

ABB

2 | 13

Die technische
Zeitschrift des
ABB Konzerns

review

die ABB
technik

Hybrider DC-Leistungsschalter für die HGÜ 6

Frische Luft unter Tage 35

Fortschrittliche Instandhaltung 64

100 Jahre Leistungselektronik 70

Bahnbrechende Technik



Power and productivity
for a better world™



Der Atatürk-Staudamm am Euphrat in der Türkei wurde 1993 fertiggestellt. Der dazugehörige Stausee hat eine Größe von 817 km² und ein Fassungsvermögen von 48,7 km³. Die acht 300-MW-Generatoren stammen von ABB. Kürzlich wurden die Regler und Erregersysteme modernisiert und ein neues SCADA-System mit Fernzugriff sowie ein Automatisierungssystem vom Typ System 800xA installiert. Im Bild zu sehen ist das riesige Maschinenhaus mit den Erregersystemen, die oberhalb der senkrecht montierten Turbinen/Generatoren (deren Abdeckungen sind auf dem Boden sichtbar) angeordnet sind. Das Bild auf der Titelseite dieses Hefts zeigt das GUD-Kraftwerk von Sorgenia in Bertinico-Turano Lodigiano (Italien), dessen Symphony Plus Leitsystem ebenfalls von ABB stammt.



Schalttechnik

- 6 Durchbruch!**
Der ABB HGÜ-Hybridschalter – ein innovativer Durchbruch auf dem Weg zu zuverlässigen HGÜ-Netzen
- 14 Weniger ist mehr**
Ein Leistungsschalter, der in der Lage ist, 15 Großkraftwerke zu schalten
- 19 Der Zwei-in-Eins-Chip**
Der Bimode Insulated Gate Transistor (BIGT)
- 24 Elegante Lösung**
Die ultimative Erdschluss-Schutzfunktion für kompensierte Netze
- 29 Sauberer Kontakt**
Schütztechnik zum Schalten hoher Leistungen und zur Steuerung von Motoren

Bergbau

- 35 Alle Wetter!**
Optimierung von Wetterströmen in Untertagebergwerken
- 42 Antriebsfaktoren**
Technologien zur Steigerung der Produktivität von Bergwerken
- 48 Wertvolle Informationen**
Integration von mobiler Ausrüstung im Untertagebau

Überwachung und Steuerung

- 52 OCTOPUS-Onboard**
Ein System zur Bewegungsüberwachung, Reaktionsprognose und Entscheidungsunterstützung bei schwerem Wetter
- 54 Konvergenz der Systeme**
Übertragung von industrieller Überwachungs- und Steuerungstechnik auf den Betrieb von Rechenzentren
- 59 Virtuelle Helfer**
Emulation von Schnittstellen zwischen Steuerung und Subsystemen mithilfe von SoftCI
- 64 CRIM**
Bestimmung der besten Instandhaltungsstrategie für komplexe Prozessanlagen

Pionierleistungen

- 70 Vom Quecksilberdampf zum Hybridleistungsschalter**
100 Jahre Leistungselektronik

Bahnbrechende Technik



Prith Banerjee

Liebe Leserin, lieber Leser,

Schalter sind ein zentrales Element jedes elektrischen oder elektronischen Systems. Von der integrierten Logik der Mikroprozessoren in Leitsystemen bis hin zu den gewaltigen Leistungsschaltern in Stromnetzen – Schaltgeräte bilden eine wichtige Grundlage für fast alle Aktivitäten von ABB und für die Technik insgesamt. ABB arbeitet kontinuierlich daran, höhere Schaltleistungen und damit neue Anwendungen zu ermöglichen bzw. die Grenzen bestehender Anwendungen zu erweitern. Manchmal gelangen dabei völlig neue, bahnbrechende Entwicklungen, die den Markt verändern und neu definieren. Eine solche Entwicklung ist der hybride DC-Leistungsschalter.

ABB gehört seit Jahrzehnten zu den Pionieren auf dem Gebiet der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), die eine verlustarme und regelbare Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen ermöglicht. Wir glauben fest an die Zukunft von HGÜ-Netzen als Rückgrat der Stromnetze von morgen. Genau wie bei der Wechselstromübertragung werden auch hier Leistungsschalter benötigt, um z. B. bei einer Störung einzelne Regionen sicher isolieren zu können, ohne das gesamte Netz abschalten zu müssen. Allerdings gibt es beim Schalten von Wechselstrom und Gleichstrom große Unterschiede, die mehr erfordern als eine bloße Skalierung oder Anpassung vorhandener Wechselstromlösungen. Zur Lösung dieser Problematik hat ABB einen Hybridleistungsschalter entwickelt, der sowohl auf herkömmlicher Schalttechnik als auch auf Halbleitern basiert. Diese Technologie wurde kürzlich von der Zeitschrift MIT Technology Review als eine der zehn bedeutendsten Innovationen des Jahres 2012 gewürdigt. Der Hybridschalter ist auch das Thema des Leitartikels in dieser Ausgabe der *ABB Review*.

Darüber hinaus wird in diesem Heft eine Reihe weiterer Schaltprodukte für verschiedene Anwendungs- und Leistungsbereiche vom Hochspannungs-Wechselstrom bis zur Motorsteuerung vorgestellt – darunter der

BIGT, ein neues Halbleiterbauelement von ABB, das u. a. im Hybridschalter zum Einsatz kommt. Ein weiterer Artikel wirft einen Blick zurück auf die 100-jährige Tätigkeit von ABB auf dem Gebiet der Leistungselektronik. Dabei befasst sich der Artikel zunächst vornehmlich mit den Schaltgeräten selbst, während die Anwendungen in einer späteren Ausgabe behandelt werden.

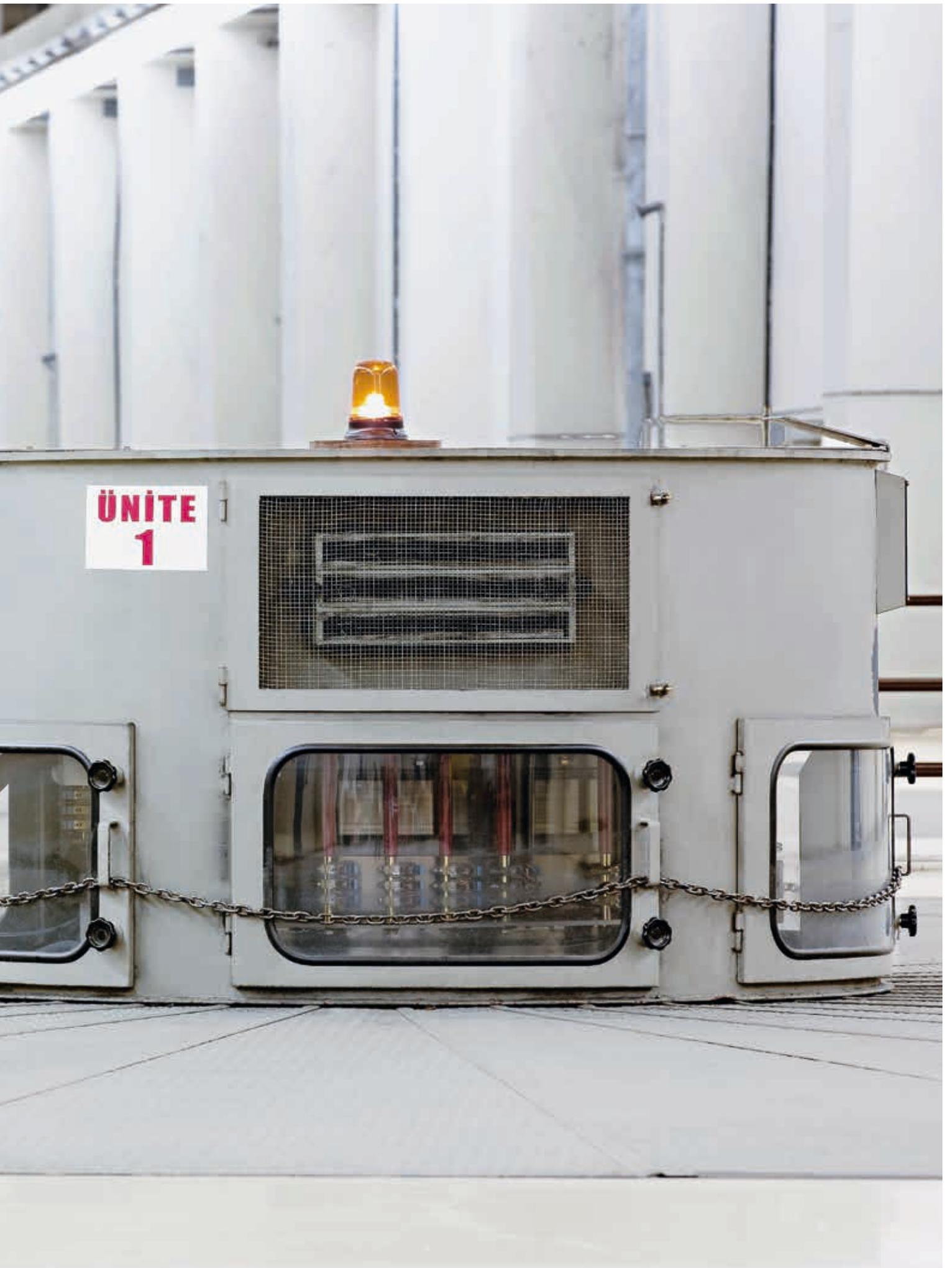
Ein weiterer größerer Themenkomplex dieses Hefts ist der Bergbau. Hier werden einige Beiträge vorgestellt, die ABB in diesem Sektor leistet. Weitere Artikel befassen sich mit dem Einsatz von ABB-Produkten auf einem Schwer-gutschiff und in Rechenzentren sowie mit der Simulation großer Anlagen und der Instandhaltungsplanung.

Doch nicht nur Technologien verändern sich, sondern auch diese Zeitschrift. Einigen Lesern wird aufgefallen sein, dass auch die deutsche Ausgabe nun den Namen *ABB Review* trägt. Dies soll eine einheitliche Identität und einen höheren Wiedererkennungswert über alle Sprachen hinweg schaffen. Eine weitere Neuigkeit für alle, die diese Zeitschrift in elektronischer Form lesen, ist ein E-Mail-Newsletter, mit dem Sie keine Ausgabe verpassen (Informationen hierzu finden Sie auf Seite 79). Über weitere Veränderungen werden wir Sie in den kommenden Ausgaben informieren. Trotz dieser Neuerungen in Form und Darstellung bleibt die *ABB Review* ihrem hohen inhaltlichen Standard verpflichtet.

Da dies die letzte Ausgabe der *ABB Review* unter meiner Leitung als Chief Technology Officer ist, möchte ich mich von allen Lesern verabschieden und Ihnen weiterhin viel Freude mit dieser Zeitschrift wünschen.

Eine interessante Lektüre wünscht Ihnen

Prith Banerjee
Chief Technology Officer
ABB Ltd.







Durchbruch!

Der ABB HGÜ-Hybridschalter – ein innovativer Durchbruch auf dem Weg zu zuverlässigen HGÜ-Netzen

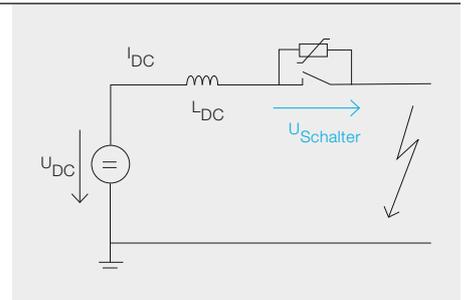
MAGNUS CALLAVIK, ANDERS BLOMBERG, JÜRGEN HÄFNER, BJÖRN JACOBSON – Wie ihre Vorgängerunternehmen gehört auch ABB zu den Pionieren auf dem Gebiet der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnik (HGÜ), die eine verlustarme Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen ermöglicht. Allerdings sind alle bisher realisierten HGÜ-Leitungen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Der Anwendungsbereich der Technik ließe sich erheblich erweitern, wenn man Leitungen mit mehr als zwei Anschlusspunkten realisieren könnte, die schließlich zu HGÜ-Netzen ausgebaut werden könnten. Bisher fehlte es jedoch an einem geeigneten Leistungsschalter für die damit verbundenen Spannungen und Geschwindigkeiten, der zudem akzeptable Verluste aufweist. Dies ändert sich nun mit dem neuen HGÜ-Schalter von ABB.

Titelbild

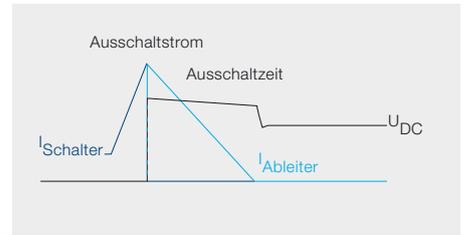
Der Hybridleistungsschalter von ABB ist eine der größten Innovationen in der Geschichte des Unternehmens. Er ebnet den Weg zur Realisierung von Gleichstromnetzen.



1a Die blauen Punkte stellen die Konverterstationen im HGÜ-Netz dar.



1b HGÜ-Leistungsschalter



1c Funktionsprinzip

Im Vergleich zu Hochspannungs-Wechselstromnetzen sind die Wirkleistungsverluste in HGÜ-Leitungen relativ gering und die Blindleistungsverluste gleich null. Dies macht HGÜ-Netze zu einer interessanten Alternative für die Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen [1] – ein Thema, das besonders im Hinblick auf den schnell wachsenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von Interesse ist.

Doch der Hybridschalter braucht nicht bis zum großflächigen Ausbau von HGÜ-Netzen zu warten, um seine Vorzüge auszuspielen. Viele gegenwärtige Vorschläge für Übertragungssysteme beinhalten Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Verbindungen, bei denen Hybridschalter ebenfalls eine Rolle spielen können. Neben der Stromwandlung können HGÜ-Konverterstationen durch Blindleistungsregelung zur Stabilität des Wechselstromnetzes beitragen. Lässt sich der Stromrichter im Fehlerfall schnell von der HGÜ-Leitung trennen, kann die Konverterstation direkt in den Stand-alone-Betrieb als statische Kompensationsanlage (STATCOM) wechseln und so die Stabilität des Wechselstromnetzes weiter unterstützen.

Die technischen Anforderungen an HGÜ-Leistungsschalter sind hoch. Die zulässige Zeit zur Unterbrechung des Stroms ist

aufgrund der niedrigeren Impedanz der Leitungen kürzer als bei einer vergleichbaren Wechselstromanwendung (d. h. der durch einen Fehler verursachte Spannungsabfall kann sich schneller ausbreiten). So muss ein Kurzschluss typischerweise innerhalb von 5 ms abgeschaltet werden, da sich dieser sonst auf bis zu

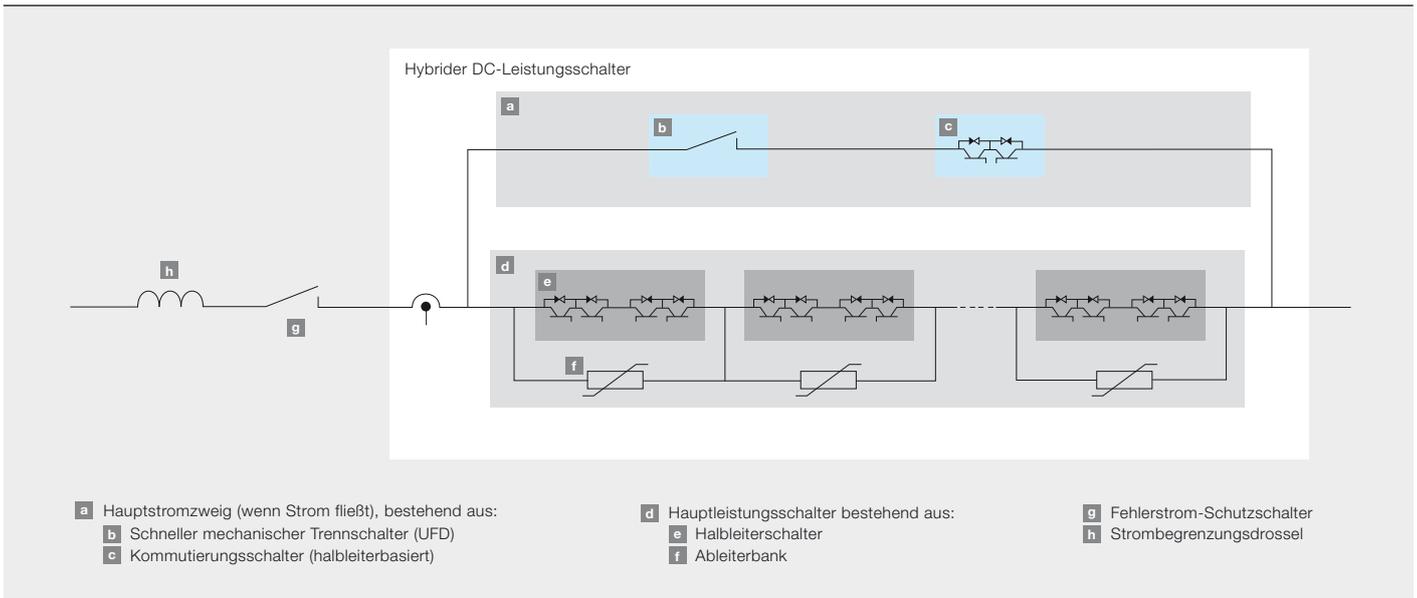
Eine kürzere Fehlerklärungszeit bedeutet zwar geringere Anforderungen an die Energieaufnahme in der Ableiterbank, erfordert aber auch eine höhere Spannungsfestigkeit des Ableiters.

200 km entfernte Konverterstationen auswirken kann. Da Konverterstationen zur Gewährleistung eines normalen Betriebs typischerweise auf eine Gleichspannung von mindestens 80 % ihres Nennwerts ausgelegt sind, müssen Fehler innerhalb von wenigen Millisekunden geklärt werden.

Ein rein mechanischer HGÜ-Leistungsschalter kann eine Leitung innerhalb mehrerer Dutzend Millisekunden ausschalten.

Dies ist aber zu langsam für die Anforderungen eines zuverlässigen HGÜ-Netzes [2]. Dennoch werden mechanische Leistungsschalter z. B. zum Löschen von Fehlerströmen eingesetzt. Ein weiterer Nachteil von mechanischen Schaltern ist, dass sie zusätzliche Komponenten zur Erzeugung des Stromnulldurchgangs benötigen, damit der Strom aufhören kann zu fließen.

Mit halbleiterbasierten HGÜ-Leistungsschaltern lassen sich die Einschränkungen hinsichtlich der Schaltgeschwindigkeit leicht überwinden. Doch da sich die Halbleiter permanent im Strompfad befinden, erzeugen sie Durchlassverluste, die typischerweise im Bereich von 30 % der Verluste der Konverterstation liegen. Ein HGÜ-Netz ist in → 1a dargestellt. → 1b zeigt einen Stromkreis mit einem mechanischen HGÜ-Leistungsschalter und einem Ableiter. Die beim Ausschalten auftretenden Transienten sind in → 1c dargestellt. Der Strom beginnt zu steigen, sobald der Fehler auftritt (die Anstiegsrate wird dabei durch die Induktivität der Netzdrossel bestimmt). Wenn der Schalter öffnet, wird der Strom auf den Ableiter kommutiert und beginnt zu sinken. Der Fehlerstrom in der Ableiterbank erzeugt eine Gegenspannung. Dadurch wird der Fehlerstrom auf null reduziert, indem die in der HGÜ-Drossel und im Fehlerstrompfad gespeicherte Energie abgeführt wird.



Die Gesamtzeit zur Fehlerklärung setzt sich zusammen aus:

- der Zeit, in der der Strom vor der Kommutierung ansteigt,
- der Dauer des nachfolgenden Stromrückgangs während des Abschaltens der Leitung.

Beide Zeitspannen spielen eine wichtige Rolle für das Design und die Kosten des HGÜ-Leistungsschalters und der Netz-drossel.

Die Ausschaltzeit wird bestimmt durch die Reaktionszeit der Schutzeinrichtung und der Wirkzeit des HGÜ-Schalters. Bei einer längeren Ausschaltzeit muss der HGÜ-Schalter über ein höheres Stromausschaltvermögen verfügen. Dadurch steigt auch die vom Ableiter zu bewältigende Energie, was wiederum die Kosten für den HGÜ-Leistungsschalter erhöht. Daher ist es wichtig, die Ausschaltzeit so kurz wie möglich zu halten. Sind die Ausschaltzeit und der maximale Ausschaltstrom gegeben, ist der einzig verbleibende veränderbare Parameter die Induktivität der HGÜ-Drossel (die die Stromanstiegsrate bestimmt). Die Größe der Drossel kann wiederum durch Faktoren wie Kosten und die Stabilität des HGÜ-Netzes beschränkt werden.

Die zur Fehlerklärung zulässige Zeit wirkt sich sowohl auf die erforderliche Spannungsfestigkeit des Ableiters als auch des Polspannungsschutzes aus. Eine kürzere Fehlerklärungszeit ist zwar mit geringeren Anforderungen an die Energieaufnahme in der Ableiterbank verbunden, erfordert

aber auch eine höhere Spannungsfestigkeit des Ableiters. Dies bedeutet eine höhere Bemessungsspannung zwischen den Polen und somit höhere Kosten für den HGÜ-Leistungsschalter.

Das folgende Beispiel vermittelt einen allgemeinen Eindruck von den Zusammenhängen zwischen den genannten Parametern. Kommt es bei einer Ausschaltzeit von 2 ms, was mit halbleiterbasierten HGÜ-Schaltern möglich ist, zu einem HGÜ-Netzfehler in der Nähe der HGÜ-Schaltanlage, beträgt die maximale Anstiegsrate des Fehlerstroms bei einer HGÜ-Drossel mit 100 mH in einem 320-kV-HGÜ-Netz mit einer maximalen Überspannung von 10 % 3,5 kA/ms. Bei einem Bemessungs-Netzstrom von 2 kA liegt das erforderliche Mindestausschaltvermögen des HGÜ-Leistungsschalters bei 9 kA.

Der HGÜ-Hybridschalter

Der HGÜ-Hybridschalter →2 basiert auf der in →1b dargestellten Anordnung, verfügt aber über einen zweiten Stromzweig →2a. Dieser besteht aus einem halbleiterbasierten Kommutierungsschalter (Load-Commutation Switch, LCS) →2c, der mit einem schnellen mechanischen Trennschalter (Ultra-Fast Disconnecter, UFD) →2b in Reihe geschaltet ist.

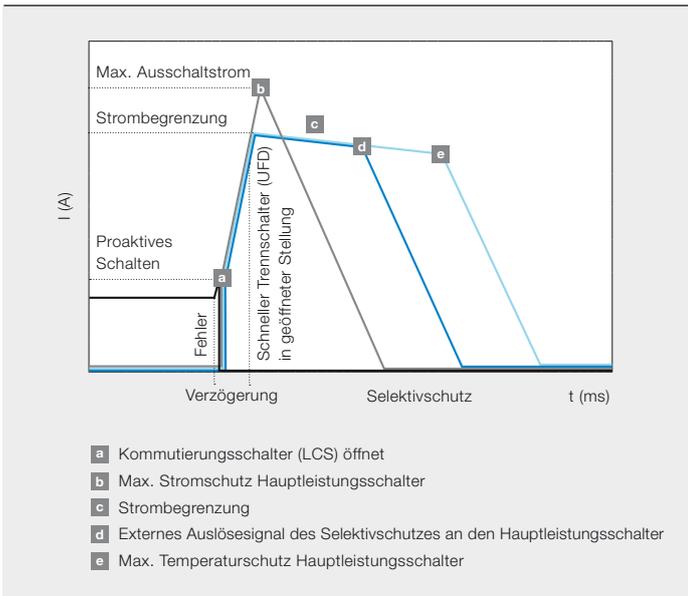
Im Normalbetrieb fließt der Strom nur durch den Bypass →2a. Tritt im HGÜ-Netz ein Fehler auf, kommutiert der Kommutierungsschalter den Strom sofort auf den Hauptleistungsschalter →2d. Wäh-

rend im Stromzweig →2a kein Strom mehr fließt, öffnet der Trennschalter →2b und schützt den Kommutierungsschalter →2c so vor der Primärspannung, die sich über dem Hauptleistungsschalter aufbaut. Die erforderliche Bemessungsspannung des Kommutierungsschalters wird somit deutlich reduziert gegenüber einer Komponente, die während des gesamten Schaltvorgangs im Hauptstrompfad verbleibt. Die Bemessungsspannung muss lediglich über der Durchlassspannung des Hauptleistungsschalters liegen, die für einen 320-kV-HGÜ-Leistungsschalter typischerweise im kV-Bereich liegt. Aufgrund dieser reduzierten Sperrspannung liegt die Durchlassspannung des Kommutierungsschalters typischerweise im Bereich von nur einigen Volt. Dadurch werden die Durchlassverluste des HGÜ-Hybridschalters auf einen Bruchteil der Verluste reduziert, die bei einem reinen Halbleiterschalter auftreten, und liegen bei 0,01 % der übertragenen Leistung.

Der halbleiterbasierte Hauptleistungsschalter →2d ist in mehrere Abschnitte mit jeweils einer Ableiterbank →2f unterteilt, die für das volle Spannungs- und Stromausschaltvermögen dimensioniert sind. Nach der Fehlerklärung unterbricht ein Leistungstrennschalter →2g den Reststrom und trennt die fehlerhafte Leitung vom HGÜ-Netz, um die Ableiterbänke gegen thermische Überlastung zu schützen.

Der mechanische Schalter →2b öffnet im stromlosen Zustand und bei geringer Spannungsbelastung und kann daher als

3 Steuerung des HGÜ-Hybridschalters



Trennschalter mit einem leichtem Kontaktsystem ausgeführt werden. Der schnelle Trennschalter ist bis zum Erreichen der geöffneten Stellung nicht der durch das Schutzniveau der Ableiterbänke bestimmten maximalen Spannung zwischen den Polen ausgesetzt. Thomson-Antriebe [4] sorgen für schnelle Öffnungszeiten und ein kompaktes Design des Trennschalters mit SF₆-Gas als Isoliermedium.

Durch proaktive Steuerung des HGÜ-Hybridschalters kann die Zeitverzögerung des schnellen Trennschalters kompensiert werden, wenn die Öffnungszeit des Trennschalters unter der für den Selektivschutz erforderlichen Zeit liegt. Die proaktive Stromkommutierung wird durch den im HGÜ-Hybridschalter integrierten Überstromschutz initiiert, sobald der HGÜ-Netzstrom ein bestimmtes Überstromniveau übersteigt → 3a. Der Hauptleistungsschalter verzögert das Ausschalten des Stroms, bis er ein Auslösesignal erhält oder der Strom der fehlerhaften Leitung nahe am maximalen Ausschaltstrom des HGÜ-Schalters liegt → 3b.

Um die Zeit bis zum Auslösen des HGÜ-Hybridschalters durch die Selbstschutzfunktion des Hauptleistungsschalters zu verlängern, kann der Hauptleistungsschalter vor dem Unterbrechen des Stroms im Strombegrenzungsmodus betrieben werden → 3c. Der Hauptleistungsschalter regelt den Spannungsabfall über der HGÜ-Drossel auf null, um ein weiteres Ansteigen des Netzstroms zu verhindern. Die maximale Dauer der Strombegren-

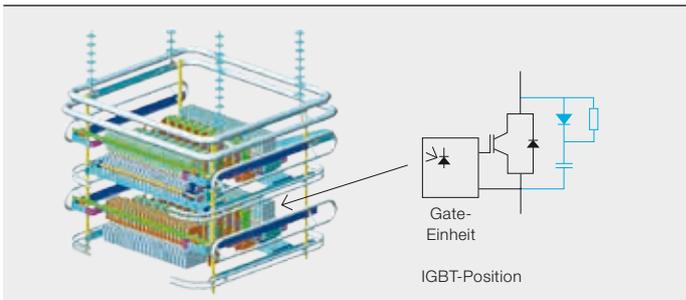
zung hängt vom Energieaufnahmevermögen der Ableiterbänke ab → 3d.

Ein schneller Reserveschutz ähnlich wie bei reinen Halbleiter-Leistungsschaltern ist auch für HGÜ-Hybridschalter in HGÜ-Schaltanlagen möglich. Dabei kann die Übertragung des Stroms vom Bypass in den Hauptleistungsschalter oder in möglicher

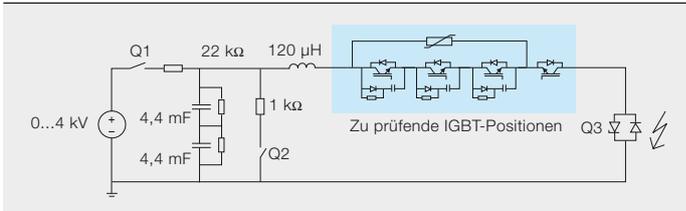
Durch proaktive Steuerung des HGÜ-Hybridschalters kann die Zeitverzögerung des schnellen Trennschalters kompensiert werden, wenn dessen Öffnungszeit unter der für den Selektivschutz erforderlichen Zeit liegt.

che Reserveleistungsschalter durch Überströme in der Leitung oder durch den übergeordneten Schaltanlagenschutz vor dem Auslösesignal des Reserveschutzes aktiviert werden. Bei einem Ausfall des Leistungsschalters können nahezu augenblicklich – typischerweise innerhalb von weniger als 0,2 ms – Reserveschalter aktiviert werden. Dies verhindert größere Störungen im HGÜ-Netz und hält das erforderliche Stromausschaltvermögen des Reserveschalters auf einem akzeptablen Niveau.

4 Aufbau der 80-kV-Hauptleistungsschalterzelle



5 Prüfschaltung für HGÜ-Hybridschalterkomponenten



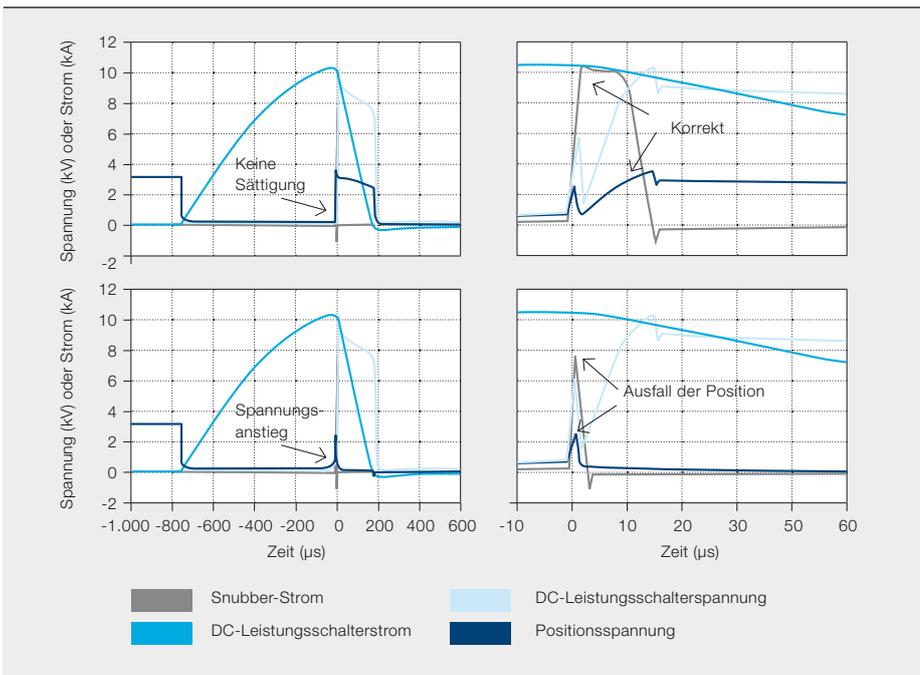
Design des Prototyps

Der Prototyp des HGÜ-Hybridschalters ist für ein Stromausschaltvermögen von 9,0 kA bei Einsatz in einem HGÜ-Netz mit einer Bemessungsspannung von 320 kV und einem Bemessungs-Übertragungsstrom von 2 kA ausgelegt. Das maximale Stromausschaltvermögen ist unabhängig vom Bemessungsstrom und hängt nur vom Design des Hauptleistungsschalters ab. Der schnelle Trennschalter und der Hauptleistungsschalter sind in Anbetracht möglicher schneller Spannungstransienten bei der Stromunterbrechung für Schaltspannungen über 1,5 p.u. ausgelegt.

Der Hauptleistungsschalter → 2d besteht aus mehreren Leistungsschalterzellen mit eigenen Ableiterbänken, die die maximale Spannung über jeder Zelle → 2e während der Stromunterbrechung auf ein bestimmtes Niveau begrenzen. Jede Leistungsschalterzelle enthält vier Leistungsschalterstapel, sogenannte „Stacks“ → 4. Zwei Stacks sind erforderlich, um den Strom in beide Richtungen zu unterbrechen.

Jeder Stack besteht aus bis zu 20 in Reihe geschalteten IGBT-Positionen. Aufgrund der hohen di/dt-Belastung wäh-

6 Belastungsprüfungen an IGBT-Positionen des HGÜ-Leistungsschalters (rechte Darstellungen vergrößert)



Der mechanische Schalter öffnet im stromlosen Zustand und bei geringer Spannungsbelastung und kann daher als Trennschalter mit einem leichtem Kontaktsystem ausgeführt werden.

während der Stromunterbrechung wurde ein mechanisches Design mit einer geringen Streuinduktivität gewählt. Die Verwendung von druckkontaktierten IGBTs mit einer Bemessungsspannung von 4,5 kV [6] ermöglicht ein kompaktes Stack-Design und sorgt beim Ausfall einzelner Komponenten für einen stabilen Kurzschlusszustand (SCFM). Einzelne RCD-Snubber über jedem IGBT-Modul sorgen für eine gleichmäßige Spannungsverteilung während der Stromunterbrechung. Optisch angesteuerte Gate-Einheiten ermöglichen den Betrieb des IGBT-Leistungsschalters unabhängig von den Strom- und Spannungszuständen im HGÜ-Netz. Ein Kühlsystem ist für die IGBT-Stacks nicht erforderlich, da die

schalters erhöht. In Reihe geschaltete, redundante IGBT-Leistungsschaltermodule verbessern die Zuverlässigkeit des Kommutierungsschalters. Für das aktuelle Design wurde eine Matrix aus 3×3 IGBT-Positionen für jede Stromrichtung gewählt. Ein Kühlsystem ist erforderlich, da der Schalter dauerhaft dem Netzstrom ausgesetzt ist.

Prüfungen

Das Stromausschaltvermögen der 4,5-kV-StakPak-IGBTs [6] wurde anhand eines verkleinerten Prototyps der Hauptleistungsschalterzelle mit drei in Reihe geschalteten IGBT-Modulen und einer gemeinsamen Ableiterbank in einer ersten Prüfschaltung verifiziert → 5. Ein viertes

IGBT-Modul wurde in umgekehrter Primärstromrichtung geschaltet, um die Funktionalität der integrierten Antiparalleldiode zu überprüfen. Durch Ent-

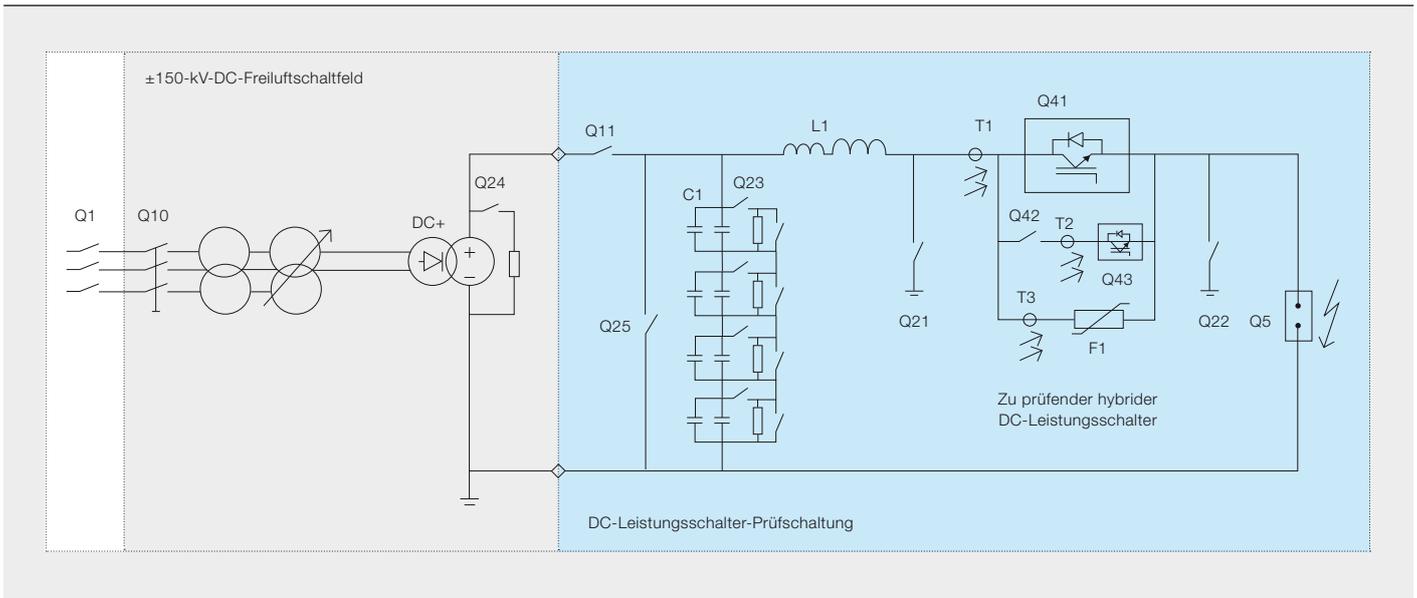
ladung einer Kondensatorbank mithilfe eines Thyristorschalters wurden – nur begrenzt durch eine kleine Gleichstromdrossel – Erdschlüsse im HGÜ-Netz dargestellt.

Das maximale Stromausschaltvermögen der IGBT-Leistungsschalterzelle wird durch den Sättigungsstrom der IGBT-Module bestimmt → 6 (anstatt durch den sicheren Arbeitsbereich, wie es bei

Jeder Stack besteht aus bis zu 20 in Reihe geschalteten IGBT-Positionen.

Hauptleistungsschalterzellen im normalen Betrieb nicht dem Netzstrom ausgesetzt sind.

Für die Auslegung des Kommutierungsschalters → 2c ist ein IGBT-Leistungsschaltermodule pro Stromrichtung ausreichend, um die Anforderungen der Bemessungsspannung zu erfüllen. Durch Parallelschaltung der IGBT-Module wird der Bemessungsstrom des HGÜ-Hybrid-



Erfolgreiche Verifizierungsprüfungen auf Geräte- und Komponentenebene bestätigten die Leistungsfähigkeit der Komponenten. Der komplette HGÜ-Hybrid-schalter wurde in einer Demonstrationsanlage bei ABB verifiziert.

Spannungszwischenkreis-Umrichter-anwendungen typisch ist). Die in Reihe geschalteten IGBT-Positionen können den Netzstrom innerhalb von $2 \mu\text{s}$ in die RCD-Snubber-Schaltungen kommutieren und so den Spannungsanstieg über den Positionen auf $300 \text{ V}/\mu\text{s}$ begrenzen. Durch spannungsloses Schalten werden die momentanen Schaltverluste reduziert und eine gleichmäßige Spannungsverteilung unabhängig von den Toleranzen in den Schalteigenschaften der verwendeten IGBT-Module gewährleistet.

