

ABB

1 | 16
de

review

Innovations-Highlights 6

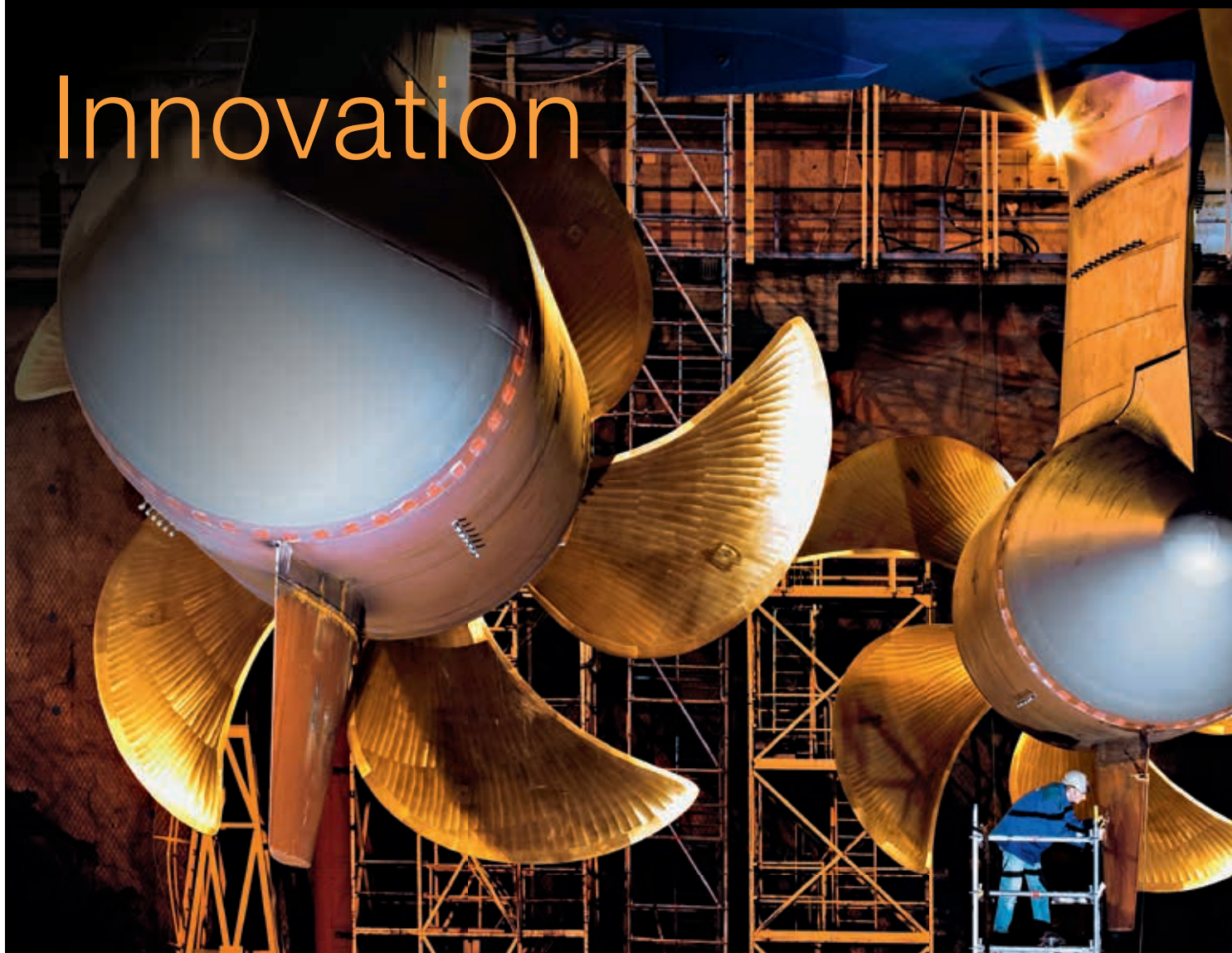
Elektrifizierung ländlicher Gebiete 12

Testlabor für elektrische Antriebe 30

3-D-Visualisierung 49

Die technische
Zeitschrift des
ABB Konzerns

Innovation



Power and productivity
for a better world™





Die ABB Review widmet ihre erste Ausgabe des Jahres traditionell dem Thema Innovation und präsentiert die neuesten Früchte aus der Forschung und Entwicklung bei ABB. Die Titelseite dieses Hefts zeigt die Propeller eines Azipod-Antriebs. Dieser ermöglicht Schiffen ein präziseres Navigieren bei geringerem Kraftstoffverbrauch (siehe auch Seite 11). Das Bild auf dieser Seite zeigt eine 50-MVA-Umspannstation (den Artikel hierzu lesen Sie auf Seite 12–17).

Innovationen

- 6 Innovations-Highlights**
Bedeutende ABB-Innovationen für 2016

Energie- technik

- 12 Kleines Wunder**
Eigenbedarfs-Spannungswandler für niedrige Leistungsanforderungen
- 18 Flexibler Freund**
Das flexible Kesselkonzept für Transformatoren von ABB reduziert die Gefahr von Kesselbrüchen
- 23 Schutzbedarf**
Fehlerschutzanalyse in Niederspannungs-Gleichstrom-Mikronetzen mit Photovoltaikanlagen

Antriebs- technik

- 30 Antriebsprobe**
Ein neues ABB-Testlabor ermöglicht Kunden die Optimierung von Motor-/Umrichterkombinationen
- 34 Eine treibende Kraft**
Hocheffiziente Elektromotoren ohne seltene Erden für nachhaltige und zuverlässige Lösungen

Zähmung der Leistung

- 41 Verdrehenschutz**
Dämpfung von Torsionsschwingungen im Zusammenspiel zwischen drehzahlgeregelten Antrieben und elastischen mechanischen Systemen

Anlagen und Wissen

- 49 Eine neue Dimension**
Verbesserung von Produktionsabläufen durch 3-D-Visualisierung
- 53 Optimierte Zellstoffproduktion**
Konsistente Zellstoffqualität durch gehobene Prozessregelung
- 60 Alarmierende Entdeckungen**
Bessere Bedienereffizienz durch Lebenszyklusunterstützung im Alarmmanagement
- 65 Von Papier zu digital**
Ein Forschungsprojekt zur Extraktion objektorientierter Beschreibungen aus R&I-Fließbildern

Leserumfrage

- 70 Unsere Leser haben gesprochen**
Die Ergebnisse unserer Leserumfrage liegen vor

Innovation



Bazmi Husain

Liebe Leserin, lieber Leser,

ich freue mich, Ihnen die erste Ausgabe der ABB Review in meiner Amtszeit als Chief Technology Officer präsentieren zu dürfen. Ich selbst bin ein eifriger Leser der Review, seit ich 1981 zu ABB kam, und fühle mich geehrt, nun dem redaktionellen Beirat dieser angesehenen Zeitschrift anzugehören.

Unsere Forschung bei ABB wird bestimmt von den Bedürfnissen unserer Kunden und der Gesellschaft. Zu den wichtigsten Anforderungen gehören heute eine geringere Umweltbelastung und eine höhere Zuverlässigkeit, Sicherheit und Produktivität.

Die Digitalisierung bietet großes Potenzial, wenn es darum geht, Geräte und Systeme miteinander zu verknüpfen und eine beispiellose Zusammenarbeit zwischen Menschen und Maschinen zu ermöglichen, um diese Bedürfnisse zu erfüllen. Aus diesem Grund übernimmt ABB eine führende Rolle in der Entwicklung von Technologien für das, was wir als „Internet der Dinge, Services und Menschen“ bezeichnen. Einige dieser Technologien werden in einem Querschnitt unserer neuesten Errungenschaften in diesem Heft vorgestellt.

Weitere Artikel befassen sich mit Neuerungen in der Elektrifizierung ländlicher Gebiete, dem Fehlerschutz in Mikronetzen, der 3-D-Visualisierung zur Verbesserung von Prozessabläufen, der Unterstützung des Bedienpersonals bei der Alarmbehandlung und der automatisierten Übertragung von Fließbildern auf Papier in computerlesbare Formate.

Der dritte Artikel unserer Reihe „Zähmung der Leistung“ über die Behandlung von Schwingungen beschäftigt sich mit den Herausforderungen beim Einsatz von drehzahlgeregelten Antrieben und elastischen mechanischen Systemen.

Für die weitere Entwicklung der ABB Review ist uns Ihre Meinung wichtig. Ich möchte mich daher bei allen Leserinnen und Lesern bedanken, die an unserer Leserumfrage teilgenommen haben. Die Ergebnisse der Umfrage haben wir auf Seite 70 zusammengestellt.

In diesem Jahr feiert ABB zwei wichtige Jubiläen: Vor 125 Jahren wurde Brown, Boveri & Cie – eines der Vorgängerunternehmen von ABB – gegründet, und vor 100 Jahren eröffnete das erste unternehmenseigene Forschungslabor. Zur Erinnerung an diese beiden Ereignisse werden wir im Laufe des Jahres in verschiedenen Artikeln einen Blick auf bisherige Innovationen und neue Möglichkeiten der technologischen Entwicklung werfen.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die ABB Review neben der Druckausgabe auch als PDF und App verfügbar ist. Beide finden Sie unter <http://www.abb.com/abbreview>.

Die in diesem Heft vorgestellten Innovationen sind nur einige Beispiele der vielen Entwicklungen, die in unseren Labors mit Blick auf die Herausforderungen unserer Kunden entstehen. Wenn Sie Vorschläge für weitere Artikel oder Verbesserungen haben, lassen Sie es uns wissen.

Ihr

A stylized handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Bazmi Husain'.

Bazmi Husain
Chief Technology Officer &
Group Senior Vice President
ABB Group



Innovations-Highlights

Bedeutende ABB-Innovationen für 2016

Forschung und Entwicklung betreiben heißt, die Zukunft der Technologie zu entdecken und zu formen. Jedes Jahr entstehen in den Labors von ABB Hunderte von Neuerungen oder Verbesserungen bestehender

Entdeckungen. Auf den folgenden Seiten präsentieren wir eine Auswahl solcher Innovationen, von denen einige in diesem Heft und in kommenden Ausgaben der ABB Review näher beschrieben werden.

Eine Alternative zu SF₆

Seit Jahrzehnten ist Schwefelhexafluorid (SF₆) aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaften ein beliebtes Isoliermittel für elektrische Schaltanlagen. Doch SF₆ ist ein Treibhausgas und seine Nutzung mit steigenden Lebenszykluskosten verbunden.

Sämtliche Anstrengungen, geeignete Alternativen zu SF₆ mit geringeren Umweltauswirkungen, aber ebenso guten Isolier- und Lichtbogenlösch-eigenschaften zu finden, sind bisher erfolglos geblieben.

Doch nun hat ABB eine umweltfreundliche Alternative mit ähnlichen Eigenschaften wie SF₆ entwickelt: ein Gasgemisch auf der Basis eines Produkts von 3M mit der Bezeichnung Novec 5110 Dielectric Fluid – ein perfluoriertes Keton mit fünf Kohlenstoffatomen.

Das Fluorketon-basierte Gasgemisch für Schaltanlagenanwendungen wurde in Zusammenarbeit mit 3M entwickelt.



Das fluorierte Molekül zerfällt unter UV-Licht in der unteren Atmosphäre und besitzt eine Lebensdauer von 15 Tagen (gegenüber 3.200 Jahren für SF₆). Das Treibhauspotenzial (GWP) des Gasgemischs liegt unter 1. Kürzlich wurde in einem gemeinsamen Pilotprojekt mit dem Schweizer Energieversorger ewz die weltweit erste gasisolierte Schaltanlage (GIS) mit dem neuen Gasgemisch in einem

Umspannwerk in Zürich in Betrieb genommen. Insgesamt wurden in der Anlage neben der ABB-GIS-Fabrik acht GIS-Schaltfelder für Hoch- und 50 GIS-Schaltfelder für Mittelspannung installiert.

Eine leichte und modulare USV

Das Angebot der industriellen Power-Protection-Lösungen von ABB reicht von statischen Frequenzumrichtern über Strom- und Spannungsaufbereiter bis hin zu unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV). Die neue leichte PowerLine DPA ist eine Doppelwandler-USV für leichtere Anforderungen – z. B. in Fabriken mit weniger rauen Betriebsbedingungen.

Das modulare Konzept der PowerLine DPA basiert auf der einzigartigen dezentralen Parallelarchitektur (DPA) von ABB. Dabei enthält jedes USV-Modul sämtliche Hard- und Software, die für einen autonomen Betrieb

erforderlich ist. Die Leistungsmodule der USV sind bei laufendem Betrieb austauschbar, d. h. es entstehen keine Ausfallzeiten. Die PowerLine DPA bietet eine redundante Systemkonfiguration zur Aufteilung und zum Schutz der Last. Die Lösung ist fehlertolerant und besitzt keine kritischen Ausfallpunkte.

Die PowerLine DPA sichert die Stromversorgung von kritischen industriellen Prozessen, die ein hohes Maß an Sicherheit und Schutz erfordern. Ihr robustes Design eignet sich für Anlagenumgebungen mit hohen Temperaturen, Staub, Feuchtigkeit und korrosiven Verunreinigungen. Die modulare Architektur der PowerLine DPA zeichnet sich durch eine hohe Verfügbarkeit, Servicefreundlichkeit, ein ausfallsicheres elektrisches Design und geringe Gesamtbetriebskosten aus.



Die dritte Generation des Leistungsschalterantriebs HMC

Seit ihrer Einführung wurden insgesamt 110.000 Antriebe vom Typ HMA und HMB für Hochspannungs-Leistungsschalter verkauft. Die neue Generation HMC zeichnet sich durch eine noch bessere Leistungsfähigkeit, Qualität und Zuverlässigkeit aus.

Das Ziel bei der Entwicklung des HMC war die Verbesserung der Eigenschaften des bestehenden Produkts – z. B. die hohe Funktionalität und Kompaktheit sowie die einfache Anpassung an den Leistungsschalter – durch Entwicklung eines neuen Produktaufbaus und einer neuen Technologie mit höherer Qualität und Zuverlässigkeit. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf Skaleneffekte und eine bessere Servicefreundlichkeit gelegt.

Dementsprechend wurde die Designmethodik gewählt:

- Modulares Design

- Gemeinsame Teilestrategie
- Standardisierung von Optionen
- Vereinfachung von Baugruppen
- Design for Excellence (Fertigung, Montage, Service, Schutz gegen Fehlbedienung usw.)

Die HMC-Antriebe eignen sich für Leistungsschalter mit Nennspannungen bis 550 kV. Kundenanforderungen können flexibel mit vorgegebenen Optionen erfüllt werden. Eine Reihe von Verbesserungen trägt zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit bei, z. B. eine direkt angetriebene Pumpeneinheit, die direkte Kopplung von Schaltgeräten des Steuermoduls sowie ein integrierter automatischer Verriegelungsstift, der ohne Beschädigung außer Kraft gesetzt werden kann.

Eine besondere Innovation ist der hubabhängige Widerstand des Speichermoduls. Dies ermöglicht die Verwendung von Schraubendruckfedern in Verbindung mit optimierten Schalteigenschaften. Außerdem kommen fortschrittlichste hydraulische Komponenten – z. B. durch Abstreifer geschützte Dichtsysteme – und Materialien zum Einsatz.



Sprachsteuerung

Kürzlich stellte ABB mit ABB-free@home die weltweit fortschrittlichste sprachaktivierte Haussteuerung vor. Das innovative System ermöglicht die Steuerung von über 60 Funktionen in einer typischen Smart-Home-Umgebung per Sprachbefehl.

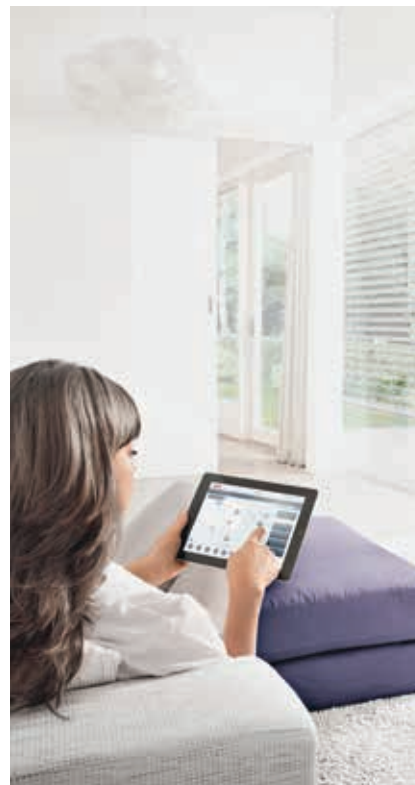
ABB-free@home ist ein zentrales Steuerungssystem zur Überwachung und Steuerung eines gesamten Wohnbereichs: Dimmen und Schalten der Beleuchtung, Zeitschaltuhr, Jalousiesteuerung, Temperaturregulation und Türkommunikation. Nun kann das System auch sprachgesteuert werden, z. B. „Bitte Jans Schlafzimmerlicht einschalten“ oder „Jans Zimmer – Licht an“. ABB-free@home

bestätigt die Aktivierung eines Befehls und antwortet auch auf Fragen zum Status der Funktionen.

Der Dialogprozessor des Systems, der Spracherkennung und ein statistisches Sprachmodell miteinander kombiniert, nutzt Algorithmen, um die Absicht des Nutzers und den Kontext zu erkennen. Das Sprachmodell passt sich auf Basis der einprogrammierten Wörter an. Ist der Befehl unvollständig, fragt das System den Nutzer nach weiteren Informationen.

In Deutschland, den Niederlanden und Österreich wird die Haussteuerungslösung von Busch-Jaeger unter dem Namen Busch-free@home und in allen anderen Ländern von ABB unter dem Namen ABB-free@home vertrieben.

Mehr über ABB/Busch-free@home erfahren Sie in der ABB Review 3/2015 auf S. 48–49.



Flexibler Handlanger für Roboter

In Kombination mit dem ABB-Bildverarbeitungssystem Integration Vision unterstützt FlexFeeder das Sortieren von 3 mm bis 30 mm großen Bauteilen, ohne dass das Zuführsystem für neue Bauteile verändert werden muss.

Die Automatisierung der Kleinteilmontage erfordert ein hohes Maß an Flexibilität, Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit. Der neue FlexFeeder von ABB kann mit der Robotersteuerung IRC5 oder jeder speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) verbunden werden. Er ist in zwei unterschiedlich großen Varianten erhältlich, wobei die größere seltener befüllt werden muss. Das Design der FlexFeeder und integrierte Beleuchtungsoptionen erhöhen die Flexibilität bei der Zuführung von Kleinteilen.

Beide Varianten sind kompakt ausgeführt, um Stellfläche zu sparen. Außerdem können zwei oder mehr Zuführsysteme nebeneinander eingesetzt werden, ohne dass separate Bildverarbeitungssysteme erforderlich sind.

Der von Pneumatikzylindern angetriebene FlexFeeder fördert Bauteile aus einer unsortierten Charge in kleinen Mengen auf eine ebene Aufnahmeplatte im Sichtbereich des Roboters. Sensoren erkennen, wann der Behälter nachgefüllt werden muss. Eine Entleerung des Behälters ist ohne Stromversorgung

möglich, und der Wechsel der zugeführten Teile erfolgt einfach und sicher. Möglichkeiten zur Boden- und Gestellmontage vereinfachen die Installation, und Handgriffe erleichtern ein Anheben und Bewegen der Einheit. Über das Programmiergerät FlexPendant kann der FlexFeeder mit einem Klick getestet und der Produktionsstatus überwacht werden.



Intelligente Motorüberwachung

Eine neue bedienerfreundliche Fernüberwachungsfunktion wird Betreibern von Motoren bald dabei helfen, durch bessere Wartungsplanung und Vermeidung ungeplanter Stillstände Geld zu sparen. Intelligente Sensortags überwachen dabei wichtige Parameter und zeigen „problematische“ Motoren an, die gewartet oder ausgetauscht werden müssen. Das Tool befindet sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium.

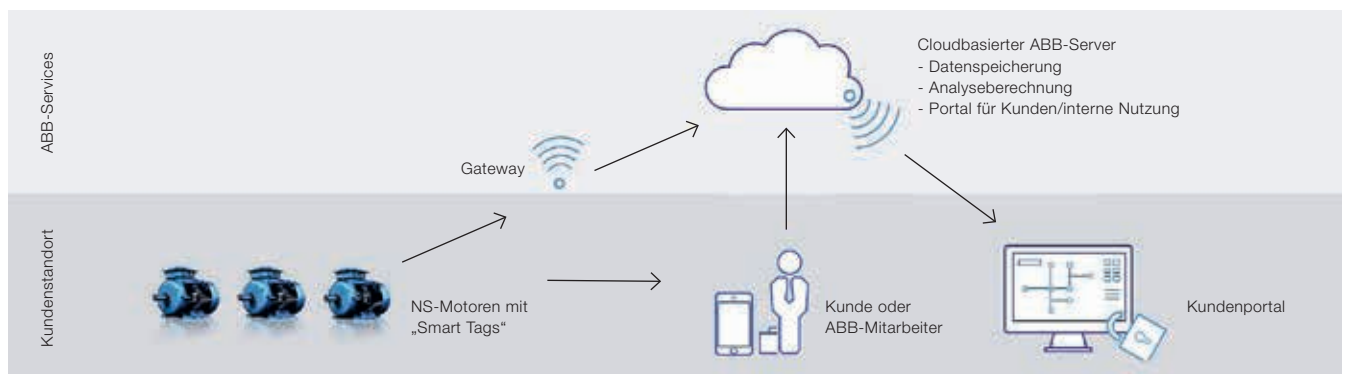
Ausgewählte Serien von ABB-Niederspannungsmotoren werden in Zukunft fabrikseitig mit Sensoren in Form sogenannter „Smart Tags“ ausgerüstet. Diese können auch an anderen Motoren nachgerüstet werden. Damit können die Motoren drahtlos über ein Smartphone oder Gateway mit dem Internet kommunizieren. Zu den regelmäßig und genau überwachten Betriebsparametern gehören:

- Betriebsinformationen
- Energieverbrauch (mit einer Genauigkeit von 10 %)
- Überlastung
- Betriebsstunden und Starts
- Schwingungen und Temperatur des Motorgehäuses
- Zustandsbezogene Informationen
- Funktionszustand der Rotorwicklung
- Innere Fehlausrichtung

- Lagerzustand
- Funktionszustand der Kühlung

Per Smartphone-App kann dann auf diese Daten zugegriffen werden. Der Dienst soll Nutzern dabei helfen, potenzielle Probleme zu erkennen und Wartungen entsprechend zu planen, um die Gesamtwartungskosten zu senken und ungeplante Anlagenstillstände zu reduzieren bzw. ganz zu vermeiden.

Auch der Energieverbrauch eines Motors kann mithilfe des Systems optimiert werden: Durch Kombination der Verbrauchsdaten einzelner Motoren mit Betriebsinformationen der Anlage lassen sich bessere Laststrategien zur Senkung der Gesamtenergiekosten formulieren.



Erster magnetfreier IE5-Motor für Anwendungen mit konstanter Drehzahl

In diesem Jahrzehnt wird der Mindestwirkungsgrad für Niederspannungsmotoren in den meisten Regionen der Welt auf die Klasse IE3 (gemäß IEC 60034-30) harmonisiert. Diese gilt als höchste praktikable Effizienzklasse für Asynchronmotoren. Nach den Motoren stehen nun Maschinen im Fokus. Dabei stellen sich Maschinenherstellern zwei Hauptfragen: Wie können sie die Energieeffizienz der gesamten Maschine steigern, und wie können sie sich im Hinblick auf

die Energieeffizienz von ihren Mitbewerbern abheben?

In den vergangenen fünf Jahren sind durch die Bemühungen, die praktischen Einschränkungen von Asynchronmotoren zu überwinden, Motoren mit Permanentmagneten aus seltenen Erden immer populärer geworden. Doch diese sind mit höheren Kosten und einer fragwürdigen Nachhaltigkeit verbunden. Das Ziel von ABB ist es, nachhaltige und kostengünstige Alternativen mit hohem Wirkungsgrad für Anwendungen mit variabler und konstanter Drehzahl anzubieten.

Die Lösung heißt Synchronreluktanzmotor-(SynRM-)Technologie. SynRM sind ganz ohne Magneten oder mit nachhaltigen Ferritmagneten erhältlich. Das neueste Mitglied der SynRM-Familie ist der DOLSynRM, der erste



magnetfreie IE5-Motor mit Direktstartfähigkeit. Ein solcher IE5-Motor mit 1,5 kW sorgte im September 2015 bei seiner Vorstellung auf der EEMODS in Helsinki für viel Aufsehen. Nachhaltige und kostengünstige Motoren mit höchster Effizienz sind also Wirklichkeit geworden. Nun es ist an den Maschinenherstellern, diese zu nutzen. Mit dem DOLSynRM bietet ABB ihren Kunden die Möglichkeit, ihre Wettbewerbsfähigkeit auf nachhaltige Weise zu stärken.

Antriebsdaten per Smartphone-App

Nutzer von elektrischen Antrieben benötigen Zugang zu Informationen für die Überwachung, Steuerung und Inbetriebnahme ihrer Ausrüstung. Vor allem aber sollte der Zugang intuitiv sein. Wie könnte dies besser gehen als mit einem Smartphone? ABB hat zwei Apps für solche Zwecke eingeführt: Drivebase und Drivetune.

Drivebase ist eine App zur Verwaltung von Antrieben. Sie kann einen Antrieb mithilfe eines QR-Codes identifizieren und liefert Fehleranalysen, Serviceempfehlungen, Berichte über Servicemaßnahmen, bequemen Zugang zu Produkthandbüchern und eine Suchfunktion für ABB-Ansprechpartner. Außerdem kann sie genutzt

werden, um einen Antrieb für zusätzliche Garantieleistungen zu registrieren.

Drivebase hilft Nutzern dabei, ihre elektrischen Antriebe zu verwalten, und bietet schnelle Unterstützung und einfachen Zugang zu Serviceleistungen von ABB. Die App kann kostenlos aus dem Apple App Store, von Google Play und dem Windows Store heruntergeladen werden.

Drivetune ist eine fortschrittliche mobile App zur Überwachung und Steuerung von elektrischen Antrieben. Sie zeigt dem Nutzer den Status seiner Antriebe an und ermöglicht eine einfache Inbetriebnahme über eine intuitive Benutzeroberfläche. Die App kommuniziert über Bluetooth mit dem Antrieb und ermöglicht den Datenaustausch in beide Richtungen.

Drivetune ist kostenlos bei Google Play erhältlich. Eine iOS-Version ist für die nahe Zukunft geplant.



Energiespeicher für Zuhause

Die optimierte Nutzung von lokal erzeugtem Solarstrom ist eine der Triebfedern für die Entwicklung einer neuen Generation von Photovoltaiksystemen. Eine der Herausforderungen, die es dabei zu bewältigen gilt, ist die Diskrepanz zwischen dem täglichen Erzeugungsprofil und dem häuslichen Bedarf. Das ABB-Energiespeichersystem REACT bietet Kunden einen optimalen Kompromiss zwischen den Kosten für die Speicherlösung und der Größe der PV-Anlage.

REACT (Renewable Energy Accumulator and Conversion Technology) besteht aus einem netzgekoppelten PV-Wechselrichter mit bis zu 5 kW, der von einem Gleichspannungs-Zwischenkreis gespeist wird, an den ein bidirektionales Batterieladegerät und die MPPTs (Maximum Power Point Trackers) der PV-Anlage angeschlossen sind. Durch die Architektur mit integriertem DC-Zwischenkreis liefert REACT die höchste Rendite bei neuen Anlagen, es kann



aber auch zur Nachrüstung vorhandener PV-Anlagen als Batterieladegerät mit AC-Zwischenkreis verwendet werden, indem die PV-Module einfach nicht an den Eingang angeschlossen werden. Der Energiespeicher besteht aus modularen Lithium-Ionen-Batterien, die eine Erweiterung des Systems von

ursprünglich 2 kWh auf 6 kWh zulassen. Ein einfaches, aber effektives integriertes Lastmanagementsystem ermöglicht die Interaktion mit ausgewählten Verbrauchern/Geräten, womit eine Erhöhung der Energieunabhängigkeit des Haushalts auf bis zu 60 % in der Grundkonfiguration erreicht werden kann.

Auf Sparkurs mit Azipod D

Das getriebelose Azipod-Antriebssystem von ABB findet breite Anwendung auf Kreuzfahrtschiffen, Eisbrechern und Offshore-Unterbringungsschiffen. Azipod D, das neueste Mitglied der Azipod-Familie, richtet sich speziell an Segmente wie Offshore-Bohrschiffe, Arbeits- und Versorgungsschiffe sowie Fähren, die ein hohes Maß an Manövrierfähigkeit (z. B. zur dynamischen Positionierung) und Zuverlässigkeit erfordern.

Der Azipod von ABB ist eine stromlinienförmige, bewegliche Gondel zum Antrieb und zur Steuerung von Schiffen. Der Propeller wird von einem in der Gondel untergebrachten

elektrischen Antriebssystem angetrieben. Durch flexible Ausrichtung der Gondel wird eine hohe Manövrierfähigkeit erreicht.

Das neueste Modell Azipod D trägt durch niedrige Wartungskosten und einen reduzierten Treibstoffverbrauch zur Erhöhung der Rentabilität von Schiffen bei. Weitere Vorteile sind eine hervorragende Manövrierfähigkeit, geringe Investitionskosten, eine hohe Service- und Wartungsfreundlichkeit sowie eine deutlich bessere Leistungsausbeute im Vergleich zu mechanischen Strahlrudern.

Der Azipod D ist einfach zu installieren und bietet Schiffskonstrukteuren und -bauern mehr Flexibilität im Hinblick auf Rumpfformen und Propellergrößen. Er benötigt 15 % weniger installierte Leistung, was u. a. auf die neue Hybrid-Kühlung zurückzuführen ist, die die Leistungsfähigkeit des Elektromo-



tors um bis zu 45 % steigert.

Laut Clarkson Research ist die Zahl der Schiffe mit elektrischem Antrieb in den letzten zehn Jahren weltweit jährlich um 12 % und damit dreimal schneller als die weltweite Flotte gewachsen.

Integration von Feldgeräten

Die enorme Menge von intelligenten Feldgeräten in Prozessanlagen stellt seit Langem eine Herausforderung für Anlagenbetreiber dar. Nicht selten stammen die Geräte von verschiedenen Anbietern und kommunizieren über unterschiedliche Protokolle. Zwar gibt es zahlreiche Standards für Treiber, die eine Integration in Wartungstools oder Leitsysteme ermöglichen, doch leider sind die einzelnen Standards nur für bestimmte Aufgaben innerhalb der Anlage optimiert, was zu Kompatibilitäts- und Interoperabilitätsproblemen führt. Unter der Führung von ABB hat ein Industriekonsortium mit FDI (Field Device Integration) einen neuen alleinigen Standard entwickelt, der die Vorzüge vorhandener Standards vereint und eine beispiellose Interoperabilität ermöglicht.

Über die eigentliche Technologie hinaus blickend hat ABB eine Studie durchgeführt, um herauszufinden,



welche weiteren Aspekte Nutzer bei der Arbeit mit Prozessgeräten beschäftigen. Auf dieser Grundlage entstand ein neues Gerätemanagement-Tool, das sowohl den Techniker im Prozessbereich als auch den Wartungsmanager im Büro unterstützen soll, indem es sich auf die wichtigsten Informationen und Funktionen der Geräte konzentriert. Das neue Tool überbrückt die klassische Teilung zwischen PC-basierten Tools mit umfangreicher Grafik und kundenspezifischen Hardwaretools mit begrenzter Funktionalität und eingeschränkten grafischen

Benutzeroberflächen für den Einsatz im Prozessbereich.

Die neue Software kann mit der neuen Generation robuster mobiler Computer verwendet werden und eignet sich somit für explosionsgefährdete Umgebungen, z. B. in chemischen Anlagen oder Öl- und Gasanlagen.

Die Kombination eines fortschrittlichen Integrationsstandards und eines modernen Softwaredesigns markiert den Beginn einer neuen Ära des Gerätemanagements in Prozessanlagen.



Kleines Wunder

Eigenbedarfs-Spannungswandler für niedrige Leistungsanforderungen

MATHEW PAUL – Schätzungsweise 1,3 Milliarden Menschen haben keinen Zugang zu Elektrizität. In kleinen Kommunen liegt dies oft an den Kosten für die Installation einer Unterstation. Für solche Fälle bietet ABB nun eine kostengünstige Lösung auf der Basis von Eigenbedarfs-Spannungswandlern (SSVTs) an, die eine lokale Stromversorgung mit geringem Kapitalaufwand ermöglicht und sich durch eine einfache Bauweise und geringen Wartungsaufwand auszeichnet. SSVTs sind einphasige Leistungstransformatoren in ihrer einfachsten Form: Primärseitig zwischen Phase und Erde geschaltet und sockelmontiert, transformieren sie die Spannung in einem Schritt von Hoch- auf Mittel- oder Niederspannungswerte herunter. Dadurch, dass die Abspannung nicht in zwei oder mehr Stufen erfolgt, können Kosten gespart, die Effizienz verbessert und die Zuverlässigkeit erhöht werden. Mit SSVTs können auch solche Standorte auf wirtschaftliche Weise elektrifiziert werden, die die Kosten für eine vollumfängliche Unterstation nicht rechtfertigen, wie z. B. Öl- und Gaspumpstationen, Bergbauprojekte, Mobilfunktürme und Krankenhäuser.



Kleine Kommunen haben aufgrund der Kosten für die Installation einer Unterstation häufig keinen Zugang zu Elektrizität. Für solche Fälle bietet ABB nun eine kostengünstige Lösung.

Ein SSVT (Station Service Voltage Transformer) verbindet die Eigenschaften eines Leistungstransformators und eines Messwandlers in einem zuverlässigen, kostengünstigen, einfachen und kompakten Produkt, das sich ideal für Anwendungen mit niedrigen Leistungsanforderungen eignet. So können z. B. die Leistungsanforderungen einer entlegenen Kommune oder einer Unterstation mit einem einzigen SSVT bzw. einem SSMV (einem SSVT für Mittelspannung) erfüllt werden. Der SSVT benötigt nur wenig Stellfläche und ist dank seiner einphasigen Bauweise einfach zu konfigurieren.

