheint viermal pro Jahr in Englisch, Französisch, Deutsch und Spanisch. Die ABB Review wird kostenlos an Personen abgegeben, die an der Technologie und den Zielsetzungen von ABB interessiert sind.

Wenn Sie an einem kostenlosen Abonnement interessiert sind, wenden Sie sich bitte an die nächste ABB-Vertretung, oder bestellen Sie die Zeitschrift online unter www.abb.com/abbreview

Der auszugsweise Nachdruck von Beiträgen ist bei vollständiger Quellenangabe gestattet. Ungekürzte Nachdrucke erfordern die schriftliche Zustimmung des Herausgebers.

Herausgeber und Copyright ©2019 ABB Switzerland Ltd. Baden, Schweiz

Druck
Vorarlberger
Verlagsanstalt GmbH
6850 Dornbirn
Österreich



Layout

Publik. Agentur für Kommunikation GmbH
Ludwigshafen
Deutschland

Satz

Konica Minolta
Marketing Services
WC1V 7PB London
Großbritannien

Übersetzung

Thore Speck
24941 Flensburg
Deutschland

Haftungsausschluss

Die in dieser Publikation enthaltenen Informationen geben die Sicht der Autoren wieder und dienen ausschließlich zu Informationszwecken. Die wiedergegebenen Informationen können nicht Grundlage für eine praktische Nutzung derselben sein, da in jedem Fall eine professionelle Beratung zu empfehlen ist. Wir weisen darauf hin, dass eine technische oder professionelle Beratung vorliegend nicht beabsichtigt ist.

Die Unternehmen der ABB-Gruppe übernehmen weder ausdrücklich noch stillschweigend eine Haftung oder Garantie für die Inhalte oder die Richtigkeit der in dieser Publikation enthaltenen Informationen.

ISSN: 1013-3119

abb.com/abbreview

Tablet-Version

Die Produktion der Tablet-Version der ABB Review (für iOS und Android) wird Ende 2018 eingestellt. Lesern der Tablet-Versionen wird empfohlen, stattdessen die PDF- oder Webversionen zu nutzen. abb.com/abbreview

Bleiben Sie auf dem Laufenden ...

Haben Sie eine ABB Review verpasst? Melden Sie sich unter abb.com/abbreview für unseren E-Mail-Benachrichtigungsservice an und verpassen Sie nie wieder eine Ausgabe.



Nach der Anmeldung erhalten Sie per E-Mail einen Bestätigungslink, über den Sie Ihre Anmeldung bestätigen müssen.

—
Vorschau 03/2019

Autonome Systeme

Häufig scheint die Zukunft zuerst in Fabriken Einzug zu halten. Das IIoT, Industrie 4.0, die Cloud, autonome Fertigung, Edge-Computing, maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz – sie alle versprechen zukünftige Verbesserungen. Die nächste Ausgabe der ABB Review befasst sich mit Möglichkeiten zur Integration und Implementierung dieser Technologien.