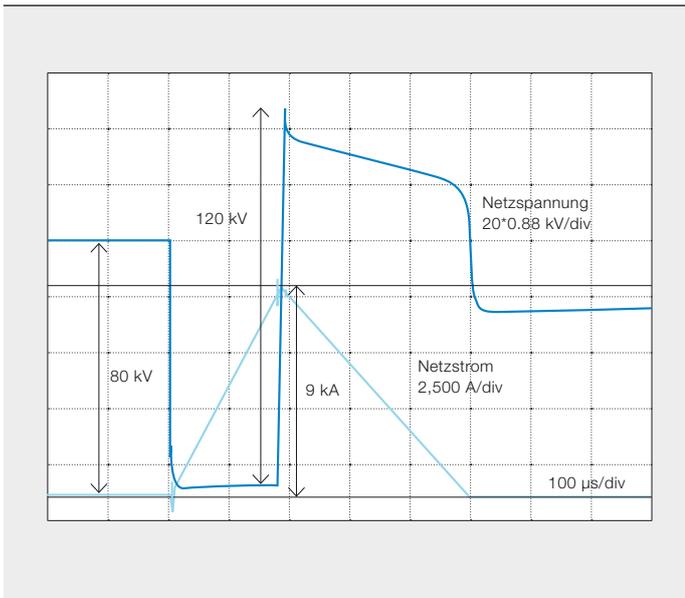
Der Netzstrom kommutiert von der RCD-Snubber-Schaltung in den Ableiterpfad, nachdem die Spannung über den IGBT-Positionen das Schutzniveau der Ableiter erreicht hat.

Die IGBT-Positionen haben die Belastungsprüfungen für Ausschaltströme unter 10 kA bestanden. Bei höheren Strömen bewirkt das Sättigungsstromniveau der IGBTs einen sofortigen Spannungsabfall über den IGBT-Modulen. Bei einer absichtlichen Zerstörungsprüfung wurden die gekapselten IGBT-Chips durch die resultierende interne Wärmeableitung im IGBT-Modul zerstört. Durch die Verwendung von druckkontaktierten IGBTs konnte ein zuverlässiger Kurzschluss ohne mechanische Zerstörung des ausgefallenen IGBT-Moduls hergestellt werden. Da bei der Prüfung nur eines der IGBT-Module ausfiel, hätte der Fehler immer noch von den beiden anderen Modulen geklärt werden können.

Die HGÜ-Nennspannung pro IGBT-Leistungsschalterzelle beträgt 80 kV . Aufgrund des hohen Spannungsniveaus benötigte die zweite Prüfanordnung deutlich mehr Platz. Die Prüfschaltung für das HGÜ-Hybrid-schalterkonzept ist in [7](#) dargestellt. Das gewünschte HGÜ-Spannungsniveau wurde durch Laden der Kondensatorbank C1 aufgebaut. Die Drossel L1 sorgt für die erwartete Stromsteilheit (di/dt) bei einem Kurzschluss. Der Kurzschluss selbst wurde durch die getriggerte Funkenstrecke Q5 initiiert. Ein typisches Testergebnis ist in [8](#) dargestellt. Verifiziert wurde ein maximaler Ausschaltstrom von über 9 kA . Die Spannung über den Leistungsschalterzellen übersteigt während der Stromkommutierung die 120 kV . Damit liegt das Ausschaltvermögen einer 80 kV -Leistungsschalterzelle bei über 1 GVA . Eine gleichmäßige Spannungsverteilung mit einem maximalen Spannungsabfall von $3,3 \text{ kV}$ und einer Streuung von weniger als 10% wurde nur für die einzelnen IGBT-Positionen in der Leistungsschalterzelle festgestellt.

Prüfergebnisse

Zur Verifizierung des vollständigen HGÜ-Hybrid-schalterkonzepts wurde die Prüfanordnung für den Hauptleistungsschalter erweitert. Eine zweite Kondensatorbank und große Drosseln wurden installiert, um die Anstiegsrate des Netzstroms auf typische Werte von HGÜ-Netzen zu begrenzen. Der schnelle Trennschalter und der Kommutierungsschalter wurden in die Systemkonfiguration integriert.



Erfolgreiche Verifizierungsprüfungen auf Geräte- und Komponentenebene bestätigten die Leistungsfähigkeit der Komponenten. Der komplette HGÜ-Hybridschalter wurde in einer Demonstrationsanlage bei ABB verifiziert. → 9 zeigt ein Schaltereignis mit einem Spitzenstrom von 9 kA und einer Verzögerungszeit zum Öffnen des schnellen Trennschalters im parallelen Zweig zum Hauptleistungsschalter von 2 ms. Der maximale Bemessungs-Fehlerstrom von 9 kA stellt die Grenze für die aktuelle Generation von Halbleiterelementen dar. Die nächste Generation wird eine Ausschaltleistung von bis zu 16 kA ermöglichen. Der Zweck der Prüfungen war die Verifizierung der Schaltleistung der leistungselektronischen Teile und der Öffnungsgeschwindigkeit des schnellen mechanischen Trennschalters. Die geprüfte Anordnung bestand aus einer unidirektionalen 80-kV-Hauptleistungsschalterzelle sowie dem schnellen Trennschalter und dem Kommutierungsschalter. Die höhere Bemessungsspannung wird durch Reihenschaltung mehrerer Hauptleistungsschalterzellen erreicht. Entsprechende Prüfungen wurden nicht nur für normale Schaltereignisse, sondern auch für Situationen mit ausgefallenen Schalterkomponenten durchgeführt.

Ausblick

Durch die Einführung der BiGT-Technologie (Bimode Insulated Gate Transistor) [7] mit rückwärts leitender Diode auf dem IGBT-Chip wird sich das Ausschaltvermögen aktueller druckkontaktierter Module verdoppeln (siehe auch „Der Zwei-in-

Eins-Chip“ auf Seite 19 dieses Hefts). Schnelle, zuverlässige und nahezu verlustfreie HGÜ-Leistungsschalter und Strombegrenzer auf der Basis des HGÜ-Leistungsschalterkonzepts wurden auf Komponenten- und Systemebene für HGÜ-Spannungen bis 320 kV und Bemessungsströme von 2 kA geprüft. Dadurch konnte ein bedeutendes Hindernis bei der Realisierung von HGÜ-Netzen ausgeräumt werden. Der nächste Schritt besteht darin, einen solchen Schalter an einer echten HGÜ-Übertragungsleitung zu testen.

Magnus Callavik

ABB Grid Systems
Vasterås, Schweden
magnus.callavik@se.abb.com

Anders Blomberg

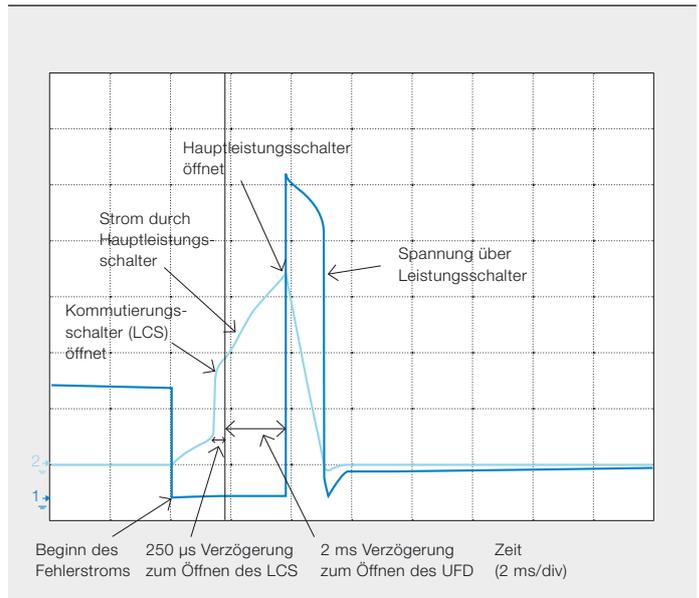
ehemals ABB Grid Systems

Jürgen Häfner

ABB Grid Systems
Ludvika, Schweden
jurgun.hafner@se.abb.com

Björn Jacobson

ABB Grid Systems
Peking, China
bjorn.jacobson@cn.abb.com



Literaturhinweise

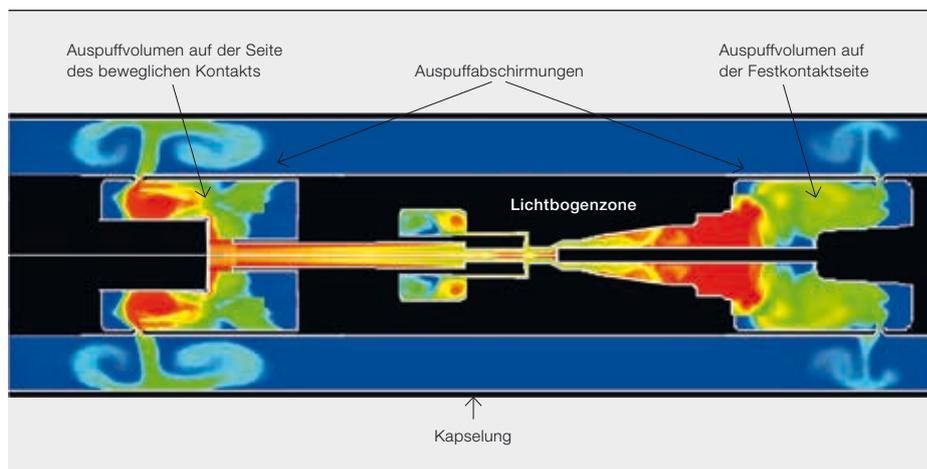
- [1] Koldby, E., Hyttinen, M.: „Challenges on the Road to an Offshore HVDC Grid“. Nordic Wind Power Conference. Bornholm, September 2009
- [2] Ekstrom, A., Hartel, H., Lips, H. P., Schultz, W., Kind, D.: „Design and testing of an HVDC circuit breaker“. Cigre Session 1976. Paper 13–06
- [3] Franck, C. M.: „HVDC Circuit Breakers: A Review Identifying Future Research Needs“. IEEE Trans. on Power Delivery. Vol. 26. April 2011: 998–1007
- [4] Magnusson, J., Hammar, O., Engdahl, G.: „Modelling and Experimental Assessment of Thomson Coil Actuator System for Ultra Fast Mechanical Switches for Commutation of Load Currents“. International Conference on New Actuators and Drive Systems. Bremen, 14.–16. Juni 2010
- [5] Asplund, G.: „HVDC switch for current limitation in a HVDC transmission with voltage source converters“. European Patent EP0867998B1
- [6] Eicher, S., Rahimo, M., Tsyplakov, E., Schneider, D., Kopta, A., Schlapbach, U., Caroll, E.: „4.5 kV Press Pack IGBT Designed for Ruggedness and Reliability“. IAS. Seattle, Oktober 2004
- [7] Rahimo, M., Kopta, A., Schlapbach, U., Vobecky, J., Schnell, R., Klaka, S. (2009): „The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BiGT) – A potential technology for higher power applications“. Proc. ISPSD09: 283
- [8] Hafner, J., Jacobson, B. (2011): „Proactive Hybrid HVDC Breakers – A key innovation for reliable HVDC grids“. Cigre Bologna. Paper 0264



Weniger ist mehr

Ein Leistungsschalter, der in der Lage ist, 15 Großkraftwerke zu schalten

HELMUT HEIERMEIER, RETO KARRER – Die Stromnetze, die unsere Städte und Ortschaften mit Strom versorgen, unterliegen einer ständigen Entwicklung. So werden insbesondere die Betriebsspannungen erhöht, um die Transportverluste zu minimieren. Dies stellt die kritischen Elemente, die die Netze steuern und schützen – die Leistungsschalter – vor erhöhte Anforderungen. Das Herzstück eines Leistungsschalters ist die Schaltkammer, in der der Schaltvorgang physisch stattfindet. Veränderte technische und wirtschaftliche Bedingungen sowie neue internationale Normen haben zur Entwicklung einer neuen Generation von Leistungsschaltern geführt.



Nennstromtragfähigkeit von 5 kA und ein Bemessungs-Kurzschlussstrom von 63 kA bei 50 und 60 Hz angestrebt.

Weitere Anforderungen waren:

- Geringe Feldgröße (ein komplettes Schaltfeld sollte in einen Standard-container passen)
- Beherrschung von Abstandskurzschlüssen ohne die Hilfe von Kondensatoren
- Reduktion des SF₆-Gasvolumens
- Geringstmögliche Reaktionskräfte (Auswirkungen auf Gebäude und Fundamente)
- Kleiner, standardmäßiger Antrieb
- Eine maximale Zeit bis zur Löschung des Kurzschlusses von zwei Perioden (in 50- und 60-Hz-Netzen)

Leistungsschalter

Ein Leistungsschalter ist ein bemerkenswertes Gerät. Er muss mit einer großen Bandbreite von Strömen von 1 A bis zu mehreren Dutzend Kiloampere fertig werden; er muss verschiedenen Spannungsszenarien, z. B. sehr schnellen Spannungsanstiegen und dauerhaften Wechselstrombelastungen, standhalten können; er muss alltägliche Schaltvorgänge ebenso wie Notabschaltungen von Kurzschlussströmen vornehmen; er muss in der Lage sein, im Notfall Fehlerströme innerhalb weniger Millisekunden zu unterbrechen, auch wenn er zuvor längere Zeit nicht betätigt wurde.

Konstruktion eines neuen Leistungsschalters

Bei der Konstruktion eines neuen Schaltgeräts und der Entscheidung für eine neue Technologie muss eine Vielzahl verschiedener Faktoren berücksichtigt werden.

Kapazitives Schaltvermögen

Diese Aufgabe zeichnet sich durch relativ niedrige Ströme, aber hohe Spannungen über den Schaltkontakten aus. Daher ist eine hohe dynamische Spannungsfestigkeit erforderlich. Die Spannungsfestigkeit muss größer sein als die ansteigende Netzspannung beim Öffnen des Leistungsschalters. Dies kann man am besten als ein „Wettrennen“ zwischen den sich öffnenden Kontakten und dem Spannungsanstieg beschreiben. Wichtig ist,

Die Netze, die unsere Gesellschaft mit dem für sie lebenswichtigen Strom versorgen, werden mit immer höheren Spannungen betrieben, um die Transportverluste zu minimieren und die Belastung der Umwelt zu reduzieren. Dies und andere Anforderungen sorgen dafür, dass ein wichtiges Element für die Steuerung und den Schutz der Stromnetze sich ebenfalls weiterentwickeln muss: der Leistungsschalter. Die Verfügbarkeit des Leistungsschalters ist hierbei von entscheidender Bedeutung, da sie sich direkt auf die Zuverlässigkeit des Netzes auswirkt.

Eine geringere Anzahl von Komponenten in Leistungsschaltern und eine geringe Antriebsenergie senken die Gefahr von unerwarteten Ausfällen. Kann außerdem die Größe des Schalters reduziert werden, sinken auch die Kosten und der Platzbedarf.

Vor diesem Hintergrund begann ABB mit der Entwicklung eines neuen Einkammer-schalters für 420-kV-Netze. Die neue Schaltkammer sollte die neuesten internationalen IEC- und ANSI/IEEE-Normen sowie die bekannten besonderen Anforderungen verschiedener Märkte weltweit erfüllen. Da in Zukunft ein Anstieg der zu bewältigenden Nenn- und Kurzschlussströme zu erwarten ist, wurde eine

Weniger Komponenten und eine geringe Antriebsenergie senken die Gefahr von unerwarteten Ausfällen. Außerdem sinken bei kleineren Schaltern die Kosten und der Platzbedarf.

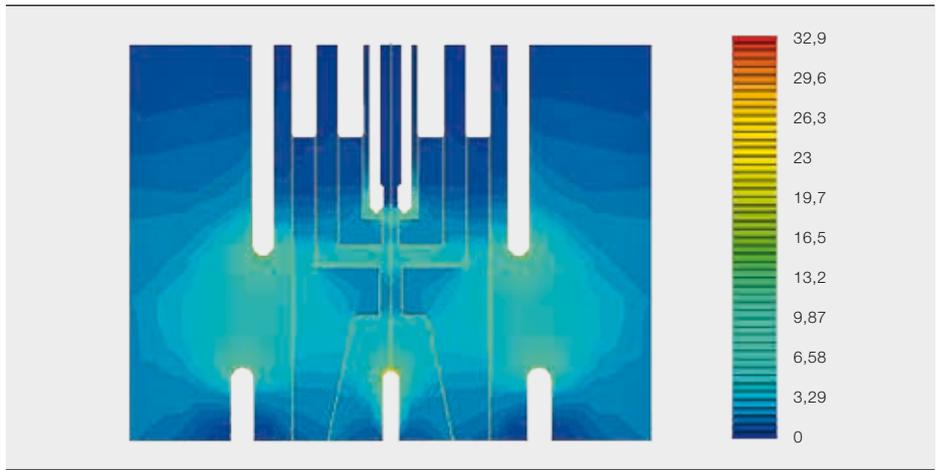
dass der Leistungsschalter das Rennen gewinnt, da es bei einem Versagen des Leistungsschalters zu einem unkontrollierten Aufschaukeln der Spannung und somit zur Belastung von Schaltanlagen-

Titelbild

Stromleitungen mit immer höheren Spannungen treiben neue Entwicklungen in der Hochspannungstechnik voran. Wie werden die neuesten Leistungsschalter den neuen Herausforderungen gerecht?

Das Ziel war ein Einkammerschalter für 420-kV-Netze mit 5 kA Nennstromtragfähigkeit und 63 kA Bemessungs-Kurzschlussstrom bei 60 Hz, der ohne die Hilfe eines Kondensators auskommt.

2 Beispiel einer elektrischen Feldsimulation der Lichtbogenzone



komponenten und Freileitungen kommen könnte. Mit anderen Worten, der neue Leistungsschalter muss eine hohe Kontaktgeschwindigkeit besitzen, damit in sehr kurzer Zeit eine hohe dielektrische Festigkeit erreicht wird.

In internationalen Normen wird dieser Aspekt durch ein sehr detailliertes und entsprechend teures Prüfverfahren abgedeckt.

Schaltvermögen bei Abstandskurzschlüssen

Dies erfordert einen hohen Gasdruck im Raum zwischen den Schaltkontakten, damit genügend Kühlleistung zum Löschen des Lichtbogens und somit für eine erfolgreiche Stromunterbrechung zur Verfügung steht. Dieser Druckaufbau ist ein

wiederum mit höheren Asymmetrieanforderungen verbunden ist als bei früheren Leistungsschaltern. Eine Unterbrechung bei großer Asymmetrie führt zu hohen Druckanstiegen, die vom Antrieb sowie dem Auspuff- und Düsensystem beherrscht werden müssen. Für den neuen Leistungsschalter bedeutet dies, dass hohe Energiezufuhren in die Lichtbogenzone und das Auspuffsystem sicher bewältigt werden müssen.

Schaltvermögen bei transformatorbegrenzten Kurzschlüssen

Diese besondere Anforderung, die an einigen Standorten erfüllt werden muss, tritt ein, wenn ein Teil (7 bis 30 %) des Bemessungs-Kurzschlussstroms fließt und es gleichzeitig zu einem sehr schnellen

Anstieg der Wiederkehrspannung (die Spannung, die nach der Stromunterbrechung an den Klemmen anliegt) kommt. Um diesen Anforderungen standzuhalten, muss der Schalter in der Lage sein, nach der Stromunterbrechung sehr

Neue Werkstoffe und Produktionsverfahren wurden evaluiert, um sicherzustellen, dass die Produktkosten im Bereich herkömmlicher Angebote liegen.

Schlüsselwert für eine schnelle Fehlerabschaltung. Ein Einkammerschalter, der für ein hohes Kurzschluss-Ausschaltvermögen ausgelegt ist, benötigt einen hohen Löschdruck.

Schaltvermögen bei Klemmenkurzschlüssen

Da eine der Anforderungen an den neuen Leistungsschalter eine Unterbrechungszeit von maximal zwei Perioden war, ist eine kurze Öffnungszeit erforderlich, was

schnell eine hohe dynamische Spannungsfestigkeit aufzubauen. Das bedeutet, dass das heiße Gas zwischen den Lichtbogenkontakten so rasch wie möglich durch kaltes Gas ersetzt werden muss.

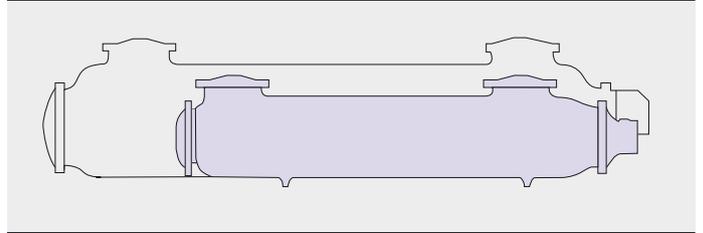
Wahl der Schalttechnik

Leistungsschalter werden zurzeit in verschiedenen Varianten angeboten, die alle ihre Vorzüge besitzen:

3 Die Prototypen wurden vollständig im Labor evaluiert.



4 Das Volumen des Leistungsschalters wurde deutlich reduziert.



5 Erste Installation in der Schweiz: alt (rechts) und neu (links)



- Blaskolbenschalter
- Blaskolbenschalter mit verstärkter Nutzung des Selbstblaseffekts
- Blaskolbenunterstützte Selbstblasschalter
- Reine Selbstblasschalter
- Selbstblasschalter mit linearer Doppelbewegung
- Selbstblasschalter mit nicht linearer Doppelbewegung

Bei der Entwicklung des neuen Leistungsschalters wurden die Vorzüge mehrerer Konzepte in einem fortschrittlichen

Die Reaktionskräfte sind geringer als bei anderen Lösungen, was die Kosten für die physische Infrastruktur senkt.

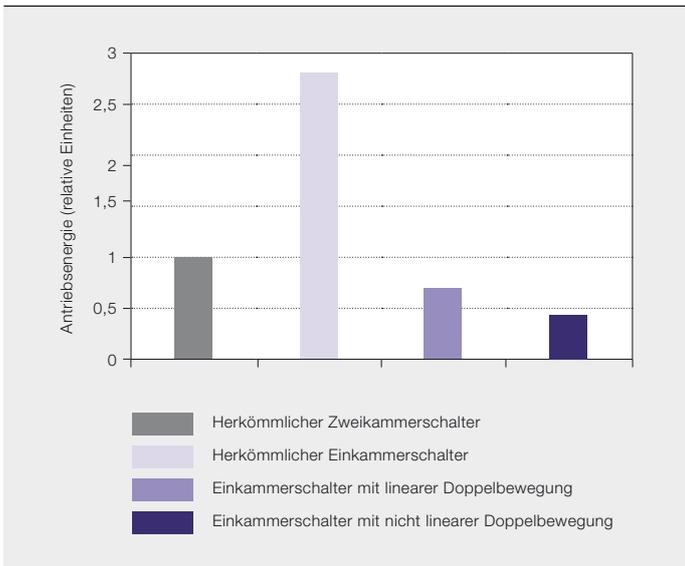
Selbstblasschalter mit einer nicht linearen Doppelbewegung kombiniert. Ein solcher Ansatz bietet mehrere Vorteile:

- Hohe und einstellbare Kontaktgeschwindigkeit
- Geringe bewegte Massen und somit geringe Reaktionskräfte
- Schnelle Öffnungszeiten (mit einem standardmäßigen energiearmen, hydromechanischen Federspeicherantrieb)
- Geringes Verhältnis zwischen dem Druckaufbau bei Nulllast und maximalem Druckaufbau (somit niedrige Temperaturen des Löschgases bei der Unterbrechung)
- Geringe mechanische Belastung der bewegten Teile aufgrund der reduzierten Geschwindigkeit bestimmter Teile
- Auch bei stärkerer Asymmetrie werden die Teile der Lichtbogeneinheit durch den maximalen Druckaufbau nicht mechanisch überlastet, da der maximal erzeugte Druck begrenzt werden kann.

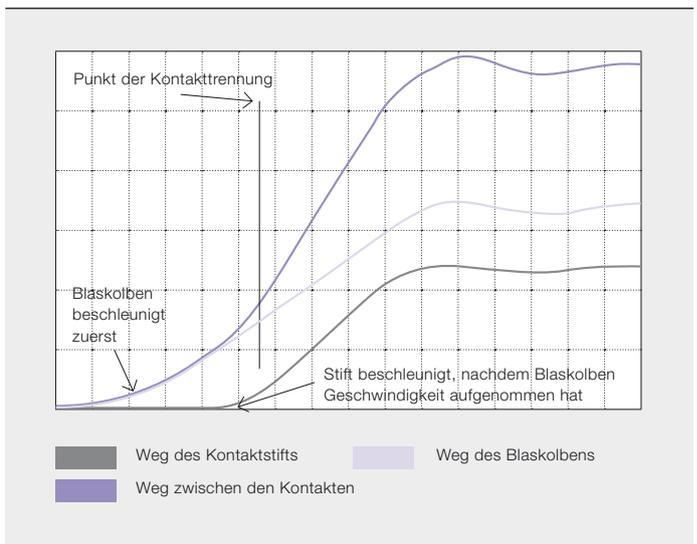
Eine wichtige Rolle bei der Entwicklung spielte der Einsatz von Simulationssoftware, um verschiedene physikalische Effekte wie Strömung, Druckaufbau und elektrische Felder während der Stromunterbrechung nachzubilden → 1-2. Die mechanischen Analysen wurden durch FEM-Tools (Finite-Elemente-Methode) unterstützt. Die Testobjekte wurden mit

Die Antriebsenergie konnte um 50 %, die Schaltfeldgröße um 50 % und das SF₆-Volumen um 30 % reduziert werden.

6 Vergleich der erforderlichen Antriebsenergie



7 Das Schaltkonzept (Achsen in relativen Einheiten). Die Schalteigenschaften entsprechen neuesten IEC- und IEEE-Standards.



Simulationssoftware half dabei, verschiedene physikalische Effekte wie Strömung, Druckaufbau und elektrische Felder während der Stromunterbrechung nachzubilden. Die mechanischen Analysen wurden durch FEM-Tools unterstützt.

verschiedenen Messsensoren ausgestattet, um Daten zur Überprüfung und Verbesserung der Simulationswerkzeuge zu erfassen. Außerdem wurden Tests zur Bestimmung der Grenzen des Testgeräts durchgeführt. Parallel zur Entwicklungsarbeit wurden neue Werkstoffe und fortschrittliche Produktionsverfahren evaluiert, um sicherzustellen, dass die Produktkosten im Bereich herkömmlicher Angebote liegen → 3.

Projektergebnisse

Die Entwicklung erreichte die gesetzten Ziele bzw. übertraf diese. Im Vergleich zur vorherigen Leistungsschaltergeneration bedeutet dies:

- eine Reduzierung der Antriebsenergie um 50 %,
- eine Reduzierung des SF₆-Gasvolumens um 30 % → 4,
- eine Reduzierung der Schaltfeldgröße für gasisolierte Schaltanlagen (GIS) um 50 % (301 ELK 3-2, 147 ELK 3-1) → 5. Weitere Reduktionen der Feldgröße werden durch angepasste GIS-Teile erreicht. Dieses verbesserte Schaltfeld kann (wie auf der Hannover Messe 2012 gezeigt) zum Transport und als Containerschaltfeld für Noteinsätze in einem Standardcontainer untergebracht werden.

Eine herkömmliche Zweikammerlösung benötigt die doppelte Antriebsenergie des neuen Systems mit nicht linearer Doppelbewegung (ein Einkammersystem mit einseitigem Antrieb nahezu das Fünffache) → 6. Die bewegte Masse pro Kammer ist in etwa gleich (Ein- oder Doppel-

kammer), wobei die bewegte Masse beim System mit Doppelbewegung etwas größer ist (Kontaktstift und Hebel).

Die Reaktionskräfte sind geringer als bei allen anderen Lösungen, was die Kosten für die physische Infrastruktur reduziert. Außerdem können die bewegten Massen nacheinander beschleunigt werden, und die Bewegung des Kontaktstifts kann reduziert werden, was den Energiebedarf weiter senkt → 7.

Der neue Leistungsschalter, der sowohl in Dead-Tank- und PASS-Anwendungen (Plug and Switch System) als auch in GIS eingesetzt werden kann, erfüllt alle gesteckten Ziele. Das neue Produkt ist ein moderner, wettbewerbsfähiger Leistungsschalter, der die neuesten internationalen Normen erfüllt. Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit ist zu bemerken, dass eine Schaltkammer in der Lage ist, nahezu 23 GW zu schalten – das entspricht der Nennleistung von etwa 15 Kernkraftwerken.

Helmut Heiermeier

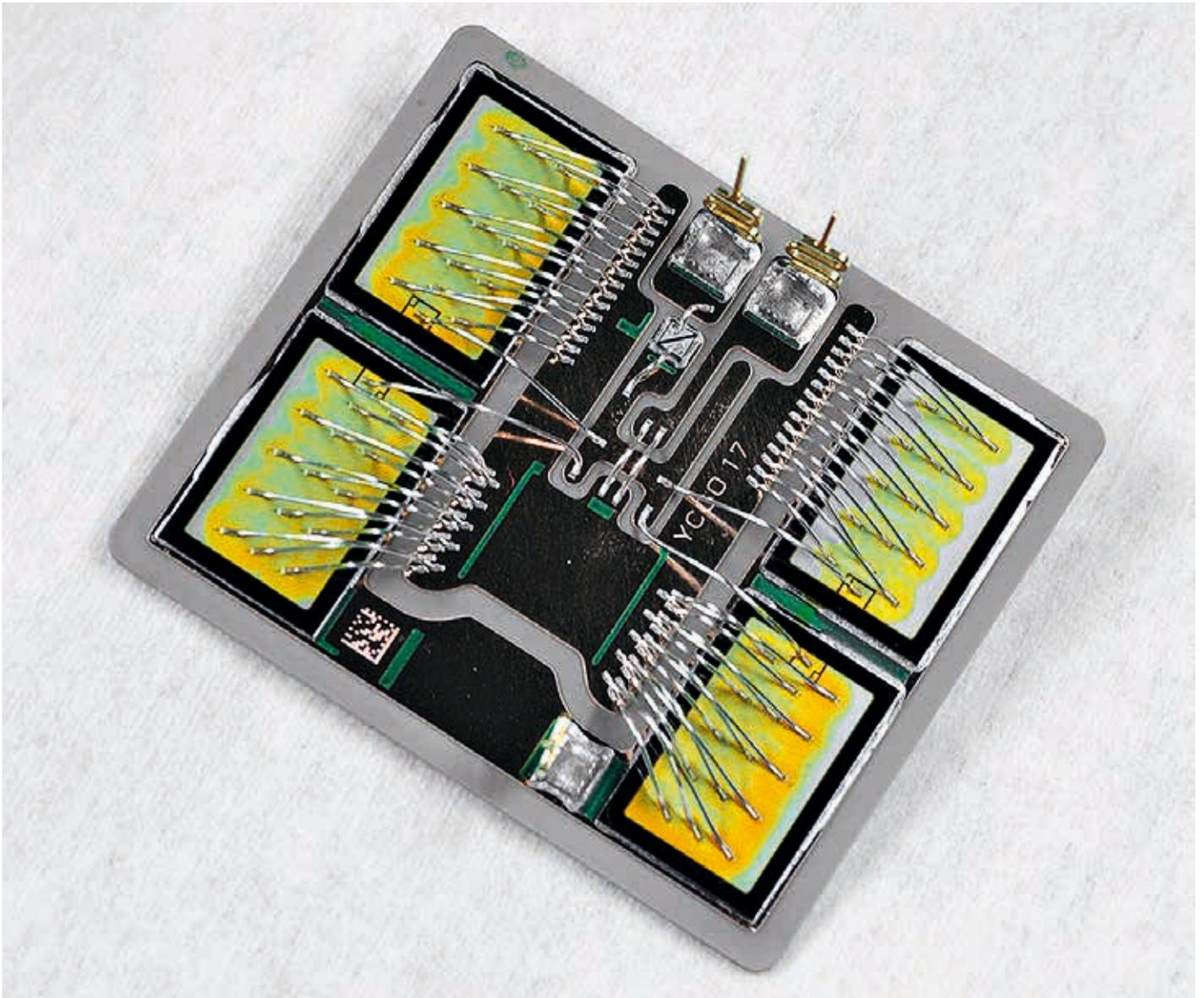
Reto Karrer

ABB Power Products, High Voltage Products

Baden, Schweiz

helmut.heiermeier@ch.abb.com

reto.karrer@ch.abb.com

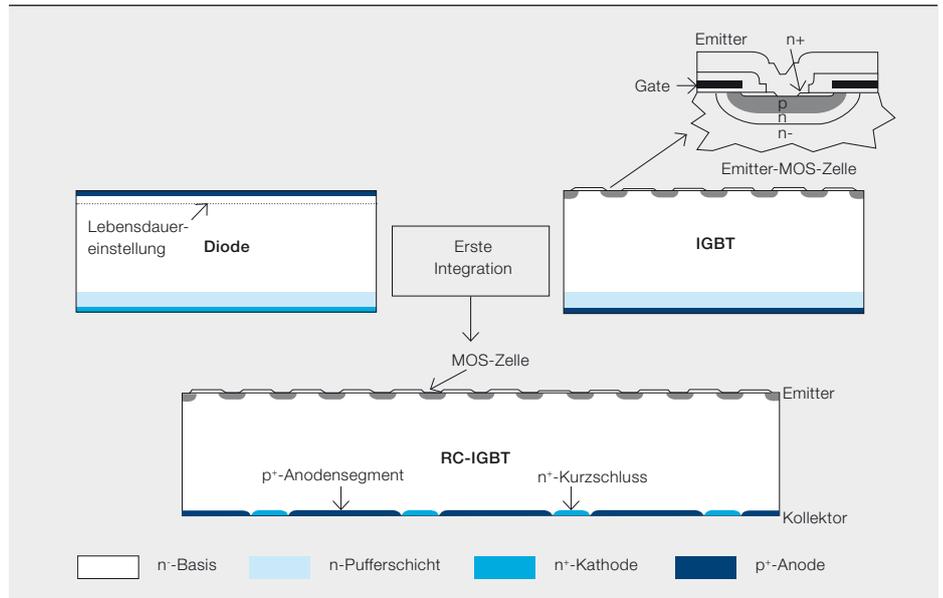


Der Zwei-in-Eins-Chip

Der Bimode Insulated Gate Transistor (BIGT)

MUNAF RAHIMO, LIUTAURAS STORASTA, CHIARA CORVASCE, ARNOST KOPTA – Leistungshalbleiter-Bauelemente, die für Spannungswidenschkreis-Umrichter (Voltage Source Converter, VSC) verwendet werden, lassen üblicherweise nur in einer Richtung Strom durch. Bei VSC-Topologien mit induktiven Lasten hingegen werden normalerweise in die eine Richtung leitende Schaltelemente mit (Freilauf-)Dioden kombiniert, die in die andere Richtung (rückwärtsleitend oder antiparallel) leiten. Die Halbleiterindustrie verfolgt seit Langem das Ziel, beide Komponenten in einem einzigen Bauelement und

möglichst auch in einer einzigen Siliziumstruktur zu integrieren, um eine höhere Leistungsdichte, kompaktere Systeme und eine einfachere Fertigung zu ermöglichen. Bei IGBTs¹ beschränkte sich die Integration von rückwärts leitenden Schaltern auf denselben Chip bislang auf leistungsärmere Komponenten und besondere Anwendungen. Mit dem BIGT (Bimode Insulated Gate Transistor) präsentiert ABB nun ein bahnbrechendes Bauelement, das über eine integrierte Freilaufdiode verfügt und Betriebseigenschaften aufweist, die bislang weitaus größeren Bauelementen vorenthalten waren.



Aufgrund der technischen Herausforderungen, die mit der Integration von Antiparalleldioden und Halbleiterschaltern verbunden sind, blieb diese Technologie (in den letzten Jahren) auf leistungsärmere Bauelemente wie IGBTs und MOSFETs² sowie auf besondere Anwendungen beschränkt. Darüber hinaus wurde für großflächige bipolare Elemente wie den IGCT³ zwar eine monolithische Integration realisiert, wobei der IGCT und die Diode aber in vollständig voneinander getrennten Regionen des Siliziums untergebracht waren.

In den letzten Jahren wurde bei ABB an der Integration einer leistungsstarken IGBT- und Diodenstruktur auf einem einzigen Chip gearbeitet. Die Zielanwendung für das neue Bauelement waren hart schaltende Mainstream-Wechselrichter⁴. Das Ergebnis ist ein neues Leistungshalbleiterkonzept mit der Bezeichnung Bimode Insulated Gate Transistor (BIGT). Die ersten Prototypen mit Nennspannungen von über 3.300 V zeichneten sich durch eine größere Leistungsdichte als herkömmliche Chips sowie ein verbessertes Gesamtleistungsvermögen aus. Der

BIGT wurde nach neuesten IGBT-Designkonzepten entwickelt und umfasst eine vollständig in dieselbe Struktur integrierte optimierte Antiparalleldiode. Neben seinen Leistungs- und Größenvorteilen zeichnet sich der BIGT durch ein weiches Abschaltverhalten in beiden Betriebsarten, eine hohe Betriebstemperaturbeständigkeit, ein besseres Störungsverhalten bei IGBT-Kurzschlüssen und Dioden-Stoßströmen⁵ sowie eine verbesserte Stromaufteilung im parallelen Betrieb aus.

traditionellen Zwei-Chip-Konzept nicht erfüllt werden können.

Die Integration als Herausforderung

In modernen Anwendungen von IGBT-Modulen stellt die Diode aufgrund ihrer Verluste, ihrer Leistungsfähigkeit und ihrer Stoßstromfestigkeit eine bedeutende Einschränkung dar. Dies ist auf die historisch bedingt begrenzte verfügbare Fläche für die Diode zurückzuführen. Das typische Flächenverhältnis zwischen IGBT und

Diode beträgt ca. 2:1. Diese Grenzen wurden im Wesentlichen nach der Einführung moderner verlustarmer IGBT-Designs festgesetzt. Eine Vergrößerung der Diodenfläche stellt keine bevorzugte Lösung dar und bleibt

Beim BIGT wurden verschiedene vorhandene und neue Technologien zur Integration von IGBT- und Diodenfunktionalitäten eingesetzt.