Bauweise

Ein SSVT bzw. SSMV ist in einer einphasigen Mantelbauweise ausgeführt und wird primärseitig zwischen Phase und Erde geschaltet. Eine zwischen die Hochspannungs-(HS-) und Niederspannungs-(NS-) Wicklungen geschaltete geerdete Schirmwicklung schützt die Sekundärseite vor transienten Überspannungen. Die SSVTs bzw. SSMVs sind größtenteils gemäß ANSI C57.13 [1] und IEC 61869-3 [2] gebaut und entsprechen der C57.12.00 [3] und der IEC 60076 [4] → 1. Mit der C57.13.8 „IEEE Station Service Voltage Transformers“ befindet sich eine neue Norm im Entwurf, die die relevanten Teile der C57.12.00 und der C57.13 beinhaltet wird.

Schutz

Das Schutzkonzept des SSVT sieht einen Stromwandler am HS-seitigen Neutralleiter- oder Erdanschluss vor, der mögliche Erdschlüsse an der Sekundärwicklung erkennt → 2.

Der SSVT benötigt nur wenig Stellfläche und ist dank seiner einphasigen Bauweise einfach zu konfigurieren.

Ein Stromwandler am Erdungsdraht des Kessels ermöglicht die Erkennung eines primärseitigen Erdschlusses. Wie bei einem Leistungstransformator kann ein optionales Unteröl-Druckrelais zur Erkennung interner Fehler eingesetzt werden.

Titelbild

Der SSVT von ABB bietet eine kostengünstige und einfache Möglichkeit, Strom aus einer Hochspannungsleitung zu beziehen, wenn sich die Kosten für eine vollumfängliche Unterstation nicht rechtfertigen lassen. Das Bild zeigt einen ölfüllten SSVT.

Eine Mikro-Unterstation ermöglicht eine lokale Stromversorgung mit geringem Kapitalaufwand und zeichnet sich durch eine einfache Bauweise und geringen Wartungsaufwand aus.

1 Vergleich von ANSI-Normen

Leistungstransformatoren der Klasse II	Messwandler vom Typ SSVT/SSMV
ANSI C57.12.00	ANSI C57.13
115 – 450 kV (550 kV optional) BIL	115 – 550 kV BIL
138 – 550 kV (650 kV optional) BIL	138 – 650 kV BIL
161 – 650 kV (750 kV optional) BIL	161 – 750 kV BIL
230 – 750 kV (825 kV optional) BIL	230 – 900 kV BIL
345 – 1.050 kV (1.175 kV optional) BIL	345 – 1.300 kV BIL
Teilentladung: 500 pC	Teilentladung: 10 pC, Teilentladungslöschspannung (PDEV): 135 % der Nennspannung
Überspannungsfaktor: maximale Dauerüberspannung (MCOV): 105 %, maximale kurzzeitige Überspannung (MMOV): 110%	Überspannungsfaktor: MCOV: 115 %, MMOV: 125 %
	Schirmwicklung

Bei einem Fehler auf der Primärseite kann der Leitungsschutz den SSVT isolieren. Da die Übertragungsleitung eine kritische Komponente darstellt, fordern viele Energieversorgungsunternehmen einen Mechanismus zur Isolierung der SSVT-Unterstation. Zurzeit ist für eine Blitzstoßspannung (BIL) von bis zu 750 kV eine HS-Ausfallsicherung zur Trennung eines defekten SSVT/SSMV von der Übertragungsleitung verfügbar → 3.

Über 750 kV kann ein einphasiger Leistungsschalter verwendet werden → 4. Gasgefüllte SSVTs sind zum zusätzlichen Schutz mit einem integrierten Leistungs- oder Trennschalter erhältlich.

Kurzschlussniveau und Überspannungsfestigkeit

Ein SSVT/SSMV besitzt eine Impedanz von 5 bis 10 % seines Basiswerts. Dank seiner geringen kVA-Baugröße ist der sekundärseitige Fehlerstrom auf ein sicheres Maß begrenzt. Eine Sicherung oder ein Sicherungsautomat kann den SSVT im normalen Betrieb gegen Überlastung auf der Sekundärseite schützen. In einem SSMV kann ein MS-Leistungsschalter diese Funktion übernehmen. Bei einer Primärnennspannung von 230 kV beträgt der volle Laststrom 1,5 A bei 200 kVA. Im schlimmsten Fall würde ein Fehler auf der Sekundärseite einen Strom von 30 A auf der Primärseite verursachen.

Umweltauswirkung

Durch die Beseitigung eines oder mehrerer Zwischentransformatoren reduzieren sich die Leerlaufverluste und Kupferverluste, was die Energieeffizienz des Systems erhöht. Außerdem besitzt ein SSVT nur einen Bruchteil des Ölvolumens eines vergleichbaren Leistungstransformators, sodass die Folgen eines Ölaustritts deutlich weniger schwerwiegend sind. Hinzu kommt, dass weniger Öl nachgefüllt werden muss und die Brandschutzanforderungen geringer ausfallen. Außerdem arbeiten SSVTs mit einem Betriebsgeräuschpegel von 30 dBA im Vergleich zu großen Transformatoren mit 70 dBA nahezu geräuschlos.

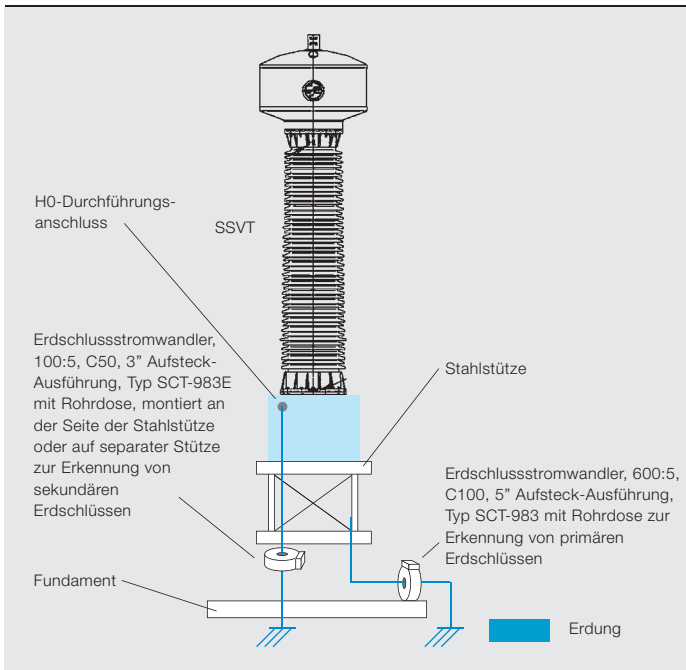
Steuerspannungsversorgung für Unterstationen

Unterstationen gibt es in verschiedenen Größen und für verschiedene Zwecke. In einer Verteilnetzstation wird die Spannung von der Hochspannungs- auf die Mittelspannungsebene oder von der Mittelspannungs- auf die Niederspannungsebene heruntertransformiert, um einzelne Verteilnetzabzweige zu speisen. Eine Schaltstation verbindet HS-Leistungstransformatoren in einem HS-Netz oder Übertragungsleitungen auf derselben Spannungsebene miteinander. Wieder andere Unterstationen sind mit – häufig entlegenen – Erzeugungsanlagen verbunden, um Strom aus diesen abzuleiten.

Ganz gleich, welchem Zweck sie dienen, alle Unterstationen verfügen über Mess- und Schutzsysteme, die über eine NS-Versorgung, die sogenannte Steuerspannungsversorgung, gespeist werden. Aus Gründen der Zuverlässigkeit benötigt jede Unterstation zwei redundante Steuerspannungsversorgungen. Normalerweise dient der Haupttransformator in der Unterstation als Hauptquelle für die Steuerspannung, doch aus verschiedenen Gründen ist eine zweite Versorgung erforderlich. So kann es z. B. sein, dass in einer Generatorstation, in der zur Primärversorgung häufig die Generatoren selbst angezapft werden, die Generatoren zu Wartungszwecken angehalten oder für längere Zeit abgeschaltet werden, oder dass in einer Windenergie- oder Solaranlage die Energiequelle zu schwach ist.

Findet keine Stromerzeugung statt, muss die Steuerspannung aus dem Netz bezogen werden. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten: Ein großer Leistungstransformator kann zur Bereitstellung der erforderlichen Leistung unter Spannung gehalten werden, was allerdings sehr ineffizient ist, da die auftretenden Verluste im Vergleich zur Last sehr hoch sind (ganz zu schweigen von den Kapitalkosten). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Leistung von einem mit einem lokalen NS-Verteilnetz verbundenen Abzweig oder einem Reservegenerator zu beziehen. Doch das ist teuer und anfällig für Störungen durch externe Faktoren.

2 Schutzkonzept des SSVT



Aus Mangel an Möglichkeiten kann es sein, dass die Planer von Unterstationen gezwungen sind, einen Verteilnetzabzweig von einem anderen Standort zu nutzen, um eine redundante Spannungsversorgung zu gewährleisten – ein teures Unterfangen, das nicht nur Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprobleme mit sich bringen kann, sondern möglicherweise auch Störeinflüssen unterliegt, die sich der Kontrolle des Betreibers entziehen.

In einigen Fällen verfügt der Haupttransformator über eine dritte Wicklung für die Spannungsversorgung. Doch dies ist ebenfalls keine ideale Lösung, da sie den Konstrukteur des Leistungstransformators in seiner Gestaltungsfreiheit einschränkt. In den meisten Fällen kompliziert es das Design unverhältnismäßig, mindert die Zuverlässigkeit des Transformators und verursacht zusätzliche Kosten durch Verluste, einen größeren Ölbehälter und eine größere Ölmenge. Auch die Leiter und Spulen müssen größer ausgeführt sein. Ein weiteres Manko bei der Verwendung der Tertiärwicklung ist, dass der Leistungstransformator unter Spannung gehalten werden muss, auch wenn die Sekundärlast abgeschaltet ist.

Eine weitere mögliche Quelle für die Spannungsversorgung ist ein Reservegenerator. Dies ist wahrscheinlich mit den geringsten Anschaffungskosten, aber mit den höchsten Lebensdauerkosten im Vergleich zu einem SSVT oder einem Leistungstransformator verbunden. Bei mit Kraftstoff betriebenen Generatoren kommen zudem Aspekte wie Zuverlässigkeit, Brandgefahr und Wartung sowie Umweltfaktoren wie Lärmbelastung, Gefahr durch auslaufenden Kraftstoff usw. hinzu.

Alternativ zu den oben genannten Möglichkeiten kann in vielen Fällen ein SSVT/SSMV eingesetzt werden, um die Spannung bereitzustellen – und zwar wesentlich einfacher und zu einem Bruchteil der Kosten.

Ein SSVT verbindet die Eigenschaften eines Leistungstransformators und eines Messwandlers in einem zuverlässigen, kostengünstigen und kompakten Produkt.

Das Konzept der Mikro-Unterstation

Viele Kommunen rund um die Welt sind aufgrund der Kosten für die Installation einer Unterstation ohne Stromversor-

3 Ölgefüllter SSVT mit Ausfallsicherung





Durch die Beseitigung einer oder mehrerer Zwischentransformatoren reduzieren sich die Leerlauf- und Kupferverluste, was die Energieeffizienz des Systems erhöht.

gung. In vielen Fällen mag es zwar HS-Übertragungsleitungen in der Nähe geben, die aber nicht angezapft werden können, um z. B. ein Wasserversorgungssystem, ein Gemeindezentrum, eine Schule oder eine Einrichtung zur medizinischen Grundversorgung zu betreiben. Ein SSVT oder SSMV ist zwar kein Ersatz für eine vollständige Unterstation, kann aber die Reichweite der Elektrizität auf diese benachteiligten Kommunen ausdehnen → 5. Verbessert sich dort erst einmal die Lebensqualität, steigt vielleicht auch der Strombedarf genügend, um eine große Unterstation zu rechtfertigen. Dann kann der SSVT/SSMV problemlos in ein anders Gebiet versetzt werden.

Seine Anschaffungs- und Gesamtlebenszykluskosten machen den SSVT zu einer interessanten Lösung für Anwendungen wie diese → 6 und Umschlaginnen-seite.

Leistungstransformatoren sind nicht nur kostenintensiver, sondern erfordern auch eine aufwändige Überwachung und Wartung. So muss z. B. die dielektrische Flüssigkeit eines Leistungstransformators im Laufe seiner Lebensdauer ausgetauscht werden. Dabei kann ein Leistungstransformator für 230 kV/100 MVA leicht 25.000 kg Öl enthalten – verglichen mit 2.000 kg Öl in einem SSVT für 230 kV/200 kVA.

Ferner kann eine Unterstation mit einem einphasigen SSVT oder SSMV unbemannt und sehr einfach gehalten sein – mit einem Ableiter, HS-Leistungsschalter, Trennschalter, Erdungsnetz und einer NS-Verteilertafel – alles in einer einphasigen und platzsparenden Konfiguration.

Die einphasige Konfiguration ermöglicht die Anordnung des SSVT/SSMV in einer Stern- oder Dreieckschaltung auf der Sekundärseite. In einer sekundärseitigen dreiphasigen Dreieckschaltung können zwei SSVTs/SSMVs eine dreiphasige Versorgung (offenes Dreieck) mit reduzierter Kapazität bereitstellen, was sogar mehr Flexibilität bietet als ein Dreiphasen-Leistungstransformator → 7. Alternativ kann ein SSVT im Notfall aus einem dreiphasigen System herausgenommen werden, um einen anderen Standort zu versorgen.

SSVT/SSMV-Einheiten sind erheblich kleiner und leichter als ein Leistungstransformator, weshalb sie sich ideal für den Transport an schwer zugängliche Standorte eignen.

Sie können als Stromquelle während des Anlagenbaus genutzt und anschließend als Spannungsquelle für die Betriebsphase konfiguriert werden.

Anwendungen

Viele Anwendungen wie Pumpstationen für Öl und Gas, Ölplattformen, Bergbau-

6 Die Installation eines SSVT für 100 kVA/220 kV kostet rund 200.000 USD und dauert 12 Monate.



7 SSVTs in einer dreiphasigen Anordnung



projekte, Mobilfunktürme, militärische Einrichtungen, Krankenhäuser, Bahnunterwerke und Beleuchtungen von Freileitungsmasten erfordern eine getrennte Versorgung der Verbraucher. SSVTs/SSMV s können darauf ausgelegt werden, den verschiedenen Umweltbedingungen an solchen Standorten – z. B. große Höhen, hohe/niedrige Umgebungstemperaturen, seismische Aktivitäten oder ein hoher Salz- oder Staubgehalt – standzuhalten. Mit bestimmten Spannungseinschränkungen können sie zwischen 25 kVA und 333 kVA bei 50 oder 60 Hz bereitstellen. Bei Bedarf ist auch eine Prüfung der Erdbebenfestigkeit durch Rütteltischtests möglich.

Ein SSMV mit einer MS-Sekundärwicklung kann verwendet werden, um entfernte Verbraucher über einen MS-Abzweig mit Strom zu versorgen. Die

Spannung kann dann beim Verbraucher mithilfe von Masttransformatoren heruntertransformiert werden. Dadurch werden die Verteilungsverluste reduziert und die Spannungsregelung verbessert.

Zusätzlich können SSVTs mit Messwicklungen ausgerüstet werden, um eine Doppelfunktion zu ermöglichen. Zurzeit befinden sich SSVTs mit höheren kVA-Nennwerten in der Entwicklung, die das Konzept der Mikro-Unterstationen noch attraktiver machen und noch größeren isolierten Anwendungen und Kommunen eine bequeme Stromversorgung aus dem Netz ermöglichen sollen.

Mathew Paul

ABB Power Grids, High Voltage Products
Lexington, KY, USA
mathew.paul@us.abb.com

Literaturhinweise

- [1] „IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers“. IEEE C57.13. 1993
- [2] „Instrument Transformers“ IEC 61869-3:2011
- [3] „IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers“ IEEE C57.12.00. 2010
- [4] „Power Transformers“ IEC 60076. 2011



Flexibler Freund

Das flexible Kesselkonzept für Transformatoren von ABB reduziert die Gefahr von Kesselbrüchen

SAMUEL S. BRODEUR, YASSER S. SALMI, ANDREW COLLIER – Explosionen von ölisierten Transformatoren sind meist auf die Bildung von Lichtbögen zwischen Bauteilen innerhalb des Kessels mit unterschiedlichem elektrischem Potenzial zurückzuführen. Die Folge ist eine rasche Gasentwicklung und ein erheblicher Druckanstieg im Kessel. Beginnt der Metallkessel sich auszudehnen, verformt er sich und kann sogar reißen. Das dabei austretende Öl kann sich entzünden und erhebliche Brandschäden am Transformator und an der umliegenden Ausrüstung verursachen. Traditionelle Schutzmethoden – z. B. auf der Basis von Leistungsschaltern, mechanischen Entlastungssystemen und Expansionskammern – haben allesamt Nachteile, etwa im Hinblick auf die Wirksamkeit, den Platzbedarf oder die Kosten. Das flexible Kesselkonzept von ABB ist eine einfache und kostengünstige Möglichkeit, die Gefahr von Kesselbrüchen ohne die Nachteile der traditionellen Methoden zu reduzieren.



Trotz konstruktiver Maßnahmen zur Verhinderung von Störlichtbögen in ölgefüllten Transformatoren und Drosselspulen besteht immer ein Restrisiko, dass ein solches Ereignis eintreten und zu einem Kesselbruch mit anschließendem Brand oder gar einer Explosion führen kann. Dies stellt eine große Gefahr für Mitarbeiter, die allgemeine Öffentlichkeit und die Umwelt dar. Eine statistische Untersuchung von 735-kV-Transformatoren hat ergeben, dass etwa 32 % der Explosionen durch schadhafte Durchführungen verursacht wurden. In nahezu der Hälfte der Fälle führte dies zu einem Brand [1]. Die Brandgefahr lässt sich durch die Verwendung von Durchführungen aus harz imprägniertem Papier (Resin-Impregnated Paper, RIP) oder einem harz imprägniertem synthetischem Textil (Resin-Impregnated Synthetic, RIS) erheblich reduzieren.

Ferner besagt die Studie, dass 54 % der Brände durch einen Bruch des Kessels oder der Durchführungsdomen verursacht

werden. Eine weitere umfangreiche Untersuchung [2] von 47.000 Transformatoren kommt zu dem Schluss, dass Transformatoren mit Laststufenschaltern, Transformatoren der Spannungs-klassen über 300 kV, Autotransformatoren und Maschinentransformatoren zu höheren Ausfallraten neigen als andere Arten von Transformatoren. Außerdem liegt die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines explosionsartigen Versagens über die Lebensdauer eines Transformators von 40 Jahren hinweg bei 40 %, wobei es in 4 % der Vorfälle zu einem katastrophalen Ölfeuer und in 22 % der Fälle zum Austritt erheblicher Ölmengen kommt. Der katastrophale Ausfall eines Transformators stellt somit keinesfalls ein vernachlässigbares Risiko dar → 1.

Traditionelle Methoden der Risikominderung

Die potenzielle Energie, die durch einen Niedrigimpedanzfehler in einem großen Netztransformator freigesetzt wird, kann bis zu 147 MJ betragen. Es gibt jedoch verschiedene elektrische und mechanische Schutzeinrichtungen, mit denen – einzeln oder zusammen angewandt – ein Großteil der durch Lichtbogenereignisse verursachten Schäden verhindert werden kann.

Zu den elektrischen Schutzeinrichtungen gehören:

- Schnelle Leistungsschalter. Hierbei handelt es sich um den wichtigsten elektrischen Schutz, da er die

Fehlerdauer minimiert, die sich linear proportional zur erzeugten Lichtbogenenergie verhält.

- Buchholz-Relais zur Erkennung der Gasentwicklung im Öl. Allerdings befinden sich diese in einiger Entfernung zur potenziellen Fehlerquelle und schalten den Transformator

Trotz konstruktiver Maßnahmen besteht in ölgefüllten Transformatoren immer das Restrisiko eines Störlichtbogens und die Möglichkeit eines anschließenden Kesselbruchs.

möglicherweise erst ab, wenn sich die Druckwelle bereits ausgebreitet hat.

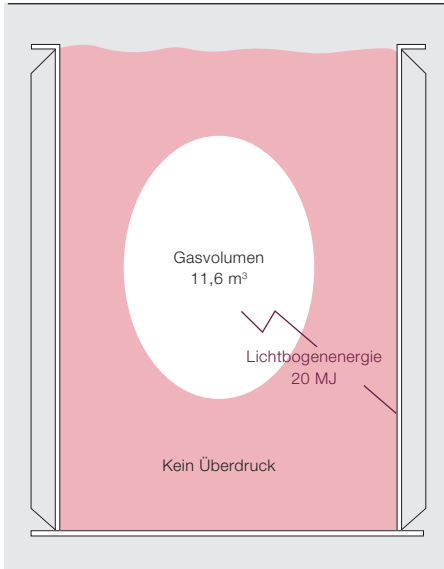
- Leitungsschutzmethoden wie Differenzialschutz oder Erdschlusserkennung. Diese müssen robust genug sein, um den täglichen Anforderungen im Hinblick auf Einschaltströme, Phasensymmetrie und Lastschwankungen standzuhalten, und gleichzeitig ausreichend tolerant, um Fehlauflösungen zu vermeiden.

Selbst mit modernen Inbetriebnahmewerkzeugen bleibt bei der endgültigen Wahl der Einstellungen für viele dieser Einrichtungen eine menschliche Komponente übrig.

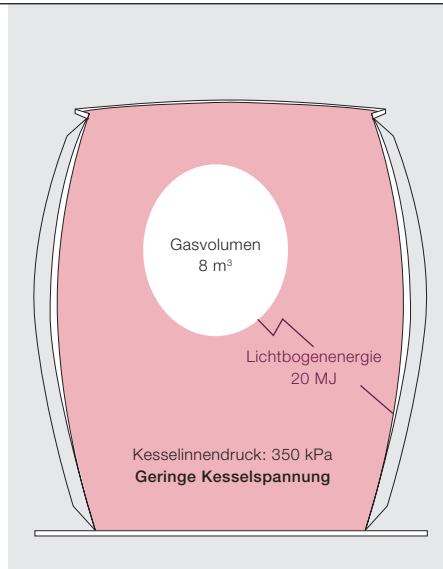
Darüber hinaus gibt es verschiedene mechanische Methoden wie z. B. einfache Überdruckventile. Eine weitere Möglichkeit mit einer kürzeren Öffnungszeit und geringerem Widerstand entlang des

Titelbild

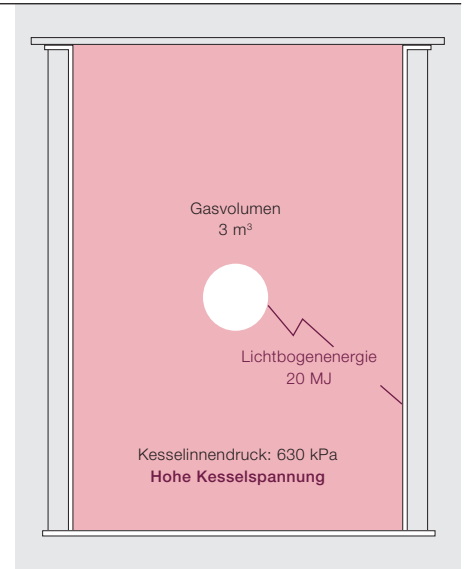
Ganz gleich, wie gut ein Transformator konstruiert und gebaut ist, es bleibt immer das Restrisiko eines Feuers oder einer Explosion. Traditionelle Methoden, um die Auswirkungen eines solchen Vorfalls zu mindern, haben ihre Nachteile. Wie schafft es das flexible Kesselkonzept von ABB, diese zu umgehen?



2a Offener Kessel



2b Flexibler Kessel



2c Starrer Kessel

Nach einer umfangreichen Evaluierung der unterschiedlichen technischen Methoden im Jahr 2007 beschloss ABB, sich auf das flexible Kesselkonzept zu konzentrieren.

Druckentlastungspfade sind Berstscheiben. Diese erfordern allerdings ein Eindämmungssystem, was die Installation kompliziert. Eine Alternative sind großvolumige Expansionskammern. Dabei ist der Kessel über einen großen Kanal mit einem speziellen Expansionstank oder größeren Ausdehnungsgefäß (dem Reservoir für das Transformatorenöl) verbunden, um ein plötzliches Ausdehnen der Flüssigkeit aufzunehmen.

Bei gasisolierten Transformatoren wird das Ölproblem durch Verwendung von inertem SF₆-Gas als Kühl- und Isoliermedium vollständig vermieden. Allerdings ist SF₆ ein äußerst wirksames Treibhausgas, d.h. ein Austritt in die Atmosphäre ist nicht akzeptabel.

Das flexible Kesselkonzept

ABB befasst sich seit den 1990er Jahren mit der Reduzierung der Brandgefahr von großen Leistungstransformatoren. Nach einer umfangreichen Evaluierung der unterschiedlichen technischen Methoden im Jahr 2007 beschloss das Unternehmen, sich auf das flexible Kesselkonzept zu konzentrieren.

Der Grundgedanke des Konzepts besteht darin, eine vorgegebene Lichtbogenenergie durch Verformung des Kessels zu absorbieren → 2. Der Kessel ist darauf ausgelegt, über diesem vorgegebenen Energieniveau zu reißen. Aus Sicherheitsgründen befindet sich die Sollbruchstelle normalerweise an der Kante des Deckels. So ist es weniger

wahrscheinlich, dass gefährliche Teile und Öl herausgeschleudert werden.

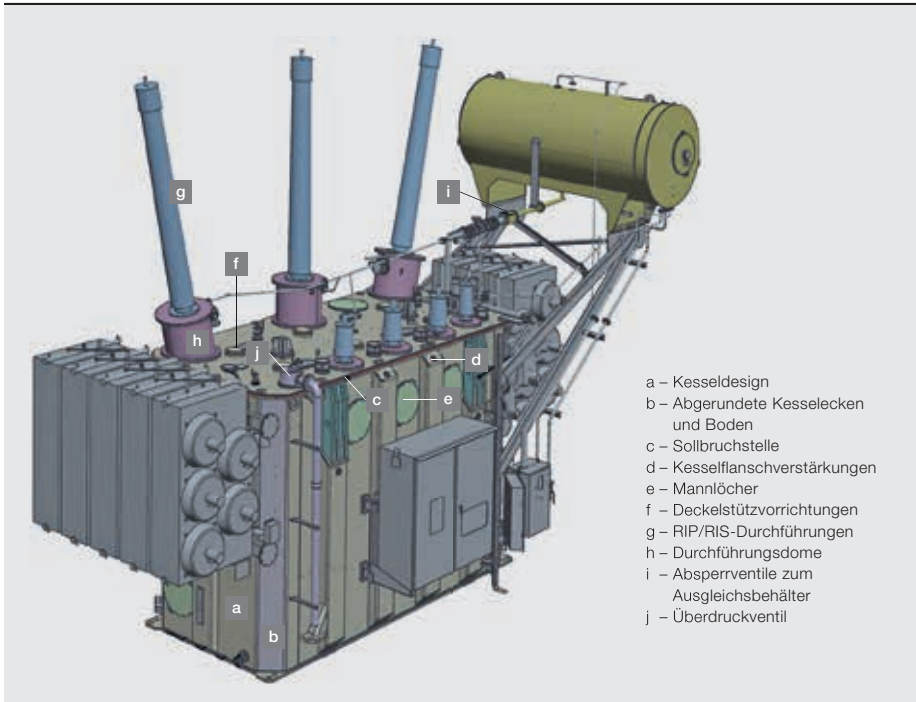
Das flexible Kesselkonzept ist einer Druckentlastungslösung in Form von Berstscheiben oder großvolumigen Expansionskammern überlegen, denn Untersuchungen haben gezeigt, dass selbst eine große Berstfläche von 1 bis 1,5 m² den Spitzendruck bei einem inneren Störlichtbogen lediglich um 10 bis 30 % senken würde. Dies reicht nicht aus, um die Berstgefahr des Kessels unter normalen Umständen zu reduzieren [4].

Sicherheitsmerkmale des Kessels

Das flexible Kesselkonzept beinhaltet viele Sicherheitsmerkmale, die das Risiko eines Ölfeuers oder eines größeren Ölaustritts bei einem Störlichtbogen mindern → 3.

Kesseldesign und Sollbruchstelle (→ 3 a und c)

Zur Bestätigung des theoretischen Widerstandsvermögens des Kessels wurde eine numerische 3-D-Simulation und Evaluierung durchgeführt. Die Finite-Elemente-Analyse (FEA) beinhaltete nichtlineare Materialeigenschaften, den Effekt großer Verformungen, eine sorgfältige Gitterverfeinerung sowie eine Analyse der Ergebnisse durch einen erfahrenen Ingenieur. Das verwendete quasistationäre Modell basiert auf der konservativen Annahme einer isothermen Ausdehnung der Gasblase und einer gleichmäßigen Druckverteilung, verstärkt durch einen dynamischen Faktor. Das Widerstandsvermögen des Kessels wird bestimmt durch die Sollbruchstelle, die



Die Sollbruchstelle befindet sich normalerweise an der Kante des Deckels. So ist es weniger wahrscheinlich, dass gefährliche Teile und Öl herausgeschleudert werden.

4 Versagen der Kesselflanschverstärkungen



an der Schweißnaht des Kesseldeckels vorgegeben ist. Die Ergebnisse der Evaluierung sind ausführlich in einem technischen Bericht beschrieben, der bei der Bestellung des Transformators ausgegeben wird.

Geformte Kesselecken und Boden (→ 3 b)

Die Schweißnähte an den Ecken der Kesselwände und zwischen Kesselwand und Bodenplatte sind wahrscheinliche Bruchstellen bei einem Störlichtbogen. Aus diesem Grund umfasst das flexible Kesselkonzept speziell geformte Kesselecken, mit denen die Schweißnähte von diesen hochbelasteten Stellen weg verlagert werden. Darüber hinaus senkt eine flexible Verbindung zwischen Kesselwand und Bodenplatte die Rissgefahr. Als zusätzliche Sicherheit sind alle Schweißverbindungen der Kesselwand vollständig durchgeschweißt und werden bei der Fertigung per Ultraschall geprüft.

5 Experimentelle Prüfung der Mannlöcher



Flanschverstärkungen und Deckelstützvorrichtungen (→ 3 d und f)

Die Kesselflanschverstärkungen und die Deckelstützvorrichtungen sind hoch belastet und versagen bei einem Störlichtbogen als erstes → 4. Dieses Verhalten wurde bei Untersuchungen von Transformatorenausfällen festgestellt und zur Verbesserung der Ergebnisgenauigkeit in die FEA-Evaluierungsroutine implementiert.

Mannlöcher und Durchführungsdome (→ 3 e und h)

Das Widerstandsvermögen der Mannlöcher bei Überdruck wurde durch einen Versuch im Labor des IREQ (Institut de Recherche d'Hydro-Québec) erfolgreich geprüft [5] → 5. Das gleiche geprüfte Verschraubungssystem mit O-Ringen wird für die Durchführungsdome, Ventile und Durchführungsverbindungen verwendet.



Als zusätzliche Sicherheit sind alle Schweißverbindungen der Kesselwand vollständig durchgeschweißt und werden bei der Fertigung per Ultraschall geprüft.



RIP- und RIS-Durchführungen (→ 3 g)

RIP- und RIS-Durchführungen mindern das Risiko von Ölaustritten, Feuer und berstendem Porzellan bei einem Störlichtbogen. Wenn überhaupt, enthalten sie eine sehr geringe Menge Öl.

Absperrventil und Überdruckventil (→ 3 i und j)

Das Absperrventil befindet sich an der Ölleitung zwischen dem Kessel und dem Ölausdehnungsgefäß → 6. Es ermöglicht den Ölfluss in beide Richtungen, aber um zu verhindern, dass Öl im Brandfall aus dem Ausdehnungsgefäß austritt und das Feuer nährt, schließt das Ventil und löst einen Alarm aus, sobald der Durchfluss einen bestimmten Wert überschreitet.

Know-how von ABB

Wie bereits erwähnt, befasst sich ABB seit Anfang der 1990er Jahre mit der Risikominderung im Zusammenhang mit Kesselbrüchen und verfügt somit über umfangreiches Wissen auf diesem Gebiet. Im Jahr 2007 begann das ABB-Werk im kanadischen Varennes mit der Konstruktion von Kesseln nach dem flexiblen Konzept. In den vergangenen fünf Jahren wurden über 20 flexible Kesselkonzepte unter anderem für Autotransformatoren, Maschinentransformatoren, Kompensations-Drosselspulen sowie Ein- und Dreiphasentransformatoren entwickelt, analysiert und bereitgestellt. Daraus konnten wiederum wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Die kontinuierliche Entwicklungsarbeit von ABB auf diesem Gebiet hat nicht nur zu einer guten Übereinstimmung zwischen dem mittels FEA prognostizierten Versagensverhalten und realen Versuchen geführt, sondern hat auch

gezeigt, dass das flexible Kesselkonzept die einfachste und effizienteste Methode zur Reduzierung der Kesselbruchgefahr darstellt → 7.