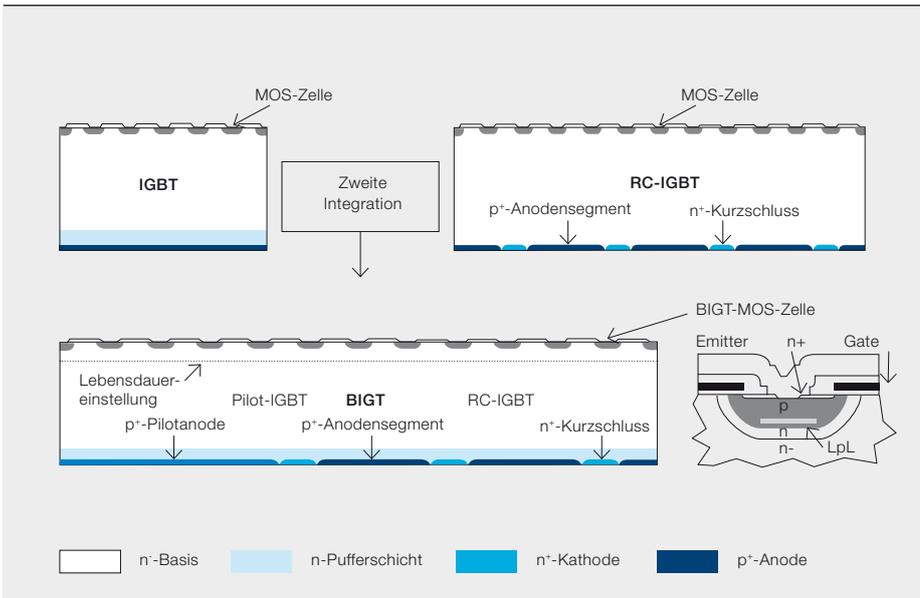
Da dasselbe verfügbare Siliziumvolumen sowohl im IGBT- als auch im Diodenmodus verwendet wird, ist das Bauelement zu keinem Zeitpunkt inaktiv, was die thermische Ausnutzung und damit auch die Zuverlässigkeit verbessert.

Die praktische Umsetzung der auf einem Einzelchip basierenden BIGT-Technologie liefert eine mögliche Grundlage für zukünftige Hochspannungsanwendungen, in denen kompakte Systeme mit höheren Leistungen benötigt werden. Dies gilt besonders für Systeme mit hohen Anforderungen an den Diodenstrom, die mit dem

in jedem Fall weiterhin durch die Größe des Gehäuses bzw. Package begrenzt. Um der Forderung nach höheren Leistungsdichten von IGBT- und Diodenkomponenten nachzukommen, wurde stattdessen versucht, IGBT und Diode zu integrieren. Dies führte zur Entwicklung des sogenannten rückwärts leitenden IGBT (RC-IGBT).

Bis vor Kurzem war der Einsatz von RC-IGBTs auf spezielle weich schaltende Anwendungen mit Spannungen unter 1.200V und geringeren Anforderungen an die Dioden beschränkt. Der Realisierung

Titelbild
Der neue BIGT von ABB integriert eine rückwärts leitende Diode in die Struktur des Halbleiterschalters.



eines solchen Bauelements für hart schaltende Hochspannungs- und Mainstream-Anwendungen standen bislang design- und prozessbezogene Probleme im Weg, die mit einer Reihe von leistungsbezogenen Nachteilen und Kompromissen verbunden waren:

- Snapback⁶ in der I-U-Kennlinie des IGBT im Durchlasszustand – MOSFET-Kurzschlusseffekt
- Kompromiss zwischen Durchlassverlusten des IGBT und Sperrverzögerungsverlusten der Diode – Plasmaformeffekt
- Kompromiss zwischen weichem Verhalten des IGBT und der Diode – Siliziumdesigneffekt
- Sicherer Arbeitsbereich (Safe Operating Area, SOA) – Effekt der Ladungsuniformität

Das Ergebnis der Bemühungen von ABB zur Lösung dieser Probleme ist ein fortschrittliches RC-IGBT-Konzept mit der Bezeichnung Bimode Insulated Gate Transistor (BIGT).

Das BIGT-Konzept

Das BIGT-Konzept basiert auf zwei Integrationschritten, von denen der erste in → 1 dargestellt ist. Der IGBT und die Diode teilen sich dabei eine gemeinsame Struktur. Auf der Kollektorseite sind abwechselnd n⁺-dotierte Bereiche in die p⁺-Anodenschicht eines IGBT eingebracht. Diese fungieren als Kathodenkontakt für den internen Diodenmodus. Das Flächenverhältnis zwischen der IGBT-Anode (p⁺-Regionen) und der Dioden-

kathode (n⁺-Regionen) bestimmt, welcher Teil der Kollektorfläche im IGBT- bzw. im Diodenmodus zur Verfügung steht. Während der Stromdurchleitung im Diodenmodus sind die p⁺-Regionen inaktiv und haben keinen direkten Einfluss auf das Durchlassverhalten der Diode. Andererseits fungieren die n⁺-Regionen als Anodenkurzschlüsse im IGBT-Modus und haben damit großen Einfluss auf das Durchlassverhalten des IGBT.

Eine Begleiterscheinung des Anodenkurzschlusses ist der oben erwähnte „Snapback“ der Spannung, der sich als Bereich mit negativem Widerstand in der I-U-Kennlinie für den IGBT-Modus bemerkbar macht. Dieser Effekt wirkt sich bei der Parallelschaltung von Bauelementen, besonders bei niedrigen Temperaturen, nachteilig aus. Zur Lösung dieses Problems war ein zweiter Integrationschritt erforderlich. Wie sich gezeigt hat, kann der anfängliche Snapback durch das Einbringen breiter p⁺-Regionen in das Bauelement kontrolliert und beseitigt werden. Diese werden auch als Pilot-IGBT bezeichnet. Dieser Ansatz führte schließlich zum BIGT-Konzept, das im Prinzip auf einer hybriden Struktur mit einem RC-IGBT und einem standardmäßigen IGBT in einem einzigen Chip basiert → 2.

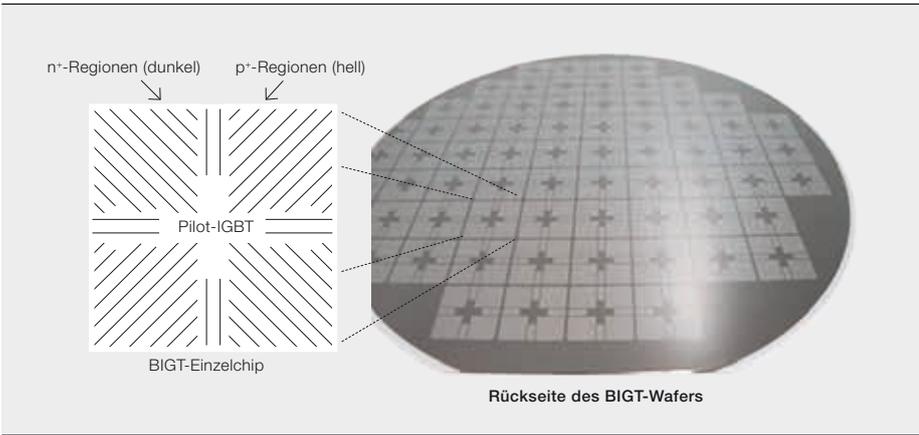
Der Pilotbereich ist mittig auf dem Chip untergebracht, um eine bessere Wärmeverteilung und geringere Stromungleichmäßigkeiten zu erreichen. Außerdem ist er so ausgelegt, dass eine größtmögliche funktionale Reichweite innerhalb des

In den letzten Jahren wurde bei ABB an der Integration einer leistungsstarken IGBT- und Diodenstruktur auf einem einzigen Chip gearbeitet.

Fußnoten

- 1 Ein IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) ist ein spannungsgesteuerter Halbleiterschalter, der in der Leistungselektronik verbreitet Anwendung findet.
- 2 Ein MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) ist ein Halbleiterbauelement, das sowohl zum Schalten als auch zur Verstärkung verwendet wird. Er schaltet üblicherweise niedrigere Leistungen als IGBTs.
- 3 Ein IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) ist ein GTO (Gate Turn-Off Thyristor), der für hartes Schalten optimiert wurde und einen in das Bauelement integrierten Gate-Treiber besitzt. Mehr über die verschiedenen Halbleitertechnologien lesen Sie im Artikel „Vom Quecksilberdampf zum Hybridleistungsschalter“ auf Seite 70 dieses Hefts.
- 4 Hartes Schalten ist das Ein- und Ausschalten von Strömen mit hohem dU/dt und dI/dt während des Schaltens.
- 5 Die Stoßstromfestigkeit ist die Fähigkeit eines Bauelements, eine plötzliche, kurzzeitige Stromspitze (weit über den Nennstrom des Bauelements hinaus) unbeschadet zu überstehen.
- 6 Snapback ist ein bei IGBTs beobachteter Effekt, bei dem die Durchlassspannung beim Einschalten eine kurzzeitige Spitze aufweist (zu sehen in → 8).
- 7 Siehe „Das Plus an Leistung“, ABB Review 3/2008, S. 19–24

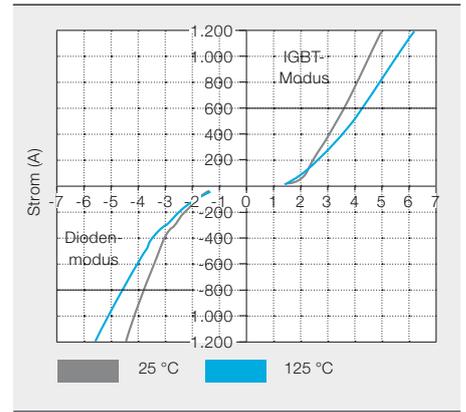
3 Design der Rückseite des BIGT



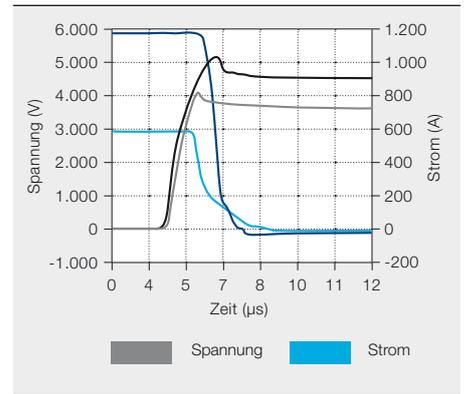
4 BIGT HiPak 1 für 6,5 kV/600 A



5 Durchlasskennlinie des BIGT HiPak 1 für 6,5 kV/600 A



6 Abschaltkennlinien des BIGT HiPak 1 für 6,5 kV/600 A im IGBT-Modus



Die BIGT-Technologie wurde ursprünglich für Hochspannungsbaulemente entwickelt und auf Modulebene mit Nennspannungen von 3,3 kV bis 6,5 kV geprüft.

Chips und eine große RC-IGBT-Region erreicht werden. Abwechselnde p⁺- und n⁺-Regionen sind in einer Streifenstruktur mit einem optimierten radialen Layout angeordnet, um im IGBT-Durchlassmodus einen sanften und schnellen Übergang vom Pilotbereich zum restlichen Chip zu gewährleisten → 3.

Bei der Entwicklung des BIGT wurden verschiedene vorhandene und neue Technologien eingesetzt, um die Integration von IGBT- und Diodenfunktionalitäten zu ermöglichen. Eine wichtige Grundlage für diese Integration bildeten bereits von ABB verwendete Technologieplattformen wie der Soft-Punch-Through-(SPT)-Puffer und verbesserte planare Zellenkonzepte⁷. Neben ihrer bekannten Robustheit und ihren geringen Verlusten trägt auch das optimale Dotierungsprofil der SPT-Technik entscheidend zur Verringerung des Snapback-Effekts bei, während das miniaturisierte planare Streifenzellendesign eine wichtige Rolle bei der Senkung der Durchlass- und Schaltverluste der Diode spielen, ohne sich negativ auf die Leistungsfähigkeit des IGBT auszuwirken. Darüber hinaus wurde neben einer herkömmlichen

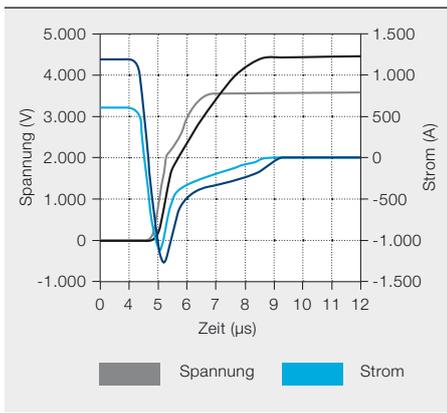
axialen Lebensdauereinstellung eine präzise lokale Lebensdauereinstellung über die p-Wanne (Local p-well Lifetime, LpL) konzipiert (siehe → 2), um den Kompromiss zwischen IGBT-Durchlassverlusten und Sperrverzögerungsverlusten der Diode zu verbessern. Ferner hat der BIGT durch die Anodenkurzschlüsse eine Reihe von Eigenschaften „geerbt“, die sich positiv auf die Leistungsfähigkeit des Bauelements in beiden Betriebsarten auswirken. Dazu gehören ein weiches Schaltverhalten unter extremen Bedingungen und sehr geringe Sperrströme bei höheren maximalen Sperrschichttemperaturen.

Leistungsfähigkeit des BIGT

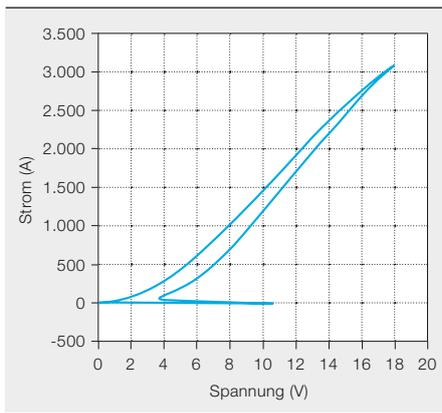
Die BIGT-Technologie wurde ursprünglich für Hochspannungsbaulemente entwickelt und auf Modulebene mit Nennspannungen von 3,3 kV bis 6,5 kV geprüft. Die hier dargestellten Prüfergebnisse wurden mit den kürzlich entwickelten HiPak 1-Modulen für 6,5 kV in Standardgröße (140 x 130) bei einem Nennstrom von 600 A erzielt → 4.

Ein herkömmliches IGBT-/Diodensubstrat ist normalerweise mit vier IGBTs und zwei

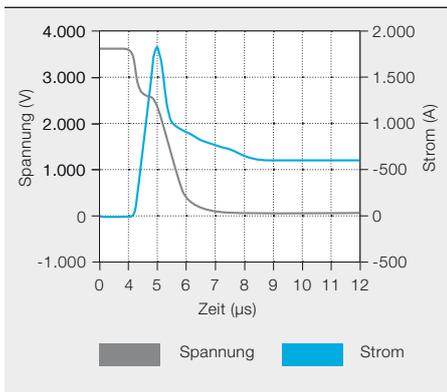
7 Sperrverzögerungskennlinien des BIGT HiPak 1 für 6,5 kV/600 A im Diodenmodus



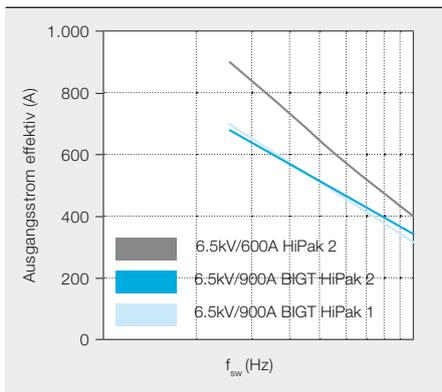
9 Stoßstromfestigkeit des 6,5-kV-BIGT-Substrats im Diodenmodus



8 Einschaltkennlinien des BIGT HiPak 1 für 6,5 kV/600 A im IGBT-Modus



10 Ausgangsstrom der 6,5-kV-HiPak 1- und HiPak 2-Module im Wechselrichtermodus



Dioden besetzt. Das neue Substrat kann sechs BIGT-Chips aufnehmen, die alle im IGBT- oder Diodenmodus betrieben werden können. Der Vorteil der BIGT-Technologie zeigt sich deutlich beim HiPak 1-Modul, das vier BIGT-Substrate für insgesamt 24 BIGT-Chips enthält. Damit ist es praktisch in der Lage, das größere IGBT-HiPak 2-Modul (140 × 190) zu ersetzen, das normalerweise sechs Substrate mit insgesamt 24 IGBTs und 12 Dioden enthält. Das größere Standard-IGBT-Modul hat zudem den Nachteil einer weitaus kleineren Diodenfläche, was normalerweise mit Einschränkungen für den Gleichrichterbetrieb und die Stoßstromfestigkeit verbunden ist. Auf der anderen Seite ist auch ein größeres HiPak 2-BIGT-Modul mit insgesamt 36 BIGT-Chips für potenzielle Nennströme von bis zu 900 A möglich.

Die BIGT-HiPak 1-Module wurden unter statischen und dynamischen Bedingungen ähnlich denen, wie sie bei aktuellen IGBT-Modulen verwendet werden, getestet. Die Durchlasskennlinien des BIGT im IGBT- und im Diodenmodus sind in → 5 dargestellt. Bei einem Nennstrom von

600 A zeigt sich für beide Betriebsarten bei 125 °C eine Durchlassspannung von ca. 4,2 V. Außerdem zeigen die Kurven einen starken positiven Temperaturkoeffizienten selbst bei sehr niedrigen Strömen und in beiden Betriebsarten, was eine sichere Parallelschaltung der Chips unterstützt. Dies ist auf den optimalen Emitter-Injektionswirkungsgrad und die in der BIGT-Struktur verwendete Lebensdauer-einstellung zurückzuführen.

Für dynamische Messungen unter Nennbedingungen wurde die Spannung des Gleichspannungs-Zwischenkreises auf 3.600 V festgelegt und für die SOA-Charakterisierung auf 4.500 V erhöht. Alle Messungen wurden bei 125 °C mit einem festen Gate-Widerstand von 2,2 Ω, einer Gate-Emitter-Kapazität von 220 nF und einer Streuinduktivität von 300 nH durchgeführt. → 6 und → 7 zeigen die Abschaltkennlinien für IGBT und Diode auf Modulebene unter Nenn- bzw. SOA-Bedingungen. BIGT-Abschaltkennlinien weisen stets ein weiches Verhalten auf als standardmäßige IGBT-/Diodenmodule. Außerdem zeigt der BIGT unter allen Bedingungen keinerlei Oszillationen oder ruckartiges

Verhalten. In → 8 ist das Einschaltverhalten des BIGT unter Nennbedingungen dargestellt. Die Gesamtschaltverluste von IGBT und Diode lagen beim getesteten Modul im Bereich von 10 Joule, was in etwa dem gemessenen Wert für das aktuelle HiPak 2-IGBT-Modul für 6,5 kV/600 A entspricht.

→ 9 zeigt die letzte Messung der BIGT-Stoßstromfestigkeit im Diodenmodus für ein Substrat (mit einem Nennstrom von 150 A) bis 3.000 A. Hier wird deutlich, dass das BIGT-HiPak 1 die hervorragende Stoßstromfestigkeit eines entsprechenden HiPak 2-IGBT-/Diodenmoduls aufweist, wobei das BIGT-HiPak 2-Modul noch deutlich darüber hinausgeht. Abschließend wurden die BIGT-Module und -Chips erfolgreich den üblichen Prüfungen zur Verifizierung der Zuverlässigkeit und zum Frequenzverhalten unterzogen.

Angesichts dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass das BIGT-Modul nicht nur aktuelle IGBT-/Diodenmodule unter weich- und hart schaltenden Bedingungen leistungsmäßig übertrifft, sondern auch die strengen Anforderungen erfüllt, die heute an die Robustheit von leistungselektronischen Komponenten gestellt werden. → 10 zeigt den simulierten Ausgangsstrom im Wechselrichtermodus für die 6,5 kV BIGT-HiPak 1- und -HiPak 2-Module im Vergleich zum heutigen HiPak 2-IGBT-Modul bei 125 °C. Aufgrund der großen verfügbaren Diodenfläche im BIGT-Modul wäre der Ausgangsstrom im Gleichrichtermodus sogar noch höher. Dies macht die BIGT-Technologie zum Wegbereiter für zukünftige Systemdesigns mit höheren Leistungsdichten und einem herausragenden Gesamtleistungsvermögen ohne diodenbedingte Einschränkungen.

Munaf Rahimo

Liutauras Storasta

Chiara Corvasce

Arnost Kopta

ABB Semiconductors

Lenzburg, Schweiz

munaf.rahimo@ch.abb.com

liutauras.storasta@ch.abb.com

chiara.corvasce@ch.abb.com

arnost.kopta@ch.abb.com

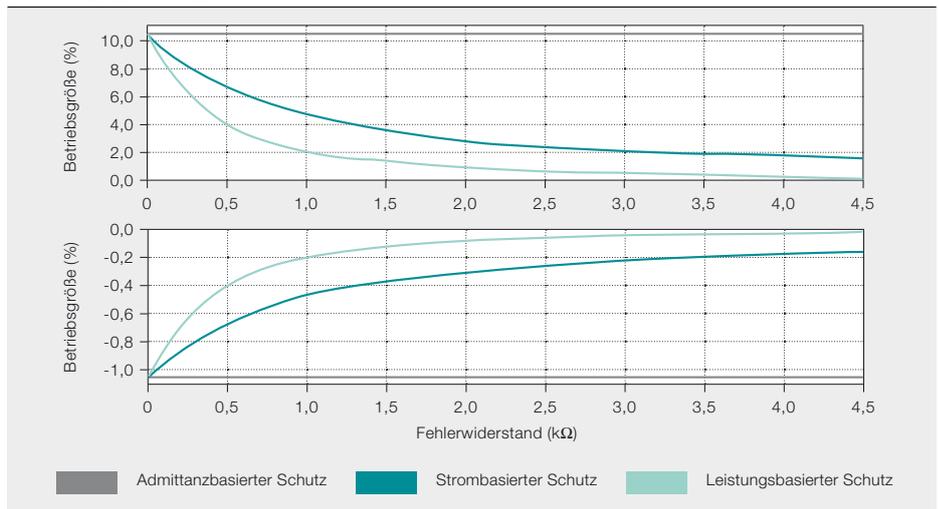


Elegante Lösung

Die ultimative Erdschluss-Schutzfunktion für kompensierte Netze

ARI WAHLROOS, JANNE ALTONEN, PRZEMYSŁAW BALCEREK, MAREK FULCZYK – Ein kompensiertes Netz ist ein Netz, in dem der Sternpunkt über eine Kompensationsspule geerdet ist. Eine solche Erdung reduziert die vom Netz verursachten kapazitiven Erdschlussströme an der Fehlerstelle auf nahezu null und erleichtert die Bedingungen für eine Selbstlöschung von Erdschlüssen, ohne dass Leistungsschalter ausgelöst und Ausfälle beim Kunden riskiert werden müssen. Aus diesem Grund werden immer mehr Mittelspannungsnetze zu kompensierten Netzen umgerüstet. Doch die niedrigen Fehlerströme in kompensierten Netzen stellen eine Herausforderung für traditionelle Erdschluss-Schutzprinzipien dar. Ein alternatives Verfahren auf der Basis einer Nulladmittanzmessung wurde in den 1980er Jahren in Polen entwickelt. Dieses einfache, aber intelligente Prinzip bietet viele Vorteile gegenüber traditionellen Methoden und kann auf ungeerdete und kompensierte Netze aller Art, einschließlich Abzweige mit dezentraler Kompensation, angewandt werden. Eine admittanzbasierte Erdschluss-Schutzfunktionalität ist nun in den ABB Relion®-Produkten REF615 und REF630 verfügbar.

1 Betriebsgröße verschiedener Erdschluss-Schutzprinzipien als Prozentsatz des Nennwertes von Y_0 , I_0 bzw. S_0 gegenüber dem Fehlerwiderstand



Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckte Waldemar Petersen, dass sich der von einem Stromnetz erzeugte kapazitive Erdschlussstrom durch Anschluss einer Induktivität am Sternpunkt des Haupttransformators auf nahezu null reduzieren lässt, wodurch sich die meisten Fehlerlichtbögen gegen Erde selbst löschen. Heute werden diese Induktivitäten als Petersen-Spulen, Kompensationsspulen oder Erdschlusslöschspulen bezeichnet.

Vorübergehende Erdschlüsse sind die Ursache für die meisten Stromausfälle. Durch den Einsatz von Kompensationsspulen kann die Ausfallhäufigkeit erheblich reduziert und somit eine zuverlässigere und höhere Versorgungsqualität gewährleistet werden. Mit einer solchen Kompensation kann ein Netz auch bei dauerhaften Erdschlüssen weiterbetrieben werden, vorausgesetzt die vorgeschriebenen Bedingungen hinsichtlich gefährlicher Spannungen werden erfüllt. Aus diesem Grund erfreut sich der Einsatz von Kompensationsspulen in Mittelspannungs-(MS-)Verteilnetzen weltweit großer Beliebtheit.

Herausforderungen in kompensierten Netzen

Trotz der Vorteile einer solchen Kompensation für den Netzbetrieb gestaltet sich

der Erdschlussschutz aufgrund der extrem niedrigen Fehlerströme durch den Kompensationseffekt der Petersen-Spule komplizierter. Häufig betragen diese Ströme nur einen Bruchteil des normalen Laststroms, d.h. sie sind zu niedrig, um herkömmliche Überstromrelais auszulösen.

Vorübergehende Erdschlüsse sind die Ursache für die meisten Stromausfälle. Mithilfe von Kompensationsspulen können diese erheblich reduziert werden.

Traditionell basiert der Erdschlussschutz in kompensierten Netzen auf dem Wirkanteil des Nullstroms (z. B. $I_0 \cos \Phi$ -Prinzip) oder der Nulleistung (wattmetrisches Prinzip). Ein alternatives Prinzip auf der Basis der gemessenen Nulladmittanz wurde Anfang der 1980er Jahre in Polen entwickelt, wo es mittlerweile zu den funktionellen Anforderungen an lokale Energieversorger gehört.

Admittanzbasierter Schutz

Wie andere Erdschluss-Schutzkonzepte basiert auch der Nulladmittanzschutz auf

den Grundschwingungsanteilen des Nullstroms (I_0) und der Nullspannung (\underline{U}_0). Doch statt den Nullstrom oder die Nulleistung ($S_0 = \underline{U}_0 = I_0$) als Betriebsgrößen zu nutzen, basiert der Schutz auf einer Überwachung der Nulladmittanz Y_0 . Diese ist definiert als der Quotient aus den Phasoren des Nullstroms und der Nullspannung:

$$Y_0 = \frac{I_0}{\underline{U}_0} = G + j \cdot B,$$

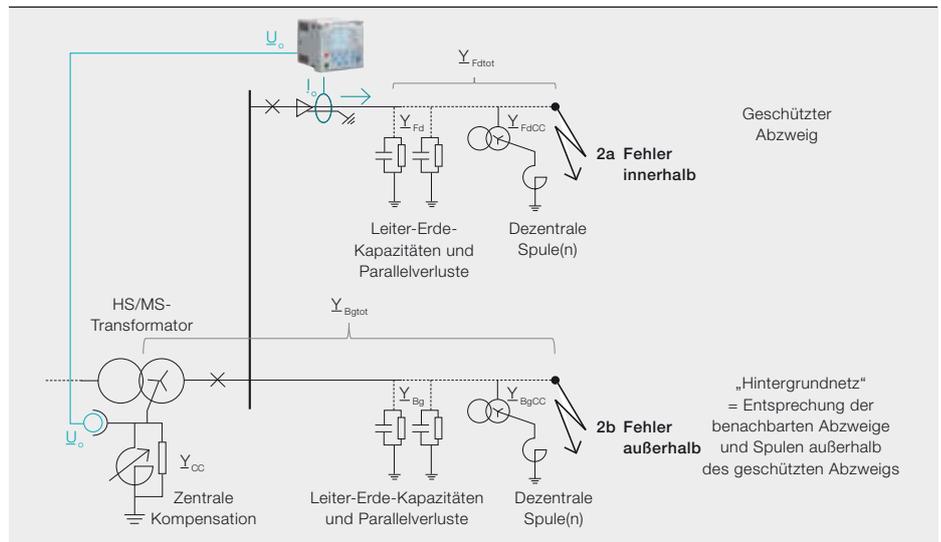
wobei G der Wirkleitwert (Konduktanz) und B der Blindleitwert (Suszeptanz) ist. Die gemessene Admittanz steht in direktem Zusammenhang mit bekannten Systemparametern, d.h. den Parallelwiderständen, -kapazitäten und -induktivitäten des Netzes. Der ohmsche Teil der Nulladmittanz, d.h. die Konduktanz G, entspricht den Parallelwiderständen und -verlusten des Systems, und der Imaginärteil, d.h. die Suszeptanz B, entspricht den Parallelkapazitäten und -induktivitäten des Systems. Da diese Werte die Grundlage für die Erdschluss-Schutzanalyse des Netzes bilden, stehen sie stets zur Verfügung und werden typischerweise im Verteilungsmanagementsystem (DMS) gespeichert.

Der Hauptvorteil einer Überwachung des Verhältnisses von I_0 und \underline{U}_0 , d.h. der Null-

Titelbild

Kompensierte Netze verbessern die Zuverlässigkeit der Stromversorgung, erschweren aber die Implementierung eines Erdschlussschutzes. Wie kann ein in den 1980er Jahren in Polen entwickeltes Verfahren helfen?

2 Vereinfachte einphasige Ersatzschaltung eines kompensierten Netzes mit einem Erdschluss im geschützten Abzweig (2a) bzw. im Hintergrundnetz (2b)



admittanz, besteht darin, dass dieses Verhältnis idealerweise bei veränderlichem Fehlerwiderstand konstant bleibt, da sowohl I_0 als auch U_0 mit steigendem Fehlerwiderstand sinken [1]. Dies steht im Gegensatz zum traditionellen Erdschlusschutz, bei dem der Betrag der Betriebsgröße, basierend auf dem Nullstrom oder der Nulleistung, durch den Fehlerwiderstand deutlich reduziert wird. Dieses

der Kompensationsspulen im geschützten Abzweig (Y_{FdCC} , wenn vorhanden). Der ohmsche Teil der gemessenen Admittanz entspricht den ohmschen Parallelverlusten des Abzweigs und den Verlusten der dezentralen Spulen im geschützten Abzweig. Der Imaginärteil ist proportional zur Summe der Leiter-Erde-Kapazitäten des Abzweigs und den Induktivitäten der dezentralen Kompensationsspulen im geschützten Abzweig → 2.

Der Hauptvorteil einer Überwachung des Verhältnisses von I_0 und U_0 , besteht darin, dass das Ergebnis bei veränderlichem Fehlerwiderstand konstant bleibt.

Bei einem Fehler innerhalb des geschützten Abzweigs, wenn der Schutz ausgelöst werden muss, ist die gemessene Admittanz gleich der gesamten Nulladmittanz des Hintergrundnetzes (Y_{Bgtot}).

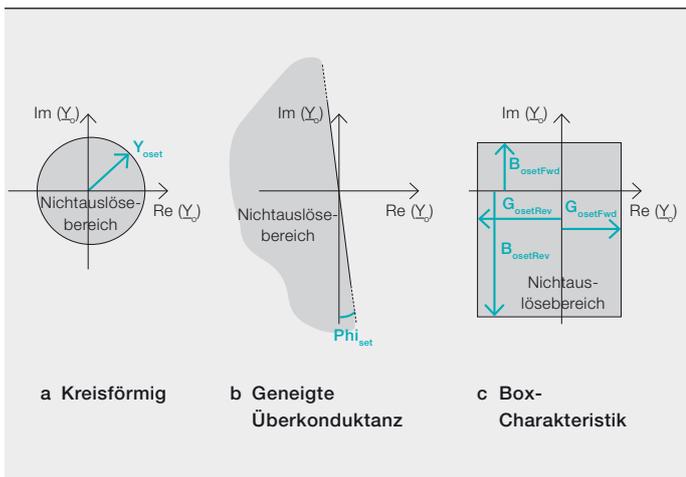
Merkmal des admittanzbasierten Prinzips erhöht die Empfindlichkeit des Erdschlusschutzes und verbessert die Unterscheidung zwischen fehlerbehafteten und nicht fehlerbehafteten Zuständen, insbesondere bei höheren Fehlerwiderstandswerten → 1.

Admittanzbasierte Schutztheorie in Kürze

Bei einem Fehler außerhalb des geschützten Abzweigs ist die gemessene Admittanz gleich dem negativen Wert der gesamten Nulladmittanz des geschützten Abzweigs ($-Y_{Fdtot}$). Diese Admittanz entspricht der Summe aus den Admittanzen der Außenleiter (Y_{Fd}) und den Admittanzen

der Außenleiter aller anderen Abzweige der Unterstation (Y_{Bg}) und den Admittanzen der Kompensationsspulen außerhalb des geschützten Abzweigs in der Unterstation (Y_{CC}) bzw. in den benachbarten Abzweigen (Y_{BgCC}). Der Realteil der gemessenen Admittanz ist immer positiv, doch das Vorzeichen des Imaginärteils, d. h. die Suszeptanz, hängt von der Abstimmung der Kompensationsspule ab. Typischerweise ist der Schutz darauf eingestellt, mit dem durch den Parallelwiderstand der Spule erzeugten, zusätzlichen ohmschen Stromanteil zu arbeiten. Bei der Admittanzmessung wird die Zunahme

3 Beispiele für Admittanzcharakteristiken mit Realteil (Re) und Imaginärteil (Im)



Der schattierte Bereich ist der Nichtauslösebereich, d. h. der Schutz wird ausgelöst, wenn die errechnete Admittanz außerhalb der Grenze(n) liegt.

des ohmschen Stroms direkt im Realteil der Admittanz, d. h. in der Konduktanz, gemessen.

Das grundlegende Funktionsprinzip des admittanzbasierten Erdschlussschutzes basiert auf der Unterscheidung zwischen den Nulladmittanzen aufgrund von inneren und äußeren Fehlern. Der Schutz arbeitet, d. h. löst den Leistungsschalter aus, wenn eine innere Fehleradmittanz gemessen wird, aber nicht, wenn eine äußere Fehleradmittanz gemessen wird. Dieser Zustand zeichnet sich durch kreisförmige oder aus einzelnen bzw. mehreren Linien bestehende Betriebsgrenzen aus. Der Schutz wird ausgelöst, wenn sich der errechnete Admittanzpunkt außerhalb dieser Linien bewegt → 3.

Das admittanzbasierte Prinzip ist auf alle Arten von Netzen mit hoher Impedanz, einschließlich Abzweigen mit dezentraler Kompensation, anwendbar.

Das admittanzbasierte Prinzip ist so flexibel, dass es auf alle Arten von geerdeten, ungeerdeten und kompensierten Netzen

mit hoher Impedanz, einschließlich Abzweigen mit dezentraler Kompensation, anwendbar ist. Letztere werden immer häufiger eingesetzt, wenn wetterempfindliche Freileitungen durch Erdkabel ersetzt werden. Diese Kabel vervielfachen den durch die Abzweige erzeugten Erdschlussstrom, weshalb typischerweise eine lokale Kompensation in Form von dezentralen Spulen erforderlich ist. Die dezentralen Spulen können für herkömmliche Erdschluss-Schutzkonzepte problematisch sein, da sich ihre Eigenschaften nicht ohne Weiteres anpassen lassen, wenn z. B. die Konfiguration des Abzweigs deutlich verändert wird.

Die Flexibilität des Prinzips bietet auch einen verbesserten Schutz bei wiederzündenden Erdschlüssen, da der Spielraum bis zu einem falschen Auslösen größer ist [2].

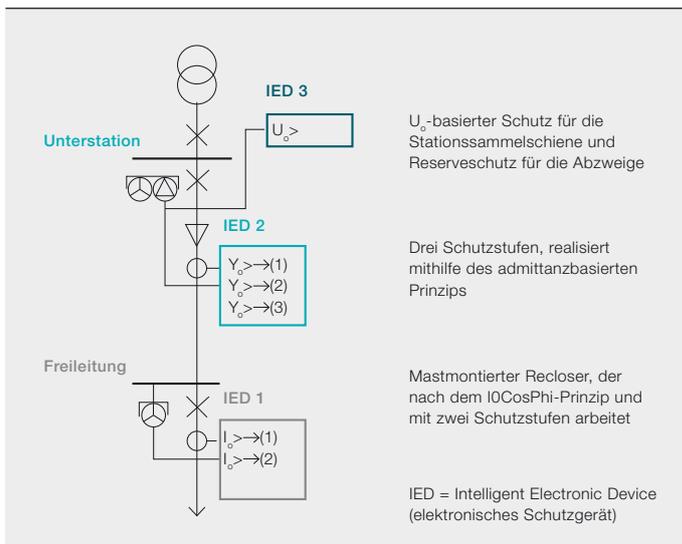
Vollständige Kompatibilität

Wie beim traditionellen Erdschlussschutz verwendet auch das admittanzbasierte Prinzip den Zustand der Nullüberspannung als allgemeines Ausgangskriterium zur Bestimmung der Grundschutzempfindlichkeit. Dies ermöglicht ein Vermischen mit traditionellen Prinzipien, was besonders praktisch ist, wenn im Verteilbereich einer Unterstation mehrere Schutzverfahren verwendet werden → 4.

Weitere Verbesserung des Prinzips

Traditionell basiert der Erdschlussschutz auf den Phasoren des Nullstroms und der Nullspannung, die errechnet werden, sobald der Erdschluss erkannt wird. Dort,

4 Beispiel für einen MS-Abzweigschutz mit admittanzbasierter und herkömmlicher Erdschluss-Schutzfunktionalität



Mit dem admittanzbasierten Prinzip kann die Auswirkung der Netzasymmetrie von den Messergebnissen beseitigt werden.

Aus dem Blickwinkel des Schutzes kann das Problem der Oberschwingungen in einen Vorteil umgemünzt werden.

wo das Netz hauptsächlich aus Freileitungen besteht, kann aufgrund nicht gekreuzter Außenleiter eine hohe „gesunde“ Nullspannung im Netz vorhanden sein. Eine solche Asymmetrie des Netzes beeinflusst die Betriebsgrößen, sodass das Berechnungsergebnis z. B. von der fehlerbehafteten Phase abhängt. Die Abhängigkeit steigt mit dem Fehlerwiderstand und kann sich negativ auf die Empfindlichkeit des Erdschlussschutzes auswirken. Mit dem admittanzbasierten Prinzip kann die Auswirkung der Netzasymmetrie von den Messergebnissen beseitigt werden. Dies wird mithilfe sogenannter Delta-Größen erreicht. Dabei werden die Werte der Phasoren des Nullstroms und der Nullspannung vor dem Fehler von den während des Fehlers gemessenen Werten subtrahiert, bevor die Nulladmittanz berechnet wird. Die entsprechenden Algorithmen lassen sich leicht in moderne elektronische Schutzgeräte (IEDs) implementieren.

Vom Problem zur Chance

Aufgrund der zunehmenden Zahl von Oberschwingungen erzeugenden Verbrauchern und verschiedenen nichtlinearen Elementen treten in MS-Netzen vermehrt Oberschwingungen höherer Ordnung auf. Infolgedessen enthält auch der Fehlerstrom bei einem einphasigen Erdschluss deutlich mehr Oberschwingungen.

Da die Kompensationsspule nur den Grundschwingungsanteil des kapazitiven Erdschlussstroms kompensiert, bleiben die anderen Schwingungsanteile erhalten. Traditionell gelten diese Anteile als Störungen, die herausgefiltert werden müssen. Beim admittanzbasierten Erdschlussschutz können diese Oberschwingungen jedoch genutzt werden, um die Unterscheidung zwischen fehlerbehafteten und nicht fehlerbehafteten Zuständen zu verbessern [3]. In modernen IEDs können die Oberschwingungsadmittanzen leicht berechnet und im Phasor-Format zur Grundschwingungsadmittanz hinzugefügt werden, was die Differenzierung zwischen fehlerbehafteten und nicht fehlerbehafteten Zuständen erleichtert.