Samuel S. Brodeur

Yasser S. Salmi

ABB Power Grids,
Large and Medium Power Transformers
Varennes, Kanada
samuel.s.brodeur@ca.abb.com
yasser.s.salmi@ca.abb.com

Andrew Collier

ABB Power Grids,
Large and Medium Power Transformers
Bad Honnef, Deutschland
andrew.collier@de.abb.com

Literaturhinweise

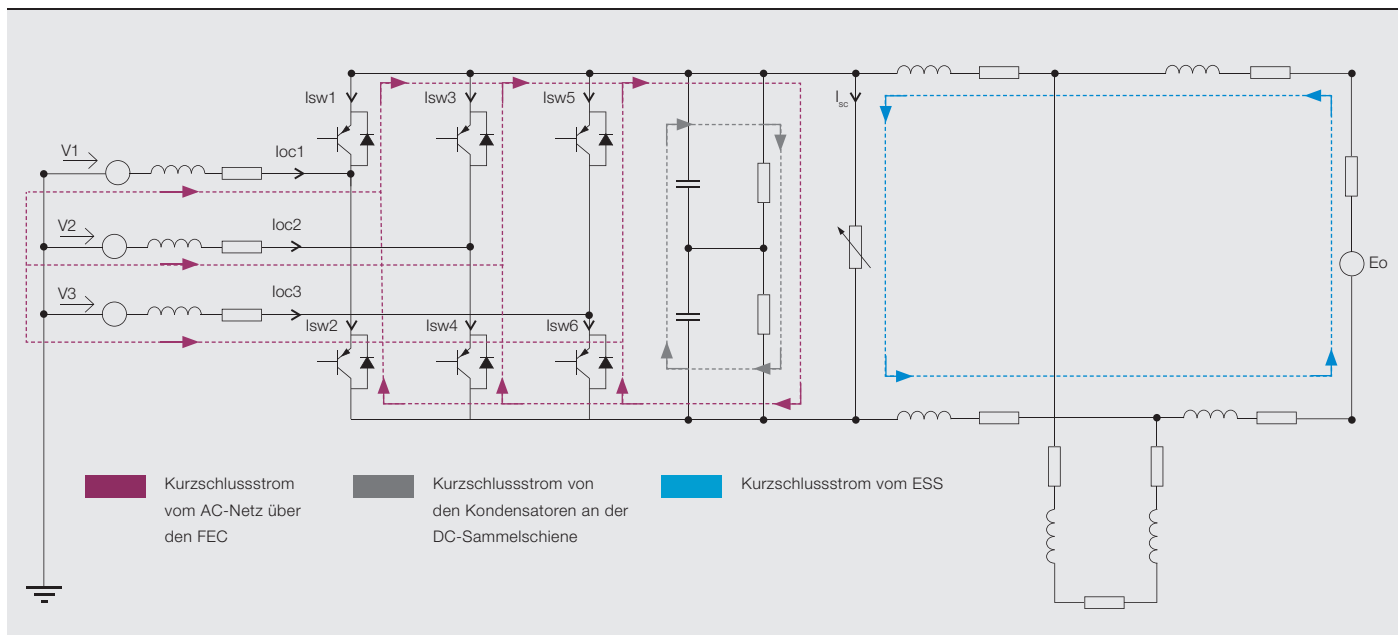
- [1] M. Foata, J.-B. Dastous: „Power transformer tank rupture prevention“. Cigré, Paris, 2010
- [2] Cigré: „Guide for Transformer Fire Safety Practices - Working Group A2.33“. Cigré - Technical Brochure 537, 2013
- [3] J.-B. Dastous et al.: „Numerical Method for the Investigation of Fault Containment and Tank Rupture of Power Transformers“. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, pp. 1657 – 1665. Juli 2010
- [4] M. Foata: „Transformer Fire Risk and Mitigation“. Cigré Session 2010, Paris
- [5] S. Beauregard et al.: „Essai en pression du trou d'homme sur enceinte rigide“. IREQ Report EMMH-2013-015. Varennes, 2013



Schutzbedarf

Fehlerschutzanalyse in Niederspannungs- Gleichstrom-Mikro- netzen mit Photovoltaik- anlagen

MARCO CARMINATI, ENRICO RAGAINI – Der Anschluss von Mikronetzen mit regenerativer Energieerzeugung an das öffentliche Stromnetz hat viele Vorteile. Verbindet man diese beiden sehr unterschiedlichen elektrischen Welten miteinander, muss jedoch sichergestellt sein, dass Fehlerzustände richtig behandelt werden – insbesondere wenn ein Mikronetz mit einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) oder einem Energiespeichersystem (ESS) über einen Einspeisenumrichter (FEC) an das Stromnetz angebunden wird. In dieser Konfiguration können Fehlerströme aus dem Wechselstromnetz durch den Umrichter gelangen und den Fehler noch verschlimmern. Die meisten universellen FECs basieren auf IGBTs (Insulated-Gate Bipolar Transistors) in Kombination mit Freilaufdioden und sind nicht in der Lage, Fehlerströme in allen Situationen zu unterbrechen. Daher ist ein spezielles Schutzsystem erforderlich, um eine sichere Fehlerbeseitigung zu gewährleisten, besonders wenn ESSs oder Gleichstromerzeuger beteiligt sind.



Der Anschluss von Niederspannungs-Gleichstrom-(LVDC-) Mikronetzen mit PV-Anlagen an Wechselstrom-(AC-)Netze ist ein Thema, das angesichts der zunehmenden Einspeisung regenerativer Energie in das öffentliche Netz an Bedeutung gewinnt. Neben den üblichen elektrischen Aspekten, die eine Verbindung dieser zwei Welten mit sich bringt, muss die Behandlung von Fehlerzuständen bedacht werden, denn PV-Anlagen und ESSs mit ihrer dazugehörigen Elektronik können sich abhängig von den verschiedenen möglichen Erdungskonzepten im Fehlerfall unterschiedlich verhalten und somit unterschiedlich auf den Betrieb und das Verhalten des Netzes im Fehlerfall auswirken.

Titelbild

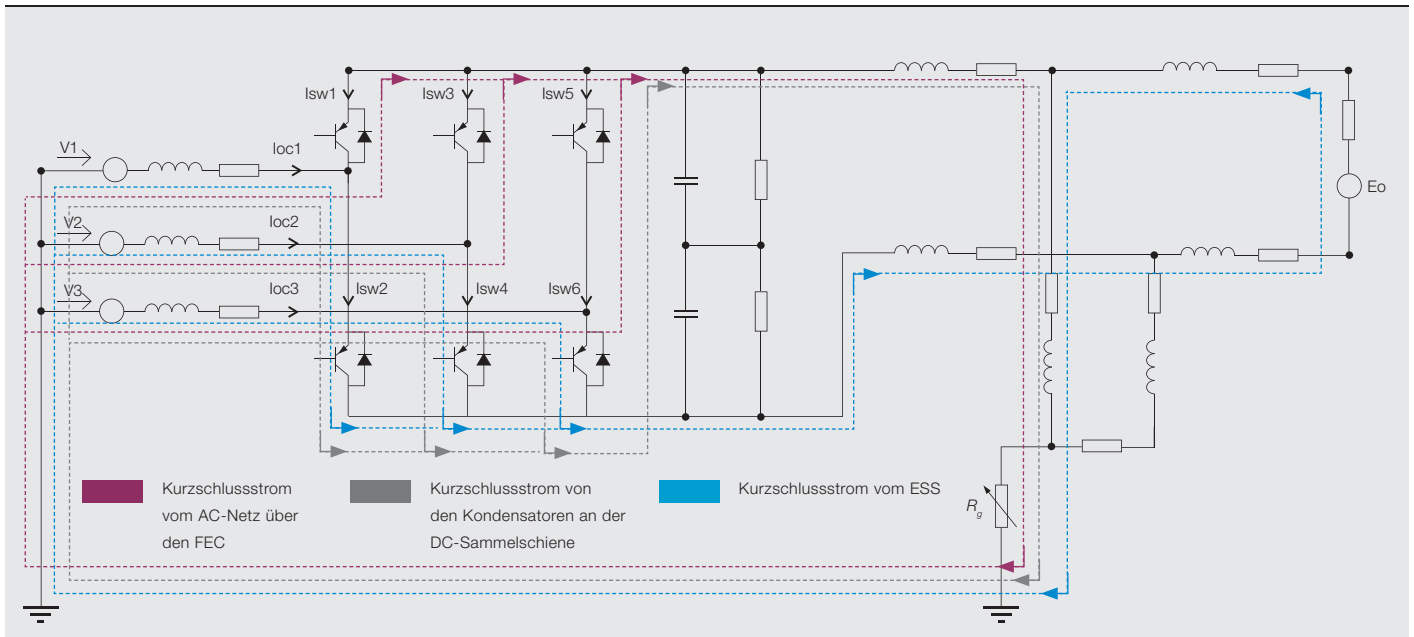
Bei der Einspeisung von Regenerativstrom aus Mikronetzen in das öffentliche Netz müssen besondere Maßnahmen getroffen werden, um die Ausrüstung des Mikronetzes gegen Fehler zu schützen.

In einem LVDC-Mikronetz ist der DC-Abschnitt typischerweise durch einen Einspeisenumrichter (Front-End-Converter, FEC) vom AC-Netz getrennt, der den überschüssigen Strom aus dem Mikronetz in das AC-Netz einspeist.

Der kritischste Punkt hierbei ist, dass die meisten universellen Umrichter nicht in der Lage sind, Fehlerströme zu begrenzen, wenn es auf der DC-Seite zu Kurzschlüssen und Erdschlüssen kommt.

Da sich PV-Anlagen und ESSs mit ihrer dazugehörigen Elektronik im Fehlerfall unterschiedlich verhalten können, muss die Behandlung von Fehlerzuständen bedacht werden.

Dies gilt für Umrichter in der gängigsten Ausführung auf der Basis von IGBTs mit antiparallelen Freilaufdioden → 1. In dieser Konfiguration kann ein hoher Strom aus dem AC-Netz durch die Freilaufdioden des FEC gelangen, sodass spezielle Schutzkonzepte erforderlich sind. (An dieser Stelle sei angemerkt, dass Thyristorgleichrichter nicht als Einspeisenumrichter verwendet werden können, da bei Umkehr des Leistungsflusses die Spannungspolarität umgeschaltet werden muss, was schwerwiegende Auswirkungen



gen auf die Geräte an der DC-Sammelschiene hätte.)

Durch die Installation korrekt dimensionierter Leistungsschalter kann – auch wenn durch die durchgelassene Energie Halbleiter überhitzen können – der Strom begrenzt, die Sicherheit gewährleistet und eine weitere Beschädigung der Anlage vermieden werden.

Die beiden Hauptfehlerarten, gegen die ein Schutz gewährleistet sein muss, sind Kurzschlüsse und Erdschlüsse auf der DC-Seite.

DC-seitiger Kurzschluss

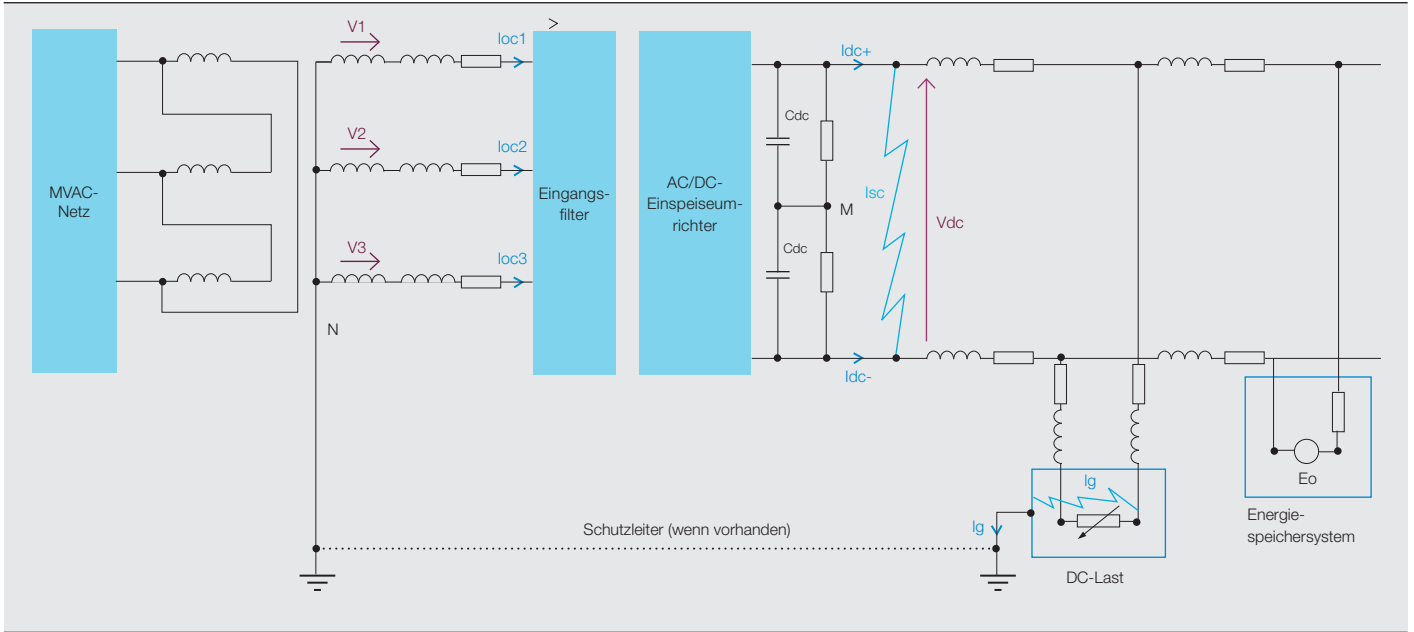
Kommt es zwischen den Anschlüssen der DC-Sammelschiene in einem Mikronetz zu einem Kurzschluss ohne eine Spannungsquelle auf der DC-Seite, sind je nach Fehlerwiderstand verschiedene Szenarien möglich: Bei hohem Fehlerwiderstand könnte der FEC in der Lage sein, die DC-Spannung auf dem Nennwert zu halten, aber unterhalb eines bestimmten Widerstandswerts beginnt der FEC, im Übermodulationsmodus zu arbeiten.

Der Grenzzustand liegt bei einem sehr geringen Kurzschlusswiderstand, wenn dieser gegen Null geht. Da Strom in den Freilaufdioden fließt, arbeitet der FEC hier als Gleichrichter im Kurzschlusszustand. In diesem Fall wird der Strom nicht mehr durch den FEC begrenzt. Der Kurzschlussstrom setzt sich zusammen aus den Beiträgen vom AC-Netz durch den

FEC, von den an der DC-Sammelschiene angeschlossenen Kondensatoren und von den DC-Erzeugern bzw. dem ESS, sofern vorhanden → 1.

Kommt es auf der DC-Seite zu Kurz- und Erdschlüssen, sind die meisten universellen Umrichter nicht in der Lage, Fehlerströme zu begrenzen.

Ist auf der DC-Seite eine PV-Anlage oder ein ESS installiert, liefert der aktive Erzeuger einen zusätzlichen Fehlerstrom, wobei der Beitrag jeweils von der Struktur des Mikronetzes abhängt. Andererseits hilft die aktive Komponente – die einen Regler mit eigener Spannungsrückkopplung beinhaltet – auch dabei, die Spannung auf einem Wert zu halten, der höher ist als in einem passiven DC-Netz. Daher sind die Kurzschlusswiderstandswerte, bei denen der Umrichter beginnt, den von der AC-Seite aufgenommenen Strom zu begrenzen (und bei denen die Regelung beginnt, im Übermodulationsmodus zu arbeiten), niedriger als in einem passiven DC-Netz.



Die beiden Hauptfehlerarten, gegen die ein Schutz gewährleistet sein muss, sind DC-seitige Kurz- und Erdschlüsse.

Das bedeutet, dass es in Systemen mit einer PV-Anlage oder ESS nicht möglich ist, den Fehlerstrom durch Überlagerung der Werte der einzelnen Quellen zu berechnen, da sich die Quellen auf nicht unmittelbar ersichtliche Weise gegenseitig beeinflussen. Daher sollten Fehlerströme für jeden einzelnen Fall unter Berücksichtigung des gesamten Systems berechnet werden.

DC-seitiger Erdschluss

DC-Abschnitte von elektrischen Anlagen sind generell gegen Erde isoliert. Der Transformator auf der AC-Seite des FEC ist jedoch aus Sicherheitsgründen normalerweise geerdet. Kommt es auf der DC-Seite zu einem Erdschluss, können Fehlerströme mit unerwarteten Auswirkungen durch den Umrichter fließen.

In einem passiven DC-Netz können je nach Fehlerwiderstand ähnliche Szenarien wie die oben beschriebenen eintreten, wobei der Umrichter in den Übermodulationsmodus schaltet und sich schließlich wie ein Gleichrichter verhält. Eine PV-Anlage oder ein ESS helfen zwar dabei, die DC-Spannung

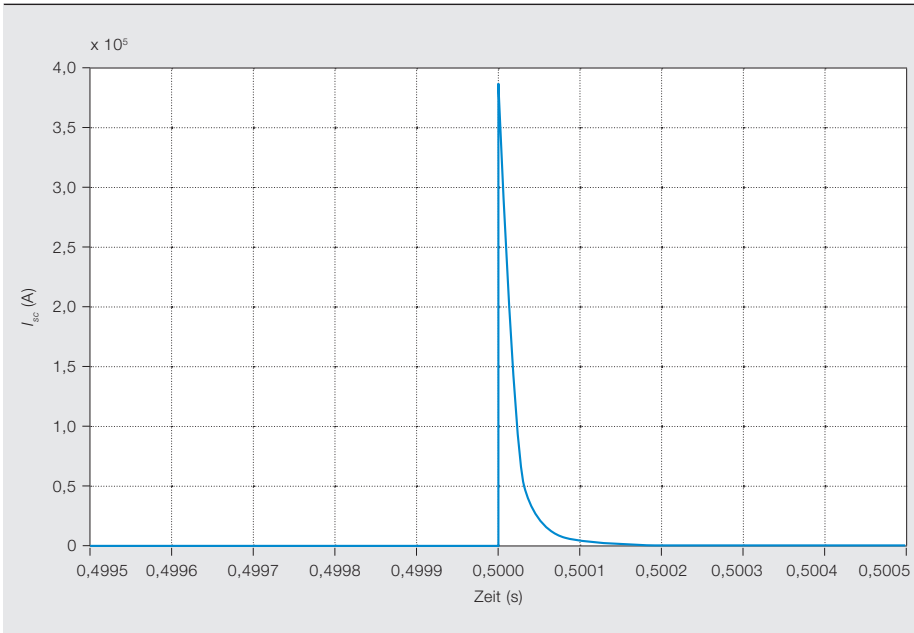
auf einem höheren Wert zu halten als ein vergleichbares rein passives DC-Mikronetz, stellen aber bei geringem Fehlerwiderstand einen Rückleitungspfad für eine unidirektionale Stromkomponente bereit.

Tatsächlich erzeugt ein Erdschluss an einem der beiden Pole des DC-Netzes einen Rückleitungspfad für den Strom zum AC-Neutralpunkt. Bei geringen Fehlerwiderstandswerten und einem Erdschluss am positiven Pol gelangt der Fehlerstrombeitrag des AC-Netzes durch die Freilaufdioden des FEC-Kathodensterns,

In Systemen mit einer PV-Anlage oder ESS ist es nicht möglich, den Fehlerstrom durch Überlagerung der Werte der einzelnen Quellen zu berechnen, da sich die Quellen auf nicht unmittelbar ersichtliche Weise gegenseitig beeinflussen.

während der Beitrag des ESS durch die IGBTs des FEC-Anodensterns fließt → 2. Tritt der Fehler am negativen Pol auf, ist die Situation umgekehrt.

Dies kann dazu führen, dass statt aus einem DC-Anschluss des FEC (wie im



Bei einem DC-seitigen Kurzschluss mit geringem Fehlerwiderstand fließt ein Fehlerstrom in den Freilaufdioden, der durch die IGBTs nicht begrenzt werden kann.

Normalfall) aus beiden DC-Anschlüssen Ströme fließen. Obwohl diese Ströme hoch genug sein können, um den FEC zu beschädigen, werden sie bei der Berechnung des Erdschlussstroms in der Designphase gern vernachlässigt.

In realen Anwendungen misst das in den Umrichter integrierte elektronische Schutzsystem die Spannung über dem IGBT, wenn dessen Gate angesteuert wird. Liegt diese Spannung über einem bestimmten Schwellenwert, schaltet der Steuerkreis den IGBT ab und setzt die Spannung am Gate herunter. Dieser sogenannte Entsättigungsschutz (DESAT) sperrt die IGBTs innerhalb weniger Mikrosekunden, wenn der durch sie fließende Strom einen bestimmten Wert übersteigt. Damit wird der Fehlerstrombeitrag der PV-Anlage bzw. des ESS durch Abschaltung der Modulation des Steuersignals für die IGBTs des FEC unterbrochen. Der Fehlerstrombeitrag des AC-Netzes wird durch die unkontrollierten Freilaufdioden des FEC allerdings weiter gespeist. Daher muss ein geeigneter externer Schutz vorgesehen werden, um den Fehlerstrom zu unterbrechen und den FEC zu schützen.

Fallstudie

Um das Verhalten des in → 3 dargestellten Mikronetzes bei DC-seitigen Kurz- und Erdschlüssen zu analysieren, wurden mehrere Simulationen durchgeführt. Normalerweise ist der Neutralpunkt direkt mit der Erde verbunden, um im Falle eines

Fehlers zwischen den Primär- und Sekundärwicklungen eine gefährliche Spannungsübertragung auf die Niederspannungs-(NS-)Seite zu verhindern.

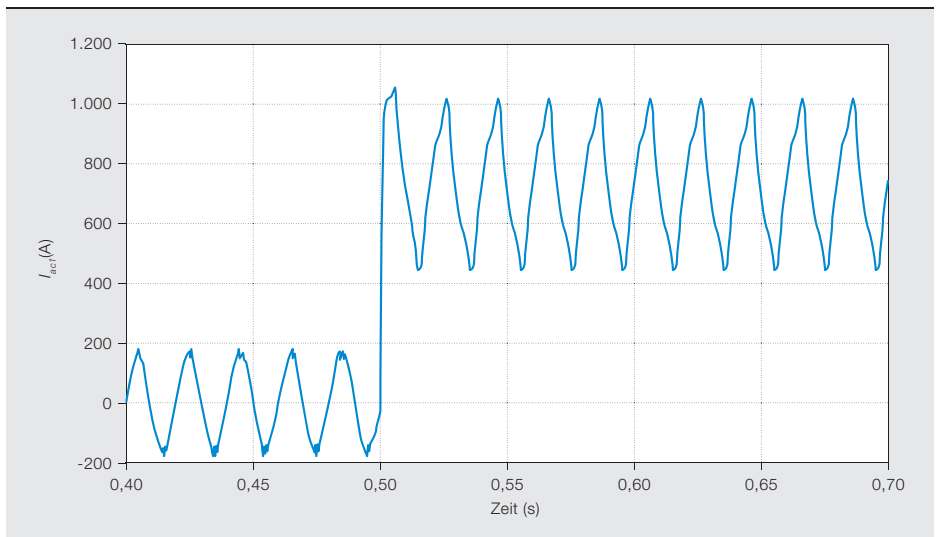
Im Falle eines DC-seitigen Kurzschlusses mit geringem Fehlerwiderstand fließt ein Fehlerstrom in den Freilaufdioden, ohne dass er durch die IGBTs begrenzt werden kann – auch wenn das Steuerungssystem ein IGBT-Sperrsignal sendet. Die Abschaltung der IGBT-Modulation ist in diesem Fall unwirksam, weil der FEC durch die antiparallel zum IGBT geschaltete Diode wie ein dreiphasiger Diodengleichrichter arbeitet. Die auftretenden Ströme können das Mehrfache des FEC-Nennstroms auf der DC-Seite erreichen (125 A bei $R_{sc} = 1 \text{ m}\Omega$) → 4.

Bei geringen Fehlerwiderständen kann der FEC-Beitrag zum Kurzschlussstrom Werte bis zum 16-fachen des FEC-Nennstroms auf der DC-Seite erreichen.

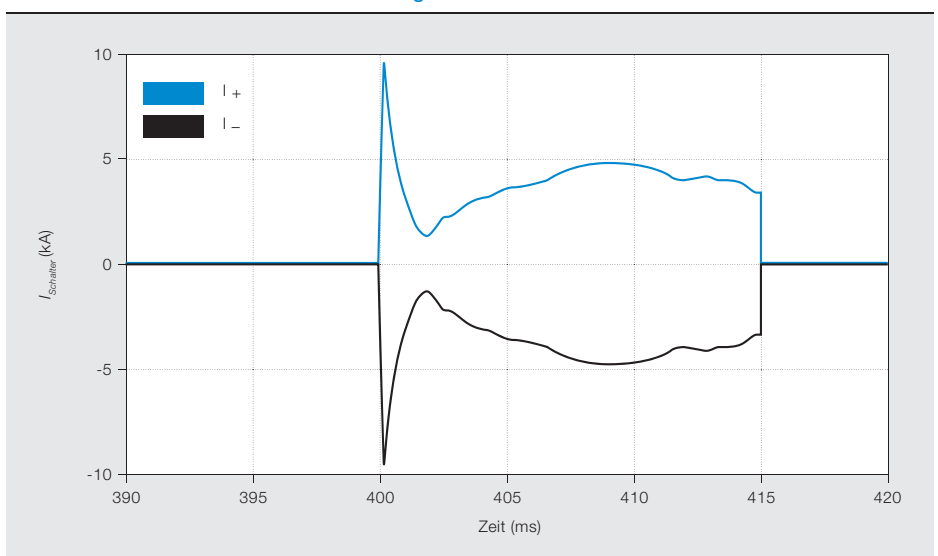
Im Falle eines DC-seitigen Erdschlusses mit geringem Fehlerwiderstand fließt ein Fehlerstrom in den Freilaufdioden des Kathodensterns – der durch die IGBTs nicht begrenzt werden kann – und in den IGBTs des Anodensterns. Die Ströme können Werte erreichen, die ein Mehrfaches des FEC-Nennstroms auf der DC-Seite betragen (125 A, $R_g = 100 \text{ m}\Omega$) [1]. Die Abschaltung der IGBT-Modulation kann lediglich den Beitrag des ESS unterbrechen.

Mit der zunehmenden Anbindung von LVDC-Mikronetzen an AC-Netze wird ein durchdachter Fehlerschutz zu einem wichtigen Bestandteil des Netzdesigns.

5 Verlauf des Stroms I_{ac1} bei einem DC-seitigen Erdschluss mit ESS und $R_g = 100\text{ m}\Omega$



6 Ströme in den beiden Polen des Leistungsschalters



Anhängig vom Wert R_g kann der Strom auf der AC-Seite vollständig positiv sein, und der gesamte bei einem Fehler vom Umrichter aufgenommene AC-Anteil speist den Fehler [1] → 5.

Sinkt der Wert von R_g , kann der FEC-Beitrag zum Kurzschlussstrom Werte bis zum 27-fachen des FEC-Nennstroms auf der DC-Seite erreichen. Ein solcher Beitrag kann nicht durch Sperrung der IGBTs beseitigt werden, da er durch die Freilaufdioden gelangt.

Fehlerschutzanalyse

An dieser Stelle sei angemerkt, dass, während für den DC-Kurzschlusschutz ein einpoliger Leistungsschalter verwendet werden kann, für einen Erdschlussfehler ein zweipoliger Leistungsschalter erforderlich ist, da das PV-System und das ESS den Fehler durch den intakten DC-Pol spei-

sen können und der Erdschluss mit gleicher Wahrscheinlichkeit sowohl am positiven als auch negativen DC-Pol auftreten kann.

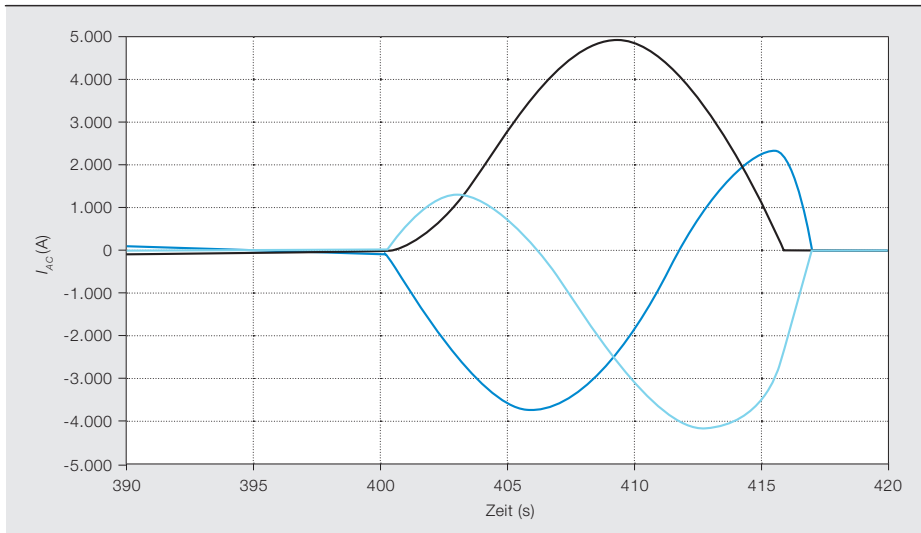
DC-Kurzschlussanalyse

Zur Simulation eines DC-seitigen Kurzschlusses wird die Modulation nach einer typischen DESAT-Schutzzeit ($2\text{ }\mu\text{s}$) abgeschaltet. Gleichzeitig wird die Auslösung um 15 ms verzögert, um einen DC-Leistungsschalter zu simulieren → 6. [2].

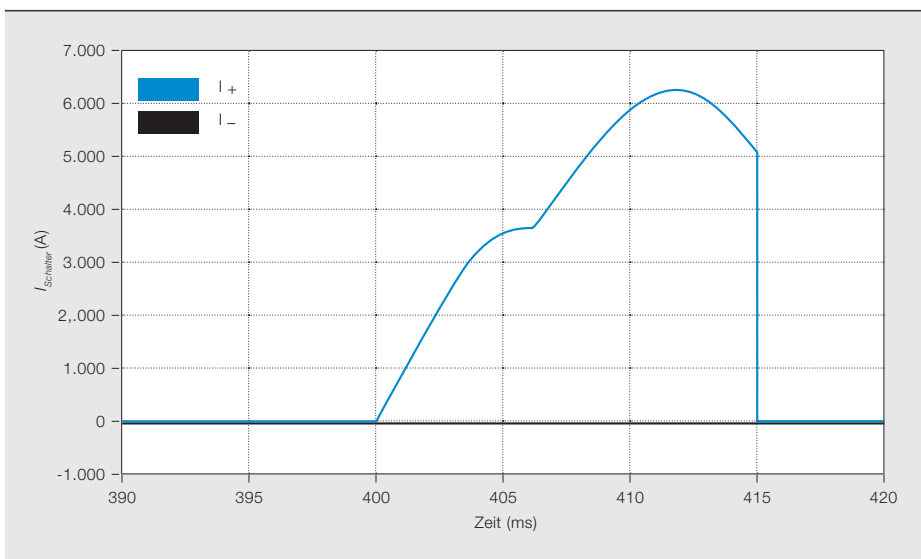
Zur Reduzierung der Überspannung ist der Leistungsschalter den Kapazitäten der DC-Sammelschiene nachgeschaltet. Aufgrund des DESAT-Schutzes fließen die in → 7 dargestellten Ströme in den FEC-Dioden.

Der Energiegehalt einer Transiente (I^2t) während der Unterbrechung beträgt etwa $170\text{ kA}^2\text{s}$. Dieser Wert ist zu hoch für den verwendeten FEC. Für die in der Simula-

7 AC-Ströme in den drei Phasen bei Auslösung des Leistungsschalters



8 Ströme in den beiden Polen des Leistungsschalters



tion betrachteten Halbleiter beträgt der zulässige I^2t -Wert 42 kA²s. Daher ist eine gewisse Überdimensionierung der Dioden erforderlich, damit der FEC der Transiente widerstehen kann.

Erdschlussanalyse

Der eben beschriebene Fehler wurde auch zwischen dem positiven DC-Pol und Erde mit Unterbrechung durch einen DC-Leistungsschalter simuliert [2]. Die daraus resultierenden AC-Ströme entsprachen denen beim Kurzschluss zwischen den Polen. Die durch die DC-Pole des FEC fließenden Ströme hingegen unterscheiden sich deutlich → 8. Tatsächlich steigt der Strom durch den fehlerhaften Pol, während der andere dank des DESAT-Schutzes nahezu bei null bleibt. Der I^2t -Wert liegt bei 157 kA²s und ist vergleichbar mit dem des Kurzschlusses. Auch hier ist eine Überdimensionierung der Dioden erforderlich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Kurzschlüsse zwischen Polen und Erdschlüsse in DC-Netzen, die durch einen FEC gespeist werden und mit PV-Anlagen und/oder ESSs ausgerüstet sind, nicht vernachlässigt werden können. Ferner reicht ein DESAT-Schutz nicht aus, um die FEC-Schaltkomponenten zu schützen, da durch Abschalten der IGBT-Modulation die in den Freilaufdioden fließenden Ströme nicht begrenzt werden. Daher müssen spezielle Schutzeinrichtungen vorgesehen und sorgfältig dimensioniert werden, um eine sichere Unterbrechung von Fehlerströmen und Begrenzung von Folgeschäden zu gewährleisten.

Mit der zunehmenden Anbindung von LVDC-Mikronetzen an AC-Netze wird ein durchdachter Fehlerschutz zu einem wichtigen Bestandteil des Netzdesigns.

Marco Carminati

Enrico Ragaini

ABB Electrification Products,
Protection and Connection
Bergamo, Italien
marco.carminati@it.abb.com
enrico.ragaini@it.abb.com

Literaturhinweise

- [1] M. Carminati et al.: „DC and AC ground fault analysis in LVDC microgrids with energy storage systems“. Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Rom, 2015. S. 1047–1054
- [2] M. Carminati et al.: „Fault protection analysis in low-voltage DC microgrids with PV generators“. Proceedings of the 5th International Conference on Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact. Taormina, 2015. S. 190–197



Antriebsprobe

Ein neues ABB-Testlabor ermöglicht Kunden die Optimierung von Motor-/Umrückerkombinationen

JUKKA JUOTTONEN – Das direkt neben dem ABB-Werk für elektrische Antriebe in Helsinki gelegene Testlabor ist eine der wenigen Prüfeinrichtungen von ABB, die vornehmlich für externe Kunden vorgesehen sind. Das Labor bietet äußerst genaue Messungen der dynamischen Leistungsfähigkeit, Belastbarkeit und Effizienz von Motoren und Umrückern, was es dem Kunden ermöglicht,

das optimale Antriebssystem für seine Anwendung zu finden und somit Kosten, Platz und Energie zu sparen. Darüber hinaus können im Labor die Leistung von Motorregelungen überprüft und die passenden ABB-Umrücker für Kundenmotoren gefunden werden. Dies bietet Kunden die Möglichkeit, ABB schnell und problemlos als neuen Lieferanten zu verifizieren.



In den vergangenen Jahrzehnten ist die Zahl der für den Einsatz mit elektrischen Antrieben konzipierten Motoren erheblich gestiegen. Gleichzeitig sind die Preise von Umrichtern kontinuierlich gesunken, während die Qualität gestiegen ist. Maschinenhersteller und andere Nutzer haben erkannt, dass es wirtschaftlich interessant ist, elektrische Antriebe zu verwenden.

Das neue ABB-Testlabor für Antriebstechnik → 1 bietet Kunden die Möglichkeit, ABB mit minimalem Aufwand als neuen Lieferanten zu verifizieren. Vor der Aufnahme eines neuen ABB-Produkts in die Serienfertigung kann eine Motor-/Umrichterkombination im Labor getestet werden. So können Kunden auf einfache und zuverlässige Weise ein optimales Antriebssystem für ihre Anwendung finden. (Manchmal gehen Kunden auf Nummer sicher und wählen einen größeren Umrichter, womit auch der Schutz und die Verkabelung entsprechend überdimensioniert sind.)

Titelbild

Das neue ABB-Testlabor für Antriebstechnik bietet Kunden die Möglichkeit, ihre Motoren mit ABB-Umrichtern zu testen, um den am besten geeigneten Antrieb zu finden.

Kundenvorteil: Optimierung und Verifizierung

Das ABB Kunden-Testlabor ist ein völlig neues Konzept und richtet sich vornehmlich an Großkunden wie Originalausrüstungshersteller (OEMs), Systemintegratoren und andere ABB-Partner, z. B. aus der Maschinenbaubranche.

Viele Kunden möchten objektive Messungen und Nachweise der Funktionalität sehen, bevor sie größere Investitionen in elektrische Antriebstechnik tätigen. Bisher war es für Kunden – jedenfalls in diesem Maße – nicht möglich, ihre Motoren bei ABB zu testen. Doch nun haben sie die Möglichkeit, genaue Messungen der dynamischen Leistungsfähigkeit, Belastbarkeit und Effizienz zu erhalten und ihre Antriebssysteme anhand dieser Daten zu bewerten.

Darüber hinaus bietet das Labor die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit der Motorregelung zu überprüfen und die passenden ABB-Umrichter für Kundenmotoren zu finden. Dies ist besonders nützlich, wenn der Kunde eine Entscheidung hinsichtlich eines neuen Produkts

treffen muss. Es besteht von Kunden-seite seit Jahren eine starke Nachfrage nach einem solchen Service, und Monate vor der Eröffnung des Labors gab es bereits eine Warteliste für Testzeiten.

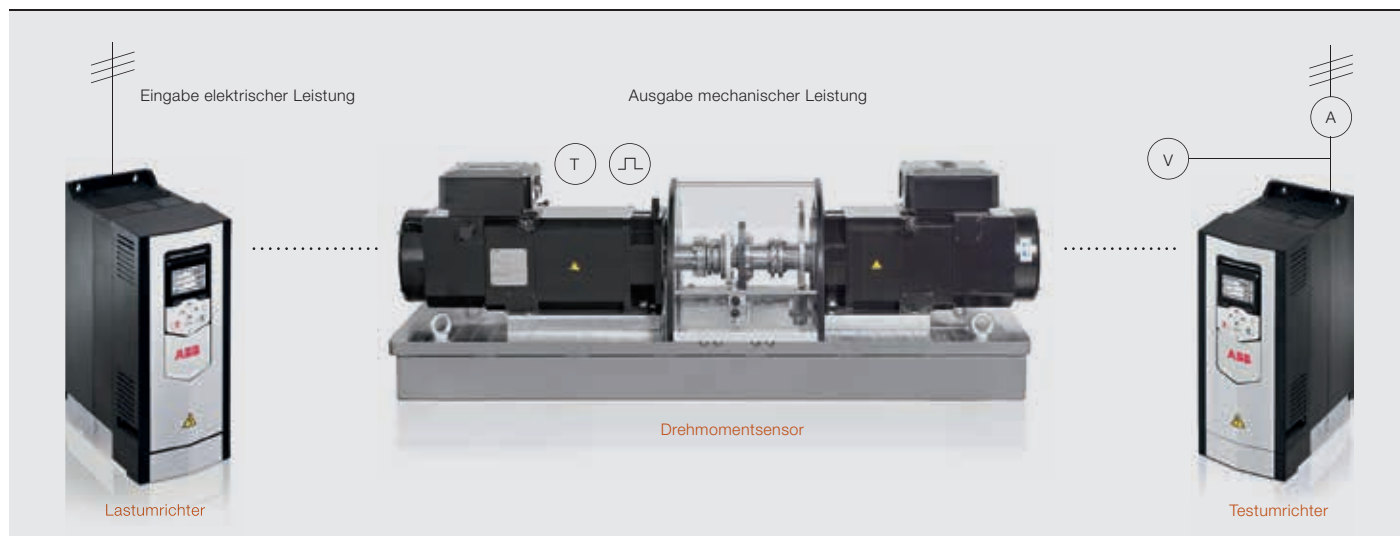
Für gewöhnlich sendet der Kunde seinen Motor einige Wochen im Voraus an das Labor, damit die entsprechende Prüfungsanordnung vorbereitet werden kann. Bei den Prüfungen selbst ist ein Kundenteam anwesend und kann die Erfassung der Messdaten in Echtzeit

Das ABB Kunden-Testlabor ist ein völlig neues Konzept und richtet sich vornehmlich an Großkunden wie OEMs, Systemintegratoren und andere ABB-Partner.

verfolgen. Durch diese äußerst genauen Messungen wird sichergestellt, dass das System spezifikationsgemäß arbeitet.

Damit sind die genauen Leistungsanforderungen des Systems bekannt, und es kann ein optimales Antriebssystem gewählt bzw. auf die Kundenanwendung zugeschnitten werden.

2 Der Lastumrichter simuliert die Last in der Kundenanwendung, während die Leistungsfähigkeit des Testumrichters gemessen wird.



3 Anordnung mit Testmotoren (rechts) und Lastmotoren (links)



Mit anderen Worten, Kunden stehen nun genaue, verifizierte und objektive Messdaten zur Verfügung, um ihre Entscheidung zu unterstützen und ihren Beschaffungsprozess zu verkürzen.

Hochpräzise Messungen

Ein Schlüsselement des Labs ist seine genaue und zuverlässige Drehmoment-Messaus-rüstung, mit der das Drehmoment von nahezu allen Motoren mit einer Leistung von bis zu 385 kW gemessen werden kann → 2-4. Dabei stehen drei Anordnungen für drei verschiedene Wellenhöhen (100, 160 und 250 mm) zur Verfügung.

Bei den Lastmotoren handelt es sich um ABB-Motoren der HDP-Reihe (High Dynamic Performance). Lastmotor und Testmotor werden jeweils mit einem ABB-Umrichter verbunden. Der Lastmotor simuliert die eigentliche Last in der Kundenanwendung. So kann die Eignung der Motor-/Umrichterkombination überprüft und optimiert werden.

Das neue ABB-Testlabor bietet Kunden die Möglichkeit, ein Antriebssystem mit minimalem Aufwand zu prüfen.

Neben kundenspezifischen Motoren können auch sämtliche ABB-Motoren getestet werden.

4 Digitaler Drehmomentaufnehmer mit magnetischer Drehzahlmessung



Das Labor bietet die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit der Motorregelung zu überprüfen und die passenden ABB-Umrichter für Kundenmotoren zu finden.

5 Angebotsumfang des Kunden-Testlabors

Prüfungen und Parameter

- Parameter: elektrische und mechanische Messungen
- Prüfungen: Dynamik, Belastbarkeit, Wirkungsgrad an verschiedenen Lastpunkten, kundenspezifische Lastpunkte
- Funktion von ABB-Umrichtern bei verschiedenen Einstellungen, z. B. für Drehzahl und Drehmoment

Methoden

- Die elektrische Leistung wird im Netz vor dem ABB-Testumrichter gemessen.
- Die mechanische Leistung wird zwischen den Test- und Lastmotoren gemessen.
- Aus der gemessenen elektrischen und mechanischen Leistung kann der Wirkungsgrad des Systems berechnet werden.

Equipment

- Präzisions-Leistungsmesser Yokogawa WT3000
- Drehmomentsensor HBM T40B
- Präzisions-Strommesssystem Hitec MACC plus

Prüfbare Mindest- und Höchstwerte

- Drei Konfigurationen: größte bis 385 kW; kleinste bis 8,2 kW (kleinster Lastpunkt ist 25 %)
- Drehmomentsensor: bis zu einer Drehzahl von 20.000 min⁻¹

Außerdem können Drehzahl, Drehmoment und Wirkungsgrad an jedem beliebigen Arbeitspunkt gemessen werden. Auch kann der Kunde eigene Prüfpunkte definieren → 5.

Das neue Labor soll die Rolle von ABB als agiler und flexibler Partner stärken. Die nun verfügbaren Einrichtungen unterstreichen die Bedeutung dieser Art der Zusammenarbeit mit Kunden, insbesondere aus der Maschinenbaubranche.

Vor Aufnahme der Serienfertigung kann eine Motor-/Umrichterkombination im Labor getestet werden, um sicherzustellen, dass sie zur Anwendung passt.

Jukka Juottonen

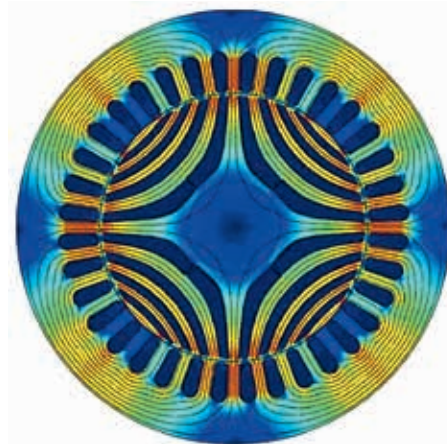
ABB Discrete Automation and Motion,
Drives and Controls
Helsinki, Finland
jukka.juottonen@fi.abb.com



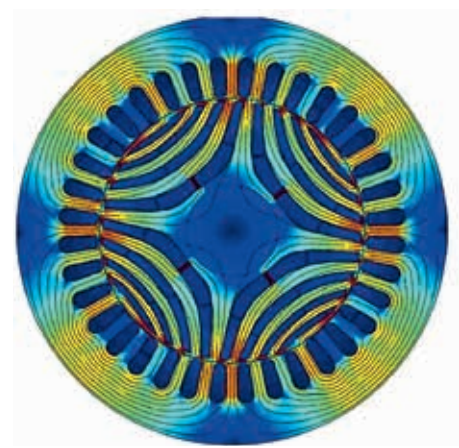
Eine treibende Kraft

Hocheffiziente Elektromotoren ohne seltene Erden für nachhaltige und zuverlässige Lösungen

FREDDY GYLLENSTEN, PETER ISBERG, ALESSANDRO CASTAGNINI, GIULIO SECONDO, JOUNI IKÄHEIMO, ARI TAMMI – In hocheffizienten Elektromotoren für industrielle Anwendungen kommen häufig Permanentmagneten zum Einsatz, die sogenannte seltene Erden (SE) wie Neodym und Dysprosium enthalten. Diese Elemente sind je nach Verfügbarkeit starken Preisschwankungen unterworfen. Dank jüngster Entwicklungen auf dem Gebiet der drehzahlregelten Motortechnik stehen inzwischen leistungsstarke Alternativen Verfügung, die ohne SE auskommen. Eine davon ist der Synchronreluktanzmotor (SynRM), der sich durch einen sehr hohen Wirkungsgrad, eine hohe Zuverlässigkeit und seine besondere Wartungsfreundlichkeit auszeichnet. Ein weiteres Beispiel ist der mit Ferritmagneten ausgestattete SynRM², eine noch effizientere und leistungsstärkere Variante des SynRM.



1a Der Rotor ist am Magnetfeld ausgerichtet, d. h. es wird kein Drehmoment erzeugt.



1b Der Rotor ist nicht am Magnetfeld ausgerichtet, d. h. es wird ein Drehmoment (gegen den Uhrzeigersinn) erzeugt.

Obwohl der Elektromotor bereits vor über 100 Jahren erfunden wurde, gibt es immer wieder Neuerungen, die diese Technik vorantreiben. So wurden in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte bei der Verbesserung des Wirkungsgrads von Elektromotoren erzielt.

Da Elektromotoren einen erheblichen Teil des Stromverbrauchs ausmachen – immerhin werden 28 bis 30 % der gesamten elektrischen Energie von Elektromotoren in mechanische Energie umgewandelt –, ist ihr Wirkungsgrad von besonderem Interesse, und in allen industrialisierten Regionen der Welt gelten gewisse Mindestvorschriften für den Wirkungsgrad von Elektromotoren. In dem Bestreben, den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen der Industrie weiter zu reduzieren, sieht manche regionale Gesetzgebung noch höhere Mindeststandards vor. Schon bald werden alle Industrieländer für nahezu den gesamten Leistungsbereich direkt netz-

betriebener (Direct-Online, DOL) Niederspannungsmotoren (0,12 bis 1.000 kW bei 50 bis 1.000 V) die Effizienzklasse IE3 als Mindestanforderung festlegen. Ähnliche Anforderungen für umrichter gespeiste, drehzahlgeregelte Motoren (Variable Speed Drive, VSD) sind bislang noch nicht definiert, werden aber in naher Zukunft erwartet.

Asynchronmotoren

Der Asynchronmotor (AM) ist mit Abstand der am weitesten verbreitete Elektromotor in der Industrie. Dieser leistungsstarke und effiziente Motor besitzt keinen Kommutator und keine Bürsten und ist damit sehr zuverlässig und relativ wartungsfreundlich. Es wird ständig weiterentwickelt, um seinen Wirkungsgrad zu verbessern.

Trotz ihrer universellen Verwendung weisen AM einige Nachteile auf, die sich aus ihrer asynchronen Drehzahl ergeben. Diese führt zu Leitungsverlusten im Rotor, die sich negativ auf den Wirkungsgrad auswirken und zusätzliche Wärme erzeugen, die die Lebensdauer der Lager verkürzt.

Permanentmagnetmotoren

Obwohl Permanentmagnetmotoren (PM-Motoren) bereits seit Langem bekannt

sind, wurden sie erst in den 1980er Jahren zu einer ernsthaften Konkurrenz für den AM, nachdem General Motors und Sumitomo Special Metals im Jahr 1982 unabhängig voneinander eine neue Generation von Permanentmagneten auf der Basis von Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) entwickelt hatten. Eine Voraussetzung für den Einsatz dieser neuen Magnete in Elektromotoren war die parallele Entwicklung von Frequenzumrichtern, die für die Steuerung und den Betrieb der Motoren erforderlich waren.

Beim PM-Motor sind die Magneten auf der Oberfläche des Rotors montiert oder darin eingebettet. Anders als der Asynchronmotor, dessen Rotor „Schlupf“ hat – sich also langsamer dreht als das Magnetfeld, das ihn antreibt –, läuft der PM-Motor synchron, d. h. sein Rotor dreht sich genauso schnell wie das Magnetfeld. Dies ermöglicht eine präzisere Dreh-

28 bis 30 % der gesamten elektrischen Energie werden von Elektromotoren in mechanische Energie umgewandelt.

zahlregelung, einen höheren Wirkungsgrad und niedrigere Rotor-/Lagertemperaturen. Bei PM-Motoren treten keine Leitungsverluste im Rotor auf. Außerdem weisen sie geringere Leit- oder Joule-

Titelbild

Die Motoren von Typ SynRM und SynRM² stellen in puncto Effizienz und Leistungsdichte einen bedeutenden Schritt in Richtung einer nachhaltigen Elektromotortechnologie dar. Das Bild zeigt den einzigartigen Rotor des SynRM.

Die IEC 60034-30-1 definiert verschiedene Effizienzklassen für netzgespeiste Motoren – d. h. Asynchronmotoren und Direktanlaufmotoren wie PM-Motoren mit Käfigen wie bei AM, die den Direktanlauf ermöglichen [2]. Das Problem bei der Definition des Wirkungsgrads von SynRM und anderen rein VSD-gespeisten Konzepten ist, dass es für diese Motoren noch keine Effizienzstandards gibt. Diese sollen in der künftigen IEC 60034-30-2 enthalten sein. Deshalb wurden zur Bestimmung der Effizienzklasse der SynRM von ABB die Grenzwerte der IEC 60034-30-1 herangezogen, obwohl die SynRM bei den Klassifizierungstests von einem VSD gespeist wurden. Der Betrieb mit einem VSD ist bei gleichem Arbeitspunkt grundsätzlich mit höheren Motorverlusten verbunden als bei direktem Netzanschluss mit sinusförmiger Spannung, da der VSD durch das Schalten der Pulsweitenmodulation (PWM) hohe Oberschwingungsspannungen erzeugt, die im Motor zu höheren Verlusten führen. Die für den SynRM angegebenen Wirkungsgrade sind daher eher konservativ.

Die niedrigere Betriebstemperatur des SynRM bietet verschiedene Vorteile wie eine längere Lebensdauer der Isolierung sowie längere Schmierintervalle bzw. eine längere Lebensdauer der Lager.



Verluste im Stator (hauptsächlich aufgrund der geringeren Stromstärke) und eine flachere Effizienzkurve auf. Hinzu kommt eine geringere Erwärmung als beim AM, was die Lebensdauer der Isolierung und Lager verlängert. Und PM-Motoren liefern ein höheres Drehmoment bei gleicher Baugröße bzw. das gleiche Drehmoment bei geringerer Größe.

Der Einsatz von seltenen Erden wie Neodym und Dysprosium ist allerdings mit gewissen Nachteilen verbunden, denn SE sind teuer und können starken Preisschwankungen unterliegen. Außerdem kann ihr starkes Rotormagnetfeld die Wartung (ein wichtiges Merkmal bei Industriemotoren) erschweren.

Je nach Preis- und Marktentwicklung könnten sich Betreiber und Kunden, die derzeit noch PM-Motoren bevorzugen, in Zukunft nach Alternativen umsehen.

SE-freie Motoren

Eine wirtschaftlich und ökologisch nachhaltige Lösung könnten in Zukunft SE-freie Motoren sein. ABB hat kürzlich zwei solche Motoren auf den Markt gebracht, die einen sehr hohen Wirkungsgrad und eine hohe Leistungsdichte bieten und dabei ohne die Komplikationen von SE-Werkstoffen auskommen. Dabei handelt es sich um den Synchronreluktanzmotor

SynRM und den permanentmagnetgestützten Synchronreluktanzmotor SynRM² mit Ferritmagneten.

Synchronreluktanzmotoren für drehzahlgeregelte Anwendungen

SynRM funktionieren nach einem äußerst eleganten Prinzip, das schon lange bekannt ist. Doch erst seit der Entwicklung fortschrittlicher Elektronik zur Drehzahlregelung ist es möglich, das Potenzial dieser äußerst effizienten elektrischen Maschinen in vollem Umfang zu nutzen. Bei einem SynRM ist der Rotor so konzipiert, dass er in einer Richtung den kleinstmöglichen magnetischen Widerstand (Reluktanz) und im rechten Winkel dazu den größtmöglichen Widerstand aufweist → 1. Dabei dreht sich der Rotor mit der gleichen Frequenz wie das Statorfeld (wie beim PM-Motor). Die ersten SynRM von ABB, die 2011 auf der Hannover Messe vorgestellt und im selben Jahr auf der SPS IPC Drives in Nürnberg mit dem Automation Award ausgezeichnet wurden, waren ausschließlich für den drehzahlgeregelten Betrieb ausgelegt.

SynRM sind herkömmlichen AM leistungsmäßig überlegen. Sie können so ausgelegt werden, dass sie einen hohen Wirkungsgrad oder eine höhere Leistungsdichte bei geringerem Platzbedarf bieten als vergleichbare AM. Außerdem



SynRM funktionieren nach einem äußerst eleganten Prinzip, das schon lange bekannt ist. Doch erst seit der Entwicklung fortschrittlicher VSD-Elektronik ist es möglich, das Potenzial in vollem Umfang zu nutzen.

sind sie wartungsärmer, besitzen eine geringere Trägheit und sind extrem zuverlässig. Da sie ohne Magneten und Käfig auskommen, ist der Rotor zudem einfacher aufgebaut als bei AM und PM-Motoren.

Die niedrigere Betriebstemperatur des SynRM bietet weitere Vorteile wie eine längere Lebensdauer der Isolierung

sich voneinander. Dies vereinfacht nicht nur die Ersatzteilverhaltung und die Wartung, sondern bedeutet auch, dass ein vorhandener AM problemlos durch einen SynRM ersetzt werden kann.

ABB ist es gelungen, den Wirkungsgrad der SynRM so rasch zu verbessern, dass die aktuellen IE-Klassifizierungen bereits übertroffen wurden → 2. Während in der

EU ein Mindestwirkungsgrad von IE3 gilt, bietet ABB bereits eine Reihe von IE4-SynRM an. Dabei ist das Potenzial dieser Technik noch nicht vollständig ausgeschöpft, und weitere Effizienzsteigerungen sind durchaus möglich.

Hierbei ist zu erwähnen, dass

Im Jahr 2014 erweiterte ABB die SynRM-Produktpalette mit dem SynRM² und präsentierte in Hannover mit einem 15-kW-Motor den ersten öffentlichen Demonstrator einer „IE5-fähigen“ Technik von ABB.

sowie längere Schmierintervalle bzw. eine längere Lebensdauer der Lager (Lagerschäden sind eine der Hauptursachen für Motorenausfälle).

Die Hardware der ABB-SynRM ist identisch mit der entsprechenden AM von ABB, lediglich die Rotoren unterscheiden

bisher nur netzbetriebene DOL-Motoren, nicht aber umrichterbetriebene VSD-Motoren nach ihrem Wirkungsgrad klassifiziert wurden. Wenn also VSD-Motoren von ABB „klassifiziert“ werden, bezieht sich dies auf die Anforderungen für DOL-Motoren, die nicht alle Aspekte des drehzahlregulierten Betriebs berücksichtigen

SynRM können so ausgelegt werden, dass sie einen hohen Wirkungsgrad oder eine höhere Leistungsdichte bei geringerem Platzbedarf bieten als vergleichbare AM.

5 Vergleich von AM, SynRM und SynRM² für verschiedene IE-Klassen

Effizienzklasse ²	IE2	IE3	IE4	IE5 ³
Motordaten¹ (aus Tests in Frequenzumrichterbetrieb)				
ABB-Produkt	M3BP (160)	M3BP (160)	M3BL(160)	N.A. (160)
Typ	IM	IM	SynRM	SynRM ²
Ausgangsleistung (kW)	15	15	15	15
Drehzahl (min ⁻¹)	1.500	1.500	1.500	1.500
Spannung (V)	380	380	380	380
Strom (A) ⁴	29,9	29,5	31,5	25,2
Leistungsfaktor (-)	0,845	0,838	0,763	0,949
Wirkungsgrad (%)	90,6	92,2	94,7	95,2
Umrichterdaten (Netzspannung: 400 V)				
ABB-Umrichterprodukt im Test	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS880-087A
Empfohlenes ABB-Umrichterprodukt für Endkunden	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A
Regelungsart	DTC	DTC	DTC	DTC
Vergleichsfälle mit IE2-Motor und Antriebssystem als Referenz				
Konstantes Drehmoment (75 %) (mit 8.585 Stunden jährlicher Einschaltdauer gem. Diagramm)				
Jährlicher Stromverbrauch (kWh)	74.846	73.536	71.924	70.745
Jährliche Stromeinsparung (kWh) ⁵	0	1.310	2.922	4.100
Jährliche Stromkosteneinsparung (USD)	0	210	470	658
Durchschnittliche Ausgangsleistung (kW)	7,6	7,6	7,6	7,6
Durchschnittlicher Systemwirkungsgrad (%)	87,1	88,7	90,6	92,2
Amortisationszeit (Monate)	–	< 10	< 10	< 11
Quadratisches Drehmoment (mit 8.585 Stunden jährlicher Einschaltdauer gem. Diagramm)				
Jährlicher Stromverbrauch (kWh)	56.386	55.335	54.089	53.275
Jährliche Stromeinsparung (kWh)	0	1.050	2.296	3.110
Jährliche Stromkosteneinsparung (USD) ⁵	0	168	368	500
Durchschnittliche Ausgangsleistung (kW)	5,7	5,7	5,7	5,7
Durchschnittlicher Systemwirkungsgrad (%)	86,7	88,4	90,4	91,8
Amortisationszeit (Monate)	–	< 12	< 13	< 15

1 Motordaten aus Tests bei Nennarbeitspunkt

2 Mindesteffizienz gemäß IEC 60034-30-1

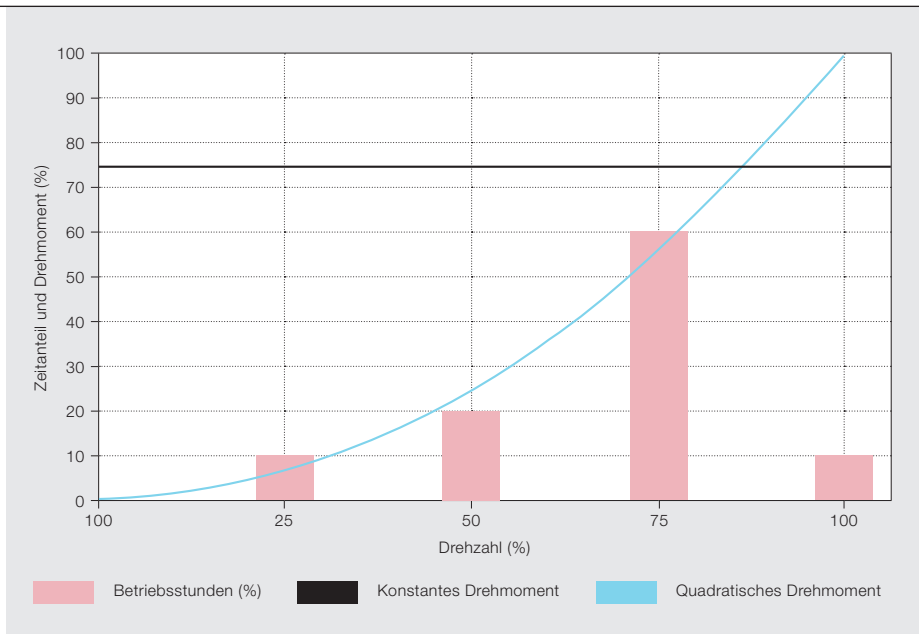
3 Die Effizienzklasse IE5 ist noch nicht definiert, wird aber voraussichtlich um 20 % niedrigere Verluste ausweisen als IE4.

4 Zum besseren Vergleich und zur Harmonisierung wurden die Ströme von den Messwerten auf eine Spannung von 380 V skaliert.

5 Für die Vergleiche wurde Deutschland mit einem Industriestrompreis von 0,16 USD/kWh als Beispiel verwendet.

5a Zusammenfassung der Testdaten

Nach 10 Betriebsjahren entspricht der anfängliche Kaufpreis für alle verglichenen VSD-Systeme nur etwa 2 bis 3 % der Stromkosten.



5b Grundlage der Energieberechnungen

– z. B. die hervorragende Leistungsfähigkeit von VSD-Systemen bei Teillast und die im VSD-Betrieb gegenüber AM deutlich geringeren Oberschwingungsverluste.

Zwei SynRM-Reihen stehen zur Verfügung: der IE4 SynRM mit 5,5 bis 315 kW und der kompakte HO SynRM (High Output) mit 1,1 bis 350 kW. Diese sind zurzeit in verschiedenen Antriebspaketen (Motor und Frequenzumrichter) erhältlich → 3–4:

- IE4 SynRM und ACS880 für Industrie- und Endkunden
- IE4/HO SynRM und ACS850 für Maschinenbauer und Originalgerätehersteller (OEMs)
- IE4 SynRM und ACQ810 für die Wasser- und Abwasserwirtschaft
- IE4/HO SynRM und ACH580 für Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanwendungen (HLK)

Wie bereits erwähnt, gewinnt das Thema Effizienz für Hersteller von Motoren und Motorsystemen zunehmend an Bedeutung, da der Trend in der EU, in den USA und in Asien in Richtung einer strengeren Gesetzgebung geht – nicht nur für Motoren, sondern auch für die Systeme, in die sie integriert sind. Dieser Entwicklung ist ABB einen Schritt voraus – mit der SynRM²-Technologie.

SynRM²

Im Jahr 2014 erweiterte ABB die SynRM-Produktpalette mit dem SynRM² und

präsentierte in Hannover mit einem 15-kW-Motor mit einer IEC-Wellenhöhe von 160 mm („SH160“) den ersten öffentlichen Demonstrator einer „IE5-fähigen“ Technik von ABB. Die Klasse IE5, die in der IEC 60034-30-1 bislang noch nicht definiert ist, wird voraussichtlich um 20 % niedrigere Verluste ausweisen als die Klasse IE4 (eine typische Abstufung zwischen den IE-Klassen).

Ein einzigartiges Merkmal dieses Motors ist der Einsatz von Magneten aus Ferrit (Eisenoxid, Fe_2O_3), die generell kostengünstiger und verfügbarer sind als Seltenerd-magnete. Das Ergebnis ist ein wirtschaftlich und ökologisch nachhaltigeres Produkt.

Zwar wurden Ferrite bereits früher in Niederspannungsanwendungen eingesetzt, doch in der Industrie konnten ferritbasierte Motoren allein nie mit AM konkurrieren. Um die notwendige Stärke zu erreichen, muss ein Motor eine dominierende Reluktanz besitzen, was durch Ferritmagnete unterstützt wird. Dank der raschen Entwicklung und zunehmenden „Intelligenz“ von drehzahlgeregelten Antrieben ist eine umfassende Steuerung und Nutzung dieser Motoren mittlerweile möglich – wie im Falle der SynRM.

Der IE5 SynRM² wurde für Kunden entwickelt, die auf der Suche nach einer noch höheren Effizienz und Leistungs-

dicke sind. Mit Leistungsfaktoren, die denen von PM-Motoren gleichen, und ausgezeichneten Feldschwächungseigenschaften ermöglicht der IE5 SynRM² neue, kompaktere Paketlösungen aus Motor und Umrichter. Derzeit arbeitet ABB an der Entwicklung einer SynRM²-Reihe mit Leistungen von 0,55 bis 15 kW, die sich z. B. an den HLK-Markt richtet. Angesichts der attraktiven Eigenschaften kann diese Technologie aber auch für großen OEMs in anderen Anwendungsbereichen interessant und von Nutzen sein.

Vergleichstests mit verschiedenen Motortypen im VSD-Betrieb

Die in der IEC 60034-30-1 definierten IE-Wirkungsgradklassen gelten für DOL-Motoren und beziehen sich auf den Nenarbeitspunkt (d. h. bei voller Last und Drehzahl). Natürlich reicht diese Klassifizierung nicht aus, um die relative Effizienz von drehzahlgeregelten Motoren und Antrieben widerzugeben, da sie weder das Teillastverhalten oder das Drehzahl-Arbeitspunkt-Verhältnis noch die durch den Umrichterbetrieb verursachten Oberschwingungsverluste in den Motoren oder die Verluste in den Frequenzumrichtern berücksichtigt. Deshalb werden die Systemwirkungsgrade für verschiedene Motortypen und Effizienzklassen in Tests ermittelt → 5a. Dazu werden zwei verschiedene, für die Industrie typische Lastprofile – konstantes Drehmoment (z. B. für Förderbänder) und quad-

Mit dem DOLSynRM, der auf der Hannover Messe 2015 als Konzept vorgestellt wurde, wird ABB künftig auch die Anforderungen von DOL-Motoren abdecken.

ratisches Drehmoment (z. B. für Pumpen und Gebläse) – in Abhängigkeit von der Drehzahl gemäß der Definition in → 5b einschließlich bestimmter Einschaltdauerprofile betrachtet.

Die Energieeinsparungen werden im Vergleich zu einem IE2-System mit Asynchronmotor und Umrichter berechnet. Dabei dient Deutschland mit einem Industriestrompreis von 0,16 USD/kWh als Referenz. Da die Stromkosten einen großen Teil der Lebenszykluskosten von Elektromotoren in der Industrie ausmachen, ist die Amortisationszeit eines VSD-Systems mit höherem Wirkungsgrad außerordentlich kurz. So betragen die Amortisationszeiten für den IE3-Asynchronmotor, den IE4 SynRM und den IE5 SynRM² mit gleichen Umrichtern vom Typ ABB ACS880-032A im Vergleich zum Referenzsystem mit IE2-Asynchronmotor je nach Motortyp und Einschaltdauer weniger als 10 bis 15 Monate. Im Anschluss an diese relativ kurzen Amortisationszeiten tragen die Systeme mit höherem Wirkungsgrad für den Rest ihrer Lebensdauer zur Kosteneinsparung bei. Nach 10 Betriebsjahren entspricht der anfängliche Kaufpreis bei allen verglichenen drehzahlgeregelten Systemen nur etwa 2 bis 3 % der Stromkosten.

Praxistests/Implementierungsbeispiel

In Großbritannien gehört die Wasserwirtschaft zu den effizientesten Nutzern elektrischer Energie. Dies gilt auch für die Pumpstation des Wasserversorgers South Staffordshire Water in Somerford – trotzdem belaufen sich die jährlichen Stromkosten auf etwa 13 Millionen USD,

von denen 90 % für das Pumpen von Wasser ausgegeben werden. In dem Bestreben, seine Energieeffizienz zu steigern, entschied sich das Unternehmen, einen 20 Jahre alten AM mit 115 kW, der von einem moderneren ABB-Frequenzumrichter vom Typ ACS800 gespeist wurde, durch ein neues Antriebspaket aus einem IE4 SynRM mit 110 kW und einem ACS850 zu ersetzen. Das System treibt eine Bohrlochpumpe mit einer Förderleistung von 2,5 Millionen Litern Wasser pro Tag an. Durch den Einsatz der neuesten Motorantriebstechnik erhoffte sich der Kunde eine Steigerung der Effizienz und eine Senkung der Wartungskosten. Am Ende wurden die Erwartungen sogar weit übertroffen: Energieeinsparungen von 6 %, eine Senkung der Gehäusetemperatur an den heißesten Stellen um 58 %, eine um 28 % niedrigere Temperatur des Antriebslagers und eine 75%ige Geräuschminderung gegenüber dem ursprünglichen Asynchronmotor.