Jahrelange positive Erfahrungen

Seit seiner Erfindung hat sich das admittanzbasierte Erdschluss-Schutzprinzip von Polen in andere europäische Länder verbreitet. Es ist auf einen standardmäßigen, gerichteten Erdschlussschutz eben-

so anwendbar wie auf die Erkennung von Hochimpedanz- und intermittierenden Erdschlüssen. Jüngste Fortschritte auf diesem Gebiet wurden von ABB in Zusammenarbeit mit finnischen Stromversorgern erzielt. Umfangreiche Feldversuche lassen darauf schließen, dass das Verfahren in seiner Empfindlichkeit traditionellen Erdschluss-Schutzverfahren tatsächlich überlegen ist. Mit den richtigen Einstellungen und genauen Messungen können Erdschlüsse mit Fehlerwiderständen von bis 10 k Ω erkannt werden [2].

Im Vergleich zu traditionellen Methoden bietet der admittanzbasierte Schutz mehrere interessante Eigenschaften wie eine verbesserte Empfindlichkeit und Sicherheit bei dauerhaften und wiederzündenden Erdschlüssen. Außerdem ist er universell anwendbar, auch in Netzen mit dezentraler Kompensation. Dies macht das Verfahren zu einer sicheren Wahl für zukünftige Smart-Grid-Anwendungen. Und zu guter Letzt können die Schutzeinstellungen leicht von den grundlegenden Systemdaten abgeleitet werden, was eine einfache und praktische Optimierung der Betriebscharakteristik ermöglicht.

Ari Wahlroos

Janne Altonen

Marek Fulczyk

ABB Medium Voltage Products

Vaasa, Finnland

ari.wahlroos@fi.abb.com

janne.altonen@fi.abb.com

marek.fulczyk@fi.abb.com

Przemyslaw Balcerek

ABB Corporate Research

Krakau, Polen

przemyslaw.balcerek@pl.abb.com

Literaturhinweise

- [1] Wahlroos, A., Altonen, J.: „Performance of novel neutral admittance criterion in MV-feeder earth-fault protection“. CIRED. Prag, 2009
- [2] Wahlroos, A., Altonen, J.: „Practical application and performance of novel admittance-based earth-fault protection in compensated MV-networks“. CIRED. Frankfurt, 2011
- [3] Wahlroos, A., Altonen, J.: „Compensated networks and admittance-based earth-fault protection“. Seminar Methods and Techniques for Earth Fault Detection, Indication and Location. Espoo, Finnland, 2011



Sauberer Kontakt

Schütztechnik zum Schalten hoher Leistungen und zur Steuerung von Motoren

GUNNAR JOHANSSON – Elektrische Schütze sind fast so alt wie die Elektrotechnik selbst. Niemand weiß dies besser als ABB, denn schließlich ist das Unternehmen seit über 100 Jahren als Hersteller von Niederspannungsgeräten bekannt. Innovationen und neue Technologien sorgen für frischen Wind in diesem Bereich und beseitigen viele der Probleme, mit denen diese „Arbeitspferde“ der elektrischen Schalttechnik traditionell zu kämpfen hatten. Einer der Wegbereiter ist die neue Generation der AF-Schütze von ABB.



Die neuen Schütze von ABB nutzen Software und Elektronik in Kombination mit einem speziellen Magneten, um schnell eine hohe Kontaktkraft aufzubauen.

Ein Schütz ist ein elektrisch gesteuertes Schaltgerät, das ähnlich wie ein Relais funktioniert – nur für höhere Ströme. Anders als ein Leistungsschalter kann ein Schütz zwar keine Kurzschlussströme abschalten, aber dafür viele andere Aufgaben übernehmen. Traditionell werden Schütze zum Ein- und Ausschalten elektrischer Maschinen verwendet. Die gebräuchlichste Art ist das dreipolige Schütz, das zum Einschalten, Leiten und Ausschalten von Strömen in einem Drehstromnetz eingesetzt wird.

Das Herzstück eines Schützes ist ein Kontaktsystem, das mit dem Hauptstromkreis verbunden ist. Neben diesem Kontaktsystem befindet sich eine Schaltkammer, die verschiedene Einrichtungen zur Optimierung der Abschaltleistung enthält. Die beweglichen Kontakte werden über eine Kontaktbrücke mit Federn betätigt, die in geschlossener Stellung für die entsprechende Kontaktkraft sorgen. Die Bewegung erfolgt durch einen von einer Spule umschlossenen Elektromagneten → 1.

Titelbild

Seit Einführung der Elektrotechnik in der Industrie spielen Schütze eine wichtige Rolle. Dank neuer Ideen können nun traditionelle Nachteile überwunden und der Weg für eine neue Generation von Schützen geebnet werden.

Einfaches Produktkonzept

Im Gegensatz zu Produkten anderer Hersteller ist bei großen Schützen von ABB der Hauptstromkreis hinten angeordnet. Diese vor etwa 10 Jahren eingeführte Konfiguration hat sich in der Praxis bewährt, da sie die Kombination mit anderen Schaltgeräten (vorrangig Leistungsschaltern) erleichtert und der Zugang zum Gerät nicht durch die dicken und recht steifen Kabel des Hauptstromkreises versperrt wird → 2.

Mittlerweile sind die Kosten für elektronische Bauteile so weit gesunken, dass elektronisch gesteuerte Schütze preislich mit herkömmlichen Schützen vergleichbar sind. Auch sind die Montagekosten gering, da das Elektronikmodul einfach in das Schütz eingerastet wird.

Weniger Rohstoffe

Beim Ein- oder Ausschalten von hohen Strömen entstehen in Schützen Lichtbögen, die zur Abtragung des Kontaktmaterials führen. Dieser Abbrand (Erosion) bestimmt die Lebensdauer des Geräts. Normalerweise bestehen die Kontakte zum größten Teil aus einer hochwertigen Silberlegierung. Da Silber recht teuer ist, können die Kontakte zur Verlängerung ihrer Lebensdauer nicht beliebig vergrößert werden. Aus diesem Grund hat ABB viel Forschungsarbeit investiert, um andere Möglichkeiten zur Verlängerung der Kontaktlebensdauer zu finden.

Dabei haben sich mehrere Ansätze herauskristallisiert:

- Verbesserung der Kontaktbewegungen durch Einsatz eines elektronischen Steuerkreises



2a Älteres Schütz mit Hauptstromkreis vorn



2b Neues Schütz mit Hauptstromkreis hinten

Die Kosten für diese elektronisch gesteuerten Schütze sind mit denen für herkömmliche Geräte vergleichbar.

- Einsatz von Softwarelösungen zur Reduzierung des Kontaktverschleißes
- Entwicklung neuer Magneten für höhere Kontaktkräfte
- Einführung neuer Schaltkammern zur besseren Beseitigung und Löschung von Lichtbögen
- Abstimmung der Herstellung und Zusammensetzung des Kontaktmaterials auf eine hohe Langlebigkeit

Schließende Kontakte

Beim Schließen von Schaltern kommt es manchmal zu einem leichten, kurzen Prellen, bevor die Kontakte in der geschlossenen Stellung zur Ruhe kommen. Dieses sogenannte Kontaktprellen führt zur Bildung kleiner, erosiver Lichtbögen. Da die Stromstärke zu diesem Zeitpunkt niedrig ist, stellt das Kontaktprellen kein großes Problem dar. Viel bedeutender ist das Phänomen des Kontaktabhebens.

Dieses leichte Abheben der Kontakte tritt ein wenig später auf, wenn ein hoher Strom fließt → 3. Die Kontakte befinden sich dann normalerweise in der richtigen Position, können aber durch bestimmte Faktoren wie den hohen Schaltstrom wieder voneinander getrennt werden, was Lichtbögen verursacht. Da nun hohe Ströme fließen, ist der Abbrand entsprechend stark → 4. Außerdem können Schwingungen, die durch den sich schließenden Magneten verursacht werden, mit den Trennkräften in Wechselwirkung treten und zum Abheben der Kontakte führen. Daher müssen die Kontakte fest geschlossen gehalten werden, um möglichen Trennkräften entgegenzuwirken.

Hierzu nutzen die neuen Schütze von ABB eine Software und eine elektronische Schaltung in Kombination mit einem speziellen Magneten, um schnell eine hohe Kontaktkraft aufzubauen. Die Schaltung sorgt außerdem für eine kontrollierte Bewegung, die Schwingungen minimiert. Dadurch wird das Kontaktabheben verringert und der Abbrand beim Schließen entsprechend minimiert.

Öffnende Kontakte

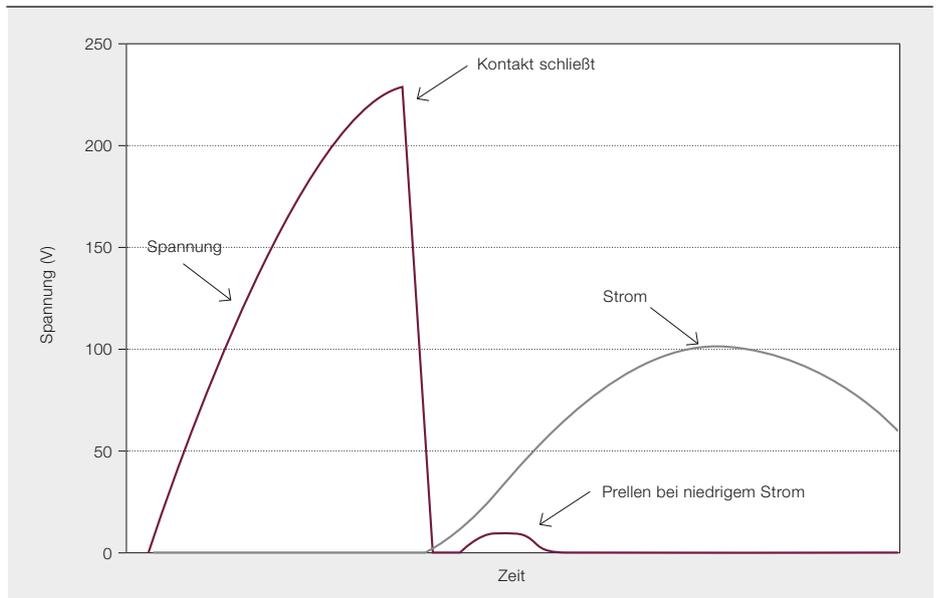
Beim Abschalten hoher Ströme (über 100 A) muss der entstehende Lichtbogen schnell vom silbernen Kontaktmaterial entfernt werden, um den Abbrand zu begrenzen. Gleichzeitig muss der Abbrand möglichst gleichmäßig auf die einzelnen Phasen verteilt werden.

Das Entfernen des Lichtbogens von den Kontakten erfolgt mithilfe herkömmlicher Technik: Der Kontakt ist von einer Stahlplatte umschlossen, die den Lichtbogen abzieht. Solche Konstruktionen werden heute sorgfältig berechnet und mithilfe von Simulationstools optimiert. Dabei wurden mittlerweile einige alte „Wahrheiten“ in Frage gestellt und widerlegt, während andere erst jetzt in vollem Umfang genutzt werden.

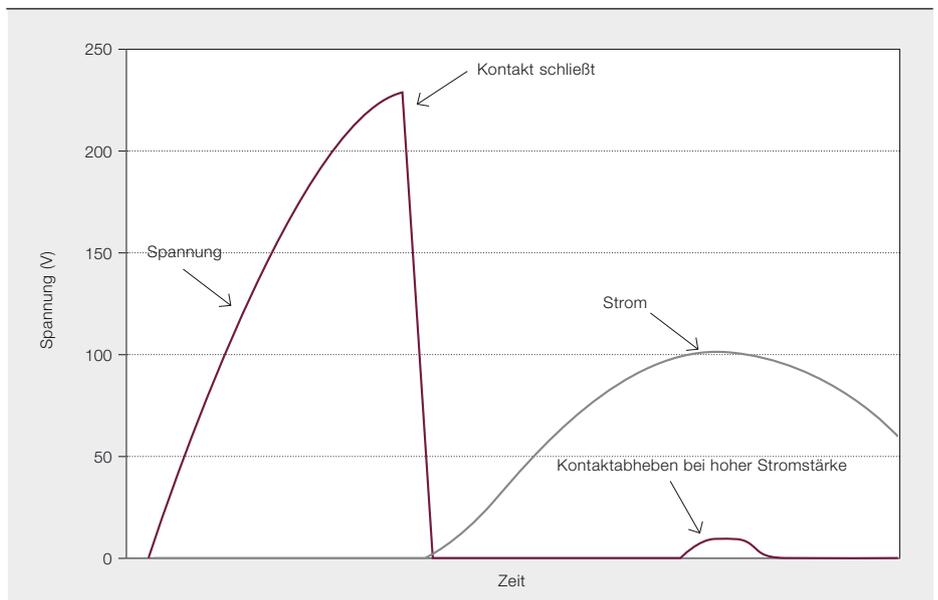
Leider kann es durch den Steuerkreis in Verbindung mit der Spule und dem Magneten zu einer ungleichmäßigen Belastung der einzelnen Phasen im Schütz kommen. Der Grund dafür ist, dass die Spannung am Steuerkreis häufig in Relation zum Hauptstromkreis steht und so ein gewisses Maß an Synchronisation zwischen dem Schaltmoment und der

Ein gutes Kontaktmaterial stellt ein Gemisch aus Silber und Zinnoxid mit Dotierungsstoffen dar.

3 Kontaktprellen und Kontaktabheben



3a Kontaktprellen tritt typischerweise bei niedrigen Strömen auf und ist unproblematisch.



3b Kontaktabheben tritt bei hohen Strömen auf und kann zu starker Erosion führen.

Spannungsphase auftreten kann. Durch diese ungleichmäßige Verteilung der Last an den Phasen verschleißt die am meisten belastete Phase am schnellsten und bestimmt so die Lebensdauer des gesamten Geräts. Folglich ist es besser, die Last gleichmäßig zwischen den Phasen zu verteilen und den Kontaktabbrand auszugleichen. Genau dies machen die Software und die Elektronik von ABB, indem sie eine Synchronisation ausschließen. Dieses zum Patent angemeldete Verfahren führt zu einer erheblichen Verbesserung der Langlebigkeit.

Kontaktmaterial

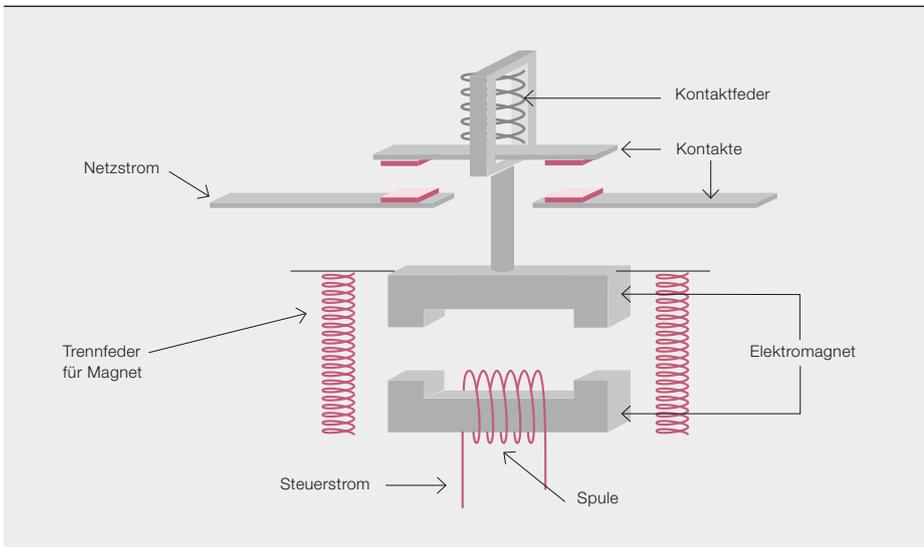
Das verwendete Kontaktmaterial und dessen Herstellungsverfahren haben einen großen Einfluss auf den Abbrand. Früher leisteten Legierungen aus Silber und Cadmium sehr gute Dienste, doch die Verwendung von Cadmium ist schon lange nicht mehr zulässig. Kontakte aus reinem Silber wären hervorragend geeignet, wenn sie sich nicht miteinander verschweißen und schnell erodieren würden. Ein gutes Kontaktmaterial stellt hingegen ein Gemisch aus Silber und Zinnoxid mit Dotierungsstoffen dar. Aufgrund der entscheidenden Bedeutung dieses Materials verwendet ABB zur Herstellung eine äußerst sorgfältig formulierte Mischung und die fortschrittlichsten Prozesse.

4 Kontaktabheben beim Einschalten (Standbild aus einem Film). Der Lichtbogen trägt Kontaktmaterial ab.



Die Schaltung sorgt für eine kontrollierte Bewegung, die Schwingungen minimiert.

5 Herkömmlicher und bewährter Steuerkreis



Zuverlässigkeit

Die wichtigste Eigenschaft eines Schützes ist für Kunden die Zuverlässigkeit. Aus diesem Grund betreibt ABB einen hohen Entwicklungs- und Testaufwand zur Realisierung von Schützen, die den höchsten Anforderungen an die Zuverlässigkeit entsprechen. Hierbei ist die Qualität des Steuerkreises von entscheidender Bedeutung.

Der Steuerkreis

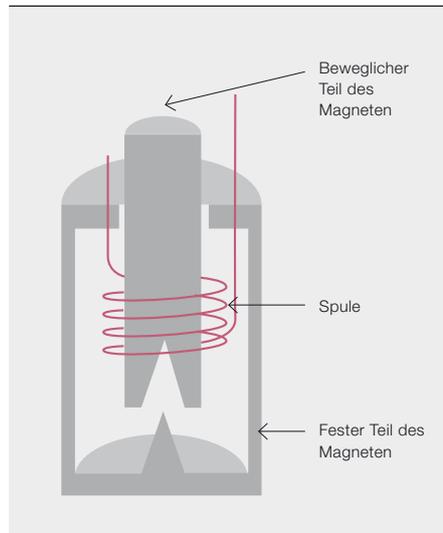
Der Steuerkreis eines Schützes basiert auf einem geteilten Elektromagneten mit einem Federsystem. Fließt ein Strom durch die Magnetspule, ziehen sich die beiden Magnethälften an. Dadurch werden die mit dem Magneten verbundenen Kontakte geschlossen und die Kontaktkraft aufgebracht. Fließt kein Strom, werden die Magnethälften durch die Kraft der Federn getrennt und die Kontakte geöffnet, sodass der Hauptstrom unterbrochen wird → 5. Dieses Grundprinzip wird seit über 100 Jahren verwendet, und bislang wurde keine bessere Alternative gefunden. ABB und ihre Mitbewerber nutzen diese einfache, bewährte und zuverlässige Lösung zum Einschalten, Leiten und Ausschalten starker Ströme.

Allerdings hat dieses Verfahren auch Schwächen:

- Anfälligkeit für Spannungsschwankungen: Schwankungen in der Versorgungsspannung verursachen Veränderungen im Spulenstrom, die sich exponentiell auf die Magnetkraft auswirken. In ungünstigen Fällen kann dies zum plötzlichen Öffnen und Schließen des Kontakts und damit zum Ausfall des Geräts führen.
- Die meisten Benutzer bevorzugen eine Wechselspannung als Steuerspannung, z. B. 230 V bei 50 Hz. Dies erfordert einen großen und komplizierten Magneten, um die Kraft beim Nulldurchgang der Steuerspannung aufrechtzuerhalten.
- Der Steuerkreis besitzt eine hohe Leistungsaufnahme, besonders wenn eine Wechselspannung verwendet wird.
- Die Toleranzanforderungen an die Oberfläche der Magnetpole sind extrem hoch. Bei intensiver Nutzung können sich die Abmessungen verändern, was zu einer Abnahme der Magnetkraft führt.

Die Software und Elektronik von ABB sorgen für eine gleichmäßige Verteilung der Last zwischen den Phasen und einen ausgeglichenen Kontaktabbbrand.

6 Zylindrischer Magnet



Diesen Problemen wird nun mit moderner Technik und innovativen Designs begegnet.

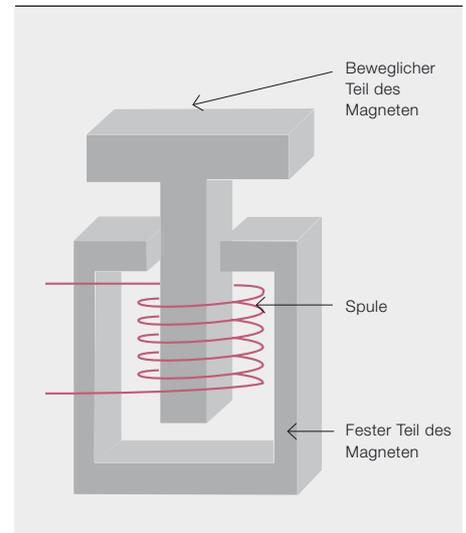
Neu im Steuerkreis

Die neuen AF-Schütze von ABB verfügen über eine mikroprozessorgesteuerte Schaltung mit patentierten Algorithmen, die unabhängig von Spannungsschwankungen stets für einen korrekten Spulenstrom sorgen. So werden sowohl der magnetische Fluss als auch die Kontaktkräfte optimiert. Außerdem wandelt die Schaltung Wechselspannung in Gleichspannung um. Dies senkt die Leistungsanforderungen, bewirkt eine gleichmäßigere Magnetkraft und beseitigt das Problem des Nulldurchgangs. Außerdem kann so ein kleinerer, einfacherer und zuverlässigerer Magnet verwendet werden, und mechanischer und elektrischer Verschleiß werden minimiert.

Da es keine Nulldurchgänge mehr gibt und der Spulenstrom geregelt wird, können alte und bewährte Magnetbauweisen, die sonst mit erheblichen Einschränkungen verbunden wären, zu neuem Leben erweckt und in vollem Umfang genutzt werden.

In den kleinsten AF-Schützen kommt ein zylindrischer Magnet mit einem beweglichen Kolben in Verbindung mit konischen Polen zum Einsatz → 6. Diese Anordnung ist sehr kompakt und energiesparend. Dank ihrer hohen Effizienz und geringen Leistungsaufnahme können die Schütze mit einer schwachen Stromversorgung, z.B. von einem Transistorausgang, betrieben werden. Die größeren AF-Schütze

7 Magnet mit T-förmigem beweglichem Teil



sind mit einem Magneten mit T-förmigen beweglichen bzw. U-förmigen festen Teilen → 7 ausgestattet. Auch diese Lösung ist äußerst platz- und energiesparend. Bei beiden Magnettypen wird die Spule nur mit Gleichstrom betrieben.

Die Konstruktion von Schützen hat sich trotz ihrer 100-jährigen Geschichte dank neuer Technik und innovativem Denken zu einem neuen, lebhaften Feld der Produktentwicklung gemauert. Weitere Verbesserungen zur Vereinfachung des Designs, Erhöhung der Zuverlässigkeit, Verbesserung der Logistik und Optimierung der Wartung von Schützen – dem Urgestein der elektrischen Schalttechnik – sind in vollem Gange.

Gunnar Johansson

ABB Low Voltage Products

Västerås, Schweden

gunnar.c.johansson@se.abb.com



Alle Wetter!

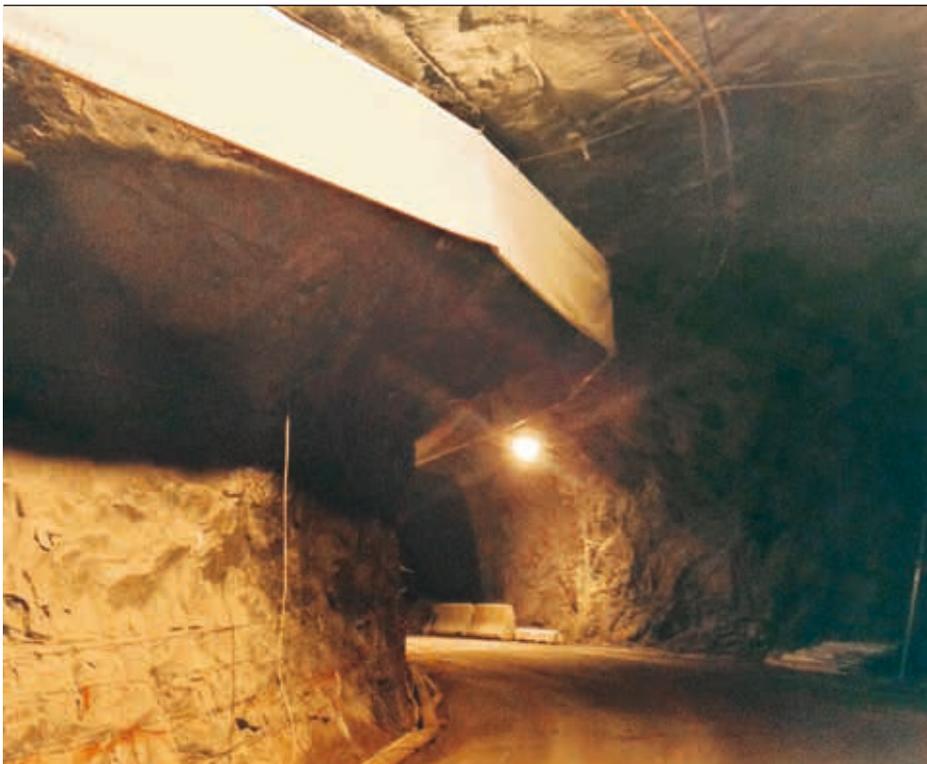
Optimierung von Wetterströmen in Untertagebergwerken

MICHAEL LUNDH, JAN NYQVIST, MATS MOLANDER – Von August bis Oktober 2010 hielt die Welt den Atem an, als 33 chilenische Bergleute in 700 m Tiefe unter der Atacamawüste eingeschlossen waren. Viele Gedanken kreisten in dieser Zeit um die fragilen Lebensgrundlagen: Umgebungstemperatur, Nahrung, Wasser und Luft. Mit steigenden Rohstoffpreisen wird auch der Abbau bisher „unerreichbarer“ Ressourcen wirtschaftlich rentabel. Doch lohnende Marktpreise und Investitionsgrenzen allein reichen nicht aus, um die physikali-

schen und technischen Herausforderungen zu bewältigen, die mit der Nutzung dieser entlegenen Ressourcen verbunden sind. Es bleiben physikalische Grenzen, die bestimmen, was auf angemessene und vor allem sichere Weise erreicht werden kann. Doch die Entwicklung neuer Technologien ermöglicht es dem Menschen, diese Grenzen neu zu definieren. So werden immer neue Grenzen erreicht. Aber das ist nur möglich, wenn sichergestellt ist, dass die lebensunterstützenden Systeme Schritt halten.

Die Belüftung benötigt viel Energie, typischerweise um die 100 GWh/Jahr, was bis zu 50 % des Gesamtenergieverbrauchs eines Bergwerks ausmachen kann.

1 Wetterkanal (Wetterlutte) in einem Bergwerk



Untertagebergwerke reichen heute häufig bis in Tiefen von 2.500 m, einige Goldminen sogar bis 3.600 m. Das ist in etwa so tief unter der Erdoberfläche wie der bolivianische Regierungssitz La Paz über dem Meeresspiegel liegt. Der Trend im Bergbau geht in Richtung Untertagebau, in noch größeren Tiefen und an entlegenen Orten. Die Bergbauindustrie, die sich heute durch ein hohes Maß an mechanisierten mobilen Aufgaben in einer rauen Umgebung auszeichnet, ist aktiv auf der Suche nach automatisierten Lösungen, um die zukünftigen Anforderungen eines sicheren, nachhaltigen und produktiven Betriebs erfüllen zu können.

Die Luft unter Tage ist durch schädliche Gase wie CO, NO_x und CO₂ von dieselbetriebenen Geräten und Sprengungen belastet. Hinzu kommen natürliche Vorkommen von Radon und Methan (in Kohlebergwerken). Folglich ist eine angemessene Belüftung erforderlich, um eine gesunde Arbeitsumgebung im Bergwerk zu gewährleisten → 1. Ihre Aufgabe besteht darin, Frischluft in die Bereiche unter Tage zu verteilen, in denen Menschen arbeiten. Hierbei handelt es sich um eine Hilfsfunktion, die eng mit dem Abbau verknüpft ist. Die Belüftung, oder „Bewetterung“, wie man im Bergbau sagt, benötigt viel Energie, typischerweise um die 100 GWh/Jahr,

was bis zu 50 % des Gesamtenergieverbrauchs eines Bergwerks ausmachen kann.

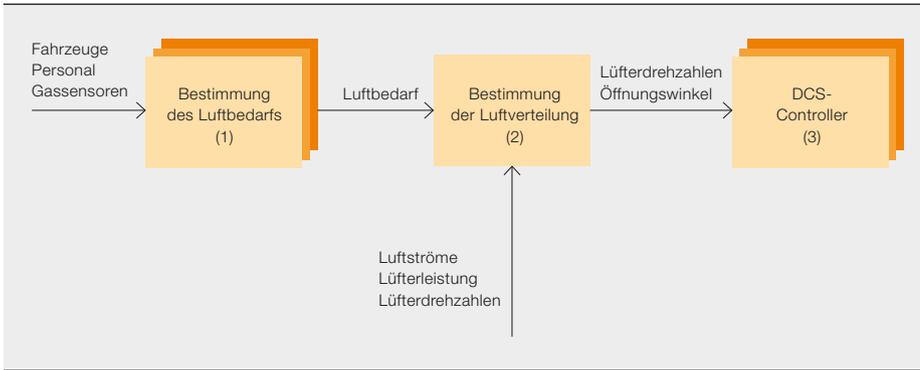
Heute werden Bergwerke meist von an der Oberfläche befindlichen Hauptgrubenlüftern mit frischer Luft versorgt, die dann mithilfe von Lüftern und/oder Luftdrosseln (sog. Wetterdrosseln) unter Tage dorthin verteilt wird, wo sie benötigt wird. Dabei kann es sein, dass die einströmende Luft erwärmt oder gekühlt werden muss. Stand der Technik bei der Belüftungssteuerung ist die bedarfsgesteuerte Belüftung (Ventilation on Demand, VoD), wobei es viele Bergwerke gibt, die über gar keine Steuerung verfügen. Doch auch die VoD hat ihre Nachteile: Es gibt keine Regelung mit Istwert-Rückführung, und die VoD verwendet ein komplexes bzw. schwaches Lüfter-/Wetterdrossel-Relationsmodell.

ABB bietet eine neue, einzigartige Methode für eine bergwerksweite koordinierte Regelung der Lüfter und Wetterdrosseln, die eine energieoptimierte und zuverlässige Lösung zur automatischen Versorgung der Grube mit der notwendigen Luft ermöglicht. Die Lösung basiert auf empirischen Modellen und Rückkopplungen von Luftsensoren, z. B. in Form von Gas-, Durchfluss- oder Temperatursensoren. Mehrgrößenmodelle beschreiben, wie

Titelbild

Ein Drittel des weltweit abgebauten Kupfers kommt aus der trockensten Wüste der Erde, der Atacama-Wüste in Chile. Foto: © 2013 Michael Vogel

2 Übersicht über die Regelungsfunktion der Grubenbelüftung



Durch automatische Systemidentifikation kann das dynamische Relationsmodell leicht an die neuen Bedingungen angepasst werden.

sich Veränderungen der Lüfterdrehzahl auf den Luftstrom und den Druck über den Lüftern auswirken. Die Parameter in den Modellen werden empirisch aus Betriebsdaten ermittelt, sodass das Modell einfach an neue Bedingungen angepasst werden kann.

Anwendung der MPC

Die gehobene Prozessregelung (Advanced Process Control, APC) wird in vielen Bereichen, z. B. in chemischen Prozessen und bei der Raffination, erfolgreich eingesetzt. Das am weitesten verbreitete Ver-

sein. Bei normalen APC-Projekten in der Prozessindustrie ist der größte Aufwand mit der Festlegung eines ausreichend guten Modells verbunden. Normalerweise umfasst die Modellierung eine Anlagentestphase, in der das System mit bestimmten Testsignalen angeregt wird und die Ausgangsgrößen aufgezeichnet werden. Diese Signale werden anschließend zur Bestimmung eines Modells mithilfe mathematischer Methoden verwendet. Dies wird auch als Systemidentifikation bezeichnet [2].

Der neue Ansatz für die Grubenbewetterung ist von der MPC-Methodik inspiriert. Eine besondere Herausforderung für die MPC ist die Tatsache, dass sich das Bergwerk ständig verändert: Neue Stollen werden für

Mehrgrößenmodelle beschreiben, wie sich Veränderungen der Lüfterdrehzahl auf den Luftstrom und den Druck über den Lüftern auswirken.

fahren ist die modellprädiktive Regelung (Model Predictive Control, MPC) [1], deren Ursprünge bis in die 1970er Jahre zurückreichen.

Ein modellprädiktiver Regler nutzt ein explizites Modell, um die zukünftige Reaktion einer Anlage vorherzusagen. Auf dieser Grundlage können Regelsignale bestimmt werden, die die Anlage so beeinflussen, dass die gewünschte Reaktion erreicht wird. Da das gewünschte Verhalten häufig ein Kompromiss zwischen miteinander im Konflikt stehenden Zielen ist, wird ein Optimierungsproblem formuliert, um die „beste“ Lösung zu finden. Ein dynamisches Modell, das die Anlage beschreibt, ist dabei von grundlegender Bedeutung. Die Erstellung eines dynamischen Modells kann sehr zeitaufwändig

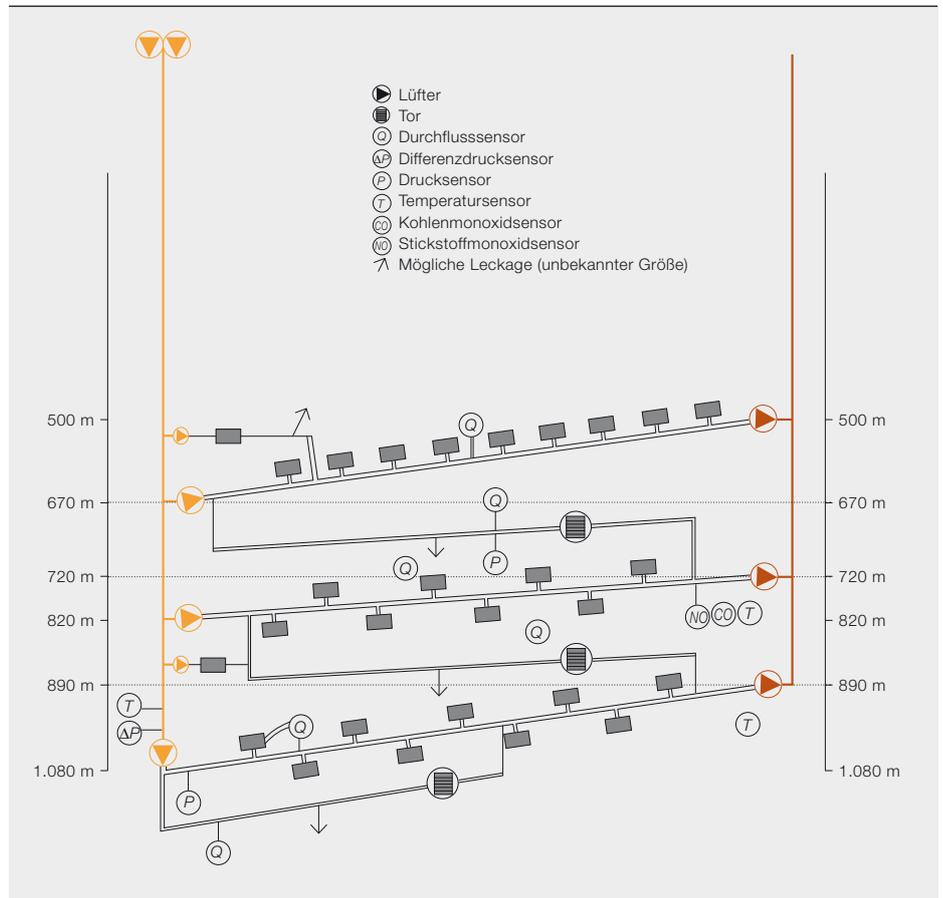
den Abbau geöffnet, während erschöpfte Stollen geschlossen werden. Neue Lüfter und Lüftungskanäle (sog. Lutten) kommen hinzu, wenn das Bergwerk weiter erschlossen wird. Außerdem kann es, z. B. nach Sprengungen, zu ungeplanten Veränderungen der Struktur kommen. Durch automatische Systemidentifikation auf der Grundlage von Betriebs- oder experimentellen Daten kann das einfache dynamische Relationsmodell leicht an die neuen Bedingungen angepasst werden.

Übersicht

Der neue Ansatz für die Grubenbewetterung weist Ähnlichkeiten mit dem aktuellen VoD-Verfahren auf. Die Struktur kann für beide Lösungsarten in drei Ebenen unterteilt werden. → 2 zeigt eine Übersicht über die Funktion.

Die optimierte Lüfterdrehzahl wird bestimmt aus dem Luftbedarf in verschiedenen Wetterwegen sowie den Eigenschaften der Lüfter und deren Antriebsmotoren.

3 Schematische Darstellung des für den Test gewählten Bergwerks



1) Die oberste Ebene bestimmt den tatsächlichen Luftbedarf in verschiedenen Wetterwegen des Bergwerks. Der Bedarf wird aus der Anwesenheit von Fahrzeugen und Personen an bestimmten Stellen ermittelt. Außerdem kann er durch Sensoren bestimmt werden, die die Konzentrationen von verschiedenen Gasen im Bergwerk messen. Dabei kann es sein, dass der Luftstrom in einigen Wetterwegen möglichst gering gehalten werden sollte, z.B. zur Steuerung der Ströme an den Zugangsrampen.

2) Die Funktionalität der zweiten Ebene bestimmt die Verteilung der Luft durch Optimierung der Drehzahl der Lüfter, die die Luft durch das Bergwerk transportieren. Die optimierte Lüfterdrehzahl wird bestimmt aus dem Luftbedarf in verschiedenen Wetterwegen sowie den Eigenschaften der Lüfter und deren Antriebsmotoren. Die zweite Ebene kann auch die Öffnungswinkel der Wetterdrosseln beibehalten, die zur Regelung des Luftstroms verwendet werden. Die Lüfterdrehzahlen und die Drosselwinkel werden bestimmt, um den tatsächlichen Gesamtenergiebedarf für die Bewetterung zu minimieren und gleichzeitig den Luftbedarf zu decken.