Energieeffizient in die Zukunft

ABB liefert passende Motorenlösungen für alle industriellen Anforderungen. Um der Forderung nach mehr Leistung, einer höheren Effizienz, längeren Wartungsintervallen und kompakteren Bauformen nachzukommen, hat ABB neue Synchronreluktanzmotoren entwickelt. Die ökologischen Vorteile der SynRM- und SynRM²-Motoren gehen jedoch über die reine Energieeinsparung hinaus, da sie mithilfe von Standardproduktionsverfahren und gängigen Werkstoffen mit geringen Umweltauswirkungen gefertigt werden. Mit dem neuesten Mitglied der SynRM-Familie, dem DOLSynRM, der auf der Hannover Messe 2015 als Konzept vorgestellt wurde, wird ABB künftig auch die Anforderungen von DOL-Motoren abdecken. Diese Technologie, die einen speziellen Käfig (ähnlich dem von AM) mit einer SynRM-Struktur kombiniert, befindet sich zwar noch in der Entwicklung, doch sie hat bereits gezeigt, dass Wirkungsgrade gemäß IE4 – und mit sorgfältiger Optimierung sogar gemäß IE5 – ohne den Einsatz von SE-Magneten oder anderen speziellen Werkstoffen erreicht werden können. Das moderne Design des SynRM bildet damit die Grundlage für eine nachhaltig effiziente Zukunft des Elektromotors.

Freddy Gyllensten

Peter Isberg

ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Västerås, Schweden
freddy.gyllensten@se.abb.com
peter.j.isberg@se.abb.com

Alessandro Castagnini

Giulio Secondo

ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Vittuone, Italien
alessandro.castagnini@it.abb.com
giulio.secondo@it.abb.com

Jouni Ikäheimo

Ari Tammi

ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Vaasa, Finnland
jouni.ikaheimo@fi.abb.com
ari.tammi@fi.abb.com

Literaturhinweise

- [1] M. Meza: „Industrial LV Motors & Drives: A Global Market Update – January 2014, IHS“. Vorgestellt auf der Motor & Drive Systems 2014 – Advancements in Motion Control and Power Electronic Technology. Orlando, FL, USA, 2014
- [2] „Drehende elektrische Maschinen – Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren“. IEC 60034-30-1:2014



Verdrehschutz

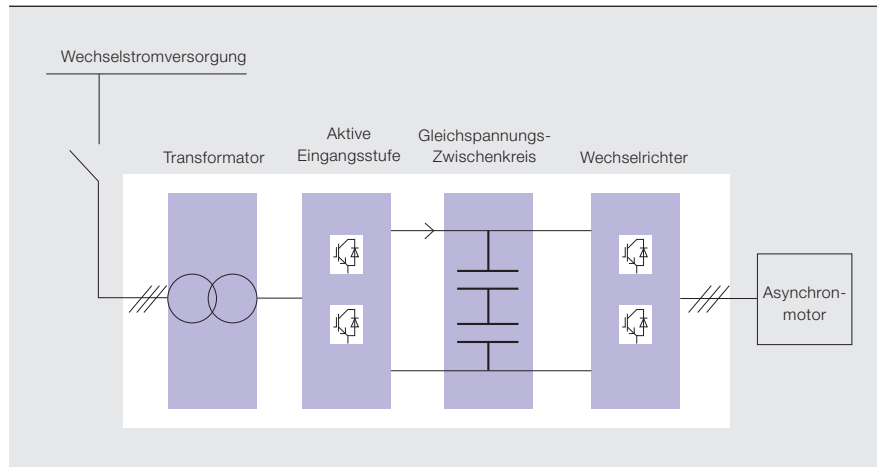
Dämpfung von Torsionsschwingungen im Zusammenspiel zwischen drehzahlgeregelten Antrieben und elastischen mechanischen Systemen

MEHMET MERCANGÖZ, SILVIA MASTELLONE, STEFAN ALMÉR, THOMAS BESSELMANN, PIEDER JÖRG, JOUKO NIIRANEN, LUCA PERETTI, VELI-MATTI LEPPÄNEN – So, wie im Gleichschritt marschierende Soldaten eine Brücke zum Schwingen bringen können oder der Wind die Tacoma-Narrows-Brücke zum Einsturz brachte, können ungedämpfte Resonanzeffekte auch für elektrische Antriebe schädlich sein: Pulsationen im Antriebsdrehmoment können sich durch Resonanz mit einer der Eigenfrequenzen der Antriebswelle verstärken und zu Torsionsschwingungen und starken Drehmomentschwankungen führen, die wiederum Schäden an Wellen und Getrieben verursachen können. Es gibt drei Hauptansätze, um solchen Torsionsschwingungen zu begegnen: ihre konstruktive Beseitigung; der Betrieb in einem sicheren Drehzahlbereich, wobei davon ausgegangen wird, dass jegliche Anregung durch die Systemträgheit gedämpft wird; und die aktive Regelung und Beeinflussung des Antriebsstrangs, um auftretenden Torsionsschwingungen entgegenzuwirken. Alle diese Ansätze haben ihre Vorzüge, wie Fallstudien aus der Praxis zeigen.

ZÄHMUNG DER LEISTUNG

ABB Review Reihe
Teil III

1 Beispiel eines elektrischen Wechselstrom-Antriebssystems



Elektrische Antriebssysteme sind in der modernen Welt überall zu finden. In vielen industriellen Anwendungen wandeln sie elektrische Leistung in mechanische Leistung um – oder im Fall von Generatoren auch umgekehrt. Doch in all diesen rotierenden, drehzahlgeregelten Systemen können beim Anfahren, im Betrieb und beim Abbremsen Torsionsschwingungen auftreten. In problematischen Fällen kann es zu übermäßigen Schwingungen kommen, die zu Getriebeverschleiß und sogar Wellenbrüchen führen können. Folglich müssen das Schwingungsverhalten von rotierenden Betriebsmitteln und die dazugehörigen Regelkreise analysiert und evaluiert werden, um den stabilen Betrieb des Systems zu gewährleisten. Dies ist besonders wichtig bei hohen Nennleistungen, da der Wellendurchmesser und somit die mechanische Festigkeit nicht proportional mit der Leistung vergrößert werden kann. Zudem sind die Folgen eines mechanischen Versagens bei einem Antrieb mit hoher Leistung gravierender.

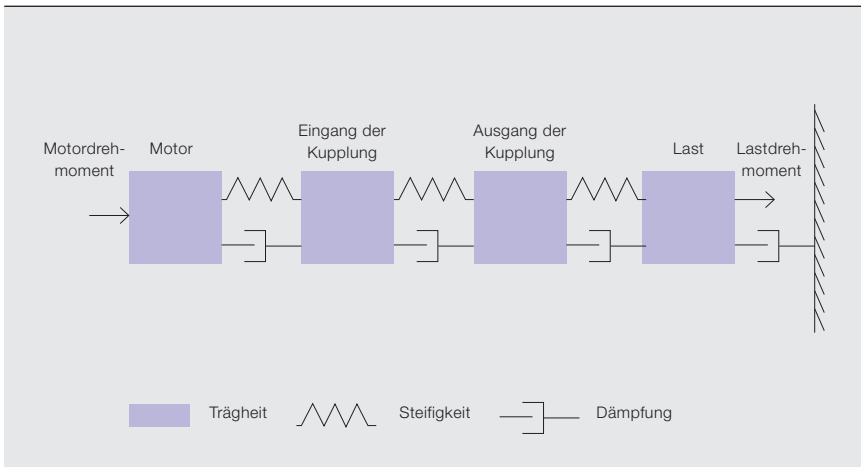
Die Stärke der Torsionsschwingungen ist abhängig von der Stärke der Torsionsanregung und dem Unterschied zwischen den Anregungsfrequenzen und den Eigenfrequenzen des Wellen-

systems sowie deren Dämpfung. Wünschenswert ist eine Situation, in der jegliche Übereinstimmung einer Torsionsanregungsfrequenz mit einer Torsionseigenfrequenz verhindert wird. Daher sollten die Torsionseigenfrequenzen des Systems berechnet und die Anregungskräfte, die im System erzeugt werden können, sowie deren Frequenzen bestimmt werden. Dies ist keine leichte Aufgabe bei komplexen Systemen, deren Antriebsstrang viele Elemente umfasst. In einigen Fällen müssen sogar die endliche Steifigkeit des Motorfundaments und anderer flexibler Teile der umliegenden Strukturen berücksichtigt werden.

Eine besondere Herausforderung bei elektromechanischen Systemen ist die Tatsache, dass die elektrischen und mechanischen Teile üblicherweise getrennt voneinander konstruiert, analysiert und gesteuert werden, ohne dass ihre Wechselwirkung untereinander und mit anderen Komponenten berücksichtigt wird. Außerdem kann es sein, dass genaue Informationen über das System nicht im Voraus bekannt sind. Der richtige Weg, um einen stabilen Betrieb des gesamten Antriebsstrangs zu gewährleisten, besteht in der Reduzierung der Unsicherheit durch Festlegung von Grenzen für die Systemparameter und der Berücksichtigung der Robustheitsreserve über den gesamten Betriebsbereich durch entsprechende Regelung.

Titelbild

In elektrischen Antriebssträngen können potenziell schädliche Schwingungen auftreten. Wie kann ihnen entgegengewirkt werden?



In rotierenden, drehzahlvariablen Systemen können beim Anfahren, im Betrieb und beim Abbremsen Torsionsschwingungen auftreten.

Antriebsstränge

Ein elektromechanischer Antriebsstrang besteht aus drei Hauptkomponenten: dem Stromnetz mit eventuellen Transformatoren und Eingangs-/Ausgangsfiltren, dem Stromrichter mit dem Motor oder Generator und der Last bestehend aus einer Antriebswelle und z. B. einer Turbine. Jede dieser Komponenten kann zur Torsionsdynamik beitragen. Schwankungen im Stromnetz können sich direkt auf das Torsionsverhalten des Antriebsstrangs eines direkt mit dem Netz verbundenen Motors auswirken. Ein Stromrichter ist zwar in

spezielle Ausführungen wie einige Permanentmagnetmaschinen können ein erhebliches Rastmoment aufweisen. Ferner kann die mechanische Last eines Motors oder die Turbinenleistung eines Generators je nach Anwendung variieren und ist in einigen Fällen schwer vorhersagbar.

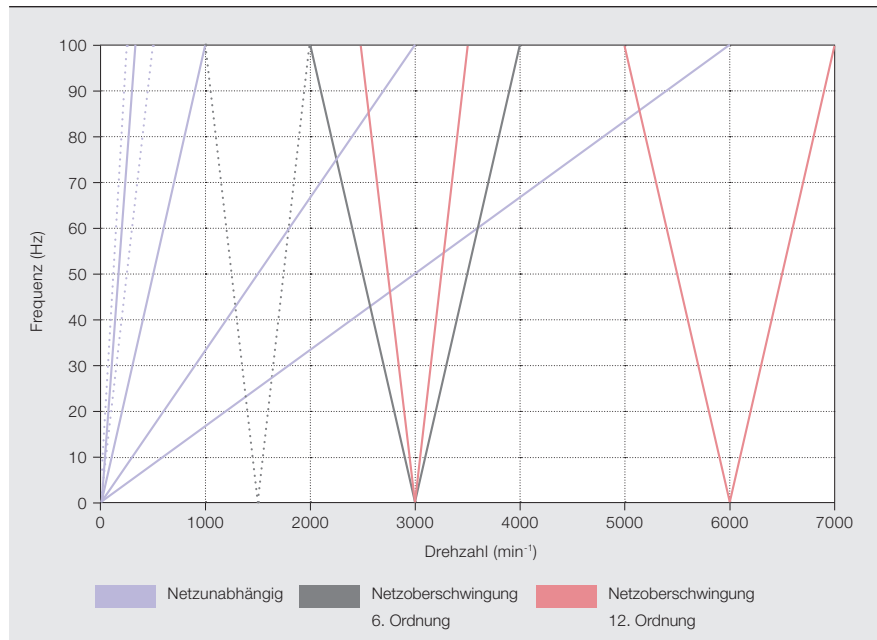
Bei der Untersuchung möglicher Torsionsresonanzen in Antriebssträngen wird zunächst eine sogenannte Modalanalyse durchgeführt. Die dabei ermittelten Eigenfrequenzen werden mit den möglichen Anregungsfrequenzen verglichen. Für eine genauere Untersuchung wird das elektrische System durch diskrete ohmsche, induktive und kapazitive Elemente modelliert. Die mechanische Antriebswelle wird durch diskrete Trägheiten modelliert, die durch trägheitslose elastische Elemente (Wellen und Kupplungen) verbunden sind → 1–2. Mithilfe der Übertragungsfunktionen oder Differentialgleichungen des Regelungssystems kann die Reaktion auf verschiedene Anregungen überprüft und optimiert werden.

In problematischen Fällen kann es zu übermäßigen Schwingungen kommen, die zu Getriebeverschleiß und sogar Wellenbrüchen führen können.

der Lage, das Torsionssystem größtenteils von Netzstörungen zu isolieren, doch durch das Schalten der Halbleiter werden Anregungsfrequenzen erzeugt, die von der Motordrehzahl abhängen. Die meisten Wechselstrommaschinen haben einen sehr glatten Drehmomentverlauf, wenn sie von einer sinusförmigen Spannung gespeist werden, doch

Im Idealfall würde das Modell das Systemverhalten vollständig widerspiegeln, sodass eine entsprechende Regelung ausgelegt und die Leistungsfähigkeit garantiert werden könnte. Doch dies ist selten der Fall, da für gewöhnlich nur die großen konzentrierten Trägheiten und die Hauptelastizität mit der benötigten Genauigkeit bekannt sind. Kleinere und verteilte Trägheiten wie die in einem Getriebe lassen sich schwieriger schätzen. Die Dämpfungskoeffizienten sind eine weitere Quelle von Ungenau-

3 Beispiel eines Campbell-Diagramms für einen zweipoligen Motor mit Frequenzen, die durch einen LCI bei bestimmten Drehzahlen angeregt werden.



Die Torsionseigenfrequenzen des Systems sollten berechnet und die Anregungskräfte, die im System erzeugt werden können, bestimmt werden.

igkeit, da es normalerweise schwierig bzw. unmöglich ist, diese für viele Elemente zu ermitteln. So werden sie häufig vernachlässigt, obwohl die Dämpfung eine erhebliche Auswirkung auf die Resonanzfrequenz und insbesondere die Amplitude haben kann. Andererseits können die elektrischen Eigenschaften des Motors und der Motorregelung im Torsionsmodell des Antriebsstrangs keinesfalls vernachlässigt werden, da sie die Eigenfrequenzen und die Verstärkung der Anregungen erheblich beeinflussen können.

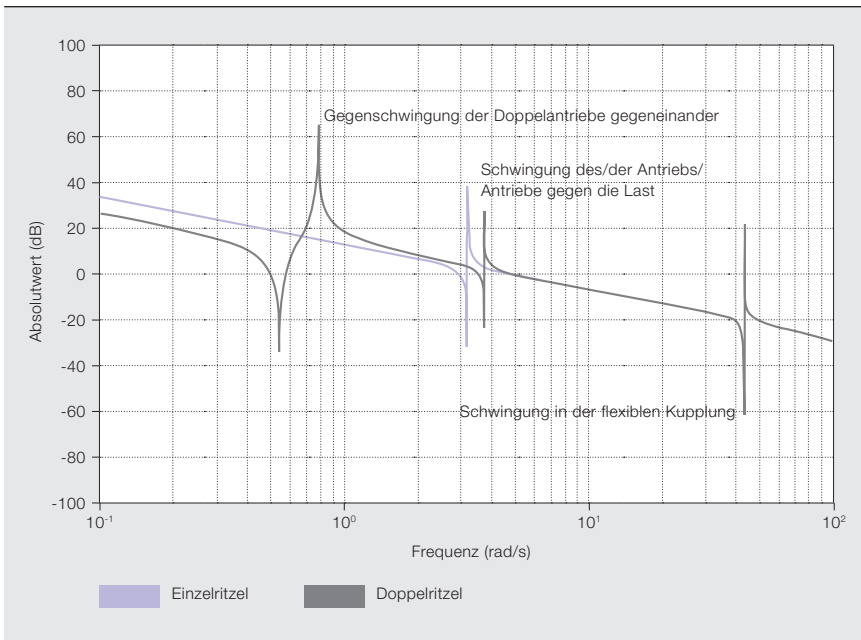
Da die elektrischen und mechanischen Teile des Antriebsstrangs miteinander verbunden sind und sich Schwingungen zwischen ihnen ausbreiten können, kann sich die Analyse nicht auf eine der beiden beschränken, sondern sollte alles vom Wellenende bis zum Stromnetz einschließlich optionaler Frequenzumrichter umfassen. Erst dann können umfassende Lösungsstrategien formuliert werden.

Lösungsstrategien

Je nach Art der Schwingungen können verschiedene Strategien zu deren Reduktion, Begrenzung oder Verhinderung verwendet werden. Dabei werden drei Kategorien unterschieden: Systementwurf, Systembetrieb und aktive Dämpfung.

Strategien während des Systementwurfs sehen vorbeugende Maßnahmen gegen Schwingungen vor. Dies kann durch den Einsatz absorbierender Elemente wie Elastomer- oder hydrodynamisch gedämpfte Kupplungen erfolgen, die die Schwingungsamplitude reduzieren, indem sie die Energie der Anregungen in Wärme umwandeln. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das Spektrum der Anregungen mithilfe physischer Filter am Umrichter Ausgang zu formen. Diese Methoden werden auch als passive Dämpfungsmethoden bezeichnet. Obwohl sie in einigen Anwendungen durchaus praktisch sind, haben sie den Nachteil, dass die abgeführte Energie einen Energieverlust darstellt, und dass die mechanische oder elektrische Filterung die Systemdynamik verlangsamt. Außerdem sind diese Maßnahmen häufig kostspielig, und Elastomerkupplungen altern.

Beim zweiten Ansatz werden mithilfe der Modalanalyse resonanzfreie Drehzahlbereiche bestimmt, in denen ein gefahrloser Dauerbetrieb möglich ist. Da sich die Anzahl der Motorpole auf diese Drehzahlbereiche auswirkt, wird die optimale Polzahl entsprechend den Prozessanforderungen gewählt. Die Methode ist praktisch und einfach umsetzbar, allerdings lassen sich nicht immer ausreichend breite Drehzahlbereiche finden, und die zum Durchqueren



der unzulässigen Resonanzdrehzahlbereiche erforderlichen raschen Beschleunigungen und Verzögerungen sind nicht für alle Anwendungen geeignet.

Die dritte Klasse von Strategien basiert auf der Nachbildung des physikalischen Verhaltens von Dämpfern. Beispiele für solche softwarebasierten

von Nichtlinearitäten wie Reibung und Spiel. Andererseits eignet sich die Gruppe der frequenzbasierten Methoden am besten zur Bestimmung der kritischen Schwingungsformen.

Häufig werden auch hybride Methoden verwendet, die zwei oder mehr der beschriebenen Strategien kombinieren. So kann z. B. die Steifigkeit der Wellen oder Kupplungen verringert werden, um die Resonanz des Systems in eine Bandbreite zu verschieben, in der dann eine aktive Dämpfungsmethode eingesetzt werden kann, um den Schwingungen entgegenzuwirken. Ein weiteres Beispiel ist die Verwendung von Frequenzanalysen zur Bestimmung des Systemspektrums und des gewünschten Zielspektrums mit anschließender Formung des Systemspektrums mithilfe zeitbasierter Energieformungsmethoden. Dieser hybride Ansatz aus zeit- und frequenzbasierten Methoden nutzt das Beste aus beiden Welten: Erfassung des Frequenzverhaltens und Nutzung von Zustandsraumverfahren.

Die verschiedenen Ansätze sollen im Folgenden anhand einiger praktischer Beispiele veranschaulicht werden.

Elektrisch angetriebene Verdichterstationen

Drehzahlgeregelte Antriebe kommen häufig in Erdgas-Verdichterstationen

Bei der Modalanalyse werden die Eigenfrequenzen in den Antrieben bestimmt und mit den möglichen Anregungsfrequenzen verglichen.

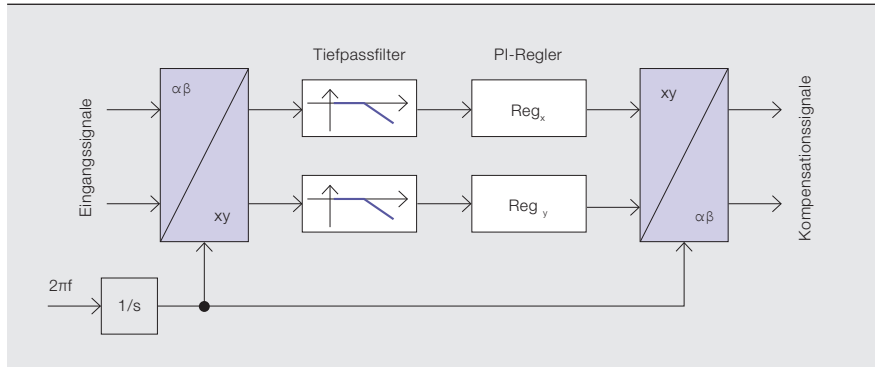
zum Einsatz. Die Leistung solcher Stationen liegt typischerweise zwischen 10 und 70 MW bei einer Rotordrehzahl von einigen Tausend Umdrehungen in der Minute. Der Antrieb ist über ein Übersetzungsgetriebe und eine relativ lange und dünne Antriebswelle mit einer Reihe von Verdichterstufen verbunden, die zusammen eine eher flexible Konstruktion mit einer hohen Lasttragfähigkeit und speziellen Torsionseigenfrequenzen bilden. Eine kontinuierliche Anregung dieser Frequenzen durch eine der Verdichterstufen oder den Antrieb kann zu starken Torsionsschwingungen führen, die die Antriebswelle nicht dauerhaft aushält. Die möglichen Folgen reichen von erhöhtem Verschleiß und einer verkürzten Lebensdauer des Getriebes bis hin zu einem plötzlichen Versagen der Kupplungen oder Wellen.

Aufgrund ihrer bewährten Zuverlässigkeit und Effizienz umfasst eine klassische Konfiguration eines drehzahlgeordneten Antriebs eine Synchronmaschine, die von einem lastgeführten Umrichter (Load-Commutated Inverter, LCI) wie dem Megadrive-LCI von ABB gespeist wird. Allerdings erzeugt der LCI Oberschwingungen im Antriebsdrehmoment, deren Frequenz von der Pulszahl des Umrichters abhängt und mit der Rotordrehzahl variiert → 3. Bei bestimmten Drehzahlen stimmen diese Frequenzen mit den Eigenfrequenzen

Wünschenswert ist eine Situation, in der jegliche Übereinstimmung einer Torsionsanregungsfrequenz mit einer Torsionseigenfrequenz verhindert wird.

Lösungen sind aktive Dämpfungsmethoden auf der Basis von Modellen und virtuellen Widerständen. Die Gruppe der Zustandsraummethoden ist besonders vorteilhaft für Systeme höherer Ordnung, denn sie ermöglicht die Modellierung und Regelung des vollständigen Systems einschließlich der Verbindungen unter Berücksichtigung

5 Typischer Kompensationsalgorithmus



Es gibt viele aktive Regelungsstrategien zur Dämpfung von Torsionsschwingungen, und ABB hat ein spezielles System für Doppelritzelantriebe patentieren lassen.

der Antriebswelle überein. Eine einfache Methode, um die Torsionsschwingungen bei elektrisch angetriebenen Verdichterstationen zu reduzieren, besteht darin, bestimmte Drehzahlbereiche zu vermeiden (wenn möglich). Alle übrigen Torsionsschwingungen, die z. B. durch Querung von Eigenfrequenzen angeregt werden, werden entweder aktiv gedämpft oder klingen von allein ab.

Drehzahlvariable Mühlenantriebe

Obwohl es in Mahlanlagen relativ selten vorkommt, können Drehmomentpulsationen, die mit einer der Eigenfrequenzen des Antriebsstrangs schwingen, schwerwiegende Auswirkungen haben, wenn sie ungedämpft bleiben.

Zahnkranz-Mühlenantriebe mit Doppelritzeln stellen eine äußerst attraktive Lösung für mittelgroße Mahlanwendungen dar, sind aber aufgrund ihres Torsionsresonanzprofils auch mit Herausforderungen verbunden und erfordern eventuell vorbeugende Maßnahmen. Vereinfacht kann das Doppelantriebssystem als eine Anordnung von flexibel miteinander gekoppelten Elementen betrachtet werden, die von den beiden Motoren und der Mühle gebildet wird. Dies führt zu zwei Torsionseigenformungen → 4:

- Eine, bei der die Motoren phasengleich gegen die Mühle schwingen. Hier liegt die Frequenz häufig bei 0,5 bis 0,6 Hz.
- Eine, bei der die Motoren gegeneinander schwingen – die Drehzahl des einen Motors steigt, während die des anderen sinkt, dann kehrt sich dies um und setzt sich unendlich fort. Die Motoren treiben die Mühle also wechselseitig an, wodurch eine

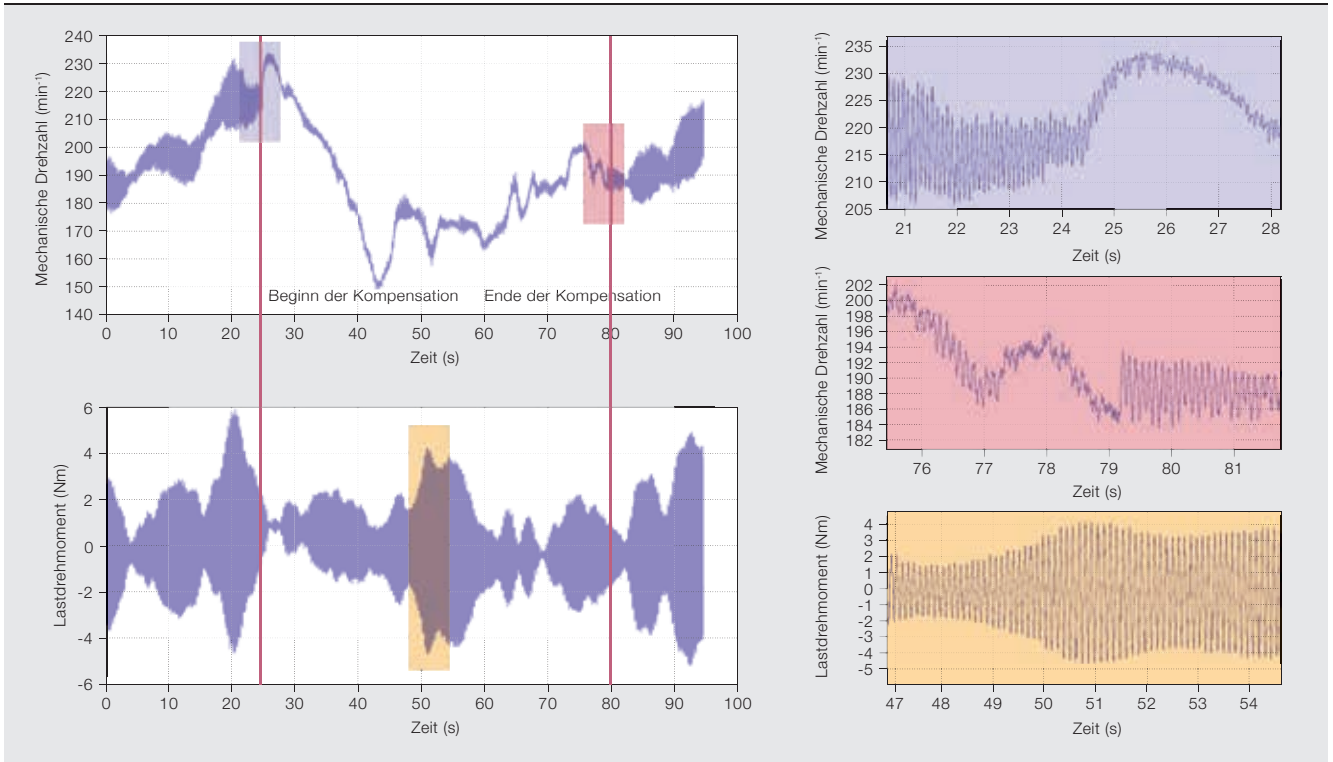
konstante Drehzahl beibehalten wird. Bei relativ langen Antriebswellen und weichen Kupplungen liegt die Eigenfrequenz dieser Schwingungsform bei 0,1 bis 0,2 Hz.

Die zweite Schwingungsform verlangt besondere Beachtung, da Probleme wie verschlissene Getriebe zu Anregungen in dem betreffenden Bereich führen können. Es gibt viele aktive Regelungsstrategien zur Dämpfung von Torsionsschwingungen, und ABB hat ein spezielles System für Doppelritzelantriebe patentieren lassen (WO/2012/020031).

Bei diesem speziellen Ansatz werden Messungen von beiden Antrieben verwendet, um Vorsteuerungen zur Dämpfung beider Eigenschwingungsformen zu berechnen, wobei die Mühlendrehzahl in einer traditionellen Master-Follower-Konfiguration reguliert wird.

Windenergieanlagen

Die Wechselwirkungen zwischen Systemen in einer Windenergieanlage zu beschreiben, ist nicht immer einfach. So führt die aerodynamische Wechselwirkung zwischen dem Wind und den Rotorblättern zu Windscher- und Turmschatteneffekten, die sich als Drehmoment-Oberschwingungen in der rotierenden Welle bemerkbar machen können. Zudem ist die Welle ein Mehrmassensystem mit Eigenresonanzen, die nicht vernachlässigt werden können. Selbst die Eigenresonanzen des Turms können unter transienten Bedingungen zu Drehmomentschwingungen beitragen. Auch das Generator Drehmoment am anderen Ende der Welle muss nicht rippelfrei sein. Je nach Art und Aufbau des Generators kann die Welligkeit im Drehmoment verschiedene Ursachen



Für alle Drehmomentober-schwingungen in der Hauptwelle kann eine Echtzeit-Signalfrequenz-analyse mit anschließender Klassifizierung und Kompensation der Welligkeit durchgeführt werden.

haben, z. B. ein Rastmoment bei Permanentmagnet-Synchrongeneratoren oder eine Netzspannungsunsymmetrie bei doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren.

Da bei der Dämpfung der Torsionsschwingungen in diesen Systemen nicht immer davon ausgegangen werden kann, dass die Oberschwingungen im Vorhinein bekannt sind, werden bis-

weilen Echtzeit-Analysen von gemessenen oder geschätzten Signalen (Ströme, Drehzahl) verwendet. Die Analyse muss jedoch stets mit einer automatischen Klassifizierung (z. B. „Wo kommt die Oberschwingung her?“) und natürlich einer Kompensation durch die Antriebsregelung einhergehen. Ein typischer Algorithmus zur Kompensation einer einzelnen Frequenz ist in → 5 dargestellt. → 6 zeigt die Labornachbildung einer Kompensation der dritten Oberschwingung auf einem Prüfstand für kleine Windenergieanlagen. Hier bewegt die emulierte Turbulenz des Winds den durchschnittlichen Drehzahlwert und erzeugt gleichzeitig Drehmomentlasten mit veränderlicher Größe.

Ange-sichts der Vielzahl von Anwendungen, in denen elektromechanische Antriebssysteme zum Einsatz kommen, und des Schadenspotenzials, das mit unbeachteten Torsionsschwingungen innerhalb dieser Systeme einhergeht, ist es unerlässlich, dass der Beseitigung dieser schädlichen Effekte besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Rigorose Design- und Analyseverfahren haben sich dabei als äußerst wirksam erwiesen.

Mehmet Mercangöz

Silvia Mastellone

Stefan Almér

Thomas Besselmann

ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Schweiz
mehmet.mercangoez@ch.abb.com
silvia.mastellone@ch.abb.com
stefan.almer@ch.abb.com
thomas.besselmann@ch.abb.com

Pieder Jörg

ABB Discrete Automation and Motion,
Drives and Controls
Turgi, Schweiz
pieder.joerg@ch.abb.com

Jouko Niiranen

ABB Discrete Automation and Motion,
Drives and Controls
Helsinki, Finnland
jouko.niiranen@fi.abb.com

Luca Peretti

ABB Corporate Research
Västerås, Schweden
luca.peretti@se.abb.com

Veli-Matti Leppänen

ABB Oy
Helsinki, Finnland
veli-matti.leppanen@fi.abb.com





Eine neue Dimension

Verbesserung von Produktionsabläufen durch 3-D-Visualisierung

MARIA RALPH, ALVARO ARANDA MUÑOZ, SUSANNE TIMSJÖ, MATS LUNDEMALM – Trotz aller Veränderungen in der Industrie durch die IT-Revolution sind viele Produktionsabläufe noch immer papierbasiert. Informationen auf dem Papier zu kommunizieren, ist zeitaufwändig und ineffizient, denn auf diese Weise Probleme oder den aktuellen Produktionsstatus im Blick zu behalten, ist nicht einfach. ABB hat den Prototyp eines 3-D-Visualisierungstools entwickelt, das Produktionsteams dabei hilft, diese Herausforderungen zu bewältigen und effizienter zu arbeiten. Der Prototyp reduziert die Einschränkungen papierbasierter Abläufe und verbessert die Produktivität, indem er wichtige Informationen digital zugänglich macht.

Titelbild

Durch die effektive Bereitstellung von Informationen für die betreffenden Personen können Produktionsprozesse wie die hier gezeigte Fertigung von gasisolierten Schaltanlagen effizienter gestaltet werden.

ABB nutzt Befragungen und Beobachtungen, um zu untersuchen, wie Menschen ihre Arbeit erledigen.

- 1 Der Prototyp liefert einen umfassenden Überblick über den Produktionsstatus. Die angezeigten Informationen können nach Sicherheit, Qualität usw. gefiltert werden.



- 2 Die Einhaltung von Zielen wird ebenfalls verfolgt und dargestellt.



In Produktionsprozessen spielt Zeit eine entscheidende Rolle, denn Produkte müssen termin- und budgetgerecht geliefert werden. Dazu müssen dem Produktionspersonal zu jedem Zeitpunkt die richtigen Informationen zur Verfügung stehen, damit es jede Situation schnell einschätzen und sofort und effizient auf mögliche Probleme reagieren kann. Mit anderen Worten, die Verbesserung des Situationsbewusstseins ist von entscheidender Bedeutung.