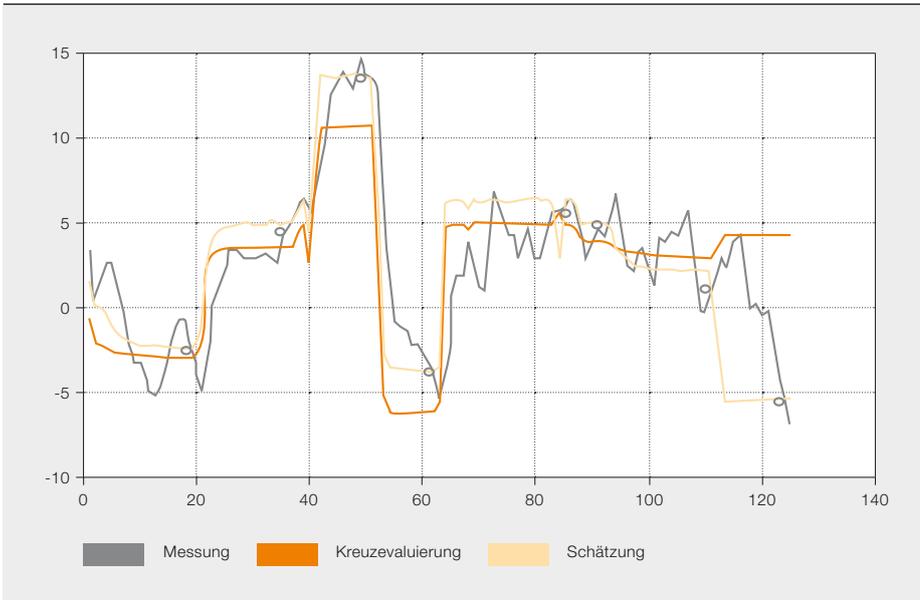
Diese Minimierung basiert auf einem Modell, das Veränderungen der Lüfterdrehzahlen, Veränderungen im Luftstrom und den tatsächlichen Energiebedarf in Relation zueinander setzt.

3) Die optimalen Lüfterdrehzahlen und Drosselwinkel werden dann als Sollwerte für untergeordnete Regler im verteilten Leitsystem (DCS) verwendet.

Bei der neuen MPC-Lösung erfolgt die Optimierung der gesamten Luftverteilung auf der zweiten Ebene.

Modellierung

Die Luftverteilung im Bergwerk wird durch die Lüfterdrehzahlen und, wenn vorhanden, die Öffnungswinkel der Lüftungsklappen beeinflusst. Dies sind die Stellglieder in dem Regelungssystem. Es besteht eine Wechselwirkung zwischen den Stellgliedern und den Wetterströmen im Bergwerk. Das bedeutet z.B., dass die veränderte Drehzahl eines Lüfters nicht nur den Luftstrom in dem Wetterweg beeinflusst, in dem sich der Lüfter befindet, sondern auch Luftströme in anderen Wetterwegen. Diese Wechselwirkung macht eine optimale Regelung der Wetterströme so schwierig.



rig. Daher ist es wichtig, dass das Modell dieses Verhalten des Bergwerks abbildet. Das Bergwerk könnte mithilfe von dynamischen Mehrgrößenmodellen beschrieben werden. Solche Modelle kommen in vielen Anwendungen, z. B. in der erdölverarbeitenden Industrie, zum Einsatz. Ein Nachteil dieser Modelle ist, dass ihre Erstellung mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Dies ist hier ungünstig, da sich die Form des Bergwerks durch Erweiterungen und unbeabsichtigte neue Wege für Luftströme durch Sprengungen ständig verändert. So ist es weder praktikabel noch nutzbringend, jedes Mal mehrere Wochen mit dem Aufbau eines neuen, genauen dynamischen Modells des Bergwerks zu verbringen, wenn sich etwas ändert.

In diesem Fall kommt ein einfaches statisches Mehrgrößenmodell zum Einsatz, das in der Lage ist, die wichtigsten Wechselwirkungen und Auswirkungen von Veränderungen in den Stellgliedern zu erfassen. Dieses Modell wird in inkrementeller Form beschrieben:

$$\begin{aligned}\Delta Q &= H_q \Delta \beta \\ \Delta p &= H_p \Delta \beta \\ \Delta E &= H_e \Delta(\beta^3)\end{aligned}$$

Wobei Q ein Vektor der gemessenen Luftströme, p ein Vektor der Drücke über den Lüftern, β ein Vektor der Lüfterdrehzahlen und E ein Vektor der Lüfterleistungen ist. Δ steht für Veränderungen zwischen zwei Abtastwerten. Die Koeffizienten in den Matrizen H_q , H_p und H_e werden durch ein-

Das Ziel der Regelung besteht darin, den gewünschten Luftstrom in verschiedenen Wetterwegen zu erhalten und gleichzeitig den Energiebedarf der Lüfter zu minimieren.

fache Experimente oder Daten aus dem normalen Betrieb ermittelt, die eine Automatisierung der Systemidentifikation ermöglichen.

Messungen

Damit das Modell für das Grubenbewettungssystem identifiziert und für die Regelung genutzt werden kann, müssen eine Reihe von Größen gemessen werden:

- Gaskonzentration und/oder Luftströme an verschiedenen zu regelnden Stellen
- Leistung der zu regelnden Lüfter
- Drehzahl der zu regelnden Lüfter
- Druck über den Lüftern

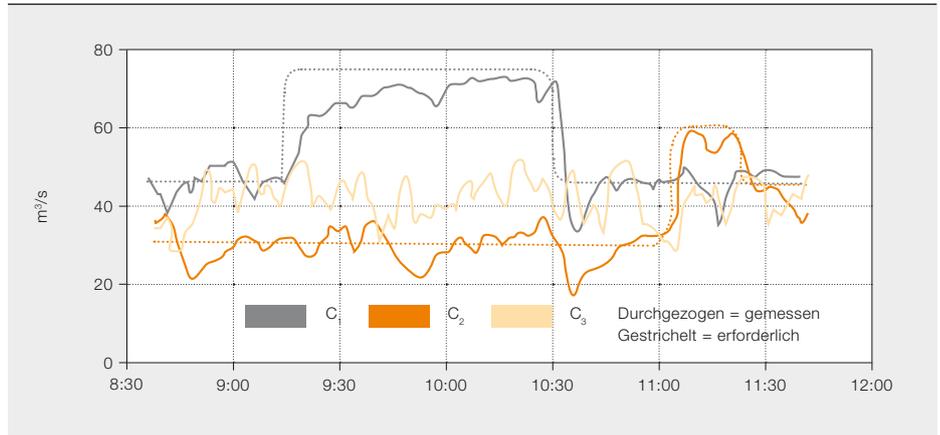
Der Regler passt die Ist-Drehzahl der Lüfter an den momentanen Bedarf an.

Regelung

Das Ziel der Regelung besteht darin, den gewünschten Luftstrom in verschiedenen Wetterwegen zu erhalten und gleichzeitig die für den Betrieb der Lüfter erforderliche Energie zu minimieren. In Wetterwegen, die Abbaubereiche mit Luft versorgen, muss der Luftstrom über dem erforderlichen Soll liegen, während die Luftströme

Da ständig Fahrzeuge in die Abbaubereiche hinein- und hinausfahren, ändert sich auch der Luftbedarf in den Wetterwegen.

5 Anpassung des Luftstroms an eine sprunghafte Veränderung des Bedarfs



in anderen Wetterwegen eventuell so gering wie möglich gehalten werden müssen. Dies kann als Optimierungsproblem formuliert werden, bei dem neue Lüfterdrehzahlen zur Minimierung der tatsächlich benötigten Leistung bestimmt werden. Bei der Minimierung werden Randbedingungen zum Luftstrom und zum Differenzdruck berücksichtigt:

$$Q_{lo} \leq Q(k) \leq Q_{hi}$$

$$\Delta p_{lo} \leq \Delta p(k) \leq \Delta p_{hi}$$

Außerdem gelten folgende Einschränkungen im Hinblick auf die Lüfterdrehzahlen:

$$\beta_{lo} \leq \beta(k) \leq \beta_{hi}$$

Dieses Optimierungsproblem wird auf zyklischer Basis gelöst, wobei neue Lüfterdrehzahlen berechnet werden. Als Anfangswerte für jede Optimierung dienen gefilterte Werte der gemessenen Signale.

Feldversuche

Die neue Methode zur optimierten Regelung der Grubenbewetterung wurde in einem in Betrieb befindlichen Untertagebergwerk getestet, das bereits über ein VoD-System von ABB verfügte, das alle Lüfter und Sensoren miteinander verbindet.

→ 3 zeigt eine schematische Darstellung des Bergwerks. Der geregelte Bereich des Bergwerks umfasst drei Abbausohlen in 500 m bis 1.068 m Tiefe. Es gibt zwei Lüfter an der Oberfläche sowie jeweils einen Lüfter am Eingang und am Ausgang jeder Abbausohle. Die orangefarbene Linie stellt die einströmende Frischluft (Frischwetter) und die braune Linie die ausströmende Abluft (Abwetter) dar. Auf jeder Sohle sowie in den Zugangsstollen zwischen den Sohlen wird die Geschwin-

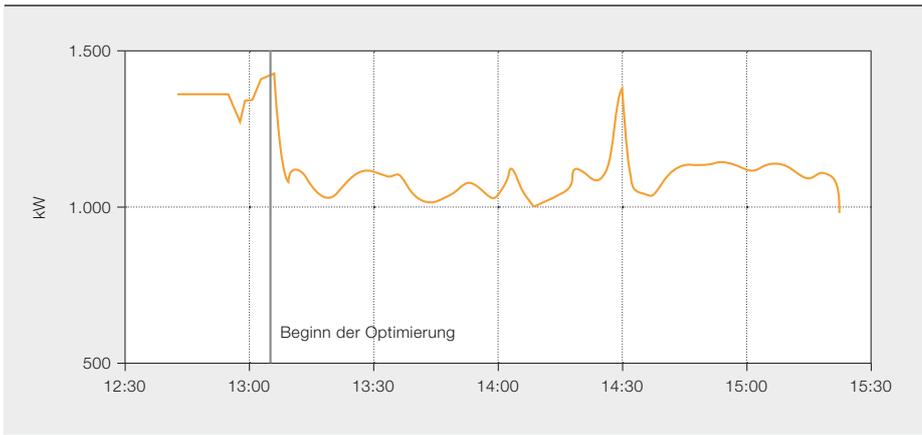
digkeit des Luftstroms mithilfe von Ultraschall-Durchflusssensoren gemessen. Die Standorte dieser Sensoren sind in der Zeichnung mit einem „Q“ gekennzeichnet. Außerdem wird für jeden Lüfter der statische Druckanstieg gemessen.

Da ständig Fahrzeuge in die Abbaubereiche hinein- und hinausfahren, ändert sich auch der Luftbedarf in den dorthin führenden Wetterwegen. Das derzeitige VoD-System ändert die Lüfterdrehzahlen entsprechend. Dies liefert die notwendige Anregung für die Identifikation des Modells. Nach entsprechender Filterung und Entfernung hochfrequenter Schwankungen, werden die statischen Modelle des oben beschriebenen Bergwerks mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate (Least Squares Fitting) bestimmt. Eine Evaluierung zweier solcher Modelle ist in → 4 dargestellt. Eines der Modelle (Geschätzt) wurde mithilfe der in der Abbildung dargestellten Messdaten und das andere (Kreuzevaluierung) mithilfe eines vollständig anderen Datensatzes identifiziert.

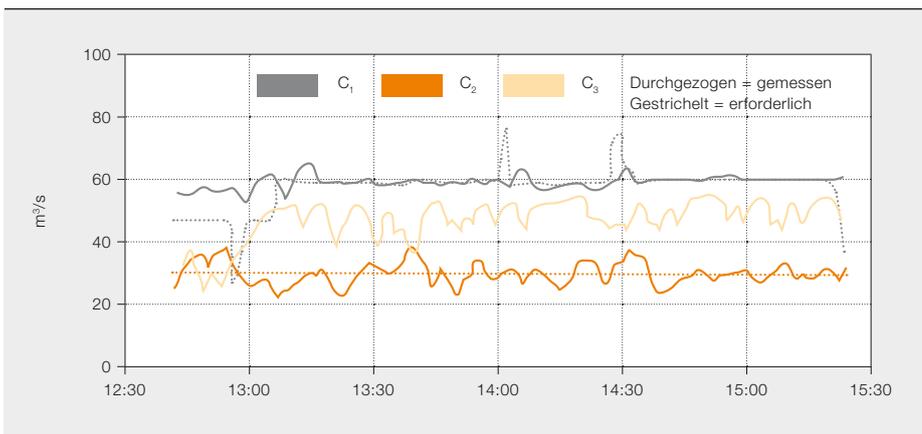
Der auf den identifizierten Modellen basierende Lüfteroptimierer wurde zwei Tage lang getestet, wobei die Bewetterung der Abbausohlen durch den Optimierer geregelt wurde. Das vom ABB System 800xA aufgezeichnete Ergebnis ist in → 5 dargestellt. Das Diagramm zeigt, wie das System den Wetterstrom in der ersten (graue Linie) und der zweiten (dunkelorange Linie) der drei Sohlen an eine sprunghafte Veränderung des Bedarfs anpasst.

Eine andere Aufzeichnung aus dem laufenden Betrieb ist in → 6 dargestellt. Die Diagramme zeigen, wie der Optimierer die Lüfterleistung erheblich reduzieren und gleichzeitig den Frischluftbedarf in den

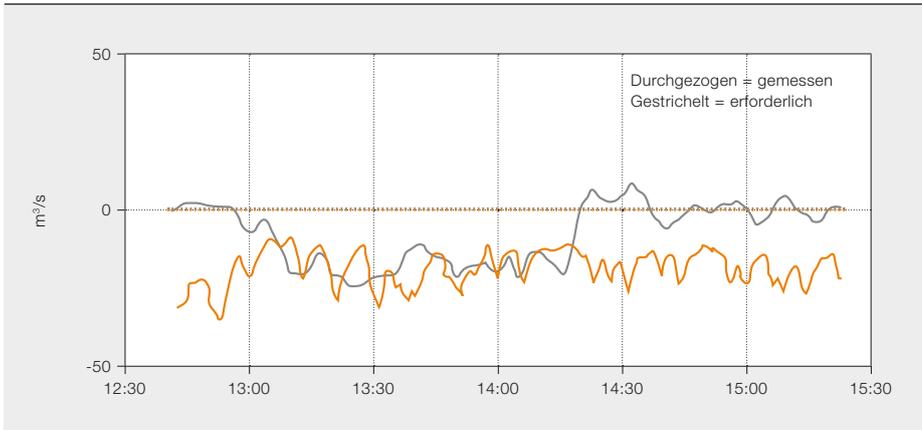
6 Aufzeichnung des optimierten Betriebs mit Reduzierung der Lüfterleistung



6a Lüftergesamtleistung



6b Wetterströme in den Zellen



6c Wetterströme an den Zugangsrampen

Wetterwegen erfüllen kann. Die Tests haben eine mögliche Reduzierung der Lüfterleistung von 30 % bis 50 % im Vergleich zum vorhandenen System bei Erhaltung der gleichen Wetterströme ergeben.

Ergebnisse

Die Feldversuche zeigen, dass durch Anwendung der einfachen empirischen Modelle in einem Grubenbewetterungssystem Folgendes erreicht werden kann:

- Automatische Regelung einer gesunden Arbeitsumgebung in einem Untertage-

bergwerk entsprechend der aktuellen Anforderungen an die Luftqualität

- Automatische Anpassung an neue Arbeitsbedingungen, wenn sich das Bergwerk entwickelt
- Deutliche Reduzierung der Lüfterleistung durch optimale Verteilung der Last auf vorhandene Lüfter
- Robuste und zuverlässige automatisierte Belüftung durch Regelung mit Istwert-Rückführung

Die Arbeitsumgebung wird durch optimierte Wetterströme verbessert, die genau auf die Tätigkeiten im jeweiligen Bereich zugeschnitten sind.

Die Anwendung dieser dynamischen empirischen Modelle in Grubenbewetterungssystemen bietet mehrere Vorteile. So profitiert nicht nur der Bergwerksbesitzer bzw. -betreiber von reduzierten Betriebskosten, auch die Arbeitsumgebung wird durch optimierte Wetterströme verbessert, die genau auf die Tätigkeiten im jeweiligen Bereich zugeschnitten sind. Dabei ist das vorhandene Modell in der Lage, mit der sich ständig verändernden Natur des Bergwerks Schritt zu halten und die Kontinuität der Wetter- und Lüfteroptimierung sicherzustellen. Dies bedeutet auch, dass die Effizienzvorteile, von denen das Bergwerk profitiert, durchgängig sind und einige der rauesten und entlegensten Arbeitsumgebungen einschließen.

Michael Lundh

Jan Nyqvist

Mats Molander

ABB Corporate R&D

Västerås, Schweden

michael.lundh@se.abb.com

jan.nyqvist@se.abb.com

mats.a.molander@se.abb.com

Literaturhinweise

- [1] Qin, S. J., Badgwell, T. A. (2003): „A survey of industrial model predictive control technology“. Control Engineering Practice 11 (2003): 733–764
- [2] Ljung, L. (1999): „System Identification – Theory for the user“. Prentice Hall



Antriebsfaktoren

Technologien zur Steigerung der Produktivität von Bergwerken

LEN EROS, MIKE SMALE, DAVID KEECH – Die starke Nachfrage nach Basisrohstoffen setzt die Bergbauindustrie zunehmend unter Druck und sorgt für einen Trend in Richtung größerer Bergwerksbetriebe mit höheren Produktivitätszielen. Doch wie schaffen es diese großen Bergwerke, unter anspruchsvollen Umgebungsbedingungen mehr zu produzieren und gleichzeitig die Kosten in Grenzen zu halten? Eine Möglichkeit besteht darin, sich einen Partner zu suchen, der nicht nur das entsprechende technische Know-how, sondern auch robuste, innovative Ausrüstung bietet, die auf die einzigartigen Bedürfnisse des Bergbaus zugeschnitten ist. Im Bereich der Ausrüstung verfügt ABB über eine breite Palette von praxiserprobten Produkten, die in Förderbändern, Hebezeugen, Brechwerken, mobilen Transportmaschinen, Belüftungsanlagen usw. zum Einsatz kommen. Da für viele dieser Anwendungen Getriebe erforderlich sind, ist der Einsatz von bestmöglichen Untersetzungsgetriebeprodukten von entscheidender Bedeutung, wenn es darum geht, Kosten-, Instandhaltungs- und Produktionsziele zu erreichen.



Dank technologischer Entwicklungen können auch Erze mit geringerer Güte und komplexerer Mineralogie abgebaut und Kostensteigerungen minimiert werden.

Die weltweite Bergbauindustrie ist groß: Ende 2012 belief sich die Summe der anstehenden Investitionen auf über 400 Mio. USD [1]. Bedingt durch einen scharfen Wettbewerb spielt die Produktivität im Bergbau eine wichtige Rolle. Die meisten Produktivitätssteigerungen in den letzten 100 Jahren wurden durch eine effizientere Mineralaufbereitung und den Einsatz größerer Geräte erreicht. Dank technologischer Entwicklungen können so auch Erze mit geringerer Güte und komplexerer Mineralogie abgebaut und Kostensteigerungen minimiert werden.

Unternehmen, die wie ABB in der Lage sind, die Bergbauindustrie mit kompletten technischen Lösungen zu beliefern, sind

Titelbild

Um sich im intensiven Wettbewerb zu behaupten, schließen moderne Bergbauunternehmen Partnerschaften mit technischen Unternehmen, die nicht nur über das Know-how, sondern auch über eine umfassende Palette von Produkten für die rauen Bedingungen im Bergbau verfügen.

angesichts der schieren Größe und Komplexität moderner Prozesse zur Produktion immer größerer Materialmengen im Vorteil.

ABB verfügt nicht nur über die erforderliche Branchenkompetenz, sondern auch über eine breite Palette von praxiserprobten Produkten, die den speziellen Leistungs- und Effizienzanforderungen von Bergwerksbetrieben gerecht werden. Die Produkte von ABB kommen in Ausrüstungen wie Förderbändern, Hebezeugen, Brechwerken und Belüftungsanlagen ebenso zum Einsatz wie in mobilen Transportmaschinen und -systemen. Aufgrund der rauen und anspruchsvollen Natur des Bergwerksbetriebs gehören ein hohes Maß an Robustheit und Zuverlässigkeit zu den wichtigsten Produktanforderungen.

Energieeinsparungen wirken sich ebenfalls auf die Erträge von Bergbauunternehmen aus, sodass energieeffiziente

Unternehmen, die in der Lage sind, komplette technische Lösungen zu liefern, sind angesichts der schieren Größe und Komplexität moderner Prozesse im Vorteil.

Produkte einen wichtigen Vorteil bieten. Generell profitieren Bergbauunternehmen also von einem Partner, der in der Lage ist, elektrische und mechanische Gesamtlösungen anzubieten.

Produkte zur Senkung der Betriebskosten

Das elektrische Produktportfolio von ABB umfasst eine vollständige Palette von

Energieeinsparungen wirken sich ebenfalls auf die Erträge von Bergbauunternehmen aus, sodass energieeffiziente Produkte einen wichtigen Vorteil bieten.

1 Antriebssystem mit einem Dodge CST 2500K, einem 2,500-PS-Baldor-Reliance-Motor, einem optionalen 3.150-Pfund-Schwungrad sowie schnell und langsam drehenden Kupplungen



Motoren einschließlich explosionsgeschützter Motoren für den Bergbau sowie drehzahlgeregelte Nieder- und Mittelspannungsantriebe verschiedener Art. Das mechanische Produktportfolio umfasst Großgetriebe, Sanftanlaufgetriebe (CST), Gehäuselager, Kupplungen, Riemscheiben und Bandtrommeln. Darüber hinaus bietet ABB Systeme zur Energieverteilung und Spannungsaufbereitung sowie Schaltanlagen zur Versorgung der Bergbauausrüstung mit elektrischer Energie.

ABB besitzt das umfassendste Angebot an großen Wechselstrom- und Bergbaumotoren der Welt. Neben den Standard- und kundenspezifischen Motoren der Marke Baldor-Reliance® mit bis zu 11 MW (15.000 PS) stehen Asynchron- und Synchronmotoren mit bis zu 65 MW (87.000 PS) zur Verfügung. Das Angebot umfasst sowohl NEMA- (National Electrical Manufacturers Association) als auch IEC-Konfigurationen (International Elec-

Einschaltdauer für bestimmte Anwendungen erfüllt. Bergbaumotoren verfügen aufgrund der rauen Betriebsumgebung über eine besonders robuste äußere Bauweise und sind mit lebensdauerverlängernden Lager- und Dichtungssystemen ausgestattet.

Ferner bietet ABB modernste Antriebstechnik für Förderanlagen in Form von getriebelosen Antriebssystemen. Diese nutzen langsam laufende Synchronmotoren mit Frequenzumrichtern und tragen zur Reduzierung der Zahl von Komponenten bei, was wiederum die Systemzuverlässigkeit erhöht und die Instandhaltungsanforderungen senkt.

Untersetzungsgetriebe

In herkömmlichen, mit Getrieben ausgestatteten Antriebssystemen kann die Motorleistung über verschiedene ABB-eigene Untersetzungsgetriebe zum Fördersystem übertragen werden. Dazu ge-

hören das Sanftanlaufgetriebe CST (Controlled Start Transmission) und das Untersetzungsgetriebe Magna Gear® XTR, die beide speziell für Bergbauanwendungen ausgelegt sind.

Das Dodge CST-System ermöglicht eine Verteilung der Motorlast, um die Belastung aller Komponenten des Fördersystems zu minimieren.

trotechnical Commission). So können Kunden sicher sein, dass sie einen Motor bekommen, der die jeweiligen Standards hinsichtlich Gehäuse, Kapselung und

Dodge® CST

Das Dodge CST-System ermöglicht eine Verteilung der Motorlast, um die Lasten und Beanspruchungen aller Komponenten

2 Ein MagnaGear XTR 210K an einem 365 m langen Förderband mit einem Höhenunterschied von 26 m



Den größten Bestand an installierten Systemen besitzt China mit über 2.000 in Betrieb befindlichen CSTs.

ten des Fördersystems zu minimieren. Im Wesentlichen ist das CST ein Zwei-in-Eins-Getriebe bestehend aus einem Untersetzungsgetriebe mit Planetenabtriebsstufe und einer integrierten Nasskupplung. An einen Wechselstrom-Asynchronmotor gekoppelt wandelt das CST-Getriebe die hohe Drehzahl und das niedrige Drehmoment des Motors in eine niedrige Drehzahl und ein hohes Drehmoment um. So sind Drehmomente bis 400 kNm möglich. Dabei steht die maximale Motorleistung über den gesamten Betriebsbereich zur Verfügung. Die Kupplung absorbiert Stoßbelastungen und schützt Motor, Getriebe, Lager, Rollen, Förderbänder und Spleißverbindungen. Das robuste Design ermöglicht eine vollständige Steuerung von schwierigen Lasten mit hoher Trägheit wie lange Förderbänder und Förderanlagen mit mehreren synchronisierten Antrieben → 1.

Das robuste Design ermöglicht eine vollständige Steuerung von schwierigen Lasten mit hoher Trägheit wie lange Förderbänder und Anlagen mit mehreren synchronisierten Antrieben.

Die innen auf der Abtriebsseite des Getriebes angeordnete Nasskupplung ermöglicht ein Hochfahren des Motors ohne Last. Während das SPS-basierte Steue-



rungssystem die Kupplung allmählich einrückt, beginnt die Abtriebswelle zu rotieren und beschleunigt in einer vorgegebenen Zeit sanft auf die gewünschte Antriebsdrehzahl.

Die Wartungsfreundlichkeit ist ein weiterer wichtiger Faktor bei der Wahl eines Antriebssystems. CST-Systeme sind einfach zu bedienen und zu warten und erfordern kein hohes Maß an technischem Fachwissen, wie es bei komplexeren Steuerungen der Fall ist. Dies ist besonders wichtig an entlegenen Standorten, wo man für die Wartung und Instandhaltung auf lokale Ressourcen angewiesen ist.

Bis 2012 wurden weltweit über 3.000 CSTs installiert. Zurzeit werden sechs Systeme in einer Kupfermine in Südamerika installiert. Hierbei handelt es sich um eine der komplexesten Installationen dieser Art. Die Installation in 5.000 m Höhe umfasst vier CSTs mit je 2.250 kW (3.000 PS) und zwei CSTs mit je 1.400 kW (1.900 PS) sowie die dazugehörigen Sockel und Hochgeschwindigkeitsbremsen.

Für einen anderen Kunden lieferte ABB ein System, das Einsparungen bei den Investitionskosten für den Antrieb in Höhe von 20 % sowie zusätzliche Einsparungen bei den Kosten für das Fördersystem ermöglichte. Die Kosten waren deutlich niedriger als für das spezifiziertere System, es bot aber eine höhere Gesamtleistung. Mithilfe von drei 1.875-kW-Antrieben (2.500 PS) und einer Förderbandlänge von fast 3,7 km produziert das Bergwerk 100 Millionen Tonnen Kohle im Jahr.

Den größten Bestand an installierten Systemen besitzt China mit über 2.000 in Betrieb befindlichen CSTs. Ein Unternehmen besitzt 400 CSTs, die in 17 Kohlebergwerken mit einer Gesamtfläche von 10.000 km² im Einsatz sind. Ausgestattet mit einer modernen Fernüberwachung erreicht dieses System eine Verfügbarkeit von 98 %.

Dodge MagnaGear XTR

Das Dodge MagnaGear XTR ist ein weiteres innovatives Untersetzungsgetriebe, das in Schwerlastanwendungen mit Nenndrehmomenten von bis zu 240 kNm verbreiteten Einsatz findet → 2, → 3. Für

Antriebsdrehmomente über 44 kNm ist es mit einem Planetenantrieb ausgestattet, was eine kompakte, langlebige und wirtschaftliche Lösung für Anwendungen mit hohen Drehmomentanforderungen darstellt. MagnaGear XTR-Untersetzungsgetriebe können mit einer Vielzahl von Sanftanlauf- und Steuerungssystemen, einschließlich elektronischen Sanftanlassern, drehzahlgeregelten Antrieben (VSDs) und Flüssigkeitskupplungen, verwendet werden.

Die Lager der MagnaGear XTR-Untersetzungsgetriebe erfüllen bzw. übertreffen die Lebensduranforderungen der AGMA (American Gear Manufacturers Association). Tatsächlich erreichen die Lager in vielen Fällen mehr als das Doppelte der Lebensdauer von Lagern in vielen Mitbewerberprodukten. Darüber hinaus sind die Getriebe mit einem Tandemdichtungssystem und einem effizienten Kühlsystem ausgestattet. Ein umfangreiches Angebot an Zubehör für spezielle Anwendungen rundet das MagnaGear-Angebot ab. Dazu gehören Grundrahmen, Getriebebeschwingen, Tunnelantriebskonfigurationen, Drehmomentstützen, interne Rücklaufsperrern (Lift-off-Style), Kupplungen und elektrische Lüfter.

Dodge-Gehäuselager setzen die Maßstäbe in der Branche. Die Lager vom Typ ISAF und die metrischen ISN-Lager verfügen als einzige in der Branche über ein „Schub-/Zug“-Adaptermontagesystem, das die Installationszeit verkürzt und gleichzeitig für einen konzentrischen Sitz auf der Welle sorgt. Dadurch wird Passflächenkorrosion nahezu ausgeschlossen. Dodge-Stehlager mit großem Durchmesser für größere Anwendungen verfügen über ein patentiertes, hydraulikunterstütztes Adaptermontage- und Demontage-system. Die Lager lassen sich nicht nur schnell installieren und deinstallieren, sie werden auch im Werk montiert, gekapselt und geschmiert. Kundenspezifische Riemenscheiben sowie eine Vielzahl von Kupplungen runden das ABB-Angebot von mechanischen Kraftübertragungsprodukten ab.

Mehr als Produkte

Da Bergbauunternehmen häufig das technische Know-how fehlt, bilden sie gern Partnerschaften mit Herstellern, die nicht nur in der Lage sind, geeignete Produkte, sondern auch technisches Wissen bereitzustellen. Die Bergbauexperten von

ABB und Baldor verstehen die Herausforderungen der Branche und wissen, wie sie Produkte und Pakete auf bestmögliche Weise zu erfolgreichen Lösungen kombinieren können.

Die Auslegung eines Förderbandantriebssystems ist ein gutes Beispiel für diesen gemeinsamen Ansatz. Das Ziel ist die Konzeption eines Fördersystems, das mit der bestmöglichen Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit so viel Material wie möglich transportiert. Die damit verbundenen Herausforderungen sind beachtlich. In der Bergbauindustrie geht man vermehrt dazu über, Förderbänder einzusetzen, um größere Lasten über längere Entfernungen zu transportieren. So muss ein Förderband nicht selten bis zu 30.000t Material in der Stunde über Entfernungen von 10 bis 20 km bewegen – und das 24 Stunden am Tag. In einer frühen Phase des Designprozesses verwendet das Team ein in der Branche verbreitetes Programm („Belt Analyst“), um das Antriebssystem mit der richtigen Ausgangsleistung zu konfigurieren und die Wahl der Motoren, drehzahlgeregelten Antriebe, Lager, Kupplungen und Förderbandtrommeln zu optimieren.

ABB sichert ihre Spitzenstellung auf dem Gebiet der Bergbautechnik durch Kooperationen mit Hochschulen und Brancheninstitutionen in aller Welt. Forschungsprojekte befassen sich unter anderem mit der Modellierung der nächsten Generation von Motoren und Fragen der Wärmeübertragung und Kühlung von Motoren. Bei der Entwicklung von Normen ist das Unternehmen in verschiedenen technischen Ausschüssen der NEMA, IEC, IEEE und CEMA (Conveyors Equipment Manufacturers Association) vertreten.

Dank ihrer umfassenden Produktpalette und umfangreichen Branchenerfahrung ist ABB in der Lage, Probleme von Kunden durch die Bereitstellung von leistungsangepassten Lösungen mit dem richtigen Motor, Steuerungssystem, Getriebe, den richtigen Lagern, Kupplungen und Trommeln zu lösen. So wird ABB auch in Zukunft Lösungen für branchenspezifische Anwendungen mit dem Ziel entwickeln, die Gesamtbetriebskosten für den Kunden durch Verlängerung der Lebensdauer und Verbesserung der Zuverlässigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Ausfallzeiten, Steigerung der Betriebseffizienz und Senkung der Energiekosten zu reduzieren.

MagnaGear XTR-Getriebe können mit einer Vielzahl von Sanftanlauf- und Steuerungssystemen, einschließlich elektronischen Sanftanlassern, VSDs und Flüssigkeitskupplungen, verwendet werden.

Len Eros

ABB Motors and Generators
Littleton, CO, USA
len.eros@us.abb.com

David Keech

Mike Smale

Baldor, ein Unternehmen des ABB-Konzerns
Greenville, SC, USA
david.keech@baldor.abb.com
mike.smale@baldor.abb.com

Literaturhinweise

- [1] „Trends in the Mining & Metals Industry: Mining's Contribution to Sustainable Development“. International Council on Mining & Metals. Oktober 2012

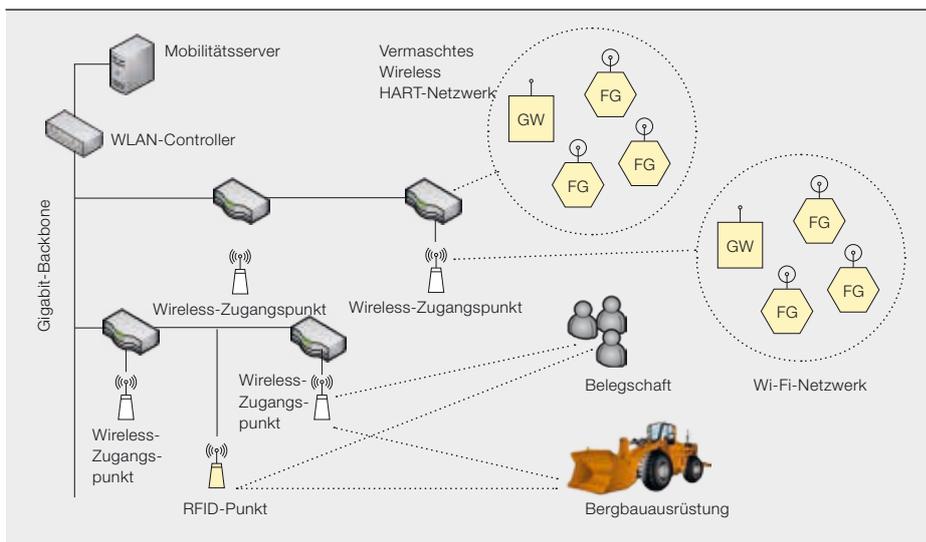


Wertvolle Informationen

Integration von mobiler Ausrüstung im Untertagebau

STEFAN L. SJOSTROM, KJELL G. CARLSTEN, KRISTER LANDERNAS, JONAS NEANDER – Die Tatsache, dass der Großteil aller leicht zu findenden, hochwertigen Metallerze auf der Erde bereits abgebaut ist, überrascht wenig. Für Bergbauunternehmen bedeutet dies, dass sie noch härter arbeiten müssen, um an die verbleibenden Ressourcen zu gelangen. Es gibt jedoch einen Technologiebereich, der im Bergbau weniger weit entwickelt ist als in anderen Industrien und der ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der betrieblichen Effizienz und Rentabilität bietet: die Automatisierung und Integration von Daten unter Tage. Aufgrund der fehlenden Technisierung im Vergleich zu anderen Industrien bleibt eine Optimierung der gesamten Wertschöpfungskette vom Bergwerk bis zur Verhüttung häufig ein Wunschtraum. ABB bietet jedoch Systeme, die es Bergleuten ermöglichen, die Nutzung der Ausrüstung unter Tage zu optimieren, die Produktivität des Bergwerks zu steigern und den Energieverbrauch zu senken.

1 Ein vollständig integriertes Netzwerk liefert dem Bedienpersonal einen umfassenden Überblick über den Abbauprozess. (FG = Feldgerät; GW = Gateway)



Der Bergbau gehört zu den ältesten Industriezweigen. Das älteste bekannte Bergwerk ist die laut Radiocarbonatierung etwa 43.000 Jahre alte „Lion Cavern“ in Swasiland, in der Zutaten für Färbemittel abgebaut wurden [1]. Andere Bergwerke ähnlichen Alters lieferten Material für die Werkzeugherstellung. Obwohl der Bergbau in den letzten 100 Jahren stark mechanisiert wurde, hinkt dieser Sektor, was die Übernahme neuer Technologien angeht, anderen Industrien wie der Öl- und Gas- oder der Zellstoff- und Papierindustrie allgemein hinterher. Da der Abbau von Erz und anderen gesuchten Rohstoffen immer schwieriger wird, gewinnen eine verstärkte Automatisierung und die Integration von Daten für einen erfolgreichen Bergwerksbetrieb zunehmend an Bedeutung.

Gleichzeitig müssen die Fähigkeiten der Mitarbeiter erweitert werden, um die Einführung und Nutzung dieser Technologie zu unterstützen. So ist entsprechend qualifiziertes Personal für die Produkt- und Prozessoptimierung, Wartungsplanung und Regelung der Umgebungsbedingungen erforderlich. Insgesamt wird es weniger, höher qualifizierte Mitarbeiter geben, die die gesamte Wertschöpfungskette abdecken. Wahrscheinlich werden einige von ihnen in der Lage sein, mehrere Bergwerke zu betreuen – unterstützt

durch Sensoren und automatisierte Systeme, die die notwendigen Echtzeitinformationen zur Steuerung aller Produkte und Prozesse über ein Kommunikations-Backbone bereitstellen → 1. Durch diese Integration kann die Nutzung der Ausrüstung unter Tage optimiert, die Produktivität des Bergwerks gesteigert und gleichzeitig der Energieverbrauch gesenkt werden. Die ABB Extended Automation System 800xA-Plattform und die dazugehörigen Produkte ermöglichen eine solche Automatisierung und Integration von Daten in einem Bergwerk.

Mithilfe der Lösungen von ABB für den Untertagebau können Echtzeitdaten von Bergbauausrüstungen verschiedener Art und von unterschiedlichen Herstellern in das offene Prozessleitsystem System 800xA integriert werden → 2. Dies ermöglicht eine bessere Visualisierung und Ausnutzung der Ausrüstungsflotte, z. B. durch Verfolgung von Maschinenstandorten, Berichte zu Maschinenzuständen und Verknüpfung von Betriebsumgebungen unter Tage. Die Entwicklung und Implementierung solcher Systeme, einschließlich der Auswahl und Weiterleitung von Informationen zur Steigerung der betrieblichen Leistungsfähigkeit, stellt einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil dar.

Bergwerksautomatisierung

Im Allgemeinen sind viele Betriebsabläufe in einem Bergwerk in sich selbst recht gut automatisiert, doch ihre Integration in ein übergeordnetes „Master-System“ ist häufig schlecht oder nicht vorhanden. Das Ergebnis ist eine Suboptimierung und eine inhomogene Sicht auf den Prozess.

Einer der Hauptgründe für dieses Defizit ist das Fehlen einer vielseitigen – drahtlosen oder drahtgebundenen – Kommunikationsinfrastruktur unter Tage. So lässt sich nur schwer ein Überblick bzw. eine umfassende Kontrolle über die verschiedenen Betriebsabläufe im Bergwerk realisieren. Außerdem ist eine Optimierung der gesamten Wertschöpfungskette vom Bergwerk bis hin zur Verhüttung nicht

Da der Abbau von Erz und anderen gesuchten Rohstoffen immer schwieriger wird, gewinnen eine verstärkte Automatisierung und Datenintegration zunehmend an Bedeutung.

möglich. Ein Grund für dieses Defizit könnte darin liegen, dass der Druck zur Kostensenkung und Produktionsoptimierung

Titelbild

Obwohl sich im Bergbau viel verändert hat, ist eine stärkere Automatisierung und Datenintegration erforderlich.



zung in der Bergbauindustrie bislang noch nicht so ausgeprägt war wie in anderen vergleichbaren Industrien.