Technologie kann dabei helfen, dieses Bewusstsein zu schaffen, doch für die Entwicklung einer solchen Technologie ist zunächst ein eingehendes Verständnis des Produktionsprozesses notwendig. Hierzu nutzt ABB Befragungen und Beobachtungen, um zu untersuchen, wie Menschen ihre Arbeit erledigen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bieten einen wertvollen Einblick in die mit täglichen Aufgaben verbundenen Herausforderungen, Ziele, Bedürfnisse und Bedenken und liefern die Grundlage für die Designüberlegungen zur Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS). Für den hier beschriebenen 3-D-Prototyp wurden verschiedene Produktionsmitarbeiter von Produktionsleitern bis hin zu Fabrikarbeitern befragt und beobachtet. Aus den Ergebnissen wurden allgemeine Anforderungen abge-

leitet. Demnach benötigt das Produktionspersonal:

- die Fähigkeit, den Produktionsfluss (z. B. die logische Beziehung zwischen verschiedenen Produktionslinien) schnell und genau zu verstehen und zu interpretieren,
- Zugang zu wichtigen Informationen zum Produktionsstatus an jedem Schritt des Prozesses,
- eine Möglichkeit, Probleme schnell zu erkennen, zu verstehen und zu lösen (z. B. die Erkennung und Behebung von Engpässen),
- Informationen über und Bewusstsein für die aktuelle Tagesproduktion und Schichtsituation (z. B. Tempo, Durchsatz),
- eine bessere Mobilität der Informationen (Tablet, Smartphone usw.),
- ein effektives Verfolgungssystem für Produktionsaufträge,
- die Bereitstellung unterstützender

Daten für die morgendliche Runde (bei der die Tagesproduktion besprochen wird),

- eine Visualisierung des Fortschritts bei der Erfüllung der verschiedenen Produktionsziele.

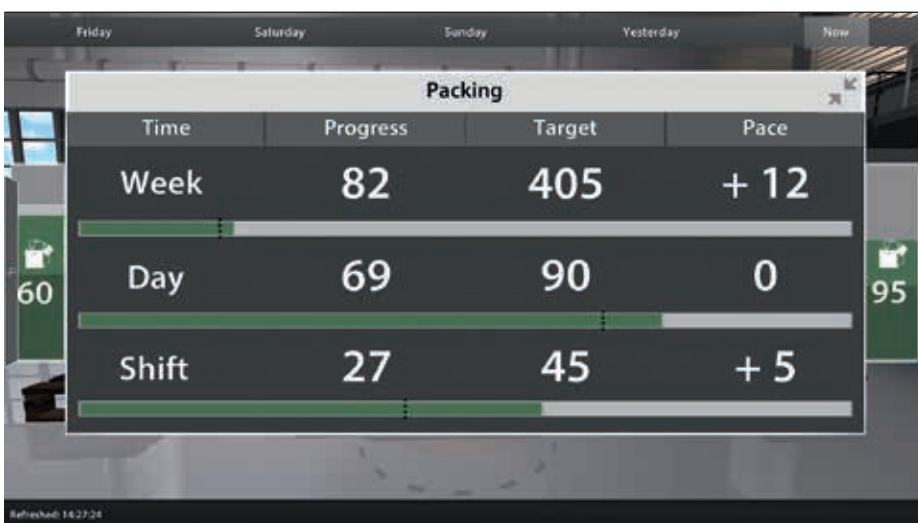
Designkonzepte

Ausgehend von diesen Schlüsselanforderungen wurde ein erster 3-D-Prototyp auf der Basis einer Unity 3D-Gaming-Engine entwickelt, um das Produktionspersonal bei seinen Bemühungen zur Verbesserung des Produktionsprozesses zu unterstützen. Der Prototyp wurde dazu genutzt, wichtige Informationen wie die Anzahl von Teilen, die innerhalb des Produktionsflusses in eine bestimmte Produktionslinie hinein- und wieder hinausgehen, darzustellen. Darüber hinaus zeigt der Prototyp eine Karte, die einen Überblick über den gesamten Produktionsprozess und mögliche Engpassstellen liefert, damit diese

3 Ein Prozessdatenspeicher verfolgt die Entwicklung der KPIs – in diesem Fall die aktuelle Zahl von Aufträgen, Modellen und Kunden für ein bestimmtes Land.



4 Detailinformationen zum Arbeitsfortschritt



leicht erkannt und schnell behandelt werden können, um Stockungen oder Stillstände zu verhindern.

Das Design des Prototyps orientiert sich eng an dem ABB Collaboration Table für das ABB Extended Automation System 800xA, mit dem sich Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs) dreidimensional darstellen lassen. Der Prototyp besitzt ein ähnliches „Look & Feel“ wie der ABB Collaboration Table und kann auch auf einem großen Touchscreen ausgeführt werden. Der Unterschied liegt in den Details zum Produktionsprozess. Der 3-D-Prototyp bietet dem Nutzer eine Vielzahl von Optionen, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Ganzheitliche Sicht

Der Nutzer erhält ein ganzheitliches Bild, das alle wichtigen Produktionsinformationen sowie die Beziehung zwischen Pro-

duktionslinien im Hinblick auf Puffer und laufende Arbeiten umfasst. Dies hilft dem Nutzer dabei, den Arbeitsablauf schnell zu erfassen und sich einen Überblick über den aktuellen Produktionsstatus in der Fabrik zu verschaffen → 1-2.

Kundenaufträge können nach Land, Kundenname und Modell oder Auftragskennung gefiltert werden → 3. Das gefilterte Ergebnis wird im Produktionsfluss visualisiert, indem die Auftragskennung und die Produktionslinie oder der Puffer angezeigt werden, in dem sich der Auftrag zurzeit befindet. Die Filterung lässt sich weiter verfeinern, um weitere Informationen zu einem bestimmten Auftrag abzurufen.

Außerdem kann sich das Personal den Produktionsfortschritt gegenüber den Zielen für die Schicht, den Tag und die Woche für jede Produktionslinie darstellen lassen → 4. So kann überprüft wer-

Die Navigation zwischen verschiedenen Informations-ebenen – von einer allgemeinen Übersicht bis zu detaillierten Informationen zu einzelnen Einheiten – ist sehr einfach.

den, ob einzelne Linien in Rückstand geraten oder zu viel produzieren, was wiederum dabei hilft, potenzielle Engpässe zu erkennen und zu verhindern → 5.

Einfache Navigation

Die Navigation zwischen verschiedenen Informationsebenen – von einer allgemeinen Übersicht bis zu detaillierten Informationen zu jeder Produktionslinie und jedem Puffer – ist sehr einfach. So lässt sich z. B. der Fortschritt jedes Kundenauftrags bis zu seinem Abschluss und Versand genau verfolgen. Ein Suchen und Filtern nach Kundenaufträgen, Trenddarstellungen zu bestimmten KPIs usw. ist ebenfalls möglich.

Farbliche Kennzeichnung

Die dargestellten Informationen werden auf der Basis vordefinierter Schwellenwerte für jeden KPI farblich gekennzeichnet. Diese Schwellen werden so visualisiert, dass Warnungen und kritische Situationen während der Produktion schnell erkannt werden.

So werden z. B. der aktuelle Produktionsfortschritt, die Qualität der produzierten Aufträge, die Sicherheitsniveau in der Fabrik und die Planung zukünftiger Aufträge anhand farbiger 3-D-Balken dargestellt, die sich verlängern oder verkürzen, um Führungskräften eine schnelle Erken-

Die Informationen werden auf der Basis vordefinierter Schwellenwerte für jeden KPI farblich gekennzeichnet.

5 Darstellung eines Engpasses im Prozess



nung aktueller oder potenzieller Probleme zu ermöglichen. Außerdem liefern die Darstellungen dem Nutzer Informationen zu Dingen wie KPI-Trends und der Produktionshistorie, um ein besseres Verständnis von Problemursachen und eine entsprechende Reaktion zu ermöglichen.

Kommunikation

Der Prototyp fördert und unterstützt die Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen dem Fabrikpersonal. So ermöglichen verschiedene Filter z. B. die Darstellung von Daten zur Unterstützung der morgendlichen Besprechungsunden, bei denen die Tagesproduktion auf der Grundlage der Sicherheits-, Qualitäts-, Fortschritts- und Planungskennzahlen vorheriger Schichten besprochen wird.

Problembeseitigung

Die Beseitigung von Problemen wie Engpässen wird unterstützt durch Markierungen, die an verschiedenen Teilen des Produktionsflusses platziert werden können, um mögliche Problemursachen zu kennzeichnen.

Datenmobilität

Auch die Mobilität der Daten wird gefördert. Die Anwendung ist sowohl für den Betrieb auf PCs als auch auf Tablets ausgelegt, d. h. es kann mit einer Internetverbindung und den richtigen Sicherheitseinstellungen von überall auf Live-Fabrikdaten zugegriffen werden.

Vorteile für das Produktionsmanagement

Bisher wurde nur ein Teil der Funktionen des Prototyps in einen realen Produkti-

onsprozess eingebunden. Dazu gehören eine Visualisierung, die zeigt, wo sich die einzelnen Teile eines Kundenauftrags im Produktionsfluss befinden, und die Verfolgung von Kundenaufträgen. Das Projekt wird kontinuierlich weiterentwickelt, wobei neue Funktionen des Prototyps schrittweise in einen realen Produktionsprozess integriert und evaluiert werden.

Der 3-D-Prototyp liefert ein ganzheitliches Bild des Produktionsprozesses und trägt insgesamt zu einem besseren Bewusstsein für den aktuellen Produktionsstatus bei. Die Bereitstellung der richtigen Informationen zur richtigen Zeit in einem intuitiven und leicht verständlichen Format hilft Mitarbeitern im Prozessbereich dabei, den aktuellen Produktionsstatus effektiver zu erfassen. Darüber hinaus kann leichter erkannt werden, welche Teile des Produktionsprozesses sofortige Aufmerksamkeit verlangen, um ein rechtzeitiges Eingreifen zu gewährleisten.

Maria Ralph

Alvaro Aranda Muñoz

Susanne Timsjö

ABB Corporate Research
Västerås, Schweden
maria.ralph@se.abb.com
alvaro.aranda@se.abb.com
susanne.timsjo@se.abb.com

Mats Lundemalm

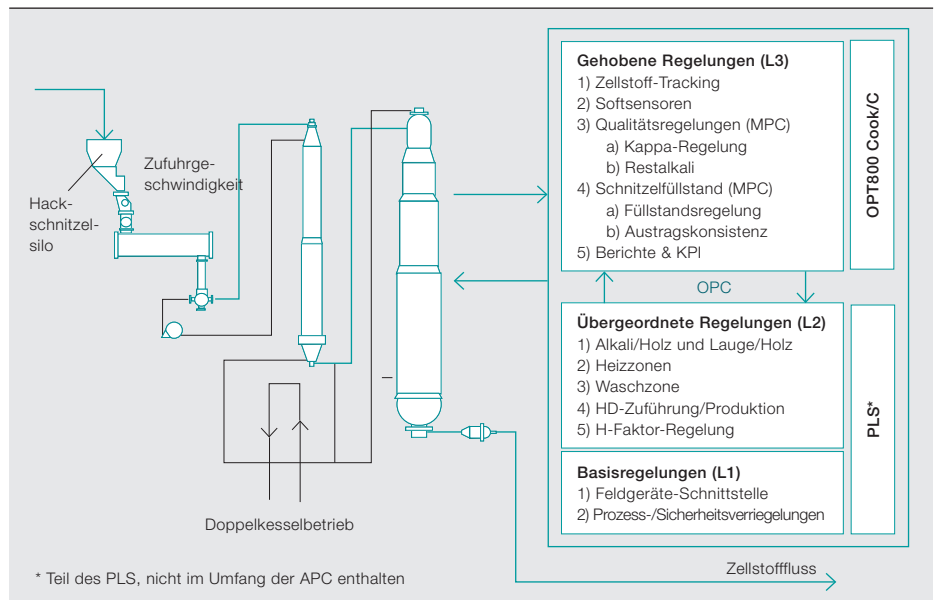
ABB Discrete Automation and Motion, Robotics
Västerås, Schweden
mats.lundemalm@se.abb.com



Optimierte Zellstoffproduktion

Konsistente Zellstoffqualität durch gehobene Prozessregelung

ABHIJIT BADWE, RAMESH SATINI – Als sich der weltweit agierende Papier- und Pappenhersteller Mondi entschloss, sein größtes Zellstoffwerk in Polen zu modernisieren, wählte das Unternehmen ABB als Partner für die Verbesserung und Optimierung der beiden dortigen Zellstofflinien. ABB entwickelte eine gehobene Prozessregelungslösung auf der Basis von modellprädiktiven Regelungen und Softsensoren. Das Ergebnis: eine Verbesserung der Zellstoffqualität um 56 % und standardisierte Lösungen, die nun auch anderen Zellstoffwerken angeboten werden können.



Im Jahr 2011 begann Mondi, nach Möglichkeiten zur Verbesserung der Zellstoffqualität und des Chemikalieneinsatzes in seinem Zellstoffwerk im polnischen Swiecie zu suchen. Gleichzeitig sollte eine Steigerung der Produktion und Senkung der Kosten für die beiden Produktionslinien erreicht werden. Dabei spielten verschiedene Faktoren eine Rolle. Einer davon war der Wunsch des Unternehmens, die Umweltverträglichkeit seiner Betriebe zu verbessern – in Zellstoffwerken bedeutet dies, den Einsatz von Wärmeenergie und Chemikalien zu reduzieren. Ein weiterer Faktor war die Notwendigkeit zur Verbesserung der Produktqualität. Im Werk Swiecie werden vorrangig Wellpappenrohre, Wellpappe und Industriesäcke, d.h. technisch überraschend anspruchsvolle Produkte, hergestellt. An dritter Stelle standen die typischen Ziele aller industriellen Prozesse: Steigerung der Produktionsmengen und Senkung der Produktionskosten.

Titelbild

Mit gehobener Prozessregelung ist es gelungen, die Produktivität im größten Zellstoffwerk Polens zu steigern. Dabei wurden die Prozesse in den Koch- und Waschlinsen auf eine Art und Weise stabilisiert, die mit herkömmlichen Methoden nicht möglich gewesen wäre.

Noch im selben Jahr erhielt ABB von Mondi Swiecie den Auftrag, die Qualität und Effizienz im Zellstoffwerk zu verbessern. Um zu verstehen, mit welchen Herausforderungen diese Aufgabe verbunden war, lohnt es sich, einen Blick auf das Prinzip der Zellstoffherstellung zu werfen.

Holzaufschluss

Das Rohmaterial für Papier und Pappe ist Holz. Bei der Zellstoffherstellung werden die wertvollen Cellulosefasern im Holz vom Lignin und den sie bindenden Hemicellulose-Polymeren getrennt. Während dies früher auf mechanische Weise durch Schlagen des Holzes erreicht wurde, kommen heute chemische Methoden zum Einsatz – nicht zuletzt, weil dies schonender für die Cellulosefasern ist.

Dazu wird das Holz zunächst von der Rinde befreit und zu Hackschnitzeln verarbeitet, die anschließend gesiebt werden, um etwa gleichgroße Stücke zu erhalten. Diese werden mit Chemikalien imprägniert und dem sogenannten Zellstoffkocher zugeführt.

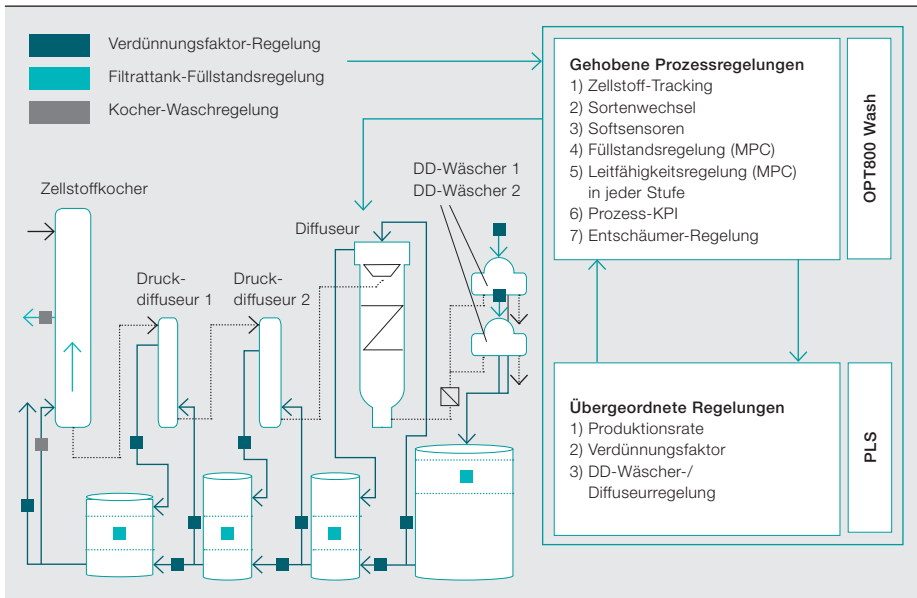
Bei dem in Swiecie verwendeten Sulfatverfahren werden die Schnitzel mit einer Lösung aus Natriumhydroxid und Natriumsulfid (der sogenannten Weißlauge)

vermischt und unter Druck mit Dampf aus kohlegefeuerten Kesseln auf eine Temperatur von etwa 160 °C erhitzt. Nach einigen Stunden bekommt das Material die Konsistenz und Farbe von Haferbrei. Durch die Reaktion mit dem Lignin im Holz sinkt der Alkaligehalt im Natriumhydroxid, und es entstehen Sulfate und Carbonate.

Am Ende des Prozesses wird der Zellstoff durch eine Luftschleuse aus dem Kocher gepresst. Der plötzliche Druckabfall führt zu einer raschen Ausdehnung der Cellulosefasern, wodurch sie leichter abgeschieden werden können. Die Flüssigkeit, in der sie sich nun befinden, wird als Braunstoff bezeichnet.

Eine der ersten Maßnahmen von Mondi Swiecie war die Suche nach Möglichkeiten zur Verbesserung der Produktionsprozesse im Zellstoffwerk.

Der nächste Schritt besteht darin, den Braunstoff zu „waschen“, um die Kochchemikalien (die sogenannte Schwarzlauge) und die verbrauchten Lignin- und Hemicellulosereste zu entfernen. Die dabei entnommene Flüssigkeit durchläuft eine Reihe von Tanks, in denen sie reduziert wird und die Natrium- und Schwefelbestandteile zurückgewonnen



Im Jahr 2011 erhielt ABB von Mondi Swiecie den Auftrag, die Qualität und Effizienz im Zellstoffwerk zu verbessern.

Die Herausforderung bestand darin, dafür zu sorgen, dass der Prozess effizienter und innerhalb engerer Toleranzen arbeitet, ohne die vorhandene Ausrüstung zu ersetzen.

werden, um neue Weißblauge herzustellen. Die gewaschene Cellulose wird gebleicht (sofern erforderlich), gepresst und erhitzt, um das Wasser zu entziehen. Anschließend kann sie zur weiteren Verarbeitung geschnitten und gewalzt oder zu Ballen gepresst werden.

Verbesserung des Prozesses

Die Herausforderung bestand darin, dafür zu sorgen, dass der Prozess effizienter und innerhalb engerer Toleranzen arbeitet, ohne die vorhandene Ausrüstung, sondern lediglich das Leitsystem zu ersetzen. Der Schlüssel hierzu lag in der Optimierung der Koch- und Braunstoffwäscheprozesse der beiden Produktionslinien. Hierzu wurden zunächst die Regelkreise einem Audit und einer

Analyse unterzogen. Anschließend wurde ein Maßnahmenplan für eine gehobene Prozessregelung (Advanced Process Control, APC) auf der Basis von modellprädiktiven Regelungen (Model Predictive Control, MPC) und Softsensoren entwickelt.

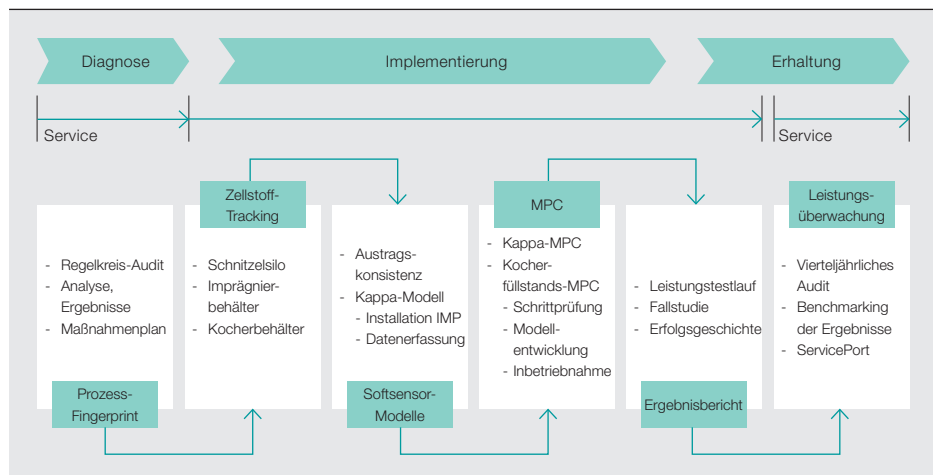
Der Kochprozess

Die zentrale Größe für die Produktqualität im Zellstoffkocher ist die Kappa-Zahl. Diese ist ein Maß für den Ligningehalt im Zellstoff und gibt an, wie gut die Hack-schnitzel „gekocht“ wurden. Dieser Wert lässt sich aus zwei Gründen schwer steuern. Zum einen besitzen die zugeführten Schnitzel einen unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalt und unterschiedliche physikalische Eigenschaften. Zum anderen kann die Kappa-Zahl nicht physisch im Kocher gemessen werden, sondern erst, wenn die Schnitzel den Kocher verlassen haben. Dies ist problematisch, denn wichtig ist die Kappa-Zahl vor diesem Punkt. Wie bei allen Kochvorgängen ist auch beim Zellstoff die richtige Verweilzeit im Kocher entscheidend – lang genug, um möglichst viel Cellulose zu gewinnen, aber nicht zu lang, um die physische Struktur der Fasern nicht zu zerstören.

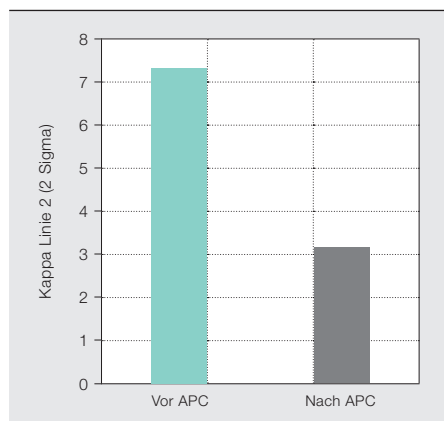
Um einen stabilen Prozess mit minimalen Schwankungen in der Zellstoffqualität zu erreichen, muss die Kappa-Zahl indirekt ermittelt werden. Hierzu werden die verschiedenen Prozessgrößen kontinuierlich gemessen, bevor die Schnitzel in den Kocher gelangen. Die Werte werden

Die APC-Lösung von ABB sorgt für einen konstanten Schnitzelfüllstand, indem sie die Drehzahl des Bodenschabers und den Zellstofffluss aus dem Kocher optimiert.

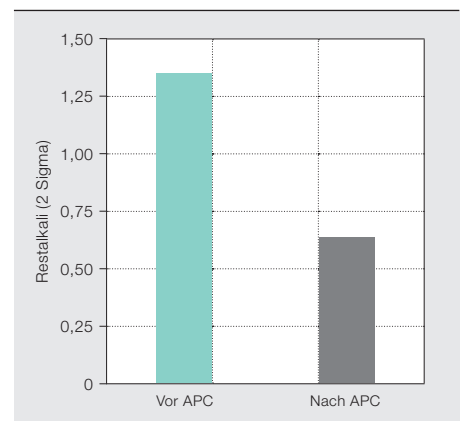
3 APC-Implementierungsansatz



4 Reduktion der Kappa-Schwankungen (2 Sigma)



5 Reduktion der Restalkali-Schwankungen (2 Sigma)



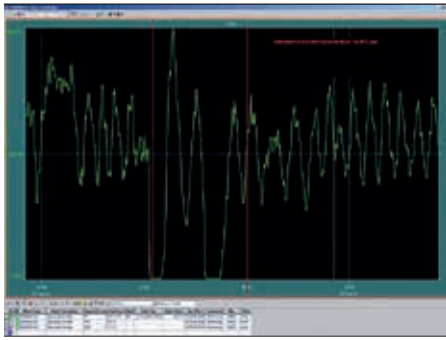
dann einem mathematischen Modell (oder Softsensor) zugeführt, das die verschiedenen nichtlinearen Effekte des Prozesses berücksichtigt.

So funktioniert auch die Lösung von ABB → 1. Die gehobene Prozessregelung nutzt einen Softsensor auf der Grundlage der Inferential Modelling Platform von ABB, der Soft-Messungen der Kappa-Zahl aus einer Reihe gemessener Prozessgrößen liefert. Eine Tracking-Funktion verfolgt diese Messungen und erstellt ein virtuelles Modell der Schnitzel auf ihrem Weg durch den Kocher. Dabei werden aus den Eigenschaften der Schnitzel Messwerte abgeleitet, die dem Modell zugeführt werden, um die Kappa-Zahl in jeder Zone des Kochers vorherzusagen. Der Softsensor arbeitet online und liefert virtuelle Echtzeitmessungen von Qualitätsgrößen (z. B. der Kappa-Zahl), die anschließend von einem modellprädiktiven Regler zur Optimierung des Kochprozesses verwendet werden, d. h. um zu entscheiden, wie lange die Schnitzel einer bestimmten effektiven

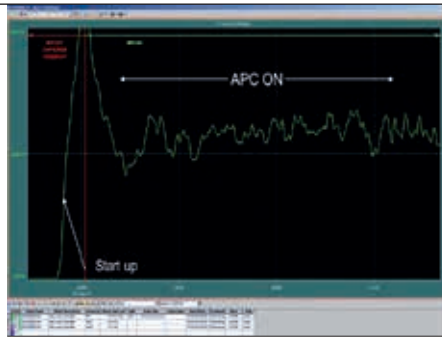
Alkalikonzentration ausgesetzt werden, und um die Alkalikonzentration im gesamten Kocher konstant zu halten. Darüber hinaus ist die APC in der Lage, eine gleichbleibende Produktionsrate zu gewährleisten. Abschließend werden die erfassten Daten in anschaulichen Berichten zusammengefasst, die auch Angaben zu wichtigen Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPI) enthalten.

Eine weitere wichtige Größe im kontinuierlichen Kochprozess ist der Schnitzelfüllstand im Kocher. Schwankungen im Füllstand führen zu einem ungleichmäßigen Kochen, Störungen im Laugenhaushalt des Prozesses und einem ungleichmäßigen Zellstofffluss am Kocherausgang. Die APC-Lösung von ABB sorgt für einen konstanten Schnitzelfüllstand, indem sie die Drehzahl des Bodenschabers und den Zellstofffluss aus dem Kocher (Austrag) optimiert.

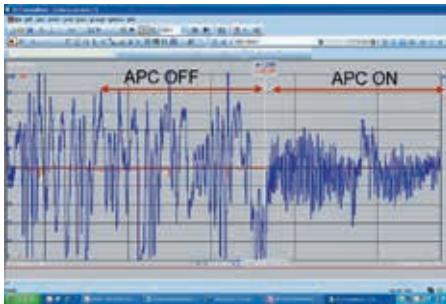
Während die APC diese komplexen Messungen verarbeitet, Echtzeitvorhersagen zum Prozess liefert und optimale Rege-



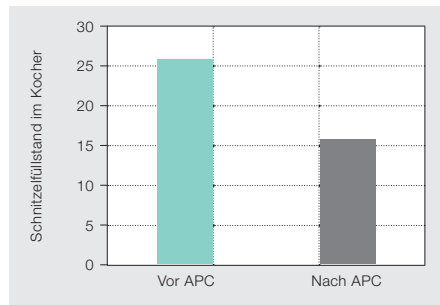
6a Füllstand ohne APC



6b Füllstand mit APC



6c Die Prozessstabilität ist größer mit APC.



6d APC führt zu geringeren Füllständen im Kocher.

Die zur Umsetzung der Ziele von Mondi gewählte Methode basierte auf der Advanced Services-Philosophie von ABB mit den Phasen Diagnose, Implementierung und Erhaltung.

lungsmaßnahmen implementiert, übernimmt das Prozessleitsystem (PLS) vom Typ ABB Extended Automation System 800xA die Basisregelungen von Laugen- und Schnitzelzufuhr, Temperatur, Druck usw. Außerdem übernimmt es die wichtige Aufgabe der H-Faktor-Regelung. Dieser bestimmt, wie schnell das Lignin gelöst wird. Da dies größtenteils von der Temperatur abhängig ist, ist eine genaue Regelung der Wärmezufuhr zum Kocher erforderlich. Hier kann eine Abweichung vom Optimum von nur wenigen Grad Celsius erhebliche Auswirkungen auf die Zellstoffqualität haben.

Der offensichtliche Vorteil der APC- und PLS-Lösung besteht darin, dass sie alle Anforderungen des Kunden für diesen Teil des Zellstoffherstellungsprozesses erfüllt. Durch das Hinzufügen von genau der richtigen Menge Dampf, Weißlauge oder Alkali werden Abfälle im Prozess so weit wie möglich vermieden. Und da die größtmögliche Menge Cellulose mit höchster Qualität produziert wird, werden auch die Qualitäts- und Quantitätskriterien erfüllt.

Braunstoffwäsche

Der zweite wichtige Bereich, der mithilfe eines APC-Systems optimiert wurde, ist die Braunstoffwäsche. Wie beim Zellstoffkocher werden auch hier die Daten kontinuierlich erfasst, sodass mithilfe von

Softsensoren prädiktive Messwerte für die Vorgänge im Prozess ermittelt werden können.

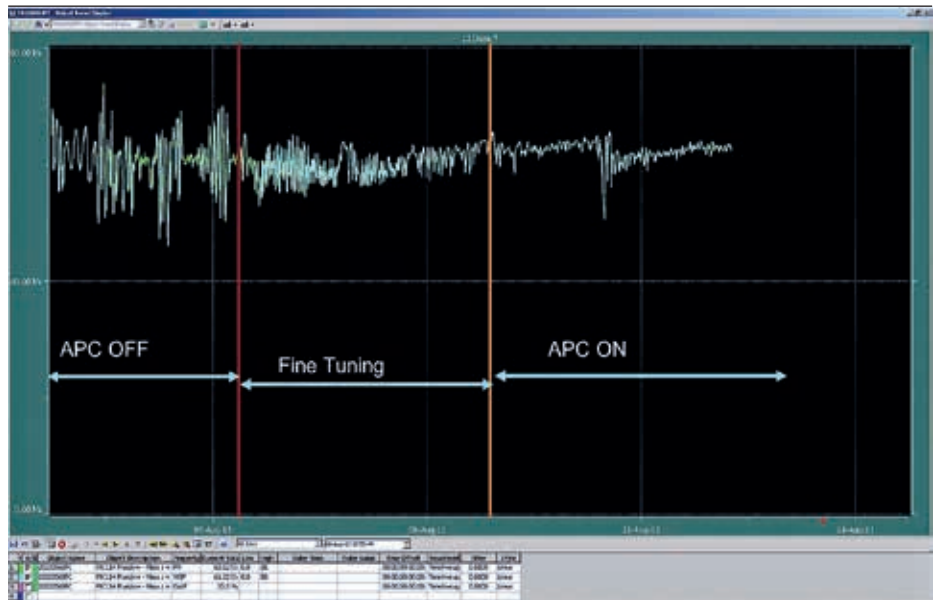
Das Ziel bei diesem Prozessschritt besteht darin, die Pegel in den zahlreichen Filtrattanks so zu regeln, dass für jede zu waschende Tonne Braunstoff genau die richtige Menge Frischwasser zugeführt wird (der sogenannte Verdünnungsfaktor). Kann für diese Größe kontinuierlich ein optimaler Wert ermittelt werden, ermöglicht dies eine Maximierung der zurückgewonnenen Kochchemikalien und eine Minimierung des Energiebedarfs in den Verdampfern. Gleichzeitig werden die Alkaliverluste reduziert. All dies wird durch die APC-Lösung für die Braunstoffwäsche → 2 erreicht. Diese errechnet den optimalen Verdünnungsfaktor für jede Waschstufe auf der Grundlage von Messungen der Leitfähigkeit im Zellstoff an verschiedenen Stellen des Prozesses. Gleichzeitig sorgt sie dafür, dass die Füllstände in den Filtrattanks innerhalb der Vorgaben liegen. Genau wie beim Kocher werden die im Prozessverlauf erfassten Informationen der Leitwerte in Form von KPIs übermittelt.

Implementierungsmethodik

Die zur Umsetzung der Ziele von Mondi gewählte Methode basierte auf der Advanced Services-Philosophie von ABB

Während die APC die komplexen Messungen verarbeitet, Echtzeitvorhersagen zum Prozess liefert und optimale Regemaßnahmen implementiert, übernimmt das PLS die Basisregelungen.

7 Stabilisierung des Zellstoffflusses mit APC



mit den drei Phasen Diagnose, Implementierung und Erhaltung → 3.

Die Diagnosephase beinhaltete ein detailliertes Audit des Prozesses und der Regelkreise bei Mondi Swiecie und führte zur Entwicklung eines spezifischen Maßnahmenplans für die Implementierung des APC-Systems.

Die Implementierungsphase umfasste die Implementierung der Zellstoff-Trackingfunktion im PLS und die Entwicklung von Online-Softsensoren zur Modellierung der Kappa-Zahl. Anschließend wurden Schrittprüfungen am Prozess zur Entwicklung mathematischer Modelle für den modellprädiktiven Regler durchgeführt, der anschließend in Betrieb genommen, abgestimmt und dem Kunden übergeben wurde.

Derzeit befinden sich die APC-Lösungen in der Erhaltungsphase, in der ABB Mondi durch vierteljährliche Audits, Fernüberwachung und Online-Nachtuning dabei hilft, die optimale Leistungsfähigkeit der APCs zu erhalten.

Ein ähnlicher Ansatz wurde bei der Implementierung der APC im Waschbereich verfolgt.