Doch die Situation ändert sich schnell, und die beste Möglichkeit, Verbesserungen herbeizuführen, ist die Einführung eines flexiblen und multifunktionalen Kommunikationssystems in die Betriebsumgebung unter Tage.

Kommunikation

Herkömmlicher UHF-/VHF-Funk wird bereits seit vielen Jahren für die Sprachkommunikation in Bergwerken eingesetzt, doch dieser Kommunikationsmethode fehlt es an Anpassungsfähigkeit und Funktionalität. Eine wesentlich bessere Lösung ist ein drahtloses lokales Netzwerk (WLAN). Tatsächlich haben bereits mehrere Bergbauunternehmen (z.B. LKAB und Boliden in Schweden) WLAN-Netze unter Tage installiert. Solche Netze werden vornehmlich für die IP-Telefonie (VoIP) und zur Datenübertragung verwendet, ermöglichen aber auch die Verfolgung von und die Kommunikation mit mobiler Ausrüstung.

Verfolgung

Durch das sogenannte „Tracking“ lässt sich der Standort eines Smartphones, Laptops, RFID-Tags oder eingebetteten Geräts bestimmen. Eine solche Verfolgung ist mit jedem beliebigen WLAN-Client möglich. Normalerweise wird der Standort durch Berechnung der Position des Clients relativ zu bestimmten Fixpunkten mit bekannten Koordinaten (häufig die WLAN-Zugangspunkte) bestimmt. Anschließend wird diese relative Position in ein globales, absolutes Koordinatensystem übertragen. Je mehr Fixpunkte es

gibt, desto höher ist die Genauigkeit bei der Ortung.

Damit solche Funktionalitäten wie das Tracking zuverlässig funktionieren, muss das drahtlose Netzwerk unter Tage sorgfältig geplant und implementiert werden. Eine große Herausforderung stellt dabei die anspruchsvolle Funkumgebung in einem Bergwerk dar. Hier spielen insbesondere Aspekte wie Stollentopologie, unterschiedliche Geologie, Signaldämpfung durch Fels und Baumaterial, Wattzahl versus Eigensicherheit sowie elektromagnetische Störungen eine Rolle. ABB hat verschiedene Feldversuche durchgeführt, um entsprechende Technologien zu untersuchen, und verfügt über Pilotinstallationen, die die Verfolgung von Bergbausrüstung unter Tage demonstrieren.

Integration mobiler Ausrüstung

Sobald eine Kommunikationsinfrastruktur unter Tage eingerichtet ist und die mobile Ausrüstungsflotte computerisiert ist, eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten des Datenaustauschs. So können z. B. Bohrpläne und Beladefolgen an die jeweiligen Produktionsmaschinen und die Ergebnisse ihrer Arbeit online zurück übertragen werden. Doch die Integration mobiler Ausrüstung in das Produktionsleitsystem bietet noch weiteren Nutzen:

- Bereitstellung der Ergebnisse der ersten Schritte des Abbauprozesses (Geologie, Erzberechnungen, Markscheidewesen, Gruben- und Produktionsplanung) für die mobilen Systeme in einem nützlichen Format
- Abrufen der von der mobilen Ausrüstung gemeldeten Ergebnisse (Online-Produktionsstatus und Produktionsberichte, Analysen und Statistiken) und

Weiterleitung an die relevanten Benutzer

- Abrufen von Ausführungsstatistiken und Wartungsdaten von Onboard-Systemen. Einige dieser Informationen werden vom Prozessleitsystem genutzt, während andere (hauptsächlich die Wartungsdaten) an andere Instanzen wie das Wartungssystem übertragen bzw. davon erfasst werden.
- Überwachung des Online-Status von mobiler Ausrüstung einschließlich Informationen zur Ortung.

Die Schnittstellen zum Produktionsleitsystem basieren auf Branchenstandards. Die Schnittstelle zwischen den mobilen Maschinen und dem offenen ABB-Prozessleitsystem ist OPC, genauer gesagt OPC Data Access (OPC DA), die die Übertragung von Echtzeitdaten, Alarmen und Ereignissen (OPC A/E) und historischen Daten (OPC HDA) ermöglicht.

Die Datensätze und die Benennung von Objekten entsprechen dem IREDES-Standard (International Rock Excavation Data Exchange Standard). Dieser bestimmt den Datenaustausch zwischen Bergbausrüstung und Bürocomputersystemen und definiert eine gemeinsame elektronische Sprache für Bergwerkautomatisierungssysteme.

Bergwerk online: mobile Integration

Die Standortinformationen und andere Daten von mobiler Ausrüstung werden über die WLAN-Infrastruktur übertragen. Nach ihrer Konsolidierung können die Daten im offenen ABB-Prozessleitsystem angezeigt werden. Diese kombinierten Informationen liefern die Grundlage für eine präzise Online-Darstellung der laufenden

Die Kooperation von ABB und Atlas Copco ist eine ausgezeichnete Gelegenheit für beide Unternehmen. Da sich die Partner auf ihre Kernkompetenzen konzentrieren, verspricht die gemeinsame Entwicklung einen hohen Mehrwert für die Bergbauindustrie.

„Unser zukünftiges Personal benötigt eine einzige, umfassende Informationsstelle, um die Nutzung unserer Maschinen unter Tage zu optimieren. Ich bin sicher, dieses Projekt wird uns bei der Optimierung des Untertagebaus einen großen Schritt voranbringen.“

David Shellhammer

Präsident Atlas Copco
Underground Rock Excavation

Tätigkeiten und des Abbaufortschritts. Die Ausgabe dieser Analyse hilft wiederum bei der weiteren Optimierung in verschiedenen Bereichen:

- Anstatt einer vorgegebenen Routine zu folgen, kann die Belüftungssteuerung auf die tatsächlichen Bedingungen und Bedürfnisse reagieren, die aus dem Status der mobilen Ausrüstung ermittelt werden.
- Die Verfügbarkeit der mobilen Ausrüstung wird verbessert, da die Asset-Monitore Daten von den Maschinen und von der Prozessumgebung kombinieren, um eine genaue Wartungsplanung zu ermöglichen.
- Die Einhaltung der Einsatzplanung durch die mobile Ausrüstung kann online überwacht werden, und Abweichungen können als Eingaben zur Neuberechnung der Arbeiten dienen.

In Zukunft wäre ein geschlossener Regelkreis denkbar, der mobile Ausrüstung bei Bedarf automatisch umleitet oder neu

Die Lösung wird zukünftigen Bergwerksbetreibern einzigartige Prozesssteuerungsmöglichkeiten und Informationen bieten.

einplant. Allein die Tatsache, dass Informationen zur Umgebung (Verkehrssituation, Zustand der Produktionsausrüstung usw.) zusammengestellt und den Bedienern mobiler Ausrüstungen zur Verfügung gestellt werden können, hilft diesen da-

Neben der IP-Telefonie und der Datenübertragung ermöglichen WLAN-Netze unter Tage die Verfolgung von und die Kommunikation mit mobiler Ausrüstung.

bei, intelligente Entscheidungen zu treffen, wenn Planung und Realität voneinander abweichen, was im Bergbau häufig vorkommen kann.

Pilotinstallation

ABB hat gemeinsam mit dem schwedischen Unternehmen Atlas Copco Underground Rock Excavation (Atlas Copco) ein innovatives mobiles Integrationssystem unter Verwendung der ABB-Automatisierungsplattform System 800xA und Bergbaumaschinen von Atlas Copco entwickelt. Eine erfolgreiche Pilotinstallation wurde im Juni 2012 vorgestellt. Die Lösung ist derzeit im Testbergwerk von Atlas Copco in Kvarntorp, Schweden, installiert → 3. Die Technik wird Bergwerksbetreibern in Zukunft einzigartige Prozesssteuerungsmöglichkeiten und Informationen bieten.

Das Projekt integriert wichtige Daten von Untertage-Bohrgeräten, -Ladern und -Lkw von Atlas Copco in die ABB System 800xA-Plattform und ermöglicht so eine

bessere Visualisierung und Nutzung der Maschinenflotte. Durch Verfolgung der Standorte, Zustände und Betriebsbedingungen der Maschinen unter Tage liefert die Lösung die erforderlichen Infor-

mationen, die Bergwerksbetreiber benötigen, um zur richtigen Zeit die richtigen Entscheidungen zu treffen und einen möglichst reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Um den Anforderungen von Kunden und zukünftigen Bedürfnissen

der Bergbauindustrie gerecht zu werden, werden Atlas Copco und ABB dieses Konzept weiterentwickeln und um weitere Funktionalitäten ergänzen.

Stefan L. Sjöström

ABB Process Automation
Umeå, Schweden
stefan.l.sjostrom@se.abb.com

Kjell G. Carlsten

ABB Process Automation
Vasterås, Schweden
kjell.g.carlsten@se.abb.com

Krister Landernas

Jonas Neander
ABB Corporate Research
Vasterås, Schweden
krister.landernas@se.abb.com
jonas.neander@se.abb.com

Literaturhinweise

[1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Mining> (abgerufen am 26. September 2012)



OCTOPUS-Onboard

Ein System zur Bewegungsüberwachung, Reaktionsprognose und Entscheidungsunterstützung bei schwerem Wetter

LEON ADEGEEST – In Industrien wie der Offshore-Öl- und -Gasindustrie kommen heutzutage immer größere und schwerere schwimmende Produktionsanlagen zum Einsatz. Dazu müssen häufig riesige, mehrere Tausend Tonnen schwere Frachten per Schiff über große Entfernungen transportiert werden. Zum Schutz dieser wertvollen Fracht gibt es moderne

Systeme, die die Bewegungen und Reaktionen des Schiffs überwachen und der Crew dabei helfen, Wetterfenster zu analysieren und bestmögliche Entscheidungen zu treffen. Das größte und modernste bisher gebaute Schwergutschiff, die „Dockwise Vanguard“, verwendet das Überwachungs- und Prognosesystem OCTOPUS-Onboard von ABB.

1 Die Dockwise Vanguard ist in der Lage, übergroße Frachten wie Bohrtürme oder Offshore-Plattformen zu transportieren.



Mit einer Tragfähigkeit von 117.000 t, einer Länge von 275 m und einer Breite von 70 m verfügt die Dockwise Vanguard über einzigartige Fähigkeiten zum sicheren Transport von übergroßen

Die OCTOPUS-Systeme verbessern die Sicherheit und Effizienz von Schiffen, was die Kosten für die Kunden erheblich senkt.

Schwergütern wie Bohrtürmen oder Offshore-Plattformen → 1. Schiffe wie dieses ermöglichen nicht nur den Transport von komplett montierten Bauten zur Verkürzung der Inbetriebnahmezeit, sondern können auch als Trockendock für andere große Schiffe wie Bohrschiffe auf See dienen.

Titelbild

Die Dockwise Vanguard ist mit dem ABB Überwachungs- und Prognosesystem OCTOPUS-Onboard ausgerüstet.

An Bord der Dockwise Vanguard bietet das vom ABB-Unternehmen Amarcon entwickelte, modulare OCTOPUS-Onboard-System Funktionen zur Bewegungsüberwachung, Reaktionsprognose und Entscheidungsunterstützung bei schwerem Wetter. Das Drei-Sensoren-Bewegungsmessungssystem von ABB wurde ebenfalls installiert, damit kritische Bereiche wie die Fracht auf der Brücke angezeigt und von dort aus überwacht werden können. Die OCTOPUS-Systeme verbessern die Sicherheit und Effizienz von Schiffen, was die Kosten für die Kunden erheblich senkt. Sie sind Bestandteil der ABB Vessel Information and Control (VICO)

Suite, die eine vollständige Palette von Automatisierungs- und Beratungslösungen speziell für maritime Anwendungen auf der Grundlage der praxiserprobten Prozessautomatisierungstechnologien von ABB umfasst.

Die auf etwa 200 Schiffen installierten OCTOPUS-Systeme liefern praktische Informationen für die Entscheidungsfindung auf See durch kontinuierliche Überwachung, Messung und Ausgabe von Empfehlungen zu Bewegung, Zustand und Position, Kraftstoffeinsatz und Wirtschaftlichkeit, Hydrodynamik und Positionierung des Schiffs.

Das modulare OCTOPUS-Onboard-System bietet Bewegungsüberwachung, Reaktionsprognosen und Entscheidungsunterstützung bei schwerem Wetter.

Das System nutzt Wetterinformationen und -vorhersagen, um einen möglichst effizienten Schiffsbetrieb zu gewährleisten und der Crew optimale Entscheidungen bei der Lieferung und Bereitstellung der Fracht zu ermöglichen. OCTOPUS ist Bestandteil der ABB Smart Marine Initiative zur Bereitstellung von branchenspezifischen Lösungen auf der Grundlage ihrer Kompetenz in den Bereichen Schiffsantriebe, elektrische Anlagen, Automatisierungs- und Beratungssysteme.

Leon Adegeest

Amarcon, ein Unternehmen des ABB-Konzerns
Dalfsen, Niederlande
leon.adegeest@nl.abb.com



Konvergenz der Systeme

Übertragung von industrieller Überwachungs- und Steuerungstechnik auf den Betrieb von Rechenzentren

MARINA THIRY, ERIC OLSON, BOB FESMIRE – Nur wenige Branchen verzeichnen ein so rapides Wachstum wie das Rechenzentrumsgeschäft. Einfache „Computerräume“ haben sich in den letzten 20 Jahren zu hochmodernen, hochspezialisierten, eigenständigen Anlagen entwickelt. Dieses Wachstum – angetrieben vom scheinbar unerschöpflichen Verlangen der Gesellschaft, Daten zu produzieren – hat dazu geführt, dass Rechenzentren mittlerweile zu den großen Stromverbrauchern gehören. Neue Vorzeige-Rechenzentren sind zwar hoch technisiert und auf eine hohe Energieeffizienz ausgelegt, aber auf jedes dieser Zentren kommen Hunderte von durchschnittlichen Rechenzentren, die mit besonderen Herausforderungen zu kämpfen haben – manchmal auch über mehrere Standorte hinweg. Nicht selten sind die Werkzeuge, die zur Verwaltung der Anlagen eingesetzt werden, den an sie gestellten Anforderungen nicht gewachsen. So besteht ein allgemeiner Bedarf an einem vereinheitlichten Überwachungs- und Managementsystem für Rechenzentren. Decathlon, die Infrastrukturmanagementlösung von ABB für Rechenzentren, ist ein solches System.



Das Wachstum hinsichtlich der Größe, Anzahl und dem Entwicklungsstand von Rechenzentren in den vergangenen zwei Jahrzehnten ist erstaunlich.

Vor 20 Jahren hießen Rechenzentren einfach „Computer-räume“. Das Wachstum, das sie in den letzten zwei Jahrzehnten hinsichtlich ihrer Größe, Anzahl und ihrem Entwicklungsstand erfahren haben, ist erstaunlich. Mittlerweile gibt es sogar eine eigene Branche, die ausschließlich diesen Sektor bedient → 1. Große Aufmerksamkeit wird dabei bedeutenden „Playern“ wie Google, Apple und Facebook geschenkt, die mehrere Hundert Millionen Dollar in eigens dafür errichtete, hoch technisierte Einrichtungen investieren. Doch auf eine dieser Vorzeige-Anlagen kommen Hunderte, wenn nicht gar Tausende von durchschnittlichen Rechenzentren, die mit schwierigen Herausforderungen wie der Notwendigkeit zur Reduzierung der Be-

triebskosten, der Verwaltung eines wachsenden Inventars und der Überwachung mehrerer Standorte zu kämpfen haben.

Entwicklung des Rechenzentrums

In den Anfangszeiten des Internets verfügten Rechenzentren nur über geringe oder gar keine einheitliche Überwachungsmöglichkeiten. So konnte man nicht sehen, wie viel Energie von einer Anlage, geschweige denn von einem bestimmten Gerät, benötigt wurde. Auch die Auslastung von Servern war weitgehend unbekannt. Tatsächlich gab es keinen dringenden Grund, dies zu wissen, denn Energie war günstig und die Kapazität kein Problem.

Die zunehmende Verbreitung der IT und das Wachstum des Internets haben zu einem exponentiellen Anstieg der Datenspeicherung und einer entsprechenden Zunahme des Energieverbrauchs geführt. Noch vor fünf Jahren lag die Leistungsaufnahme von typischen Servern bei etwa 2,5 kW pro Rack. Heute sind es zwischen 8 kW und 30 kW pro Rack, was mit ent-

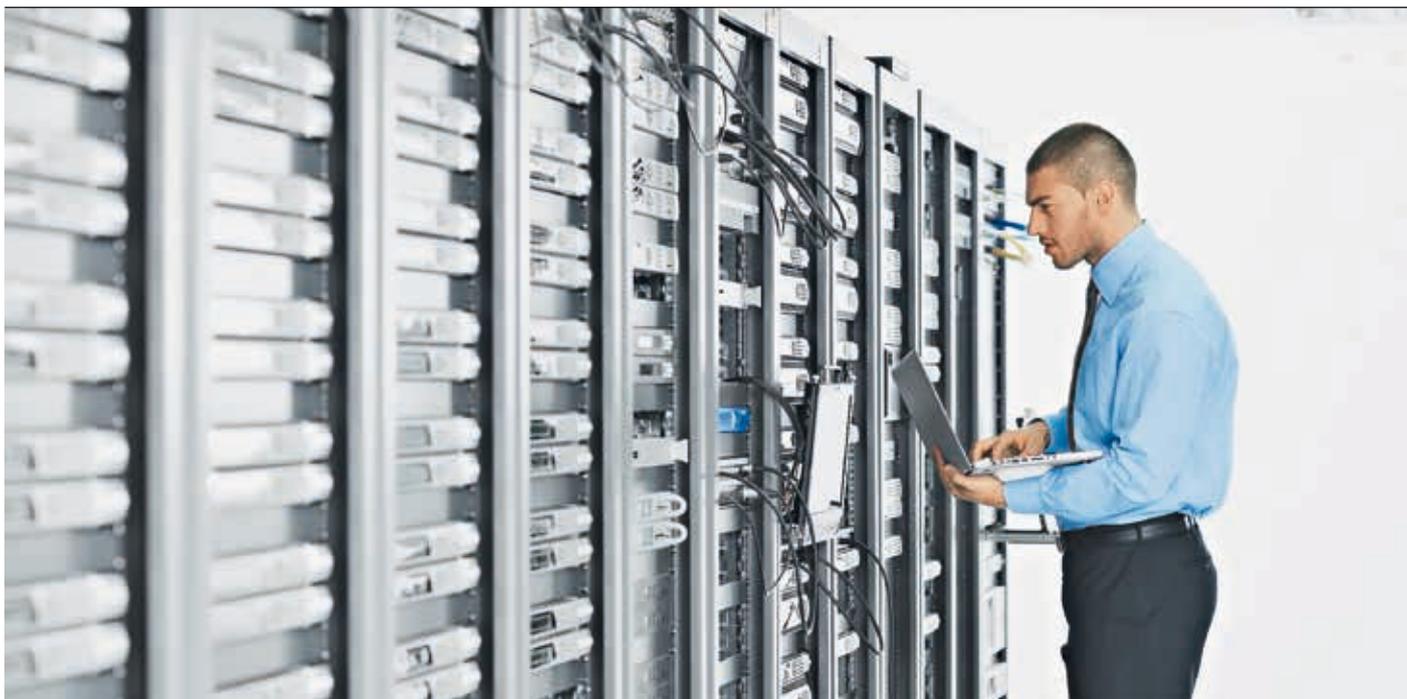
sprechend hohen Kühlanforderungen verbunden ist.

Daraufhin wurden in vielen Rechenzentren z.B. sogenannte Warmgang-/Kaltgang-Anordnungen umgesetzt, um ein Vermischen von warmer und kalter Luft zu verhindern. Hierbei handelt es sich jedoch um eine passive Lösung. Wenn es um die aktive Überwachung und Steuerung geht, sind die heutigen Systeme häufig unzureichend. Zwar sind einzelne Punktlösungen verfügbar, z.B. zum Management von Servervirtualisierungen oder zur anlagenweiten Überwachung des Energiebedarfs, doch diese Systeme sind nicht integriert, was die Komplexität erhöht und Informationslücken verursacht.

Auf anderen Gebieten hinken Rechenzentren anderen Branchen noch immer weit hinterher. Beim Asset-Management geht es z.B. darum, durch systematische Überwachung des Zustands und der Leistungsfähigkeit von Betriebsmitteln das Wartungsmanagement zu verbessern und die Betriebs- und Wartungskosten

Titelbild

Viele Rechenzentren nutzen modernste Datenspeichertechnik, werden aber von ihren Management- und Überwachungssystemen im Stich gelassen. Wie kann Decathlon, die DCIM-Lösung von ABB, dieses Problem lösen?



einer ganzen Geräteflotte zu optimieren. In der Welt der Rechenzentren beschränkt sich das Asset-Management historisch bedingt häufig auf das Festhalten des Kaufdatums und des physischen Standorts von Geräten.

ABB schätzt, dass nur rund 5–10 % der Rechenzentren über Überwachungs- und Steuerungssysteme für den Serverbetrieb, den Energieverbrauch und die Regelung der Umgebungsbedingungen verfügen. Weitere 20–40 % verfügen über gewisse Überwachungs- und Steuerungsmöglichkeiten (normalerweise für den Serverbetrieb), während die übrigen 40–65 % über wenige bis gar keine Möglichkeiten dieser Art verfügen. Dies liegt daran, dass viele ältere Einrichtungen wie einfache Büroräume – allerdings mit besonderen elektrischen Anforderungen – behandelt wurden und daher mit den bereits installierten herkömmlichen Gebäudemanagementsystemen zur Regelung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit auskommen mussten.

Infrastrukturmanagement für Rechenzentren

Es besteht also Bedarf an einem einheitlichen Überwachungs- und Managementsystem für Rechenzentren. Dieses sollte eine einzige Benutzeroberfläche besitzen, die die Komplexität, die mit dem Einsatz mehrerer Punktlösungen mit entsprechenden Schnittstellen verbunden ist, reduziert. Außerdem sollte es sowohl den Ser-

verbetrieb als auch die Kühlung, Regelung der Umgebungsbedingungen und den Energieverbrauch verwalten. Die gute Nachricht ist, dass sich die Prozessindustrie bereits mit vielen dieser Probleme auseinandergesetzt hat, d. h. die Rechenzentrumsbranche kann bei der Entwicklung ihrer eigenen Lösungen auf diese missionskritischen Systeme zurückgreifen. Dieser Bereich der Technologieentwicklung nennt sich Data Center Infrastructure Management (DCIM).

Aus strategischer Sicht geht es beim DCIM darum, das Rechenzentrum an den Geschäftszielen des Unternehmens auszurichten und eine bessere Wertschöpfung zu erzielen durch:

- Bereitstellung von Informationen zu Energieverbrauch und Leistung,
- betriebliche Entscheidungen zur Unterstützung von geschäftlichen Initiativen,
- möglichst zuverlässige und effiziente Bereitstellung von neuen Anwendungen und Webservices.

DCIM-Eigenschaften

Bei einem DCIM-System sind mehrere Eigenschaften entscheidend. Der kritischste Parameter für Rechenzentren ist die Verfügbarkeitszeit (Uptime), d. h. DCIM-Systeme müssen äußerst zuverlässig sein. Außerdem müssen DCIM-Systeme Asset-Management-Funktionalitäten bieten, die über die einfache Überwa-

chung von Servern hinausgehen. Durch den Einsatz von zustandsbasierten Wartungs- und Diagnosetools (z. B. zur Identifizierung von Servern, die in einer Schleife laufen) kann ein vergleichbares Asset-Management wie in anderen betriebsmittelintensiven Branchen erreicht werden. Da immer mehr Betreiber mehrere Rechenzentren, Computerräume und Serverschränke zu betreuen haben, ist eine standortübergreifende Transparenz ein weiteres unverzichtbares Merkmal.

Letztendlich stellt das DCIM die Darstellungs-, Entscheidungsunterstützungs- und Steuerungstechnologien zur Verfügung, die eine bessere Verwaltung des unternehmensweiten Rechenzentrumsbetriebs durch eine vereinheitlichte Sicht auf die mechanischen, elektrischen und IT-Systeme ermöglichen. DCIM-Systeme sollten den Betreibern von Rechenzentren aussagekräftige Informationen liefern, die es ihnen ermöglichen, die Kapazität zu steigern, den Betrieb zu optimieren sowie Kosten und Risiken zu senken. Decathlon, die DCIM-Lösung von ABB, stellt sich dieser Herausforderung, indem sie in mehreren Bereichen eine erhebliche Verbesserung gegenüber dem aktuellen Status Quo bietet:

Facility Management

Überwachung und Regelung von Gebäudesystemen wie Klimaanlage, Belüftung, mechanische und elektrische Systeme.

Wartungsmanagement

Wechsel von einer zeitbasierten zu einer zustandsbasierten Wartung mithilfe von automatisierten Prognosen und Diagnosen zur Erkennung und Behebung von Schwierigkeiten, bevor diese zu Problemen werden.

Power Management

Überwachung und Steuerung von Geräten, elektrischen Systemen und Zählern einschließlich Schaltanlagen, Mikronetzen und Stromerzeugungsanlagen vor Ort zur Gewährleistung einer sicheren und zuverlässigen Stromverteilung und -nutzung.

Energiemanagement

Verbindet Echtzeit-Verbrauchsdaten mit Versorgungsvertragsinformationen, Echtzeit-Preisen und verbraucherseitigem Lastmanagement (Demand Response) zur Optimierung der Energiekosten.

Ressourcenprognose und Energieplanung

Services von Drittanbietern bieten einen zusätzlichen Mehrwert durch Optimierung der Energiewertschöpfungskette und die Möglichkeit zur Teilnahme an Energiemärkten. Ein Beispiel hierfür ist Global Energy Intelligence®, ein in Decathlon integrierter, abonnementbasierter Service von Power Assure, der Servermetriken, IT-Analysen und -Prognosen, weltweite Energiemarktintegration, Demand Response, Systemdienstleistungen, Energiepreisbestimmung und -prognosen bietet.

Asset- und Kapazitätsplanung

Die DCIM-Suite von Nlyte Software wurde ebenfalls in Decathlon integriert. Sie hilft dabei, Platz-, Energie- und Kühlkapazitäten durch intelligente Platzierung von IT-Betriebsmitteln zu optimieren. Außerdem bietet sie Funktionen zur Modellierung von Was-wäre-wenn-Szenarios und zur Automatisierung und Verwaltung von Workflow-Prozessen.

Fehlerbeseitigung

Ursachenanalysen und Alarmmanagement liefern detaillierte Leistungsdaten für den gesamten Rechenzentrumsbetrieb.

Steuerung und Automatisierung

Ermöglicht eine Optimierung der Leistungsfähigkeit der Einrichtung und der IT auf Geräte- und Systemebene.

Fernüberwachung

Echtzeit-Überwachung aller Betriebsmittel und Umgebungsbedingungen.

Argumente für DCIM

Der Bedarf an entsprechenden Darstellungs-, Entscheidungsunterstützungs- und Steuerungstechnologien für eine schnelle Reaktion in Rechenzentren ist eindeutig, und DCIM bietet eine Lösung für den Flickenteppich aus Punktlösungen, auf den viele Zentren heute vertrauen. DCIM ist noch recht neu, doch es haben sich einige übergeordnete Konzepte herauskristalliert, die aller Voraussicht nach die Entwicklung dieser Systeme bestimmen werden.

Transparenz und bessere Kontrolle

Das Wesentliche beim DCIM ist die Bestimmung einer realistischen Bemessungsgrundlage für den Energieverbrauch des Rechenzentrums durch umfassende Echtzeit-Überwachung, damit die Betreiber wissen, wann, wo und wie viel Energie verbraucht wird. Mithilfe dieser Informationen können dann taktische Maßnahmen zur Optimierung der Ressourcen und zur Vorhersage der Energieanforderungen getroffen werden.

Konsolidierung von Ressourcen

DCIM-Systeme nutzen eine bessere Transparenz zusammen mit leistungsstarken Analysen, um Ressourcen zu konsolidieren, Verschwendungen zu vermeiden und so vorhandene Kapazitäten optimal zu nutzen. Dies führt zu Einsparungen bei der Hardware (z. B. weniger Server) und der Anlage selbst (z. B. Energie, Kühlung und Platz) sowie zu einer geringeren Umweltbelastung.

Leistungsoptimierung

DCIM hilft durch bessere Transparenz und Steuerung dabei, die realen Zustände im Rechenzentrum aufzudecken, Verfügbarkeiten zu steigern, Energie-, Kühl- und Platzkapazitäten zu maximieren, Betriebsabläufe zu optimieren und das Risiko für das gesamte Unternehmen zu reduzieren.

Gebäude- und IT-Automatisierung

DCIM-Systeme können bei Aufgaben wie der Lastverschiebung und der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsregelung sowie bei der Überwachung anderer Parameter (z. B. Schwingungen in HLK-Anlagen) helfen, um Ausfällen vorzubeugen.

Was kommt als Nächstes?

Für die meisten Rechenzentren, die nicht die Vorzüge hochmoderner Systeme und einer ebensolchen Bauweise genießen, ist ein schrittweiser Ansatz zur Verbesserung des Betriebs ratsam.

Eine Zustandsbeurteilung ist immer ein guter erster Schritt. Sie zeigt, wo unmittelbare Verbesserungen (z. B. Energieeinsparungen) erzielt werden können. Außerdem wird die anschließende Einführung eines DCIM-Systems erleichtert, wenn der Betreiber weiß, was er vom System will.

Nachrüstungen sollten mit einfachen Initiativen mit kurzer Amortisationszeit (d. h. weniger als ein Jahr) beginnen. Diese können die Erhöhung der zulässigen Raumtemperatur oder die Installation von drehzahlgeregelten Lüftern im Kühlsystem beinhalten.

Großes Entwicklungspotenzial für das DCIM liegt z. B. in der Möglichkeit, die Arbeitslast von Rechenzentren von einem Standort zum anderen zu verlagern, um Unterschiede in den Energiepreisen zu nutzen. Diese unmittelbare Verlagerung der „Produktion“ ist etwas, wovon Unternehmen der „Old Economy“ nur träumen können. Konzepte wie diese werden die Entwicklung von DCIM-Systemen vorantreiben und eine zentrale Rolle bei der vollständigen Entfaltung des Potenzials solcher Systeme auf ihrem Weg zu einem festen Bestandteil jedes Rechenzentrums spielen.

Marina Thiry

ABB Inc
Menlo Park, CA, USA
marina.thiry@us.abb.com

Eric Olson

ABB Inc
Warminster, PA, USA
eric.olson@us.abb.com

Bob Fesmire

ABB Inc
Cary, NC, USA
bob.fesmire@us.abb.com

Literaturhinweise

- [1] Datacenter Dynamics Inc (Juli 2012): „Datacenter Dynamics Global Industry Census 2012“.
<http://www.datacenterdynamics.com/focus/archive/2012/07/datacenterdynamicsindustry-census-data-center-industry-robust>





Virtuelle Helfer

Emulation von Schnittstellen zwischen Steuerung und Subsystemen mithilfe von SoftCI

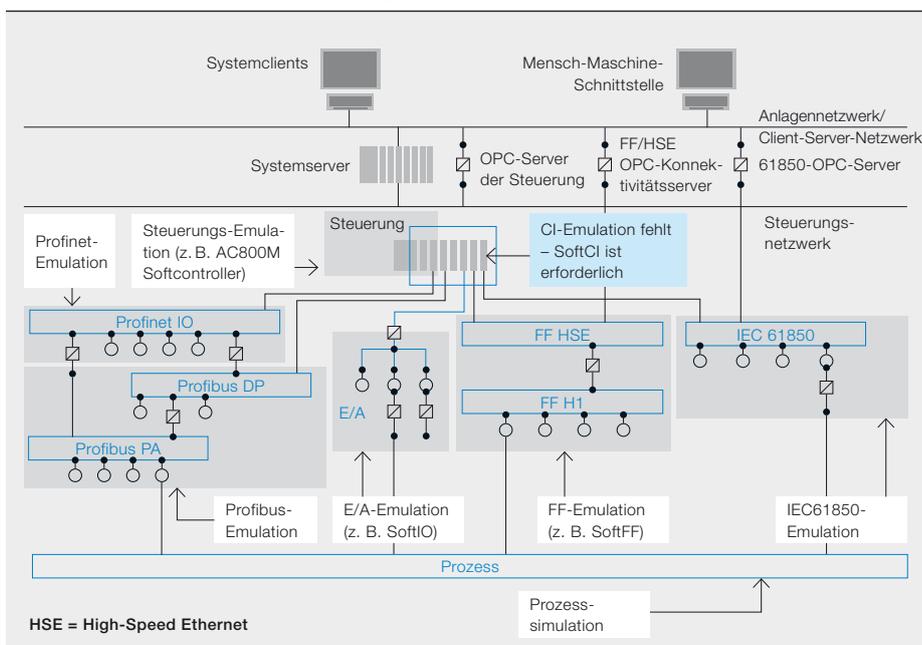
MARIO HOERNICKE, TRYGVE HARVEI – Eine moderne Industrieanlage ist ein unglaublich komplexes und ausgeklügeltes Gebilde: Hunderte oder gar Tausende von Sensoren, Messgeräten und verschiedenen intelligenten Feldgeräten tauschen Daten mit Automatisierungscontrollern in einem riesigen, präzise koordinierten Datenstrom aus. Eine vollständig hardwarebasierte Testinfrastruktur für ein solch komplexes System aufzubauen, ist ein Ding der Unmöglichkeit. Also verwendet man Softwareemulatoren, um die vorhandenen Subsysteme nachzubilden. Im Laufe der Jahre sind diese immer weiter verbessert worden, doch was noch immer fehlt, ist eine zufriedenstellende Methode, um die Schnittstellen zwischen den Subsystemen und der übergeordneten Steuerung nachzubilden. Das Ergebnis einer Forschungsinitiative, die zur Lösung dieses Problems ins Leben gerufen wurde, heißt SoftCI und soll die Kommunikationsschnittstellen von AC800M-Controllern bei Integrations- und Werksabnahmeprüfungen ersetzen.

Titelbild

Die Emulation der Leittechnikumgebung einer komplexen Industrieanlage wie dieser Flüssigerdgasanlage in Norwegen in Software und Hardware ist eine schwierige Aufgabe. Ein neuer Emulator, der Subsystemschnittstellen treffend nachbildet, erleichtert diese Aufgabe.

Jedes System muss getrennt in seinem eigenen Kontext ohne Berücksichtigung von System- oder Kommunikationsaspekten geprüft werden.

1 Emulatoren für Prozessleitsystem-Hardware heute: SoftCI wird für die Kommunikation zwischen den Komponenten benötigt.



Eine vollständige Prozessanlage kann natürlich nicht im Labor nachgebaut werden, um neue Automatisierungssysteme zu testen. Also werden die Funktionen der Anlage in Hard- und Software nachgebildet (emuliert). Während ein Großteil der Anlagenfunktionalität mittlerweile erfolgreich imitiert werden kann, sieht dies bei der Kommunikation zwischen dem Emulator für die Steuerung und den Emulatoren für die Subsysteme anders aus. Aufgrund der zunehmenden Verwendung von Feldbussen und Ethernet in Anlagen und der

roller Interfaces, CI) mit dem Namen SoftCI. Hierzu wurde ein Software Development Kit (SDK) implementiert, das es dem Benutzer erlaubt, die CI-Emulation in vorhandene Subsystem-Emulatoren zu integrieren oder eigenständig im Standalone-Modus auszuführen. Mithilfe von SoftFF [2], einem Foundation-Fieldbus-Simulator, kann die Integrität der Emulation verifiziert werden.

SoftCI-Umgebung

Bei einer Werksabnahme (Factory Acceptance Test, FAT) muss das gesamte System umfassend nachgebildet werden, um die Konsistenz des Engineerings zu prüfen. Alles, was nicht auf einem Standard-PC ausgeführt werden kann, wird auf einem Emulator ausgeführt. Verschiedene Emulatoren bilden dabei unterschiedliche Subsysteme und Feldbusse nach → 1. So gibt es z. B. eine – SoftSPS für IEC61131-3-Code [3]. Heute muss jedes System getrennt in seinem eigenen Kontext ohne Berücksichtigung von System- oder Kommunikationsaspekten geprüft werden.

Da verschiedene CIs häufig ähnliche Kommunikationsfunktionen besitzen, könnte ein generisches Kommunikationskonzept viele CI-Typen abdecken.

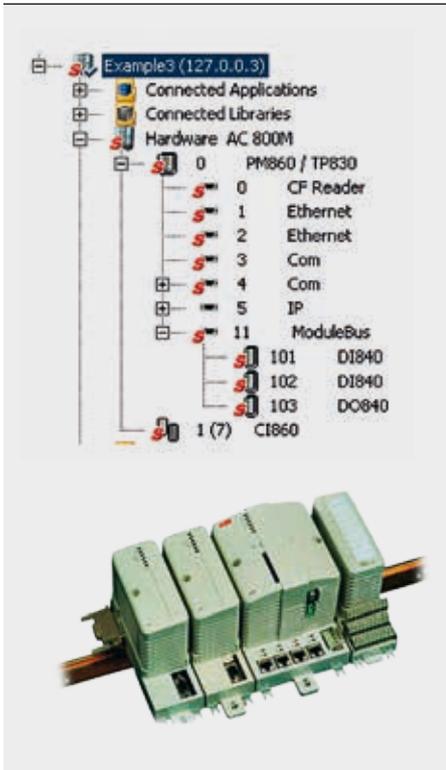
kritischen Bedeutung einer fehlerfreien Kommunikation stellt dies ein bedeutendes Problem dar.

Ziel der NGFAT-Initiative (Next Generation Factory Acceptance Test) ist es, dieses Problem zu lösen [1]. Zu den Zielsetzungen der Initiative gehört die Entwicklung einer generischen Emulation für Controller-Kommunikationsschnittstellen (Cont-

roller Interfaces, CI) mit dem Namen SoftCI. Hierzu wurde ein Software Development Kit (SDK) implementiert, das es dem Benutzer erlaubt, die CI-Emulation in vorhandene Subsystem-Emulatoren zu integrieren oder eigenständig im Standalone-Modus auszuführen. Mithilfe von SoftFF [2], einem Foundation-Fieldbus-Simulator, kann die Integrität der Emulation verifiziert werden.

Vor diesem Hintergrund wurde SoftCI entwickelt. SoftCI emuliert die vertikale Kommunikation zwischen den Emulatio-

2 Topologie des AC800M. Hier die Verwendung eines FF-Kopplers



nen der Steuerung und der Subsysteme. Eine Anlage besitzt normalerweise eine Vielzahl von Subsystemen, die viele verschiedene Aufgaben übernehmen, aber nur Steuerungen eines bestimmten Typs. Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des SoftCI-Konzepts wurde das Augenmerk auf den AC800M-Controller von ABB gelegt.

Im Blickpunkt: AC800M

Der AC800M-Controller beinhaltet Eingabe-/Ausgabe-Module (E/A-Module), aber auch Feldbus- und Subsystemkoppler – die CIs. Ein Koppler ist eine spezielle Komponente zum Anschluss des physischen Feldbusses auf Geräteebene → 2.

Ein Schnittstellenmodul vom Typ CI860 übermittelt z.B. Daten zwischen dem AC800M und einem Foundation-Fieldbus-Gerät (FF). Dabei verwendet es eine Tabelle, um die IEC61131-Variablen des Leitsystems auf FF-Signale abzubilden. Während IEC61131-Variablen mit der Steuerungsanwendung verbunden sind, stellt FF das Gegenstück innerhalb des entsprechenden Engineering-Werkzeugs FieldBus Builder FF (FBB FF) dar. Die FF-Signale werden mithilfe von FBB FF mit den FF-Funktionsbausteinen verknüpft. Dadurch, dass das Signal mit den Funktionsbausteinen und die

3 Eigenschaften von Foundation Fieldbus CI860 und IEC61850 CI868 mit dem mit Control Builder M (CBM) in den CIs vorgenommenen Mapping

Foundation Fieldbus (CI860)

Channel	Name	Type
QW1.0	FF Real Publish 0	RealIO
IW1.3072	FF Real Subscribe 0	RealIO

Variable	Protocol Info
Application_1.Program1.ToFF	ToFF
Application_1.Program1.FromFF	FromFF

IEC61850 (CI868)

Channel	Name	Type	Variable	Protocol Info
WS.2.1.1	MV1	RealIO		
WS.2.1.2	MV2	RealIO		
WS.2.1.3	MV3	RealIO		
WS.2.1.4	MV4	RealIO		
WS.2.1.5	MV5	RealIO		
WS.2.1.6	IO1	RealIO		

Channel	Name	Type	Variable	Protocol Info
QWS.1.1.6.1	Op	RealIO		
QWS.1.1.6.2	Tr1	RealIO		
QWS.1.1.6.3	Tr2	RealIO		
QWS.1.1.6.4	Tr3	RealIO		

Eigenschaften

- Eine CI für Eingangs- und Ausgangsvariablen
- FF-Signale werden in 1131-Variablen kopiert (und umgekehrt)
- Das Mapping wird in einer einzigen Tabelle für jede CI konfiguriert

- Eine CI für Eingangs- und Ausgangsvariablen
- IEC61850-Signale werden in 1131-Variablen kopiert (und umgekehrt)
- Für jedes IED wird eine separate Mapping-Tabelle erstellt
- IEDs im Feld sind immer Eingänge
- AC800M wird als IED behandelt
- Das AC800M IED ist immer ein Ausgang

IEC61131-Variable mit der Steuerung verknüpft ist, kann der Ingenieur durch Mapping des Signals und der Variable in der Mapping-Tabelle einen Austausch von Werten zwischen dem AC800M und FF realisieren.

Ein weiteres Beispiel eines CI ist das CI868 für IEC61850-Netze [4]. Hier sieht die Struktur unterhalb des CI anders aus als bei FF. Das CI enthält eine getrennte Mapping-Tabelle für jedes IED (Intelligent Electronic Device), das mit der Steuerung verbunden ist. In dieser Tabelle können die vom Subsystem kommenden Signale wie bei FF auf die Leitsystemvariablen abgebildet werden.

Abgesehen davon, dass für FF eine einzige Tabelle und für IEC61850 mehrere Tabellen verwendet werden, ist das Schema des CI gleich → 3.

Da verschiedene CIs häufig ähnliche Kommunikationsfunktionen besitzen, könnte ein generisches Kommunikationskonzept viele CI-Typen abdecken. Die meisten CIs werden z. B. verwendet, um Werte von IEC61131-Variablen in Subsystemsignalen umzuwandeln, und bieten keine zusätzliche Funktionalität. Somit könnte ein konfiguriertes CI als Mapping-Tabelle modelliert werden.

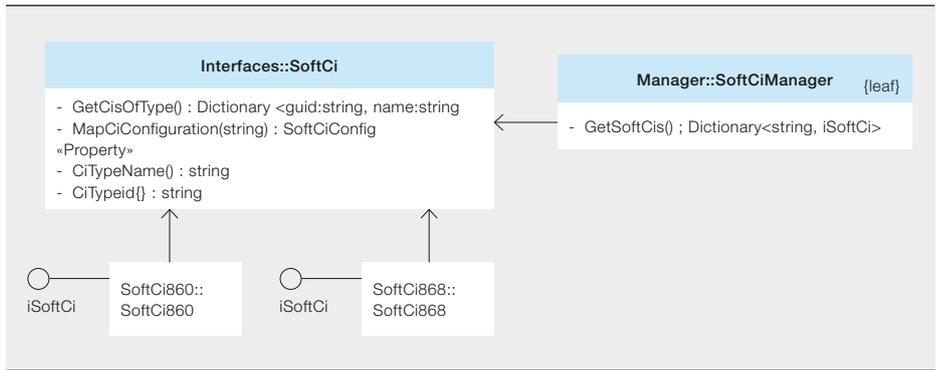
Das CI-Modell ist nicht das einzige, was entwickelt werden muss. Zur Laufzeit muss eine generische Kommunikationsmethode Werte mit dem AC800M austauschen. Dies ist für jede Art von CI erforderlich, da die CIs stets Daten mit dem AC800M austauschen. Es ist sozusagen eine Kommunikation mit dem Subsystem-Emulator auf Feldebene erforderlich. Die Subsystem-Emulation hängt von der Art des jeweiligen Subsystems ab. Sie kann ABB-spezifisch, Open-Source-basiert oder drittanbieterspezifisch sein und eine „offene“ oder „geschlossene“ Eigenschaft besitzen.

Offene Emulatoren können um weitere Funktionalitäten erweitert werden. So könnte das SoftCI in den Subsystem-Emulator integriert werden und die Werte der Variablen des AC800M direkt mit den Werten der Variablen des Subsystem-Emulators austauschen. Das CI-Modell wird innerhalb der Subsystem-Emulation ausgeführt.

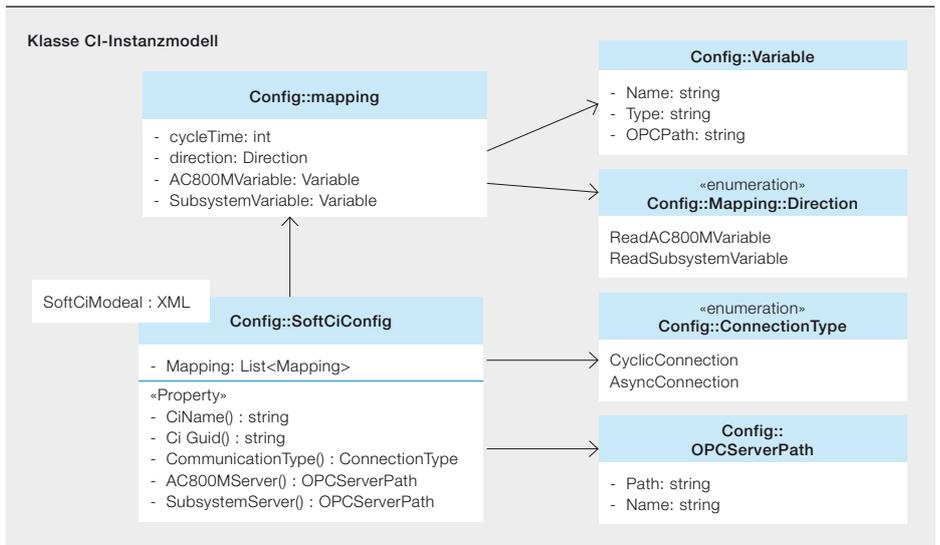
Geschlossene Emulatoren erlauben keine erweiterte Funktionalität. Da diese aber trotzdem mit SoftCI verwendbar sein sollten, muss eine andere vertikale Standardkommunikationsmethode betrachtet werden. Dies bedeutet, dass SoftCI in der Lage sein muss, CI-Modelle im

SoftCI emuliert die vertikale Kommunikation zwischen den Emulationen der Steuerung und der Subsysteme.

4 CI-Modell für einen spezifischen Typ



5 CI-Modell für eine spezifische Instanz



Stand-alone-Modus auszuführen. Außerdem müssen CI-Modelle ggf. manuell entwickelt und daher in einer von Menschen interpretierbaren Form gespeichert werden.

Generische CI-Emulation

Damit sind die Grundlagen für die Entwicklung generischer Funktionalitäten zur Emulation von CIs verschiedenen Typs gelegt.

CI-Modelle

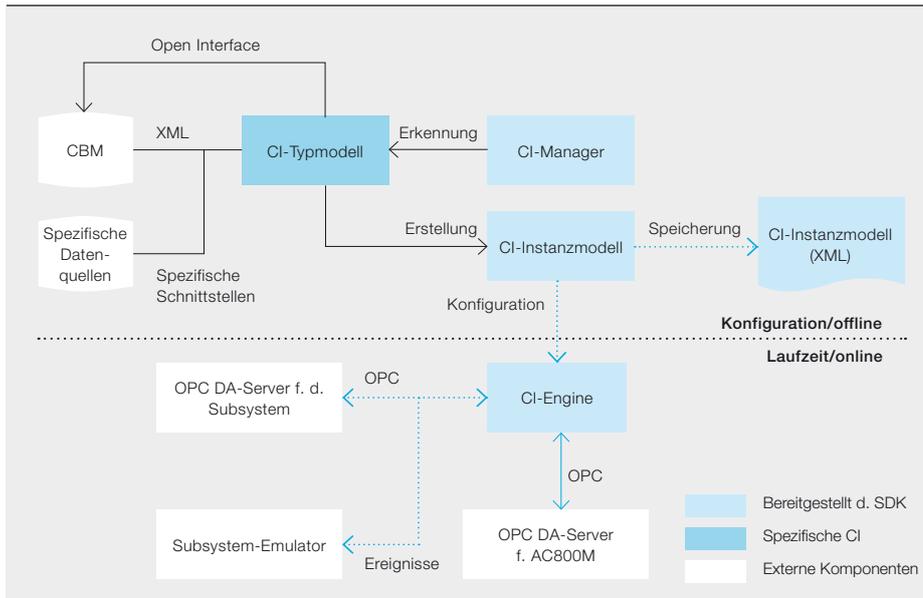
Ein bedeutender Teil der Funktionalität ist die Erstellung von CI-Modellen. CI-Modelle bestehen aus zwei Teilen, von denen einer den CI-Typ und der andere die CI-Instanz beschreibt. Das Modell für den CI-Typ wird einmal erstellt und ist für jede Instanz gleich, während das Instanzmodell für jede Instanz separat erstellt wird.

Das Meta-Modell für einen CI-Typ wird als .NET-Schnittstelle bereitgestellt, die in eine Klasse implementiert werden kann → 4. Es besteht hauptsächlich aus den beschreibenden Eigenschaften, dem

Namen und der ID des CI-Typs sowie einer Methode zum Aufrufen der Instanzen des beschriebenen Typs vom 800xA Engineering-Arbeitsplatz. Ist eine automatische Erstellung von Instanzmodellen gewünscht, kann eine Methode zur Erstellung des Modells implementiert werden. Dann ist SoftCI in der Lage, die Instanzen zu erkennen und die Modelle für die Instanzen ohne Interaktion mit dem Benutzer zu erstellen.

Das Meta-Modell für die Instanzen wird in Form von .NET-Klassen bereitgestellt, kann aber in XML gespeichert werden → 5. Das Meta-Modell verwendet keine Methoden, sondern nur Dateneigenschaften zur Beschreibung der jeweiligen Instanz. Im Allgemeinen handelt es sich hierbei um die Darstellung der Mapping-Tabelle aus Control Builder M (CBM).

Neben der Mapping-Tabelle aus CBM werden der Name und die ID der CI-Instanz beschrieben. Damit kann SoftCI dem Benutzer anzeigen, welche Instanzen zurzeit emuliert werden. Darüber hinaus



muss der Kommunikationstyp der CI-Instanz beschrieben werden. Die Kommunikation kann je nach Kommunikationsmethode des Subsystems azyklisch oder zyklisch sein. Auch Mischungen aus beidem sind erlaubt.

CI-Kommunikation

Wie oben erwähnt, muss eine Methode zur Kommunikation mit dem AC800M-Softcontroller gefunden werden, d. h. die Kommunikationsparameter für eine Instanz müssen modelliert werden.

Als Kommunikationsmethode wurde OPC Data Access (DA) gewählt. OPC DA wird vom AC800M-Softcontroller unterstützt und ist normalerweise für die jeweilige Hardware und das Produktionssystem vorkonfiguriert. Somit ist für die Emulation keine Neukonfiguration erforderlich. Da innerhalb des Prozessleitsystems mehrere OPC-Server zur Anwendung kommen können, müssen der Name und der Pfad zum AC800M OPC-Server für die betreffende Controller-Instanz im Instanzmodell beschrieben sein.

SoftCI-Module

Das SoftCI-SDK besteht aus einer Reihe von Softwaremodulen → 6. Neben dem Modell steht ein CI-Manager zur Verfügung, der zur Identifizierung von CI-Typmodellen verwendet werden kann. Es ist möglich, dass mehrere Typen innerhalb eines einzigen Prozessleitsystems für eine Anlage verwendet werden. Der Manager ist in der Lage, diese zu erkennen und automatisch ohne Interaktion mit dem

Benutzer die jeweiligen Instanzmodelle zu erstellen.

Die mit dem SDK gelieferten Modelle werden als Klassenbibliotheken bereitgestellt, die zur schnellen Erstellung einer CI-Emulation innerhalb von Subsystem-Emulatoren genutzt werden können. Außerdem steht eine kleine, einfache Benutzerschnittstelle zur Verfügung, die zur Ausführung der CI-Emulation im Stand-alone-Modus verwendet werden kann.

Prüfungen

Das beschriebene Konzept wurde erfolgreich durch Implementierung einer CI-Emulation für FF getestet. Auch in Verbindung mit einer IEC61850-Emulation hat sich das Konzept bewährt. Ein Prototyp von SoftCI868 wurde implementiert, und der Austausch von Werten zwischen der IEC61850-Emulation und dem AC800M-Softcontroller funktioniert.

Auf dem Weg zur virtuellen Anlage

SoftCI ist ein SDK, das generische Emulationsfunktionalität für AC800M-Kommunikationsschnittstellen bietet und damit einen weißen Fleck auf der Landkarte der Emulatoren füllt. Auch wenn es nicht für alle Arten von CIs einsetzbar ist, wird doch die Mehrheit der CI-Typen abgedeckt. SoftCI860 wurde bereits in SoftFF implementiert und steht zur Verwendung im Rahmen von Integrations- und Werksabnahmeprüfungen zur Verfügung (ein erstes Pilotprojekt läuft zurzeit).

Ein Schnittstellenmodul vom Typ CI860 übermittelt z. B. Daten zwischen dem AC800M und einem Foundation-Fieldbus-Gerät (FF).

SoftCI stellt einen evolutionären Schritt in Richtung einer umfassenden virtuellen Inbetriebnahme für das ABB 800xA Extended Automation System dar – und damit einen weiteren wichtigen Schritt zur Perfektion der virtuellen Anlage.

Mario Hoernicke

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

Trygve Harvei

ABB Process Automation
Oslo, Norwegen
trygve.harvei@no.abb.com

Literaturhinweise

- [1] Hoernicke, M., Greifeneder, J. (2011): „Next Generation Factory Acceptance Test“. *Annual Report ABB Corporate Research Germany*: 83–89
- [2] Hoernicke, M., Weemes, P., Hanking, H.: „Feldbusprüfung ohne Feld: Soft FF senkt den Inbetriebnahmeaufwand durch Simulation von Foundation Fieldbus“. *ABB Review* 1/2012: 47–52
- [3] IEC61131-3: *Programmable controllers – Part 3: Programming languages*. Edition 2.0, 2003
- [4] IEC61850: *Communication networks and systems in substations*, 2003



CRIM

Bestimmung der besten Instandhaltungsstrategie für komplexe Prozessanlagen

KARI SAARINEN, SHIVA SANDER TAVALLAEY, PATRIK M. WESTERLUND – Der Wechsel von einer reaktiven zu einer präventiven Instandhaltungsstrategie kann in vielen Industriezweigen erhebliche Kosteneinsparungen einbringen. In der Prozessindustrie umfassen Anlagen häufig viele Tausend Elemente, die instand gehalten werden müssen, was eine rein präventive Instandhaltungsstrategie unpraktisch oder gar unmöglich macht. Wie lässt sich in solchen Fällen die optimale Mischung aus beiden Instandhaltungsstrategien ermitteln? CRIM (CRIticality-analysis-based Maintenance) liefert eine systematische Instandhaltungsplanungsmethode zur Identifizierung kritischer Betriebsmittel und geeigneter präventiver Instandhaltungspläne unter Berücksichtigung von Umgebungs- und Prozessbedingungen. Grundlage der Methode ist eine schnelle Kritikalitätsanalyse der Anlagenausrüstung mit einer anschließenden Lebenszykluskostenanalyse.



CRIM liefert eine kostengünstige Instandhaltungsstrategie für die gesamte Anlage durch die systematische Anwendung von Kritikalitätsanalysen, Lebenszykluskostenanalysen und Lebensdauerschätzungen.

Der Begriff „Instandhaltungsoptimierung“ umfasst eine Vielzahl verschiedener Ansätze, die von einfachen erfahrungsbasierten „Faustregel-Methoden“ bis hin zu komplexen systematischen Methoden reichen. Zu den einfachen Methoden gehören der Betrieb bis zum Ausfall (Run-to-Failure, RTF), eine Methode, die sich für redundante Betriebsmittel und solche mit einer sehr geringen Ausfallrate eignet; die zeitabhängige Instandhaltung (Time-Based Maintenance, TBM), die sich besonders

eignet, wenn eine regelmäßige Überholung bzw. ein regelmäßiger Austausch des Betriebsmittels im Vergleich zu den Kosten eines Ausfalls günstig ist und eine einzige, bekannte Ausfallart vorherrscht; und die zustandsabhängige Instandhaltung (Condition-Based Maintenance, CBM), die kostengünstigste Methode für kritische Betriebsmittel.

Zu den komplexeren Methoden gehören die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung (Reliability-Centered Maintenance, RCM), die genaueste Methode zur Bestimmung des richtigen proaktiven Instand-

haltungsansatzes für eine hohe Systemverfügbarkeit, und TPM (Total Productive

Die Kritikalitätsfaktoren werden im Einvernehmen mit den Instandhaltungs- und Prozessexperten bestimmt.

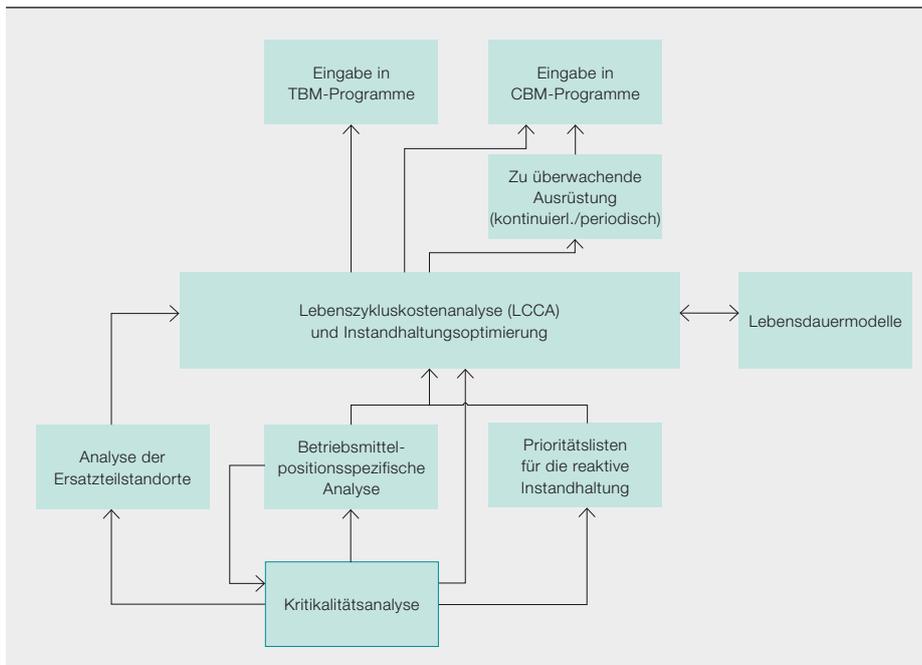
Maintenance), die Integration der Instandhaltung in den Fertigungsprozess – ein Konzept, das umfassende Qualitätsmanagement- und proaktive Instandhaltungsstrategien kombiniert, um eine maximale Produktionseffizienz zu gewährleisten. RCM ist ein eher „gewichtiger“ Ansatz, während sich TPM vornehmlich auf die Maximierung des Maschinen-

Titelbild

In einer Anlage mit vielen Tausend Geräten (wie diese Eisenerz-Pelletieranlage) kann die Wahl der richtigen Instandhaltungsstrategien knifflig sein. CRIM hilft bei der Bestimmung geeigneter Instandhaltungspläne.

Die Kritikalitätsanalyse beinhaltet die quantitative Beurteilung von Ereignissen und Fehlern sowie deren Klassifizierung nach der Schwere der Folgen.

1 Ablaufdiagramm des CRIM-Prozesses



durchsatzes konzentriert – d.h. keine der beiden Methoden eignet sich in dem hier betrachteten Kontext. Hier kommt die CRIM-Methode von ABB in Spiel. Sie ermöglicht die Bestimmung einer kostengünstigen Instandhaltungsstrategie für die gesamte Anlage durch systematische Anwendung von Kritikalitätsanalysen (CA), Lebenszykluskostenanalysen (LCCA) und Lebensdauerschätzungen.

Der zweite Schritt im CRIM-Prozess ist die LCCA. Sie wird für kritische Objekte durchgeführt, um zu sehen, welche Vorteile bestimmte Instandhaltungsprogramme für dieses Objekt bieten → 1.

Kritikalitätsanalyse

Kritikalität ist ein relatives Maß für die Folgen eines Ausfalls. Dementsprechend beinhaltet eine Kritikalitätsanalyse die quantitative Beurteilung von Ereignissen und Fehlern sowie deren Klassifizierung nach der Schwere der Folgen. Mit anderen Worten, es werden bei diesem Ansatz nur die Folgen von Ausfällen beurteilt.

Die Wahrscheinlichkeiten von Ausfällen werden später in der LCCA berücksichtigt.

Mit einem wohldefinierten Prozess und den richtigen Werkzeugen lassen sich Tausende von Betriebsmitteln auf kostengünstige Weise beurteilen.

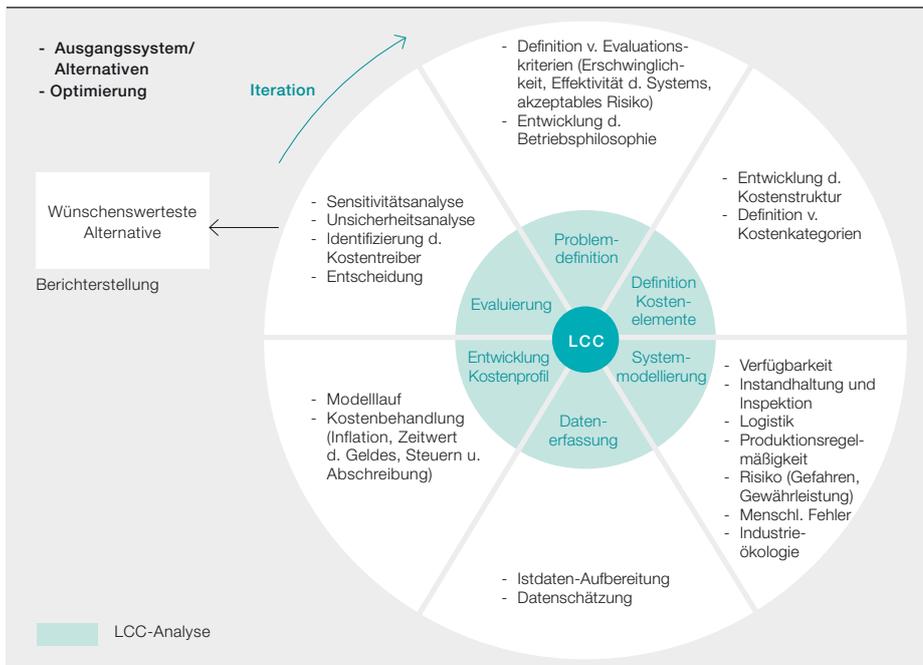
Vor Beginn der Kritikalitätsanalyse bittet der Projektbegleiter von ABB den Kunden, eine Liste aller zu analysierenden Betriebsmittelpositionen in das CA-Werkzeug zu laden. Beim CA-Team-Meeting stellt der Projektbegleiter eine Reihe sorgfältig ausgewählter Fragen zu jeder Position und wählt auf der Grundlage der Ant-

Anhand einer Reihe sorgfältig ausgewählter Fragen wählt der Projektbegleiter die Kritikalitätsstufen für jeden Kritikalitätsfaktor.

CRIM

Der CRIM-Prozess beginnt mit einer Kritikalitätsanalyse – ein wichtiger Vorgang bei jeder Instandhaltungs- und Zuverlässigkeitsmethode → 1. Die CA liefert die Grundlage für die Bestimmung des Werts und der Auswirkung bestimmter Betriebsmittel auf die Sicherheit von Menschen, der Umwelt und des Produktionsprozesses. Darüber hinaus bestimmt die CA das Maß an Aufmerksamkeit, das ein Betriebsmittel in Bezug auf die Instandhaltungsstrategie und -taktik benötigt.

2 Darstellung eines LCC-Konzepts [1]



Der Unterschied zwischen Produktionsverlusten durch Betriebsmittelausfälle und Verlusten durch präventive Instandhaltungsmaßnahmen ist das Schlüsselement der Analyse.

Die LCCA ist ein kollektives Verfahren mit dem Ziel, die Kosten und die Rentabilität eines Systems oder Betriebsmittels über seine Lebensdauer hinweg zu berechnen.

worten die Kritikalitätsstufen für jeden aufgeführten Kritikalitätsfaktor. Diese Faktoren werden zuvor in Besprechungen mit den Instandhaltungs- und Prozessexperten bestimmt. Die endgültige Kritikalitätsstufe, die für jedes Betriebsmittel automatisch generiert wird, berücksichtigt sämtliche Aspekte wie Ausfallzeit, Reaktionszeit der Produktion, Kapazität, Qualität, Umwelt, Sicherheit und Energieverluste im Falle eines Betriebsmittelausfalls sowie mögliche sekundäre Effekte. Aus all diesen Informationen wird ein CA-Bericht erstellt.

Lebenszykluskostenanalyse

Die LCCA ist ein kollektives Verfahren, das eine Vielzahl von verschiedenen Analysen umfasst. Ziel der LCCA ist die Be-

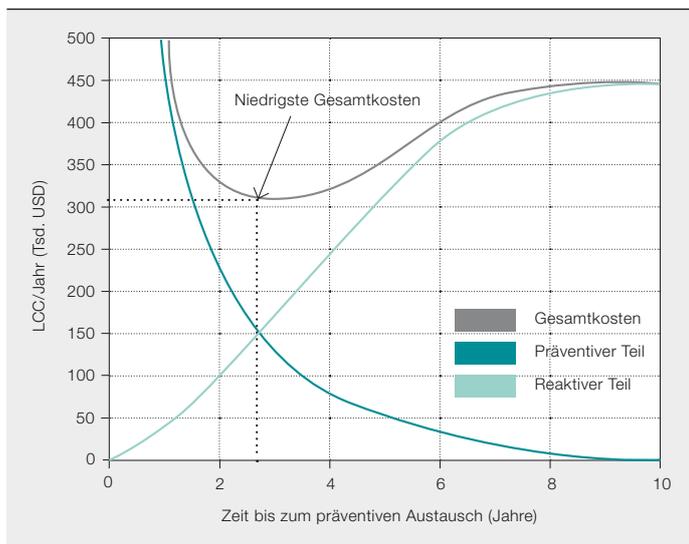
rechnung der Kosten und der Rentabilität eines Systems oder Betriebsmittels über seine Lebensdauer hinweg einschließlich Forschung und Entwicklung, Herstellung, Betrieb, Instandhaltung und Entsorgung → 2. Die LCCA beginnt wie in der Abbildung dargestellt mit der Problemdefinition und setzt sich im Uhrzeigersinn auf iterative Weise fort, bis alle im ersten Prozess definierten Kriterien erfüllt sind.

Im Fall von CRIM besteht das Problem darin, die durchschnittlichen minimalen langfristigen Instandhaltungskosten pro Zeiteinheit für reaktive, zeitabhängige und zustandsabhängige Instandhaltungsstrategien zu bestimmen.

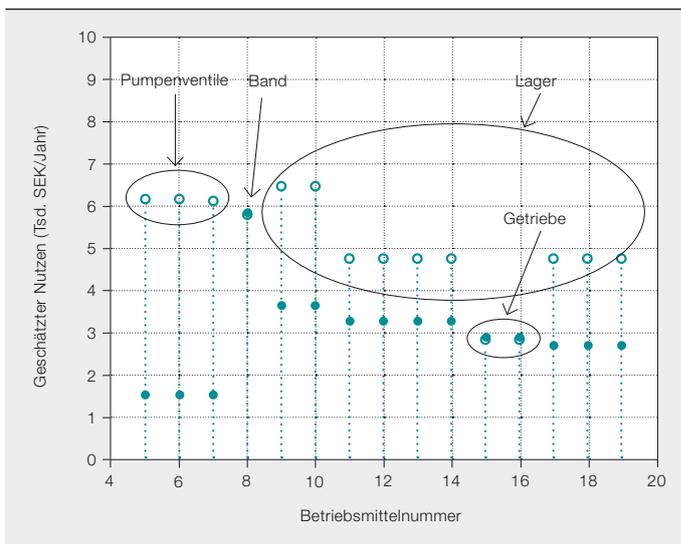
Das hier angewandte LCCA-Konzept berücksichtigt nur die mit der gewählten Instandhaltungsstrategie für das betreffende Betriebsmittel verbundenen Kosten. Folglich sind die einzigen berücksichtigten Investitionskosten die für die CBM erforderlichen Ausrüstungskosten. Die Betriebskosten unterteilen sich in jährliche Fixkosten und Kosten aufgrund von reaktiven oder präventiven Instandhaltungsmaßnahmen. Die jährlichen Fixkosten beinhalten nur Kosten für die Zustandsüberwachung.

Der Unterschied zwischen Produktionsverlusten durch Betriebsmittelausfälle und Verlusten durch präventive Instandhaltungsmaßnahmen ist das Schlüsselement der Analyse.

3 LCC eines Instandhaltungsobjekts, das nach einer bestimmten Zeit oder bei Ausfall erneuert werden soll



4 Errechneter Nutzen einer TBM (volle Kreise) bzw. Zustandsüberwachung (leere Kreise) für eine Prozesskritikalität von 4 oder 5



Das Problem besteht darin, die durchschnittlichen minimalen Instandhaltungskosten für reaktive, zeitabhängige und zustandsabhängige Instandhaltungsstrategien zu bestimmen.

Die proaktive bzw. präventive Instandhaltung basiert auf Vorhersagen des Instandhaltungsbedarfs, wobei kein Diagnoseschritt vorgesehen ist. Bei guter Auslegung und Vorausplanung des Prozesses sollte die Produktionsausfallzeit deutlich kürzer sein als bei der reaktiven Instandhaltung. Außerdem können alle erforderlichen Materialien bestellt werden, bevor es zum Ausfall kommt, sodass diese bei Bedarf bereitliegen.

Die durchschnittlichen Instandhaltungskosten in einem bestimmten Zeitraum sind also eine Summe aus verschiedenen Instandhaltungskosten, gewichtet nach der Häufigkeit der betreffenden Instandhaltungsart. Die Häufigkeit und Gesamtzahl der Instandhaltungsmaßnahmen hängen von der gewählten Instandhaltungsstrategie ab. Die Häufigkeiten werden mithilfe von Lebensdauermodellen geschätzt, die die Betriebsbedingungen der Instandhaltungsobjekte beinhalten. Diese Bedingungen – Temperatur, Schmutzigkeit, Belastung usw. – werden bei der oben beschriebenen positionsspezifischen Analyse der kritischen Betriebsmittel beurteilt.

Der nächste Schritt der Analyse umfasst die Formulierung des Lebenszykluskostenmodells (LCC-Modell) für jede der Instandhaltungsstrategien mithilfe der Lebensdauer- und Kostenmodelle. In einem realen TBM-Fall, bei dem der Austausch einer Komponente nach Erreichen ihres geplanten präventiven Austauschzeitpunkts bzw. nach ihrem Ausfall (je nachdem, was zuerst eintritt) vorgesehen ist, wurde

eine optimale Austauschzeit von 2,8 Jahren ermittelt. Daraus ergeben sich jährliche Lebenszykluskosten von 310.000 USD → 3.

Die LCCA kann auch zur Optimierung von Ersatzteilstandorten eingesetzt werden, indem verschiedene LCC für eine Reihe von Standorten errechnet werden.

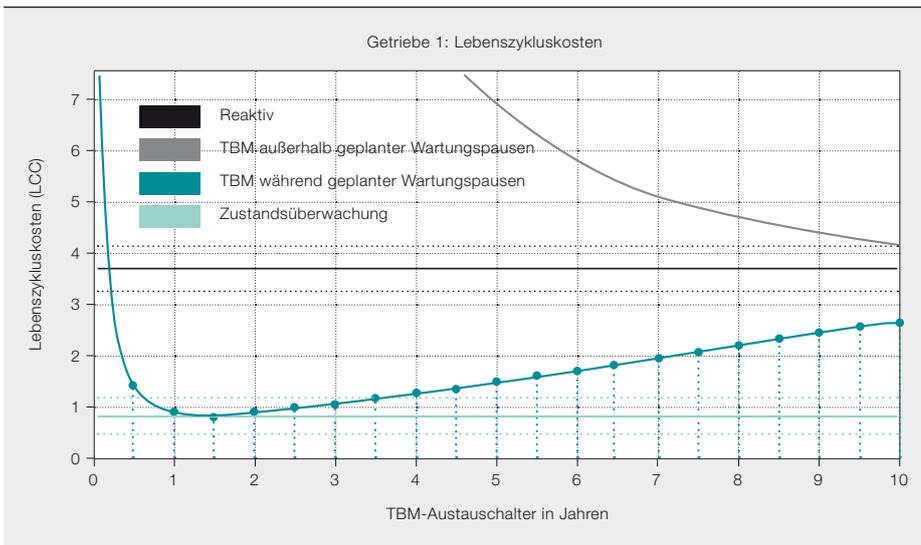
Die Auswirkung veränderter Eingangsparameter auf das Ergebnis kann mithilfe von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen untersucht werden. Durch Veränderung der Eingangsparameter über einen bestimmten Bereich können die Auswirkungen der wichtigsten Faktoren und Kompromisse auf die Kosten aufgezeigt werden.

CRIM in Zahlen

Bei einer zweitägigen CA an einem Pilotkundenstandort wurden 698 einzelne Betriebsmittel von zwei Prozesslinien erfasst. Die Kalibrierung und Einführung dauerte etwa einen halben Tag. Die Beurteilung der ersten 100 Einheiten nahm die zweite Hälfte des ersten Tages in Anspruch. Danach lag die Beurteilungsgeschwindigkeit zwischen 50 und 100 Einheiten pro Stunde. Die CA liefert die Eingaben für die LCCA, und das Werkzeug listet die im Rahmen der LCCA errechneten endgültigen Kosten für die identifizierten kritischen Komponenten auf → 4.

Alle für ein Objekt, z. B. ein Getriebe, errechneten LCC-Ergebnisse können zusammengefasst werden → 5. Die gestrichelten Linien in der Abbildung zeigen die Unsicherheiten verschiedener LCCA-

5 Lebenszykluskosten für das „Getriebe 1“ als Funktion des Austauschalters. Bei den Parametern des Lebensdauermodells wird von einer Unsicherheit von 10 % (gestrichelte Linie) ausgegangen.



6 Auswirkung eines reduzierten Kritikalitätswerts auf die LCC durch Veränderung des Ersatzteilstandorts

Gruppenname	Veränderung der Kritikalität	Veränderung der LCC (Tsd. USD/Jahr)	Ersatzteilkosten (Tsd. USD)
Schalter	5 → 2	350	31
Pumpenventile	5 → 3	512	15
Kühllüfter	3 → 1	113	3
Sensoren	3 → 1	77	3

Schätzungen. In diesem Fall gibt es ein optimales Zeitintervall für die TBM-Strategie, die mit entsprechenden CBM-Strategien konkurriert. Auf der anderen Seite zeigt sich, dass eine TBM, die nicht während der geplanten Instandhaltungspausen erfolgt, kein Minimum aufweist und somit teurer ist als eine reaktive Instandhaltung. Normalerweise wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Auswirkung einer kleinen positiven oder negativen Veränderung jedes Parameterwerts auf das LCC-Ergebnis zu errechnen.

Die vom CA-Werkzeug erstellte Ersatzteilliste wird für die weitere Optimierung der Ersatzteilstandorte mithilfe der LCCA verwendet.

Ein Vergleich der errechneten LCC für die gelisteten Objekte unter zwei verschiedenen Annahmen hinsichtlich der Ersatzteilstandorte – logistische Verzögerungen von mehr als einem Tag gegenüber einer Stunde – zeigt, dass die LCC in einigen Fällen durch einfaches Verlagern des Ersatzteils näher an das Betriebsmittel bzw. durch Erhöhung der Ersatzteilverfügbarkeit drastisch reduziert werden kann.

Außerdem kann sich eine Veränderung des Ersatzteilstandorts direkt auf den vom CA-Werkzeug errechneten Kritikalitätswert auswirken. In dem betrachteten Fall konnte eine Reduzierung vom Höchstwert fünf auf den nichtkritischen Wert zwei festgestellt werden → 6.

Die Folgen eines solchen Rückgangs des Kritikalitätswerts zeigen sich in der Veränderung der LCC → 6. Die in der Berechnung verwendeten Ersatzteilkosten betragen nur einen Bruchteil der LCC.

CRIM-Lösung

CRIM bietet Anlagenbetreibern hilfreiche Unterstützung bei der Bestimmung einer optimalen Mischung aus prädiktiven, präventiven und RTM-Instandhaltungsstrategien für die Tausenden von Betriebsmitteln in einer Anlage. Am Pilotstandort konnten durch die Wahl einer geeigneten CBM-Strategie und den Einsatz guter Zustandsüberwachungsmethoden für kritische Pumpenventile LCC-Einsparungen in Höhe von 620.000 USD identifiziert werden.

Eine Hauptkenntnis der Pilotstudie ist, dass sich die CRIM-Analyse als Bestandteil der Anlagenentwurfsphase oder Werks-

abnahmeprüfung anbieten würde. Außerdem ist es von entscheidender Bedeutung, dass Fachwissen aus allen Bereichen in den Prozess einbezogen wird.

Besondere Zustimmung erhielt der CRIM-Ansatz vom Kunden, der sagte: „Können wir es uns leisten, keine CRIM-Analyse für die gesamte Anlage durchzuführen“?