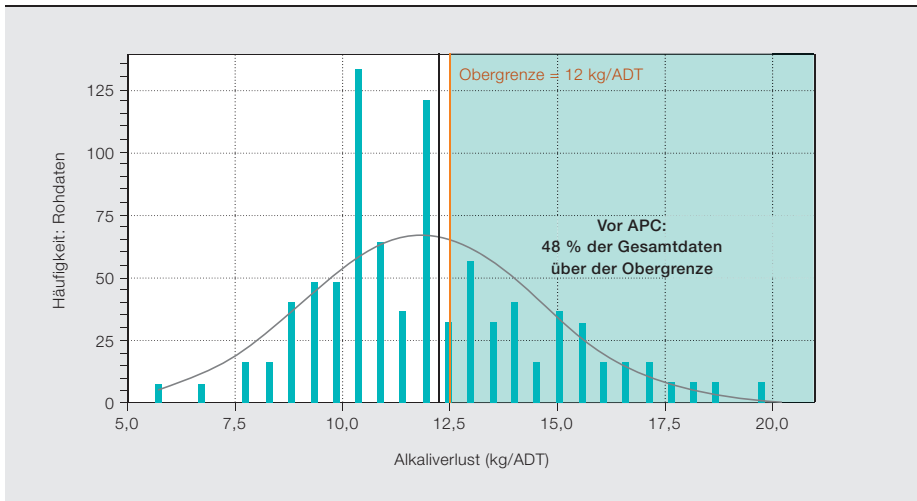
Ergebnis

Die Arbeiten wurden in einzelnen Phasen zwischen August 2011 und dem Abschluss aller Installations- und Testarbeiten im Dezember 2013 durchgeführt. Dabei wurden die Mitarbeiter des Zellstoffwerks stets in den Prozess einbezogen, um sicherzustellen, dass sie im Umgang mit der APC vertraut sind und ihre Arbeitsweisen und Schulungen auf eine bestmögliche Nutzung des Systems ausrichten können.

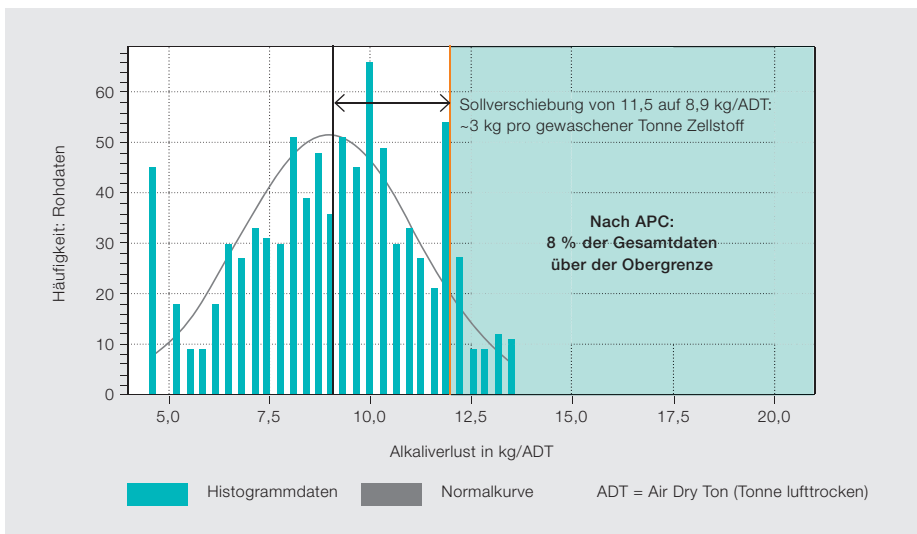
Der offensichtliche Vorteil der APC- und PLS-Lösung besteht darin, dass sie alle Kundenanforderungen für diesen Teil des Prozesses erfüllt.

Nach der Inbetriebnahme des gesamten Systems konnten quantitative Aussagen über die Erreichung der Ziele getroffen werden:

- Die Kappa-Schwankungen im Zellstoffkocher wurden um 56 % reduziert, d. h. die APC trägt zur Produktion einer durchgängig hohen Zellstoffqualität bei → 4.
- Die Schwankungen des Restalkaligehalts sanken um 48 %, d. h. es wurde eine bessere Nutzung der Weißlaug im Kochprozess erreicht → 5.
- Die Schwankungen des Schnitzelfüllstands im Kocher reduzierten sich um



8a Vor APC



8b Nach APC

- 40 % → 6, was einen gleichmäßigeren Zellstoffaustrag → 7 und eine deutlich höhere Stabilität in den Zellstoffherstellungs- und Waschprozessen bewirkt.
- Die Alkaliverluste im Waschprozess wurden um 30 % verringert → 8.
 - Der Frischwassereinsatz im Waschbereich und somit auch der Dampfverbrauch in den Verdampfern wurde reduziert.
 - Die Füllstände der Waschfiltrat- und Austragstanks wurden stabilisiert, was die Kohlendioxid- und Abwasserbelastung reduziert.

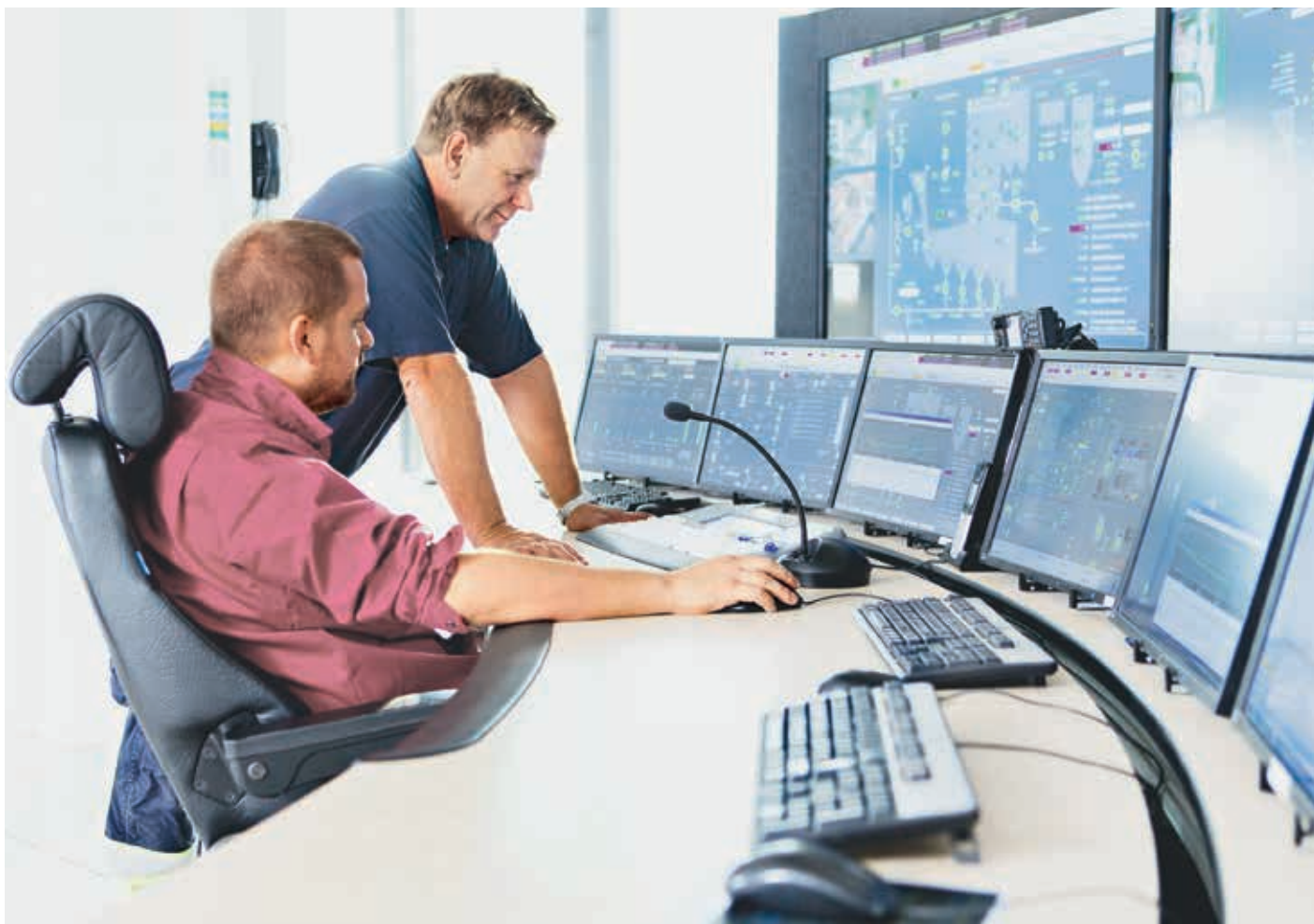
Durch die erfolgreiche Lösung des Optimierungsproblems und die anschließende Validierung der Lösung im Werk von Mondi ist ABB nun in der Lage, standardisierte Lösungen anzubieten, von denen auch andere Zellstoffwerke profitieren können. Diese sind unter den Bezeichnungen OPT800 Cook/C für kontinuierliche Kocher und OPT800 Wash für die Braunstoffwäsche erhältlich.

Letzten Endes hat sich die APC-Lösung nicht nur als Wegbereiter für andere APC-Anwendungen, sondern auch für System 800xA erwiesen. So erhielt ABB kürzlich den Auftrag zur Bereitstellung eines PLS für die größte Zellstoff- und Papierfabrik der Welt, die zurzeit in Indonesien errichtet wird. Eine der Hauptüberlegungen des Kunden war es, das PLS durch eine bewährte APC-Lösung zu ergänzen – und genau dies hat das Projekt bei Mondi Swiecie ermöglicht.

Abhijit Badwe

Ramesh Satini

ABB Pulp and Paper Control Systems
Technology Center
Singapur
abhijit.badwe@sg.abb.com
ramesh.satini@sg.abb.com



Alarmierende Entdeckungen

Bessere Bedienereffizienz durch Lebenszyklusunterstützung im Alarmmanagement

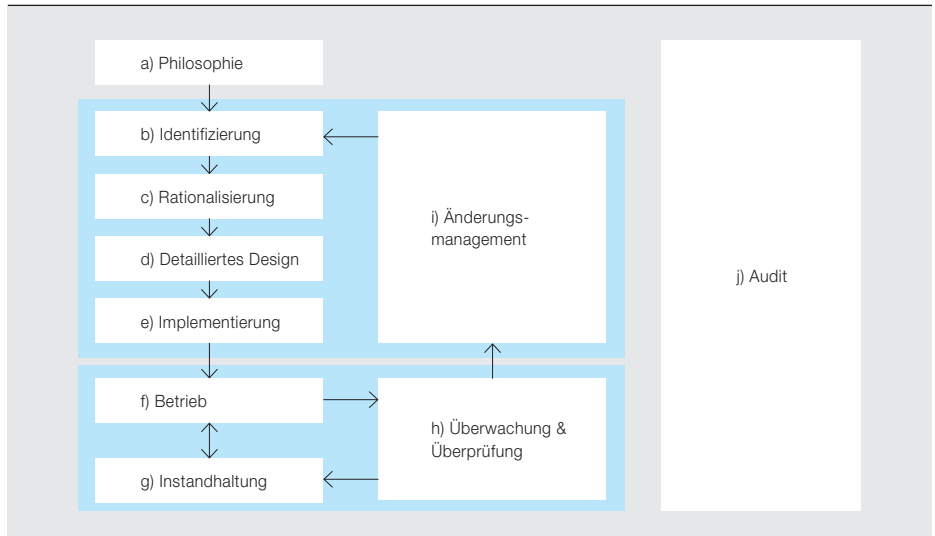
MARTIN HOLLENDER, JOAN EVANS, THOMAS-CHRISTIAN SKOVHOLT, ROY TANNER – Der britische Astronaut Tim Peak wurde vor einer Simulationsübung in der Sternenstadt bei Moskau einmal gefragt, was die größte Herausforderung bei einer solchen Simulation sei. Seine Antwort: „Das Schwierigste ist, wenn mehrere Fehler gleichzeitig auftreten“ [1]. Auch in Industrieanlagen mit Prozessleitsystemen gehört die Behandlung von Alarmen, die massenhaft auf das Bedienpersonal einprasseln, nach wie vor zu den größten Herausforderungen. Um diese Alarmfluten unter Kontrolle zu bekommen, muss das gesamte alarmbezogene Designwissen aus der Engineering-

phase später in der Betriebsphase, wenn zusätzliches Wissen verfügbar wird, leicht zugänglich sein. Nur so können gehobene Alarmierungstechniken wie Alarmunterdrückung wirklich fachgerecht konfiguriert und optimiert werden. Durch ein gutes Änderungsmanagement und eine entsprechende Lebenszyklusunterstützung kann das Alarmsystem an die sich verändernde Realität in der Anlage angepasst und eine kontinuierliche Verbesserung sichergestellt werden. Alarmmanagementstandards wie IEC 62682 und ISA 18.2 unterstreichen die Bedeutung der Lebenszyklusunterstützung im Alarmmanagement.

1 Der Lebenszyklusgedanke in der funktionalen Sicherheit und im Alarmmanagement

	Funktionale Sicherheit		Alarmmanagement
1996	ANSI/ISA 84.01	2009	ANSI/ISA 18.02
2003	IEC 61511	2014	IEC 62682

2 Lebenszyklus nach IEC 62682



Obwohl die Notwendigkeit eines wirksamen Alarmmanagements mittlerweile allgemein anerkannt ist, zeigen Unfälle wie der Vorfall im Werk von DuPont in Bell, West Virginia, [2] im Jahr 2010, dass es auch bei Unternehmen, die in der Sicherheitstechnik führend sind, Defizite gibt. Seit per Software konfigurierbare Prozessleitsysteme (PLS) in der Industrie gang und gäbe sind, lassen sich zusätzliche Alarme mit minimalem Kostenaufwand für den Endnutzer hinzufügen. Dies hat zu einer sinkenden Alarmsystemqualität in Leitsystemen geführt, weil einfach viel zu viele Alarme konfiguriert wurden. Ein klassisches Beispiel hierfür ist die Explosion in der Raffinerie von Texaco in Milford Haven im Jahr 1994 [3], bei der die beiden Anlagenfahrer in den letzten 11 Minuten vor der Explosion 275 Alarme erhielten. Dies gilt mittlerweile als ein Merkmal für ein überlastetes Alarmsystem, das es dem Bedienpersonal unmöglich macht, die Situation richtig einzuschätzen und zu korrigieren. Solche Alarmsysteme sind weder nützlich noch akzeptabel, was schließlich zur Entwicklung systematischer Alarmmanagementansätze geführt

hat, die erstmalig in der 1999 veröffentlichten EEMUA-Richtlinie 191 dokumentiert wurden.

Zehn Jahre später wurde das Alarmmanagement in der Norm ISA 18.2 um einen Lebenszyklusansatz ergänzt. Dieser ähnelt dem im Bereich der funktionalen Sicherheit mit der ISA 84 und der IEC 61511 bereits etablierten Ansatz. Einfach ausgedrückt bedeutet dies: Die Gewährleistung eines sicheren Betriebs und eines nützlichen Alarmsystems ist keine Einmalaufgabe, sondern erfordert kontinuierliche Maßnahmen.

Die neue IEC 62682 (veröffentlicht im Jahr 2014) [4] – die erste internationale Norm für das Alarmmanagement – basiert auf der ISA 18.2 → 1 und betont die Bedeutung eines systematischen Lebenszyklusmanagements. So fordert die IEC 62682 z. B. eine systematische Erfassung und Dokumentation aller für den Entwurf von Alarmen verwendeten Informationen (Sicherheitsstudien, Ausrüstungsspezifi-

kationen usw.). Später, während des Anlagenbetriebs, können die ursprünglichen Designentscheidungen durch weitere Informationen ergänzt oder überprüft werden. Für eine solche Überprüfung müssen sämtliche Informationen, auf denen die

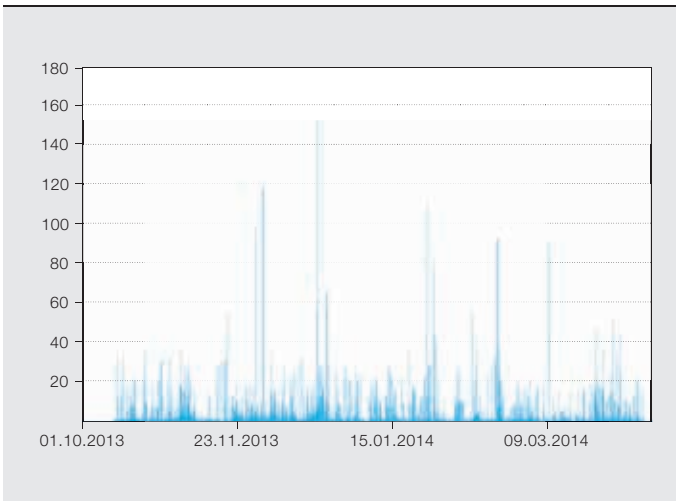
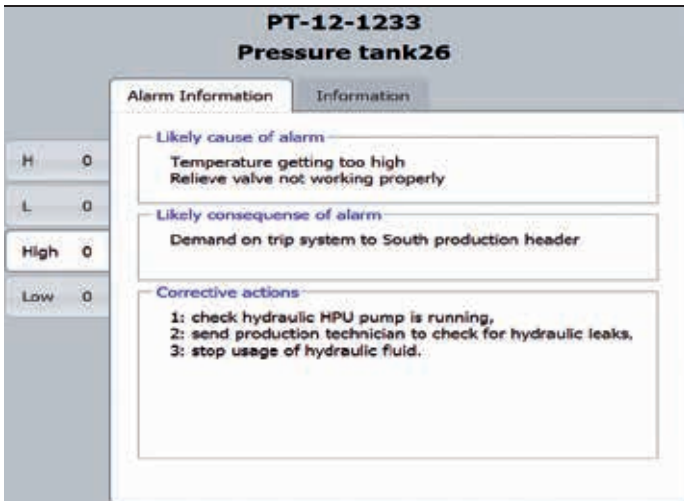
Ein klassisches Beispiel für ein überlastetes Alarmsystem ist die Explosion in der Texaco-Raffinerie in Milford Haven, bei der in den letzten 11 Minuten vor der Explosion 275 Alarme aufliefen.

ursprüngliche Designentscheidung basiert, verfügbar und vollständig nachvollziehbar sein, um mögliche gefährliche Nebenwirkungen der Änderungen auszuschließen.

→ 2 fasst den Lebenszyklus gemäß IEC 62682 zusammen und kann als Richtschnur zur Entwicklung und Instandhaltung eines Alarmsystems verwendet werden, das den Anforderungen der IEC 62682 und guter Branchenpraxis entspricht.

Titelbild

Gehobene Alarmierungstechniken bieten wichtige Unterstützung für das Bedienpersonal in modernen Prozessanlagen.



Alarmmanagementprinzipien müssen in konkrete Projektaktivitäten übersetzt werden.

Alarmphilosophie

Der erste Schritt im Projektlebenszyklus ist die Alarmphilosophie. Dies ist der Plan, der festlegt, wie Alarme für die betreffende Anlage verwaltet werden sollen. In ihm sind definiert:

- Rollen und Verantwortlichkeiten
- Alarmanforderungen
- Arbeitsabläufe und Verfahren zur Umsetzung der vereinbarten Anforderungen

Die IEC 62682 bietet unter anderem eine nützliche Orientierung für den Inhalt und die Struktur einer geeigneten Alarmphilosophie.

Der Erfahrung von ABB nach liegt die Herausforderung nicht im Verfassen des Dokuments, sondern in dessen Anwendung auf den Projektlebenszyklus. Daher konzentriert sich die Beratungsunterstützung von ABB hierbei schwerpunktmäßig auf die Übersetzung von Alarmmanagementprinzipien in konkrete Projektaktivitäten und -ergebnisse und die Kommunikation der Auswirkungen von Alarmanforderungen an das erweiterte Projektteam.

Dies ist entscheidend, wenn sichergestellt werden soll, dass der Zweck und die Entwurfsabsicht von Alarmen bei Projektüberprüfungen wie Gefahren- und Betriebsfähigkeitsanalysen (HAZOP), Schutzebenenanalysen (LOPA) und Prüfungen der Rohrleitungs- und Instrumentierungspläne (R&I) identifiziert und dokumentiert werden.

Stehen diese Alarmdesigninformationen zur Verfügung, wird im nächsten Projektschritt entschieden, wie und wo alarmbezogene Daten gespeichert und verwaltet werden. Dazu sieht die IEC 62682 das Konzept einer Master-Alarmdatenbank vor, die als „autorisierte Liste rationalisierter Alarme und dazugehöriger Attribute“ definiert ist. Die Umsetzung dieses Konzepts von ABB heißt Alarm Rationalization Tool (ART) und bietet viele wichtige Vorteile:

- Vollständige Datenbankfunktionalität zur Erfassung und schnellen Navigation sämtlicher alarmbezogener Konfigurations- und Designdaten
- Eingabeformulare, bei denen alle Konfigurationseinstellungen für einen Alarm auf einem einzigen Bildschirm angezeigt werden, und die eine effiziente Alarmrationalisierung unterstützen.
- Kontrollierte Kopierfunktionen, die eine Wiederverwendung bestehender Konfigurationen für ähnliche Fälle ermöglichen.

Rationalisierung

Laut IEC 62682 [5] müssen in der Rationalisierungsphase des Alarmlebenszyklus folgende Angaben für jeden Alarm festgelegt werden:

- Empfohlene Bedienerhandlung
- Folgen bei Untätigkeit oder falschen Handlungen
- Mögliche Ursache des Alarms

Stehen diese Informationen während des Betriebs zur Verfügung, führt dies zu konsistenteren Bedienerhandlungen und hilft unerfahrenen Bedienern, eine Wissensgrundlage aufzubauen und Selbstvertrauen zu entwickeln. Dort, wo vorhandene Anlagen modernisiert werden, ist das Bedienpersonal die zuverlässigste Quelle für diese Informationen. Bei neuen Anlagen ist die vollständige Definition der erforderlichen Alarme schwieriger, da man bei der Definition der erforderlichen Alarmkonfiguration stark auf Design- und Anbieterdaten angewiesen ist.

Ein wichtiges Merkmal des ABB ART neben der Erfassung von Alarmanforderungen und Designdaten ist die Möglichkeit zum Export von Bedienerreaktionsdaten an die ABB Online-Funktion Alarm Helper → 3. Alarm Helper stellt diese Informationen auf dem Bedienerarbeitsplatz des Extended Automation System 800xA bereit. Sowohl Alarm Helper als auch ART sind Bestandteil des umfangreichen ABB-Alarmmanagementpakets AlarmInsight. AlarmInsight beinhaltet ein umfassendes Alarmmanagement-Toolset und wurde für die Zusammenarbeit mit System 800xA entwickelt und getestet.

Der unmittelbare Zugriff auf eine solche Online-Hilfefunktion gilt als besonders wichtig für kritische Alarme (IEC-Bezeichnung: „highly managed alarms (intensiv verwaltete Alarme) [6]“) und wird in zunehmendem Maße von Aufsichtsbehörden



erwartet. Betriebe, die Alarm Helper bereits verwenden, schätzen ihn als gern genutztes und wirksames Werkzeug zur Bedienerunterstützung.

Kontinuierliche Bemühungen

Im Hinblick auf die Betriebsphase ist das Lebenszyklusmanagement ein zentraler Bestandteil der IEC 62682 und ISA 18.2 und wurde auch in die dritte Ausgabe der EEMUA 191 aufgenommen. Alarmma-

Leider treten diese Fluten häufig in den schwierigsten Phasen auf, wenn das Bedienpersonal am meisten Unterstützung benötigt (z. B. beim An- oder Abfahren). Zu den Alarmflutszenarien gehören:

- Alarmfluten, die entstehen, weil Prozessabschnitte heruntergefahren werden (z. B. Alarmer aufgrund niedriger Durchflussmengen nach der Abschaltung von Pumpen), sich in unterschiedlichen Betriebszuständen befinden (z. B. Reinigung) oder Messinstrumente kalibriert werden. Diese Alarmer können zum Problem werden, wenn sie zusammen mit einem

Prozessproblem auftreten und wichtige Alarmer in einer Flut von unnötigen Alarmen untergehen.

- Alarmfluten entlang der Ursachenkette nach einer Prozessstörung. Eine einzelne Ursache kann zu einer Vielzahl von Folgealarmen führen. Dabei muss der erste Alarm in der Alarmliste der Hauptursache nicht unbedingt am nächsten liegen – je nach Prozessdynamik und Konfiguration der Schwellenwerte können sekundäre und irre-führende Alarmer zuerst auftauchen.

Solche Alarmfluten lassen sich nicht allein durch die Wahl guter Konfigurationswerte für Grenzen, Hysterese- oder Verzögerungstimer verhindern. Hier kommen gehobene Alarmierungstechniken wie das Verbergen (IEC 62682: „suppression-by-

design“) und Gruppieren von Alarmen ins Spiel. ABB System 800xA bietet eine Reihe von leistungsstarken Tools für die gehobene Alarmierung auf Controller-, Server- und Arbeitsplatzebene einschließlich Gruppierung, Verbergen (dynamisches Unterdrücken) und Zurückstellen (zeitlich begrenztes, bedienergesteuertes Unterdrücken) von Alarmen.

Kalkuliertes Risiko

Die Herausforderung bei der Behandlung von Alarmfluten besteht darin, einen Mittelweg zu finden zwischen den möglichen Risiken, die die Unterdrückung eines Alarms in einer bestimmten Situation mit sich bringt, und der Notwendigkeit, Spitzen in der Alarmrate bei außergewöhnlichen Zuständen zu reduzieren. Diese Risiken lassen sich am besten durch eine Kombination aus bewährten, umfassenden Toolsets wie ABB AlarmInsight → 5 und einem robusten Änderungsmanagement mit einem entsprechenden Prüfungs- und Genehmigungsprozess mindern.

In anfänglichen (vorausschauenden) Rationalisierungsprüfungen können bereits Kandidaten für eine grundsätzliche Alarmunterdrückung ermittelt werden – z. B. die Gruppierung von Alarmen, die ausgeblendet werden sollen, wenn ein bestimmtes System außer Betrieb ist. Später kann dies durch die Untersuchung von Alarmfluten während der Betriebsphase verfeinert werden, wobei auf die Funktionen von AlarmInsight zurückgegriffen werden kann:

- Bedienerkommentare zu Alarmreaktionen, die in Alarm Helper gespeichert und dargestellt werden

Alarmfluten lassen sich nicht allein durch die Wahl guter Konfigurationswerte für Grenzen, Hysterese- oder Verzögerungstimer verhindern.

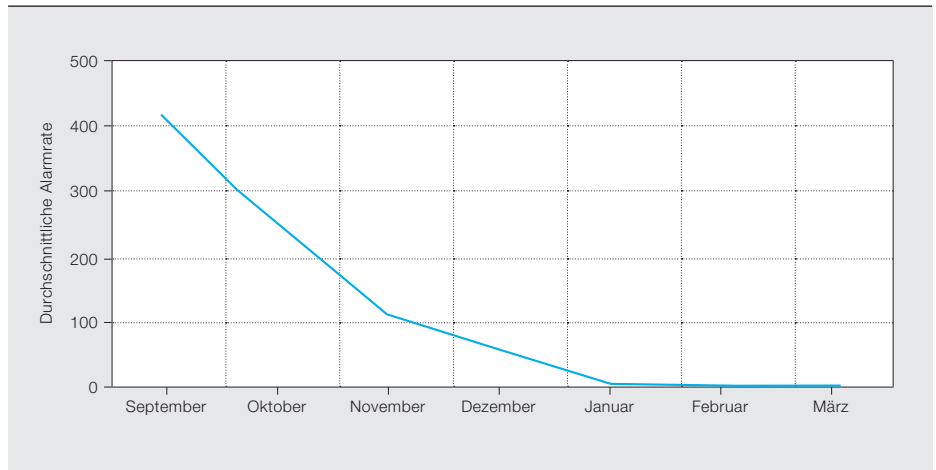
nagement erfordert kontinuierliche Bemühungen, um eine gleichbleibend hohe Alarmsystemqualität sicherzustellen.

Heutzutage haben viele Anlagen ihre durchschnittliche Alarmrate mit niedrigen Alarmraten im normalen Betrieb gut im Griff. Aber Alarmfluten stellen häufig noch immer eine Herausforderung dar.

→ 4 zeigt die Alarmrate einer petrochemischen Anlage über einen Zeitraum von einem halben Jahr. Obwohl die durchschnittliche Alarmrate bei unter einem Alarm in 10 Minuten liegt und somit gut unter Kontrolle ist, treten zuweilen Fluten von über 100 Alarmen in 10 Minuten und regelmäßig kleinere Fluten von etwa 20 Alarmen in 10 Minuten auf.

ABB konnte die durchschnittliche Alarmrate in einer Offshore-Gasanlage senken und die Anlagenabschaltungen von 25 auf sechs im Jahr reduzieren.

6 Reduzierung der Alarmrate in der Offshore-Gasanlage von Rashpetco mit ABB AlarmInsight



- Detaillierte Alarmanalyse mit Expert Tool und Alarm Analysis
- Aktuelle Alarmattribute aus der ART-Datenbank

Dieses kombinierte Toolset erleichtert die Identifizierung möglicher Szenarien zur Alarmunterdrückung durch die Analyse echter Anlagendaten. Dadurch, dass die Notwendigkeit manueller „Ad-hoc“-Analysen entfällt, reduziert sich die Möglichkeit menschlicher Fehler bei der Herleitung von Ursache und Wirkung erheblich. Außerdem können Schlussfolgerungen auf der Grundlage viel umfassenderer Datensätze getroffen werden, die sich über mehrere Jahre erstrecken können. Ist ein bestimmtes Szenario identifiziert, geprüft und bestätigt, kann mithilfe des Toolsets geprüft werden, ob es weitere Fälle gibt, auf die dieselbe Logik angewandt werden kann. Die Produktintegration zwischen System 800xA und AlarmInsight ermöglicht eine kontinuierliche Optimierung, Sicherstellung und Überwachung von Alarmen.

Dieser Ansatz hat seinen Nutzen bereits in einer Reihe von Fällen unter Beweis gestellt, z. B.:

- Erkennung von Folgealarmen nach einem bestimmten Shutdown
- Analyse kritischer Ereignisse mit Hervorhebung von Auslösern, die eine frühe Bedienerreaktion (Eingriff) erfordern und eine Systemabschaltung/Anlagenstörung verhindern könnten.

Die Hauptvorteile werden durch ein Lebenszyklus-Toolset ermöglicht, das die Grundlage für eine kontinuierliche Verbesserung bildet. Zu den Vorteilen gehören:

- Weniger Produktionsabschaltungen
- Geringeres Unfallrisiko, weniger Gefahren für die Umwelt, Einhaltung aller relevanten Vorschriften und Normen
- Verbesserte Bedienereffizienz

→ 6 zeigt, wie es ABB gelungen ist, die durchschnittliche Alarmrate in einer Offshore-Gasanlage der Rashid Petroleum Company (Rashpetco) zu reduzieren. Das Ergebnis war eine Minderung der Anlagenabschaltungen von 25 auf sechs im Jahr. Da jede Abschaltung mit hohen Kosten verbunden ist, bedeutet dies erhebliche Einsparungen für das Unternehmen.

Fazit

Alarmmanagement ist ein Bereich mit wachsender Bedeutung sowohl für Aufsichtsbehörden als auch die Öffentlichkeit, die den Nachweis eines lebenszyklusorientierten Ansatzes und kontinuierlicher Verbesserung zur Gewährleistung eines sicheren Anlagenbetriebs fordern. Mit der IEC 62682 stehen bewährte Verfahrensweisen des Alarmmanagements nun auch als internationale Norm zur Verfügung. Hierzu bietet ABB einen umfassenden Werkzeugkasten, mit dem nachweislich Einsparungen erzielt und ein auch von den Aufsichtsbehörden als vorbildlich angesehenes Alarmmanagement erreicht werden kann.

Martin Hollender

ABB Corporate Research
Ladenburg, Deutschland
martin.hollender@de.abb.com

Joan Evans

ABB Process Automation, Oil, Gas & Chemicals
Billingham, Großbritannien
joan.evans@gb.abb.com

Thomas-Christian Skovholt

ABB Process Automation, Oil, Gas & Chemicals
Oslo, Norwegen
thomas-christian.skovholt@no.abb.com

Roy Tanner

ABB Process Automation, Control Technologies
Wickliffe, OH, USA
roy.tanner@us.abb.com

Literaturhinweise

- [1] D. Shukman (11. November 2015): „Tim Peake: British astronaut's training nears end“. Verfügbar unter <http://www.bbc.com/news/science-environment-34788169>
- [2] S. Smith: „Did DuPont Prioritize Cost Over Safety at Belle, W.Va., Facilities? Chemical Safety Board Investigation Indicates It Did“. EHS Today, Juli 2011
- [3] „The explosion and fires at the Texaco Refinery, Milford Haven, 24 July 1994“. Health and Safety Executive. Norwich, 1997
- [4] „Alarmmanagement in der Prozessindustrie“. DIN-EN 62682 (VDE 0820-382), 2015
- [5] „Geforderter und empfohlener Inhalt der Alarmphilosophie“. DIN-EN 62682 (VDE 0820-382), Abschnitt 6.2.1, Tabelle 3
- [6] „Intensiv verwaltete Alarmer“ (engl. Highly Managed Alarms). DIN-EN 62682 (VDE 0820-382), Abschnitt 6.2.9

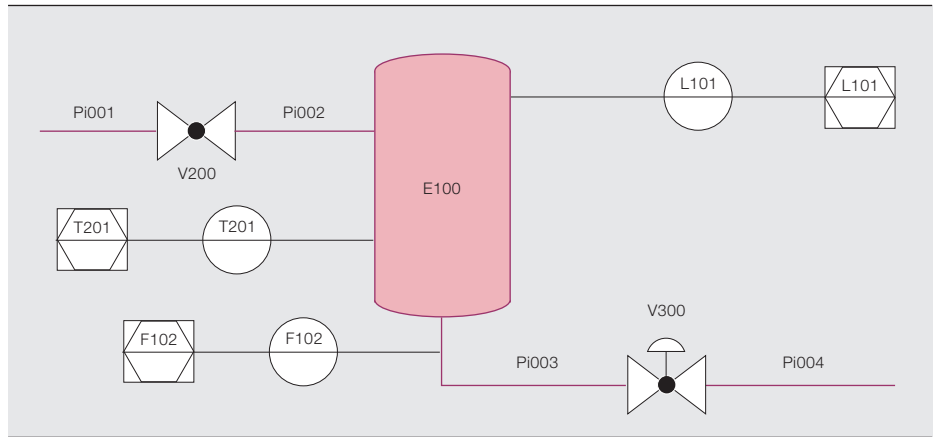


Von Papier zu digital

Ein Forschungsprojekt zur Extraktion objektorientierter Beschreibungen aus R&I-Fließbildern

ESTEBAN ARROYO, STEVE ROYSTON, ALEXANDER FAY, MARIO HOERNICKE, PABLO RODRIGUEZ – In der Prozessindustrie kann der Umfang der Dokumentation einer Anlage gewaltige Ausmaße erreichen. Hinzu kommt, dass der Zugriff darauf häufig durch die Verwendung unterschiedlicher Formate – von traditionellen Papierformaten bis hin zu einfachen digitalen Formaten – erschwert wird. Entscheidet sich der Eigentümer einer Anlage, diese Informationen zu konsolidieren, z. B. im Vorfeld einer Modernisierung, kann es einen riesigen Aufwand bedeuten, diese bunt gemischte

Dokumentation in ein einziges, für computerbasierte Auswertungen zugängliches und aktuelles Format zu bringen. ABB erforscht Möglichkeiten, um auf effiziente, automatisierte und konsistente Weise Modelle aus technischen Dokumenten zu extrahieren. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts mit der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) Hamburg wurde eine Methode auf der Basis optischer Erkennungs- und semantischer Analyseverfahren entwickelt, die Rohrleitungs- und Instrumentierungs-(R&I)-Fließbilder in objektorientierte Modelle umwandelt.



nicht die Form eines Datenmodells besitzt. Hier setzt ABB an und hat in Zusammenarbeit mit der HSU Methoden zur Extraktion von objektorientierten (OO) Darstellungen aus bestehenden Designdokumenten, speziell R&I-Fließbildern, entwickelt [2].

Bisherige Forschungen haben gezeigt, dass verschiedene Aufgaben entlang des Lebenszyklus einer Anlage, wie automatisierte HAZOP-/PAAG-Analysen [3], die Erkennung von Entwurfsmustern [4], die Ableitung von Simulationsmodellen [5] sowie die Erkennung und Diagnose von Fehlern [6], durch die Verwendung von Fließbildern unterstützt werden können. Allerdings setzen alle bestehenden Ansätze voraus, dass Fließbilder in OO-Formaten (z. B. IEC 62424 CAEX/AutomationML [7, 8] oder ISO 15926 [9]) beschrieben sind. Leider ist dies bei bestehenden Prozessanlagen meist nicht der Fall, da die meisten Fließbilder in nicht computerinterpretierbaren Formaten vorliegen.

Von Pixeln zur Bedeutung

Die hier beschriebene Methode extrahiert OO-Modelle aus gemischten Text- und Grafikdokumenten, genauer gesagt R&I-Fließbildern → 1, wobei Text, Symbole und Verbindungstopologien erkannt werden. Der Ansatz basiert darauf, dass diese Dokumente aus vier grundlegenden Artefakten bestehen: parametrische Formen, nicht parametrische Formen, Textanmerkungen und zugrunde liegender semantischer Inhalt → 2.

Voraussetzung für den Umwandlungsprozess ist, dass Fließbilder in PDF-Dateien (PDF/Bitmap oder PDF/SVG) gespeichert sind, aus denen Rasterbilder

extrahiert werden können. In manchen Fällen sind jedoch vorbereitende Prozessschritte erforderlich, damit ein Rasterbild gewonnen werden kann. Dies gilt insbesondere für ältere Papierunterlagen oder CAD-Dateien → 3. Anschließend werden drei Prozeduren zur Erzeugung des computerinterpretierbaren Modells ausgeführt:

- Optische Erkennung: OSR und OCR → 4 zur Identifizierung von Symbolen und Textanmerkungen
- Semantische Analyse: Interpretation der funktionalen Bedeutung von grafischen Formen zur Verbesserung des Erkennungsvorgangs und der Ausdrucksmächtigkeit des Modells
- Darstellung und Verifizierung: Beschreibung der erfassten Information als OO-Modell mit anschließender visueller Prüfung.

Optische Erkennung (OR)

Bei der optischen Erkennung kommen bewährte Bildverarbeitungsverfahren zur Identifizierung von geometrischen Formen und textuellen Bezeichnern zum Einsatz. Die Ausführung des Prozesses erfolgt durch die rekursive Anwendung zweier Methoden: OSR und OCR.

Optische Symbolerkennung (OSR)

Im ersten Schritt der OSR werden nicht parametrische Symbole (d. h. Mehrkurven-Formen) wie der Behälter E100 und das Ventil V300 in → 1 lokalisiert und mit Schablonen in vordefinierten Bibliotheken abgeglichen. Eine Bibliothek kann z. B. Kataloge mit Anlagenkomponenten oder Symbolen umfassen, die üblicherweise verwendet werden, um bestimmte Geräte oder Apparate innerhalb der Fließbilder abzubilden. Die Definition der Bibliotheken erlaubt nicht nur eine Modu-

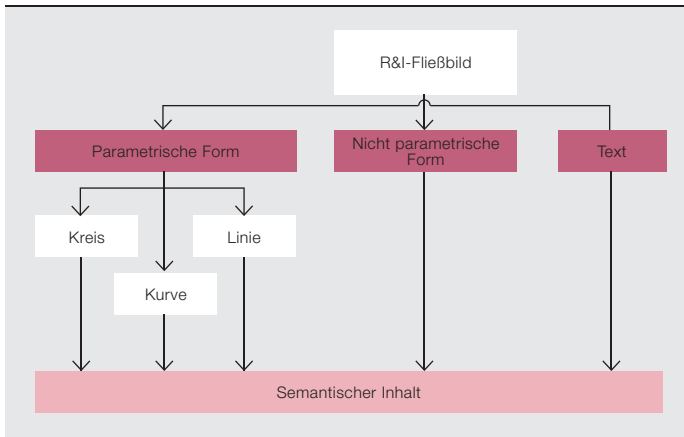
Durch die immense Größe und Komplexität von Prozessanlagen und die zahllosen Veränderungen und Ergänzungen, die im Laufe ihrer Lebenszyklen vorgenommen werden, entstehen riesige Mengen an Dokumentation. Dazu gehören strukturelle Modelle, Funktionsbeschreibungen, Fließbilder und Ausrüstungsspezifikationen. Obwohl diese Dokumente eine reichhaltige Informationsquelle darstellen, die bei planerischen und betrieblichen Aktivitäten genutzt werden sollte, stehen ihrer Nutzung zurzeit die Herausforderungen einer zeitnahen Lokalisierung und Datenextraktion entgegen [1].

Zurzeit ist es gängige Praxis, vorhandene technische Dokumentation manuell durch Scannen, Speichern und Indizieren zu digitalisieren. Die daraus resultierenden Dateien enthalten unstrukturierte Informationen, die nicht vollständig für Automatisierungsaufgaben genutzt werden können, da ihr zugrunde liegender Inhalt

Titelbild

In der Prozessindustrie kann Dokumentation in verschiedenen Formaten, z. B. in Papier- und einfachen elektronischen Formaten, vorliegen. Wie können all diese Formate in einen modernen objektorientierten Standard übertragen werden?

2 Zusammensetzung eines typischen R&I-Fließbilds



larität, die wiederum effizientere Suchprozeduren zulässt, sondern auch eine effektive Erfassung und Wiederverwendung von strukturellem Wissen innerhalb von Projekten. Das verwendete Abgleichkriterium basiert auf den strukturellen Merkmalen der untersuchten Formen. Dabei werden drei geometrische Haupteigenschaften → 5 unterstützt, um eine ausführliche Suche nach möglichen Übereinstimmungen zu gewährleisten: Drehung, Skalierung und Überlappung.

Mithilfe einer Bewertung, die den Grad der Übereinstimmung zwischen identifizierten Kandidaten quantifiziert, werden Konfidenzniveaus innerhalb der Erkennungsmethode definiert. Erfolgreich abgeglichene Objekte werden auf dem Bild unterdrückt, um die Erkennung weiterer Artefakte zu erleichtern.

Eine semantische Regel kann z. B. besagen, dass eine Rohrleitung höchstens mit zwei anderen Elementen verbunden sein kann.

In einem zweiten Schritt werden parametrische Symbole (d. h. mathematisch beschriebene Formen wie Kreise oder Linien) wie die Rohrleitung Pi002 und der Sensor L101 in → 1 identifiziert. Die dabei verwendeten Erkennungsmethoden sind in der Lage, mögliche Kandidaten unabhängig von ihrer Größe und Lage zu identifizieren. Schwellenwerte können eingerichtet werden, um die Mindestausmaße für parametrische Formen festzulegen und somit die Fehlinterpretation

von Zeichen als Symbole zu verhindern. Wie bei den nicht parametrischen Symbolen kann die Zuverlässigkeit des Erkennungsprozesses auf der Grundlage errechneter Übereinstimmungsgrade angepasst werden. Auch hier werden die gefundenen Objekte unterdrückt, um die Identifizierung weiterer Artefakte zu erleichtern.

Optische Zeichenerkennung (OCR)

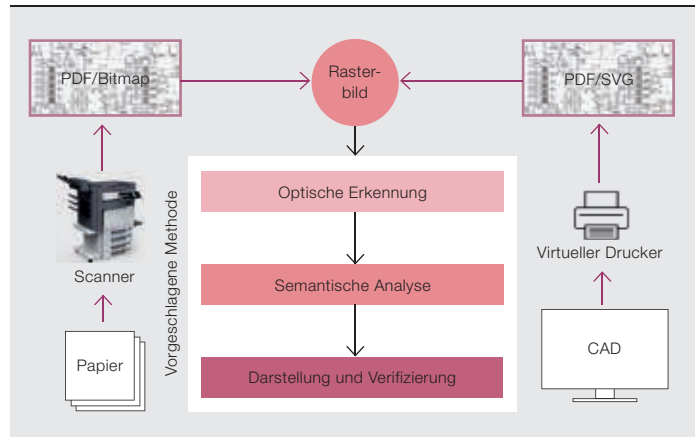
Davon ausgehend, dass sich der textuelle Bezeichner eines Objekts in seiner Umgebung oder innerhalb des Objekts befindet, werden die Koordinaten von identifizierten Formen zur Generierung von Suchfenstern verwendet → 6. Die Größe eines solchen Fensters ist typischerweise proportional zu den Abmessungen des analysierten Bilds, kann aber auch vom Benutzer definiert werden.

Ein OCR-Algorithmus sucht innerhalb des definierten Fensters nach Text. Wird mehr als ein Bezeichner gefunden, werden Nomenklaturregeln (z. B. reguläre Ausdrücke) verwendet, um falsche Zeichenketten zu verwerfen, und jedes Objekt wird mit einem eindeutigen Bezeichner versehen. Unklare Identifizierungen (z. B. aufgrund sich berührender Zeichen) werden zur manuellen Klärung an den Benutzer übermittelt.

Semantische Analyse (SA)

Im Kontext der entwickelten Methode bezieht sich SA auf die Einbindung von domänenspezifischem Wissen, insbesondere von funktionalen und strukturel-

3 Übersicht über den Digitalisierungs-Workflow



4 Abkürzungen

AML	AutomationML
CAD	Computer-Aided Design
CAEX	Computer-Aided Engineering Exchange
PDF	Portable Document Format
R&I	Rohrleitung und Instrumentierung
OCR	Optical Character Recognition
OO	Objektorientiert
OR	Optical Recognition
OSR	Optical Symbol Recognition
SA	Semantische Analyse
SVG	Scalable Vector Graphics

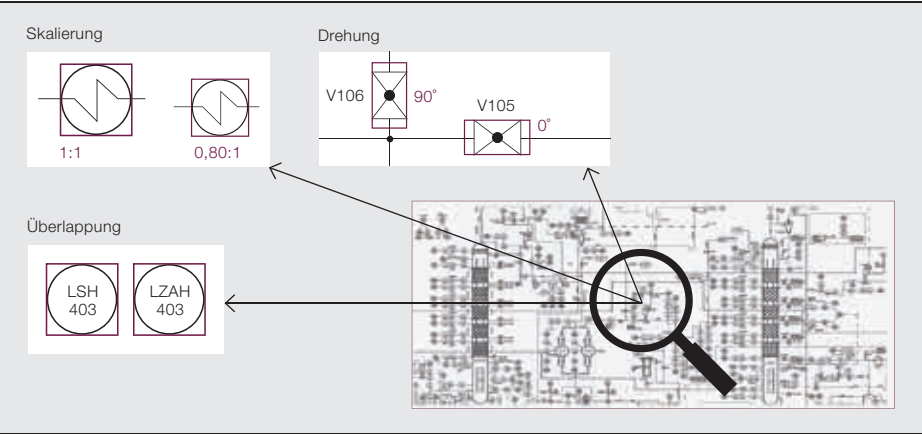
len Inhalten, in die Erkennung grafischer Formen und deren Beziehungen zueinander. Unter anderem wird die SA zur Erkennung von Verbindungen und zur Verbesserung der Ausdrucksmächtigkeit bei der Modellierung durch die Definition spezifischer Schnittstellentypen genutzt.

Verbesserung der Verbindungserkennung

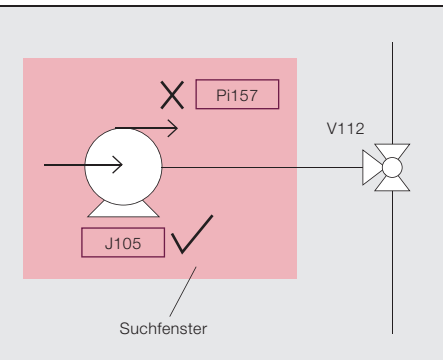
Charakteristische Verbindungen in technischen Diagrammen basieren auf Anordnungen von Linienzügen, sogenannten Polylinien. Daher müssen zur Erkennung von Verbindungen als erstes zusammenhängende Linien zu einzelnen verbindenden Artefakten zusammengefasst werden. Die Nähe solcher Artefakte zu strukturellen Formen wird analysiert, und die grundlegenden Verbindungen des Diagramms abgeleitet. Die Konsistenz der Verbindungen wird durch Anwendung semantischer Regeln sichergestellt. So kann eine semantische Regel z. B. besagen, dass eine Rohrleitung an ihren Enden höchstens mit zwei anderen

Über die Erkennung von Verbindungen hinaus werden weitere Regeln geprüft, um Fehlerkennungen automatisch zu korrigieren und/oder den Benutzer zu warnen.

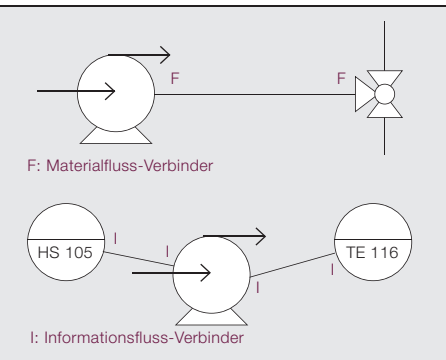
5 Unterstützte Merkmale des geometrischen Abgleichprozesses



6 Suchfenster und Zuordnung von Bezeichnern



7 Spezifische Schnittstellentypen



Elementen verbunden sein kann. Verstoßen mögliche Kandidaten gegen eine solche Regel, werden weitere Regeln geprüft, um Fehlerkennungen automatisch zu korrigieren und/oder den Benutzer zu warnen.

Definition von Schnittstellentypen

Die Erzeugung von detaillierten OO-Modellen erfordert die Unterscheidung zwischen verschiedenen Verbindungsarten. So ist z. B. die Semantik (Funktion und Physik) einer Verbindung zwischen einem Behälter und einem Sensor von Natur aus anders als die einer Verbindung zwischen einem Behälter und einer Rohrleitung → 1. Erstere überträgt Informationen und besteht typischerweise aus einer elektrischen Leitung, während letztere Material transportiert und üblicherweise durch einen Stutzen realisiert ist.

Diese Unterscheidung ist in vielen Anwendungsfällen entscheidend, z. B. bei der Fehlererkennung und -diagnose, wo die Ursachenanalyse stark vom Ausbreitungsmedium für Anlagenstörungen abhängt → 7.

8 Beispiel einer Verbindungsmatrix

	Behälter E100	Rohrleitung Pi002	Sensor L101
Behälter E100		F	I
Rohrleitung Pi002	F		
Sensor L101	I		

9 Beispiel einer Koordinatentabelle

Anlagenkomponente	Fließbildkoordinaten (X, Y)	Abmessungen (L, B)
Behälter E100	(81, 123)	(123, 57)
Rohrleitung Pi002	(59, 142)	(22, 1)
Sensor L101	(105, 126)	(18, 18)

Darstellung und Verifizierung

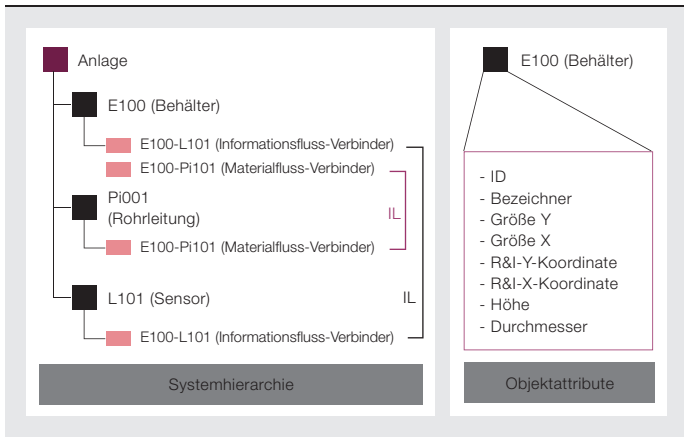
In dieser Phase werden die von den Bildverarbeitungsalgorithmen abgeleiteten Informationen zunächst auf eine strukturelle Zwischenbeschreibung und dann auf ein OO-Modell übertragen. Der Prozess endet mit einer visuellen Prüfung, bei der dem Benutzer eine Benutzeroberfläche bereitgestellt wird, auf der er die Konsistenz der digitalisierten Artefakte verifizieren kann.

Strukturelle Zwischenbeschreibung

Um eine erste Darstellung der erfassten Informationen zu ermöglichen, werden die Verbindungen, die Position und die

Abmessungen der gefundenen Elemente jeweils in einer Verbindungsmatrix und einer Koordinatentabelle gespeichert.

In der ersten Zeile und Spalte der Verbindungsmatrix → 8 sind die erkannten Elemente aufgeführt. Diese werden mit ihrer Klasse und ihrer Kennzeichnung bezeichnet (z. B. Behälter E100). In den Zellen der Matrix sind die Verbindungen zwischen den Elementen (Zeile, Spalte) festgehalten. Dabei werden für die Verbindungstypen eigene Benennungen verwendet: F für Materialfluss und I für Informationsfluss.



In der Koordinatentabelle → 9 sind die Positionen der betreffenden Objekte und ihre jeweiligen Abmessungen gespeichert.

Strukturelle Zwischenbeschreibungen können als Tabellenblätter (z.B. mit Microsoft Excel oder Datentabellen in C# Windows Forms) kodifiziert und rekursiv zur Ableitung der gewünschten OO-Modelle genutzt werden. Darüber hinaus können sie für einfache Aufgaben wie die Erzeugung von Teilleisten oder zur Klärung von Fragen über das Vorhandensein einer bestimmten Komponente oder Komponentenart verwendet werden.

OO-Modellierung

Aus den erfassten Daten wird ein OO-Modell, genauer gesagt ein IEC 62424-konformes CAEX/AutomationML-Modell abgeleitet [7, 8]. Dieser Vorgang beginnt mit der Erzeugung eines Objekts für jeden Eintrag in der ersten Spalte der Verbindungsmatrix. Anschließend werden Schnittstellen hinzugefügt. Für den Behälter E100 werden z.B. zwei Schnittstellen erstellt – eine vom Typ Materialfluss (F) und eine vom Typ Informationsfluss (I) → 10. Anschließend werden Attribute zugewiesen (z.B. Position und Abmessungen). Das Ergebnis ist ein OO-Modell, das die Verbindungen und semantischen Informationen des Fließbilds beschreibt.

Visuelle Prüfung

Zum Schluss wird eine grafische Darstellung der abgeleiteten Informationen erzeugt → 11 und über das ursprüngliche schwarz-weiße Fließbild gelegt, wobei die identifizierten Objekte als farbige Formen dargestellt sind. So kann der Benutzer die Objekte mit dem ursprünglichen

Bild vergleichen und gegebenenfalls Veränderungen vornehmen. Korrekturen, die auf der grafischen Benutzeroberfläche vorgenommen werden, wirken sich direkt auf das OO-Modell aus, sodass keine zusätzlichen Engineering-Werkzeuge erforderlich sind. Zuvor erzeugte Warnungen können genutzt werden, um die Prüfung zu priorisieren.

Bestmögliche Nutzung der Dokumentation

Die verbesserte Nutzung vorhandener Dokumentation und die automatisierte Übertragung in digitale Anlagenmodelle trägt zur Erhöhung der Effizienz von (Re-) Engineering-Aufgaben in Neubau- und Modernisierungsprojekten bei. Das Verfahren ist in einer Vielzahl von Branchen einsetzbar, z.B. der chemischen und pharmazeutischen Industrie, der Öl- und Gasindustrie, der Wasserwirtschaft und der Stromerzeugung.

Esteban Arroyo

Alexander Fay

Helmut-Schmidt-Universität
Hamburg, Deutschland
esteban.arroyo@hsu-hh.de
alexander.fay@hsu-hh.de

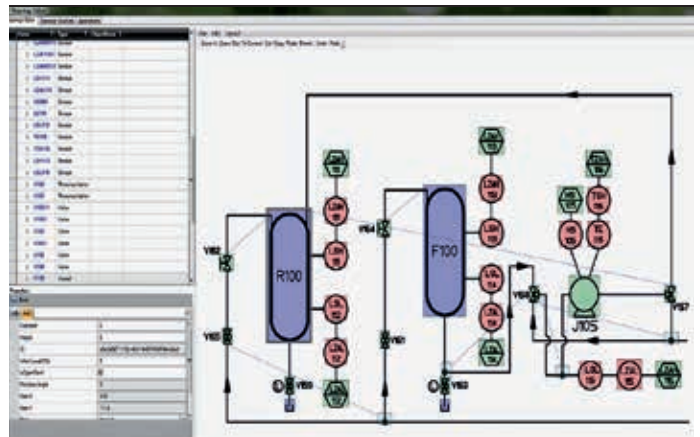
Mario Hoernicke

Pablo Rodríguez

ABB Corporate Research
Ladenburg, Deutschland
mario.hoernicke@de.abb.com
pablo.rodriguez@de.abb.com

Steve Royston

ABB Process Automation,
Oil, Gas & Chemicals
St. Neots, Großbritannien
steve.royston@gb.abb.com



Literaturhinweise

- [1] E. Arroyo et al.: „Integrating Plant and Process Information as a Basis for Automated Plant Diagnosis Tasks“. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Barcelona, Spanien, 2014
- [2] „Diagrams for the chemical and petrochemical industry“. DIN EN ISO 10628:2001
- [3] A. Fay et al. (2009): „Knowledge-based support of HAZOP studies using a CAEX plant model“. Inside Functional Safety, Vol. 2, S. 5–15, 2009
- [4] R. Drath et al. (2006): „Computer-aided design and implementation of interlocking control code“. IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design (CACSD), S. 2653–2658
- [5] M. Barth et al. „Object-oriented engineering data exchange as a base for automatic generation of simulation models“. IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Porto, Portugal, 2009
- [6] S.Y. Yim et al. (2006): „Using process topology in plant-wide control loop performance assessment“. Computers and Chemical Engineering, Vol. 31, S. 86–99
- [7] „Representation of process control engineering – Requests in P&I diagrams and data exchange between P&I tools and PCE-CAE tools“. IEC 62424 (2008-08)
- [8] R. Drath: „Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML“. Springer Verlag Berlin Heidelberg, Deutschland 2010
- [9] T. Holm et al.: „ISO 15926 vs. IEC 62424 – Comparison of Plant Structure Modeling Concepts“. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Krakau, Polen, 2012

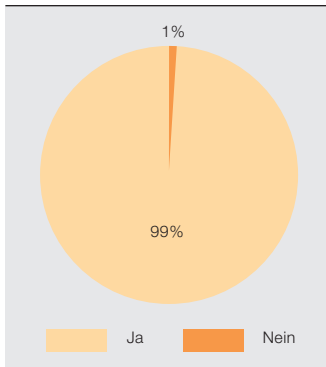
Unsere Leser haben gesprochen

Die Ergebnisse unserer Leserumfrage liegen vor

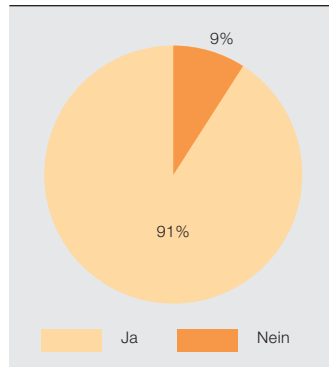
In Heft 3/2015 haben wir unsere Leserschaft aufgefordert, an einer Umfrage teilzunehmen, deren Ergebnisse wir hier präsentieren → 1–7. Das Redaktionsteam der ABB Review bedankt sich an dieser Stelle bei allen Teilnehmern. Die fünf Gewinner, die aus allen Teilnehmern ausgelost wurden,

erhalten je einen Rucksack und eine Mütze aus der Solar-Impluse-Kollektion. Wir gratulieren Isidro Fraga Hurtado aus Kuba, John Grant und Nasos Bardis aus den USA, Tamer Mahmoud aus Ägypten und Walter Heinrich aus Deutschland.

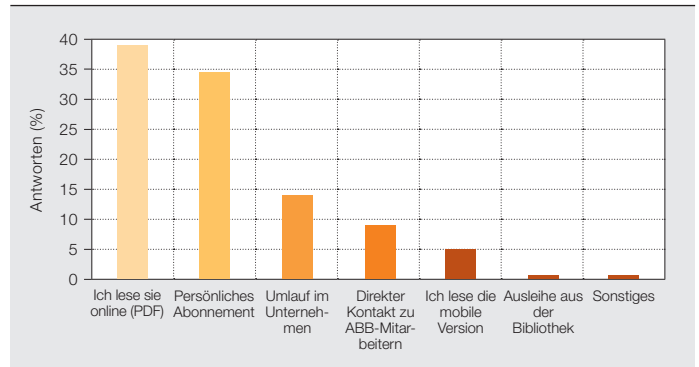
1 Lesen Sie Artikel in der ABB Review, die sich nicht mit Ihrem/Ihren Fachgebiet/en befassen?



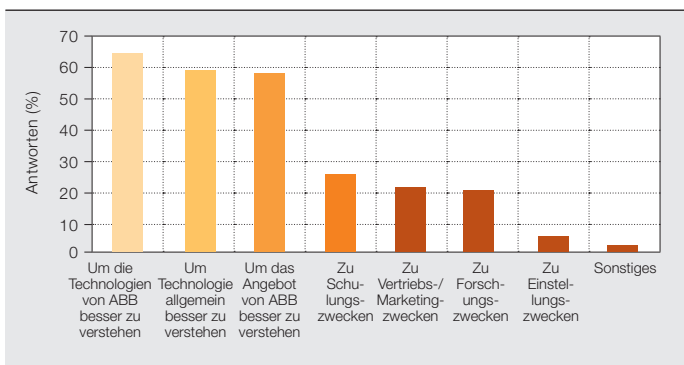
2 Würden Sie die ABB Review an Kollegen weiterempfehlen?



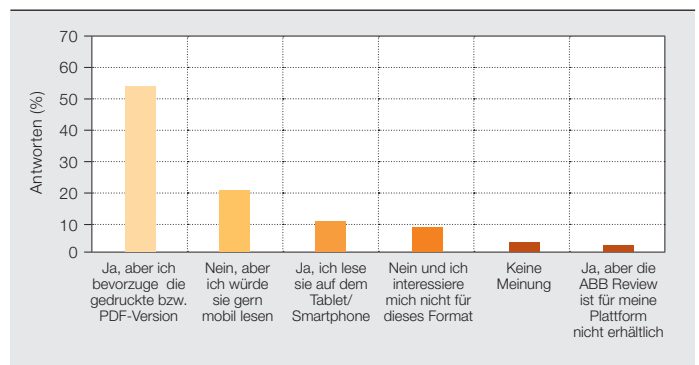
3 Wie erhalten Sie Ihr Exemplar der ABB Review?



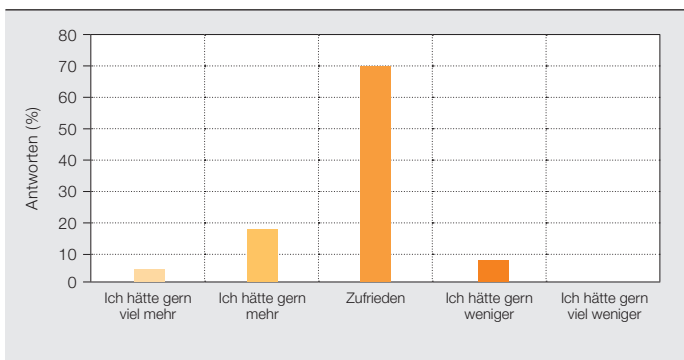
4 Wozu nutzen Sie die ABB Review? (Mehrere Antworten möglich)



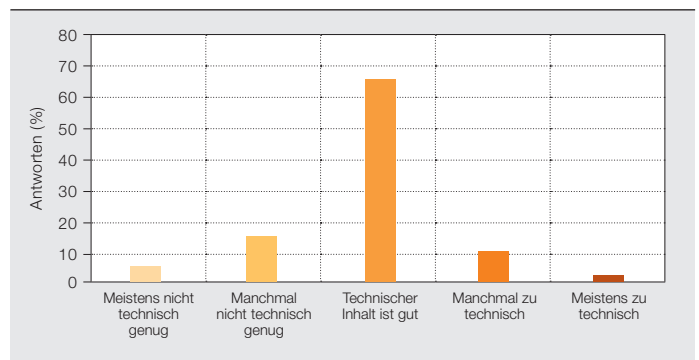
5 Wissen Sie, dass die ABB Review als mobile Version für Tablet/Smartphone erhältlich ist?



6 Wie zufrieden sind Sie mit der Anzahl von Artikeln in einer Ausgabe?



7 Wie zufrieden sind Sie mit dem technischen Inhalt der Artikel?



Editorial Board

Bazmi Husain

Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

Christoph Sieder

Head of Corporate Communications

Ernst Scholtz

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 Technology Ltd.
ABB Review
Affolternstrasse 44
CH-8050 Zürich
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 © 2016
ABB Technology Ltd.
Zürich, Schweiz

Satz und Druck

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
AT-6850 Dornbirn, Österreich

Layout

DAVILLA AG
Zürich, Schweiz

Übersetzung

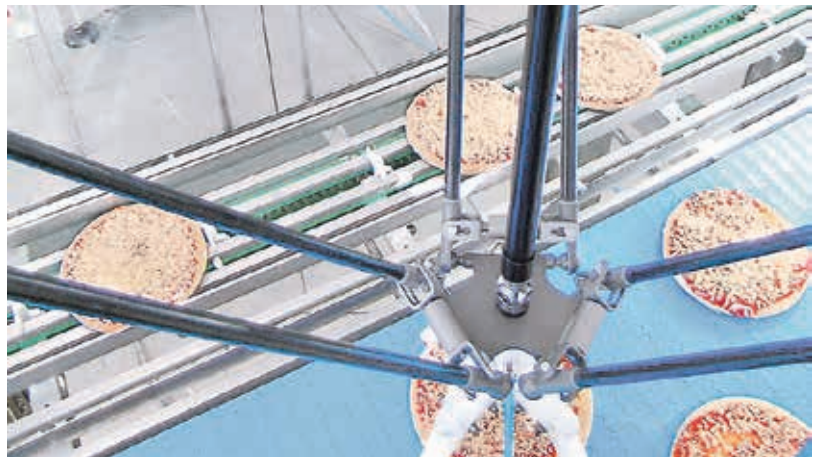
Thore Speck, Dipl.-Technikübersetzer (FH)
D-24941 Flensburg, Deutschland

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

www.abb.com/abbreview



Vorschau 2|16

Nahrungsmittel und Getränke

Im Laufe der Jahre wurden in der ABB Review viele Themen behandelt, die für die menschliche Existenz von zentraler Bedeutung sind, wie Energieversorgung, Fertigung, Bergbau und das Transportwesen. Noch direkter mit den Bedürfnissen des Menschen verbunden ist das Thema Nahrungsmittel und Getränke – ein Thema, bei dem vielleicht die wenigsten gleich an ABB denken würden.

Dabei spielen Technologien und Produkte von ABB bei der Herstellung vieler Nahrungsmittel und Getränke eine wichtige Rolle. Der Beitrag von ABB reicht hier von einzelnen Messgeräten über anlagenweite Leitsysteme bis hin zu Handhabungsausrüstungen wie Motoren und Roboter. Tatsächlich gehört der Bereich Nahrungsmittel und Getränke zu den erklärten strategischen Wachstumsbereichen des Unternehmens. Mehr über das Engagement von ABB im Bereich Nahrungsmittel und Getränke erfahren Sie in der ABB Review 2/2016.



Tablet-Ausgabe

Die ABB Review ist auch als Tablet-Version verfügbar.

Besuchen Sie uns unter <http://www.abb.com/abbreviewapp>

Bleiben Sie auf dem Laufenden ...



Haben Sie eine ABB Review verpasst? Melden Sie sich unter <http://www.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.



Stets zur Hand.
Wann Sie wollen,
wo Sie wollen.

Kennen Sie unsere ABB Review App mit zahlreichen praktischen Funktionen? Verfügbar in vier Sprachen bietet sie interaktive Funktionalitäten für Tablets und Smartphones wie vollständig durchsuchbare Inhalte, eingebundene Bildergalerien, Filme und Animationen. Erhältlich im App-Store Ihres Vertrauens.

<http://www.abb.com/abbreviewapp>