Kari Saarinen

Shiva Sander Tavallaey

ABB Corporate Research

Vasterås, Schweden

kari.saarinen@se.abb.com

shiva.sander-tavallaey@se.abb.com

Patrik M. Westerlund

ABB AB, Process Automation, Mining

Umeå, Schweden

patrik.m.westerlund@se.abb.com

Literaturhinweis

[1] Y. Kawauchi and M. Rausand. (1999). Life cycle cost analysis in oil and chemical process industries. <http://www.ntnu.no/ross/reports/lcc.pdf>

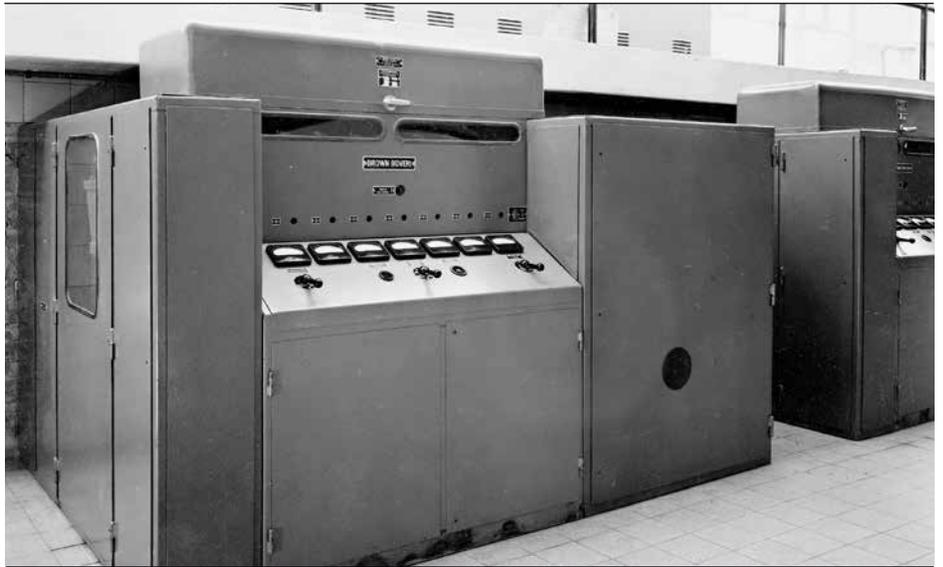


Vom Quecksilberdampf zum Hybridleistungsschalter

100 Jahre Leistungselektronik

ANDREAS MOGLESTUE – Im Jahr 2013 jährt sich der Einstieg von ABB (und ihrer Vorgängerunternehmen) in die Leistungselektronik zum hundertsten Mal. Heute ist die Leistungselektronik aus vielen Anwendungen – angefangen von großen HGÜ-Anlagen (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) zur Übertragung vieler Gigawatt über Tausende von Kilometern bis hin zu alltäglichen Haushaltsgeräten – nicht mehr wegzudenken. Eine Triebfeder für die Entwicklung der

Leistungselektronik war der Wunsch, Elektrizität ohne den Einsatz mechanischer (d. h. wartungsintensiver) Komponenten von einer Frequenz oder Spannung in eine andere umzuwandeln. Die ersten Umformer waren mit Quecksilberdampf-Gleichrichtern ausgestattet, die in den 1950er und 1960er Jahren durch Halbleiter ersetzt wurden. ABB gehört seit nunmehr 100 Jahren zu den Pionieren sowohl in der Entwicklung als auch in der Anwendung dieser Technologie.



Am Anfang war die kommerzielle Nutzung der Elektrizität geprägt durch den Wettstreit zweier Verteilungstechnologien, in dem sich der von Tesla propagierte Wechselstrom schließlich gegen die Gleichstromtechnik von Edison durchsetzte. Während sich Wechselstrom (AC) für viele Anwendungen eignet, gibt es einige Bereiche, in denen der Gleichstrom (DC) unverzichtbar bleibt. Hierzu gehören die Elektrolyse (z. B. bei der Aluminiumherstellung), das Laden von Batterien, die drahtlose Kommunikation und die Elektrifizierung von Straßenbahnen, U-Bahnen und einigen Eisenbahnen. Diese Anwendungen spielen noch immer eine wichtige Rolle bei ABB, auch wenn die Liste der Tätigkeitsfelder mittlerweile um weitere Anwendungen wie Rechenzentren oder die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) erweitert wurde.

Bereits in einer frühen Phase der Entwicklung elektrischer Systeme suchte man nach Wegen, AC in DC (Gleichrichtung) und DC in AC (Wechselrichtung) umzuwandeln sowie aus festen Eingangsgrößen variable Ausgangsgrößen zu erzeugen (z. B. für drehzahlregelte Antriebe). Die meisten modernen leistungselektronischen Anwendungen lassen sich noch immer in eine dieser drei Kategorien einordnen.

Eine Vorläufertechnik zur Umwandlung von AC in DC war der rotierende Umformer (ein Motor und ein Generator mit einer gemeinsamen Welle). Dieses Funktionsprinzip kann auch umgekehrt (zur Umwandlung von DC in AC) oder zur Umwandlung zwischen zwei verschiedenen AC-Frequenzen genutzt werden. So elektrifizierten mehrere europäische Länder ihre Eisenbahnen mit $16\frac{2}{3}$ Hz, da dies genau einem Drittel von 50 Hz entspricht. Der rotierende Umformer konnte sogar für Anwendungen mit variablen Ausgangsgrößen erweitert werden. Der Ward-Leonard-Umformer nutzt z. B. die Erregung des DC-Generators zur Veränderung seiner Ausgangsspannung (was z. B. einen drehzahlgeregelten Antrieb ermöglicht). Die Scherbius-Maschine bietet die Möglichkeit, nicht vollständig synchrone AC-Netze durch Zulassen eines gewissen Phasenschlupfs miteinander zu koppeln.

Eine wertvolle Eigenschaft von rotierenden Umformern ist ihre Fähigkeit, bei Netzstörungen weiterzulaufen. Kurze Unterbrechungen der Stromversorgung werden dabei durch die kinetische Energie der rotierenden Masse überbrückt. Interessanterweise findet sich diese Energiepufferung bei modernen leistungselektronischen Umrichtern in Form von Kondensatoren im Gleichspannungs-Zwischenkreis wieder.

Mechanische Umformer haben jedoch den Nachteil, dass bewegliche Teile gewartet werden müssen (Schmierung, Austausch von Kohlebürsten) und erhebliche mechanische Kräfte auf die Konstruktion und die Verankerung wirken.

Schalten

Während bei rotierenden Umformern Eingang und Ausgang vollständig galvanisch voneinander getrennt sind, erfolgt in der Leistungselektronik die Umwandlung durch Veränderung des Strompfades zu bestimmten Zeitpunkten mithilfe extern ausgelöster Schaltvorgänge. In seiner einfachsten Form zeigt sich das Prinzip der Pfadumschaltung im DC-Motor, bei dem ein Kommutator den Stromfluss in der Rotorwicklung in Abhängigkeit von seiner Position umkehrt (eine einfache Umwandlung von DC in AC). Einen weiteren Ansatz für eine universellere AC-Umwandlung stellt der Kontaktstromrichter → 1 dar, der auf sich schnell bewegenden, mechanischen Kontakten basiert (praktisch eine H-Brücke, aber mit mechanischen Schaltern anstelle von Ventilen). Eine erhebliche Schwäche bestand darin, dass im Gegensatz zu rotierenden Umformern die Wellenform des AC-Ausgangs nicht sinusförmig, sondern rechteckig war. Diesen Nachteil besitzen viele andere leistungselektronische Schaltungen ebenfalls. Wie weiter unten beschrieben wird, stellte die Bewältigung dieses Problems einen bedeutenden Fortschritt in der modernen Leistungselektronik dar.

Genau wie rotierende Umformer waren auch Stromrichter mit mechanischen Schaltern wartungsanfällig. Ein Ziel der Leistungselektronik war es, ähnliche Ergebnisse ohne mechanische Schalter zu erzielen.

Titelbild

Eine Diode für Traktionsanwendungen (um 1980)

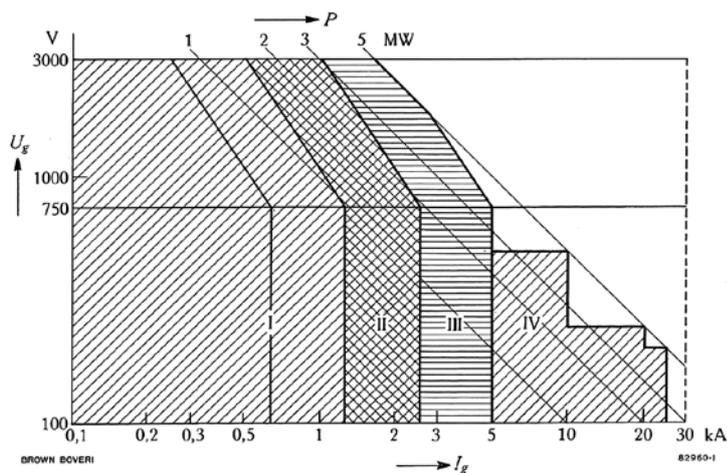
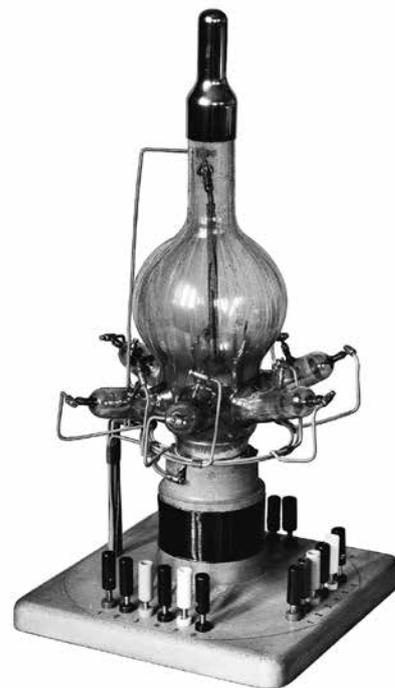


Fig. 10 — Graphical representation of load capacity of new Brown Boveri mutator range

U_g = D. C. voltage
 I_g = Direct current
 P = Output
 I = Air-cooled, pumpless multi-anode mutators
 II = Air-cooled, pumped multi-anode mutators
 III = Water-cooled single-anode mutators
 IV = Contact converters

Quelle: Wasserrab, T.: Einführungsvorlesung der Mutortagung in Baden 1955 (Tagungsunterlagen von BBC veröffentlicht)



Trotz ihrer offensichtlichen Nachteile waren Kontaktstromrichter für Nennströme geeignet, die jenseits der Fähigkeiten von Quecksilberdampfventilen lagen → 2. Deshalb wurden sie bis zur Einführung von siliziumbasierten Stromrichtern weiter produziert.

Quecksilberdampfventile

Anfang des 19. Jahrhunderts demonstrierte der britische Chemiker und Erfinder Humphry Davy, dass ein Lichtbogen erzeugt werden kann, indem man Strom durch zwei einander berührende Stäbe leitet und dann die Stäbe auseinanderzieht. Hierbei bildet sich im Spalt zwischen den Elektroden ein leitendes Plasma (Gas aus ionisierten Teilchen). Bei der Wiedervereinigung (Rekombination) von ionisierten Teilchen im Plasma entsteht Licht, während durch die vom Strom erzeugte Wärme neue Ionen gebildet werden (Erregung), was ein Erlöschen des Lichtbogens verhindert. Interessanterweise geht es auch bei modernen Halbleiterschaltern im physikalischen Sinne um die Erregung, Bewegung und Rekombination von Ladungsträgern.

Im Jahr 1902 demonstrierte der amerikanische Erfinder Peter Cooper Hewitt einen Versuchsaufbau mit einer Quecksilber- und einer Stahlelektrode (in späteren Versionen Kohlenstoff), die in einem mit

Quecksilberdampf gefüllten Glaskolben eingeschlossen waren. Interessanterweise floss der Strom in dieser Anordnung von der Kohlenstoff- zur Quecksilberelektrode, aber nicht umgekehrt. Während das Quecksilber nach dem Zünden des Lichtbogens kontinuierlich Elektronen abgab, war dies an der Kohlenstoffanode (im Betriebstemperaturbereich) kaum der Fall. Der Quecksilberdampf wurde durch den Lichtbogen ionisiert, und die auf die Quecksilberkathode auftreffenden Quecksilberionen erzeugten ausreichend Wärme, um eine kontinuierliche Freisetzung von Elektronen aufrechtzuerhalten. Dies war die Geburtsstunde des Quecksilberdampfventils und damit der Leistungselektronik.

In den folgenden Jahren versuchte eine Vielzahl von Erfindern und Unternehmen, dieses Prinzip der Gleichrichtung zu verbessern und zu kommerzialisieren.

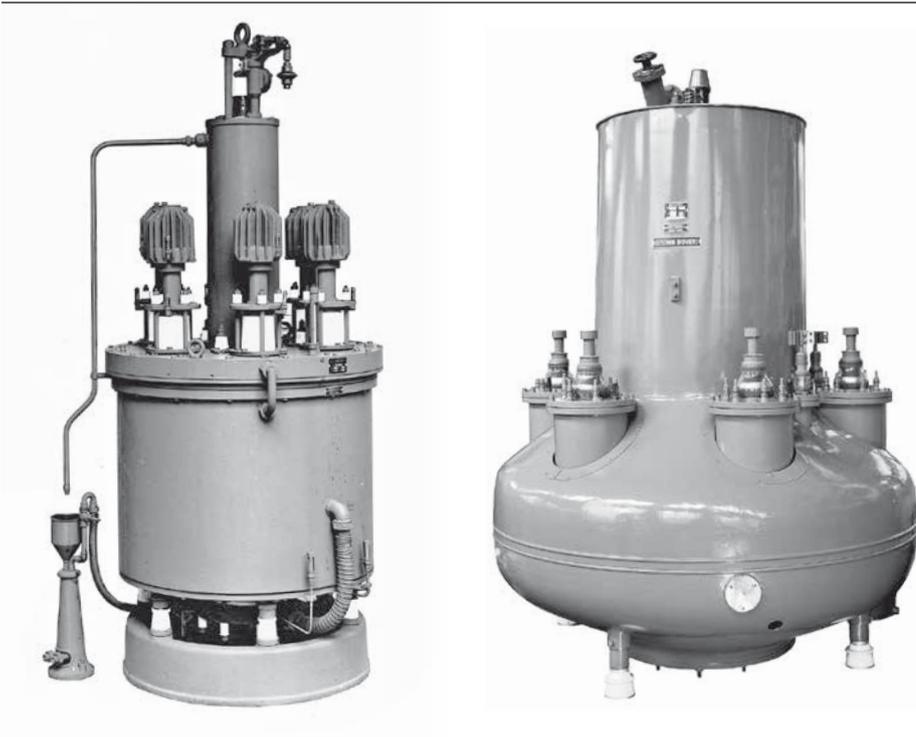
Herstellung von Quecksilberdampf-Gleichrichtern

Im Jahr 1908 begann der ungarische Ingenieur Béla B. Schäfer mit der Forschung an Quecksilberdampfventilen für die Frankfurter Firma H&B (Hartmann & Braun). Sein erstes von vielen Patenten (eine Lösung für die Einbettung von Metalldrähten zur luftdichten Durchführung durch Glaswände) reichte er 1909

ein. H&B war das erste deutsche Unternehmen, das einen Gleichrichter für einen Kunden baute (im Jahr 1911 für eine Gießerei in Frankfurt). Da das Hauptgeschäft von H&B die Herstellung wissenschaftlicher Instrumente war und das Unternehmen nur wenig Erfahrung mit industriellen Hochstromanwendungen hatte, gründete es 1913 ein Joint-Venture mit dem Schweizer Unternehmen BBC (Brown, Boveri & Cie). Das neue Unternehmen nannte sich GELAG (Gleichrichter AG) und hatte seinen Standort im schweizerischen Glarus. Die GELAG beschäftigte sich vornehmlich mit der Forschung und Entwicklung, während die Ventile von BBC im schweizerischen Baden gefertigt wurden. Ab 1916 produzierte BBC zusätzlich in Mannheim, Deutschland. Im Jahr 1921 wurde die deutsche Fertigung in ein größeres Werk in Lampertheim verlegt. Im selben Jahr kam ein weiterer Standort hinzu, als BBC die 1919 gegründete Gleichrichter GmbH in Berlin übernahm.

In den 1920er Jahren erwarb BBC die Anteile von H&B an der GELAG und löste das Unternehmen 1939 schließlich auf, wobei die Tätigkeiten vom Mutterkonzern übernommen wurden. Später sollte auch H&B ein Teil der ABB-Familie werden: Das Unternehmen wurde 1995 von der Elsig Bailey aufgekauft, die 1999 Teil von ABB wurde.

4 Quecksilberdampfventile mit Stahlbehältern von BBC



4a Ventil Typ HG 5/6 (1923) (420 A, 650 kW, 1.550 V und 1.700 kg Gewicht) für die Elektrifizierung in Zweilütschinen → 5.

4b Großes Quecksilberdampfventil im Stahlbehälter. Dieses Exemplar für 2.500 A, 2.000 kW aus den 1950er Jahren wog 1.235 kg und war über 3 m hoch.

Schäfer verließ die GELAG im Jahr 1921 und gründete ein eigenes Beratungsunternehmen. Im Jahr 1927 verkaufte er Ventilentwürfe an ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget) für die Fertigung in Ludvika, Schweden. Somit floss das Fachwissen von Schäfer in die Produkte von drei ABB-Vorgängerunternehmen ein.

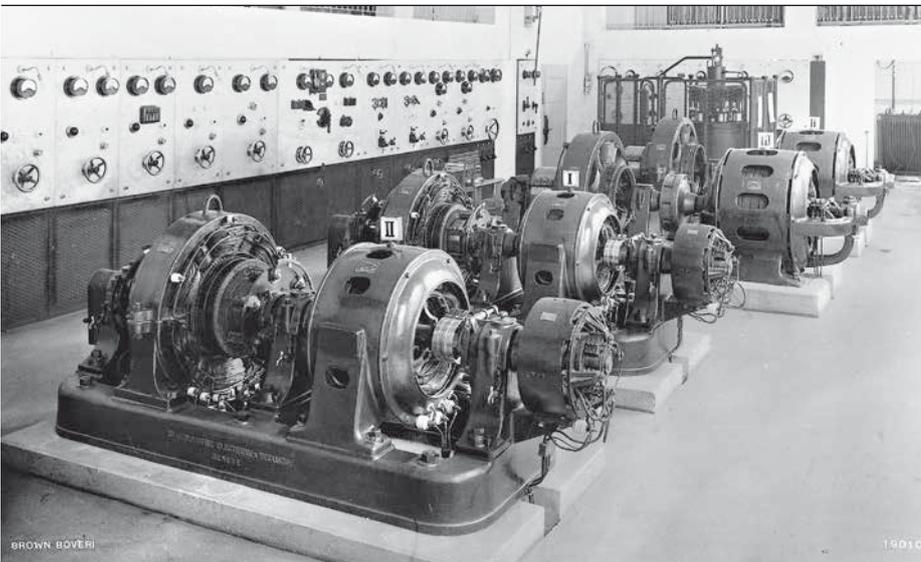
Ventile: Bauweise und Anwendungen

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Glas ist das Leistungsvermögen eines Ventils durch die Größe seiner Oberfläche begrenzt → 3. Mit steigenden Nennleistungen wurden deshalb Stahlbehälter (mit isolierten Elektroden) verwendet → 4. In den darauf folgenden Jahren erlebte der Markt für Quecksilberdampfventile einen starken Aufschwung, der sich auch auf die Produktion von BBC übertrug → 5, → 6 und dem Unternehmen eine Führungsrolle in der Entwicklung dieser Technologie einbrachte.

→ 7 zeigt eine einfache Gleichrichterschaltung. Sie entspricht einer H-Brücke, in der ein einzelnes Gehäuse mit sechs Anoden die Aufgabe von sechs einzelnen Dioden übernimmt.

Zwar konnte ein solches Ventil in Betrieb bleiben, solange die Betriebstemperatur innerhalb des Toleranzbereichs blieb und man den Lichtbogen nicht vollständig erlöschen ließ, aber es konnte nicht von allein den Betrieb aufnehmen, wenn kein Plasma vorhanden war. Deshalb war eine Starterelektrode erforderlich, an die ein Hochspannungsimpuls angelegt wurde, um den anfänglichen Lichtbogen zu erzeugen. Die Möglichkeit, den Durchlassbetrieb zu einem beliebigen Zeitpunkt starten zu können, barg offensichtlich großes Potenzial für das selektive Schalten (alle bislang in diesem Artikel beschriebenen Ventile waren Dioden). Die Entwicklung solcher schaltbarer Ventile, die eine Phasenanschnittsteuerung ermöglichten, begann 1930. Diese Ventile erfüllten die gleiche Funktion wie heutige Thyristoren – sie lassen sich beliebig einschalten, werden aber erst beim Nulldurchgang des Stroms gelöscht. Schaltet man sie einer H-Brücke zusammen, lässt sich ein netzgeführter Wechselrichter realisieren. Da sich die Bezeichnung „Gleichrichter“ angesichts solcher neuer Anwendungen als zunehmend irreführend erwies, begann BBC 1934 damit, ihre

5 Elektrifizierung der Berner Oberland-Bahn

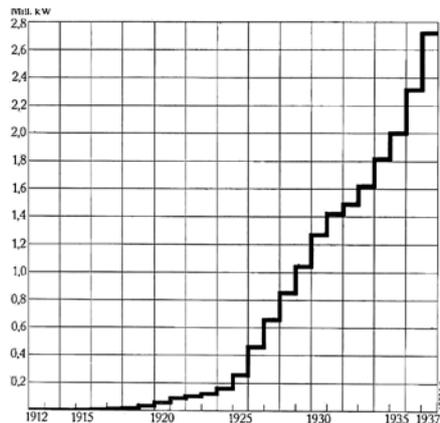


Die Berner Oberland-Bahn in der Jungfrau-region der Schweizer Alpen wurde 1913 von BBC mit 1.550 V Gleichstrom elektrifiziert. Die Gleichrichtung erfolgte mithilfe von rotierenden Umformern, wobei die Gleichstromversorgung von einer Batterie unterstützt wurde. Zur Demonstration ihrer Quecksilberdampf-Gleichrichtertechnik installierte BBC eine entsprechende Anlage parallel zu den rotierenden Umformern. Die Effizienz und Zuverlässigkeit der Anlage waren so eindrucksvoll, dass sie 2¼ Jahre in Betrieb blieb, bevor sie 1923 durch eine permanente Installation ersetzt wurde.

Das obige Bild zeigt die Umformerstation im Jahr 1924 mit den beiden rotierenden 220-kW-Hauptumformern im Vordergrund, den zwei 48-kW-Hilfsgeneratoren mit regelbarer Erregung dahinter und dem 650-kW-Quecksilberdampf-Gleichrichter im Hintergrund. Deutlich zu erkennen ist der erheblich reduzierte Platzbedarf.

Quelle: „Gleichrichteranlage Zweilütschinen der Berner Oberland-Bahnen“. BBC Mitteilungen, Oktober 1925, Seite 214

6 Die Herstellung von Mutatoren war ein wachstumsstarker Geschäftsbereich für BBC.



Ventile einheitlich als „Mutatoren“ zu bezeichnen.

Nachdem nun sowohl Gleichrichter- als auch Umrichterfunktionen realisiert werden konnten, baute BBC für die Schweizerische Landesausstellung 1939 eine temporäre Gleichstrom-Übertragungsleitung mit 50 kV und 500 kW. Sie verfügte über eine Umformerstation an jedem Ende und versorgte den BBC-Ausstellungspavillon in Zürich über eine Entfernung von 25 km mithilfe eines einpoligen Kabels von Wettingen aus mit Strom (wobei die Rückleitung durch die Erde erfolgte) → 8. Diese Verbindung war der Vorläufer der heutigen HGÜ-Technik.

Die weltweit erste permanente, kommerzielle HGÜ-Leitung, die die Insel Gotland mit dem schwedischen Festland verband, wurde jedoch im Jahr 1954 von ASEA gebaut.

Die Fertigung von Quecksilberdampfventilen dauerte bis Mitte der 1960er Jahre an → 9, bis diese von einer weiteren Revolution in der Leistungselektronik abgelöst wurden: den Halbleitern. Diese boten zahlreiche Vorteile wie eine größere Leistungsdichte und höhere Geschwindigkeiten, sie waren leichter und verlustärmer, und sie kamen ohne giftiges Quecksilber aus.

Halbleiter

Die Elemente des Periodensystems werden allgemein in Metalle und Nichtmetalle unterteilt. Metalle in ihrer reinen Form leiten Strom, Nichtmetalle hingegen (in

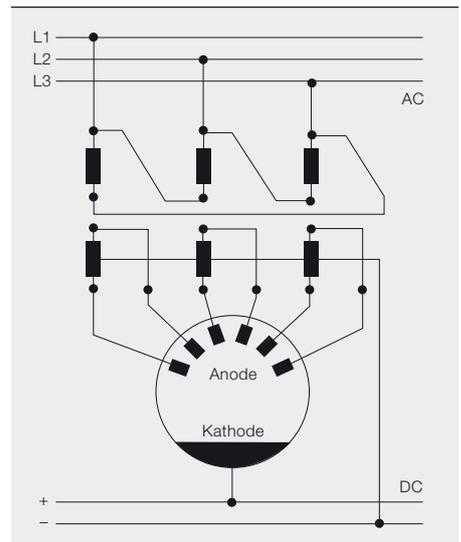
der Regel) nicht. Es gibt jedoch eine interessante Gruppe von Nichtmetallen, deren Leitfähigkeit zwischen der von Metallen und Nichtmetallen liegt. Dies sind die Halbleiter, von denen besonders Germanium und Silizium von Bedeutung sind. Einige Hybridkristalle wie Galliumarsenid und Siliziumkarbid besitzen ebenfalls Halbleitereigenschaften.

Die Halbleitfähigkeit wurde erstmals 1833 von Michael Faraday an Silbersulfid beobachtet, doch vollständig erklärt wurde das Phänomen erst Anfang der 1930er Jahre mit dem Aufkommen der Bändertheorie.

Um die Leitfähigkeit von Halbleitermaterialien zu erhöhen, werden gezielt Verunreinigungen in den Kristall eingebracht. Diese Atome besetzen Positionen im Kristallgitter, die anderenfalls von einem Atom des Substratmaterials belegt würden. Wenn die eingebrachten Atome über mehr Elektronen in ihrem äußeren Band verfügen als das Trägermaterial (n-Typ), können sich die „überschüssigen“ Elektronen frei durch den Kristall bewegen, wodurch sich seine Leitfähigkeit erhöht. Besitzen die eingebrachten Atome weniger Elektronen in ihrem äußeren Band (p-Typ), entstehen sogenannte Löcher. Diese Positionen können von Elektronen benachbarter Atome besetzt werden, sodass die Löcher praktisch durch den Kristall „wandern“. Folglich verhalten sich die Löcher wie positive Ladungsträger und erhöhen ebenfalls die Leitfähigkeit.

Ein einfaches Beispiel für ein Halbleiterbauelement ist die Diode. Hier liegt eine

7 Mutator zur Gleichrichtung von Drehstrom

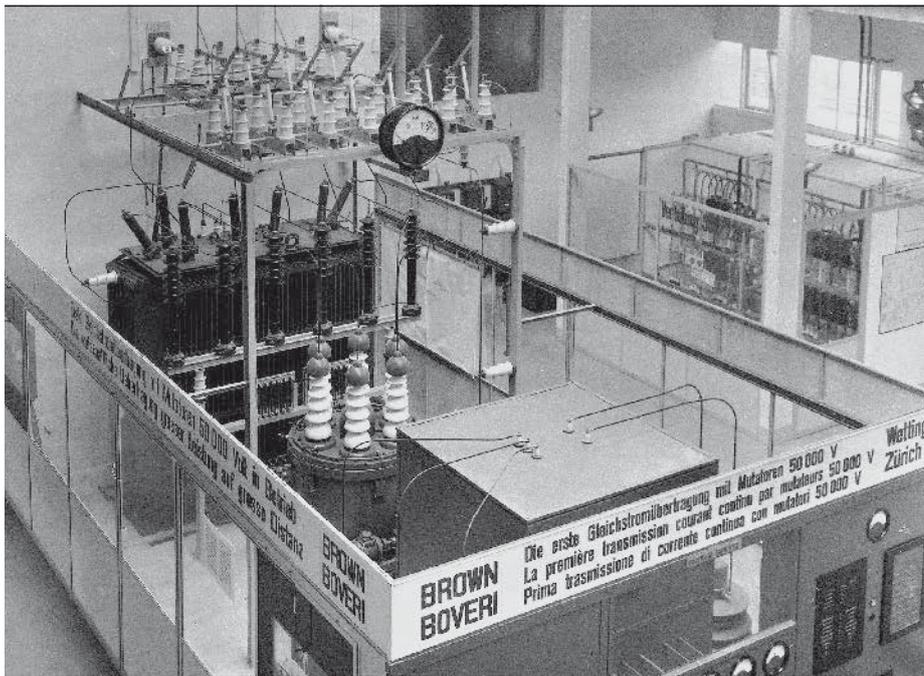


p-Zone direkt neben einer n-Zone auf demselben Kristall. Der Strom kann von der p- zur n-Zone fließen (d.h. in der p-Zone fließen die Löcher in Richtung des p-n-Übergangs, während in der n-Zone die Elektronen in Richtung des Übergangs fließen, wo sich die beiden Ladungsträgerarten rekombinieren). Wird eine Spannung in Sperrrichtung angelegt, kommt es zu einer „Verarmung“ an Ladungsträgern am Übergang, und es fließt kein Strom mehr.

Zur Entwicklung schaltbarer Ventile war eine Methode zum externen Auslösen der Leitfähigkeit erforderlich. Der erste Transistor wurde 1947 von Bell Laboratories entwickelt. Dieser nutzte ein elektrisches Feld zur Steuerung der Verfügbarkeit von Ladungsträgern in einem Germaniumkristall, d. h. der Stromfluss durch den Kristall wurde über eine Steuerspannung bestimmt.

Die Erfindung des Transistors war der Auslöser für eine rasche und deutlich sichtbare Entwicklung, die schließlich in der erstaunlichen Revolution auf dem Gebiet der Kommunikation und Datenverarbeitung gipfelte, deren Früchte (und andauernde Entwicklung) heute überall zu sehen sind. Vielleicht weniger offensichtlich, aber ebenso spektakulär ist eine andere Revolution der Halbleitertechnik, die sich parallel auf dem Gebiet der Leistungselektronik vollzogen hat. Elektrizität kann heute auf Arten und Weisen transformiert, gesteuert und umgewandelt werden, die noch vor einigen Jahrzehnten niemand für möglich gehalten hätte. So

8 1939 demonstrierte BBC auf der Schweizerischen Landesausstellung in Zürich die DC-Übertragung mit Quecksilberdampfumrichtern.



wären die heute allgegenwärtigen Daten- und Kommunikationsgeräte und ihre hochintegrierten Mikroprozessorchips kaum von Nutzen ohne die leistungselektronischen Schaltungen, die sie mit Strom versorgen, ihre Akkus laden und die Rechenzentren und Kommunikationsverbindungen am Laufen halten, die soziale Netzwerke und andere Online-Dienste erst möglich machen. Auch der derzeitige Boom im Bereich der erneuerbaren Energien und die daraus resultierende Reduktion der Schadstoffemissionen wären nicht möglich ohne leistungselektronische Umrichter, die eine zuverlässige und erschwingliche Netzanbindung sicherstellen.

Es hat viele Jahrzehnte gedauert, bis all dies möglich wurde. Sowohl BBC als auch ASEA begannen ihre Halbleiterentwicklung um 1954, und die ersten Gleichrichterioden von BBC (für 100 V/100 A) kamen 1956 auf den Markt. Diese und andere frühe Halbleiter bestanden aus Germanium¹, das, wie sich herausstellte, aufgrund von Einschränkungen hinsichtlich der Sperrspannung und Temperatur für energietechnische Anwendungen ungeeignet war und bald darauf vom Silizium verdrängt wurde.

Thyristoren

Der Einsatz von Transistoren in analogen Verstärkern (z. B. in Radios und Telekommunikationsgeräten) ist allgemein bekannt. In der Leistungselektronik gelten jedoch

andere Anforderungen: Die Schalter sollten sich idealerweise entweder im ein- oder ausgeschalteten Zustand befinden, und die Übergangszeit dazwischen sollte so kurz wie möglich sein. Da die Verluste im Bauelement – und damit auch die erzeugte Wärme – das Produkt von Stromstärke und Spannung sind, muss eine der beiden Größen möglichst nahe null gehalten werden, sowohl im Interesse der Energieeffizienz als auch um thermische Schäden am Bauelement zu vermeiden.

Einer der ersten schaltbaren Leistungshalbleiter war der Thyristor, dessen Wirkprinzip 1950 von William Shockley beschrieben wurde. Ein Thyristor ähnelt der oben beschriebenen p-n-Diode, verfügt jedoch über zusätzliche Schichten zwischen den äußeren p- und n-Zonen. Diese Schichten sind normalerweise nicht leitfähig. Wird jedoch über einen dritten Kontakt (das sogenannte Gate) ein Strom injiziert, wird dieser Bereich mit Ladungsträgern geflutet, sodass ein Strom fließen kann, sofern eine Durchlassspannung zwischen Anode und Kathode anliegt. Nach dem Einschalten (Zünden) hält sich der Nachschub an Ladungsträgern von allein aufrecht, sodass der Zündstrom abgeschaltet werden kann. Der Thyristor bleibt im leitfähigen Zustand, bis der Strom unter einen kritischen Wert fällt.

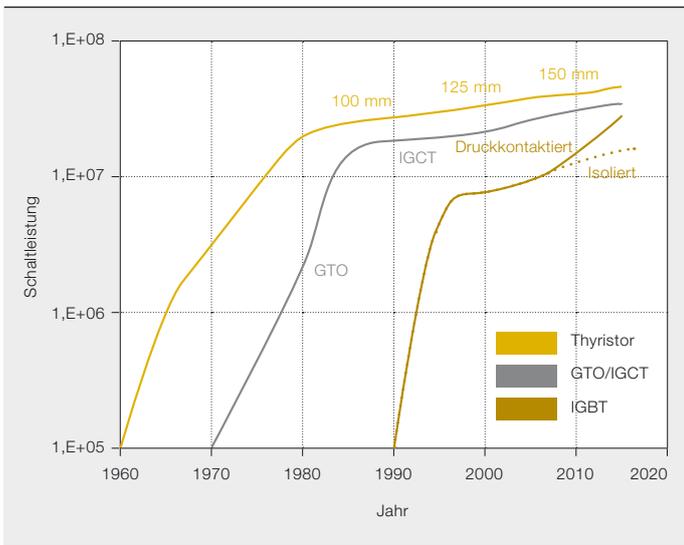
Fußnote

¹ Einige Hersteller verwendeten Selen.

9 Meilensteine von ABB in 100 Jahren Leistungselektronik

1913	Beginn der Herstellung von Quecksilberdampf-Gleichrichtern bei BBC in Baden
1915	Lieferung von stationären Gleichrichtern für die Limmattal-Straßenbahn in Zürich durch BBC
1921	Beginn der Fertigung in Lampertheim (BBC)
1924	Veröffentlichung der Schalttheorie von Dällenbach und Gerecke (BBC)
1928	Beginn der Herstellung von Quecksilberdampf-Gleichrichtern bei ASEA in Ludvika (Schweden)
1938	Ausrüstung einer Lokomotive mit Gleichrichter (versuchsweise 50-Hz-Elektrifizierung in Deutschland) durch BBC (Mannheim)
1939	Experimentelle Gleichstromübertragung zw. Wetztingen u. Zürich durch BBC → 8
1954	Erste Germanium-Diode von BBC
1954	Erste kommerzielle HGÜ-Verbindung zur Insel Gotland (ASEA)
1960	Erster Thyristor von BBC
1961	HGÜ-Verbindung zw. Großbritannien und Frankreich unter dem Ärmelkanal (ASEA)
1964	Erste BBC-Lokomotive m. Silizium-Dioden-Gleichrichter (Re 4/4 f. d. Schweizer BLS)
1967	Erste Thyristorgleichrichter-Lokomotive v. ASEA (Rc f. d. Schwedische Staatsbahn)
1970	HGÜ-Verbindung „Pacific Intertie“ zwischen Celilo (Oregon) und Sylmar (Südkalifornien) – letztes Großprojekt mit Quecksilberdampfventilen
1971	Beginn der Halbleiterfertigung in Lampertheim (BBC)
1973	Eröffnung des BBC-Forschungszentrums in Dättwil (Schweiz)
1979	HGÜ-Verbindung Cabora Bassa – Johannesburg (BBC in Zusammenarbeit mit AEG und Siemens)
1981	Beginn der Halbleiterfertigung in Lenzburg (BBC)
1984	HGÜ-Verbindung Itaipu – Sao Paolo (ASEA)
1987	Erste BBC-Lokomotiven mit GTO-Umrichtern (für BT und SZU, Schweiz)
1988	Fusion von BBC und ASEA zu ABB
1993	Beginn der Entwicklungsarbeiten für die BiMOS-Technologie
1996	Beginn der IGCT-Fertigung
1998	Eröffnung der BiMOS-Linie in Lenzburg
2004	HGÜ am Drei-Schluchten-Damm (China)
2010	Akquisition von Polovodiče (Tschechische Republik)
2010	Neue Halbleiterfabrik in Lenzburg
2012	BIGT-Plattform
2012	Beginn der Arbeiten an einer neuen Halbleiter-Forschungseinrichtung in Dättwil
2013	Beginn der Arbeiten an einer neuer Halbleiter-Forschungseinrichtung in Dättwil
2013	ABB feiert 100 Jahre in der Leistungselektronik

10 Entwicklung der Schaltleistung der drei wichtigsten Leistungshalbleiter-Bauelemente



11 In Lenzburg schlägt das Herz der Halbleiterproduktion von ABB. Das Gebäude rechts ist das neue BiMOS-Werk.

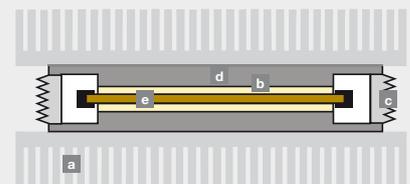


12 Halbleiterfertigung in Lenzburg



13 Querschnitt durch ein Druckkontaktmodul

Bei **Druckkontaktmodulen** tritt der Laststrom durch die Oberfläche auf der einen Seite **d** ein und auf gegenüber liegenden Seite wieder aus. Ein hoher mechanischer Druck auf den Flächen sorgt für einen niedrigen elektrischen und thermischen Widerstand in den Kontakten.



- a Kühlkörper
- b CTE-Kompensation (Mo)
- c Gehäuse
- d Kupfer
- e Halbleiter

Damit kann er zur netzgeführten Wechselrichtung, nicht aber für den selbstgeführten Betrieb verwendet werden (außer es wird ein künstlicher Nulldurchgang der Spannung durch externe Komponenten hervorgerufen).

Zwischen 1960 und 1980 stiegen die maximale Sperrspannung und das Leistungsvermögen pro Bauelement annähernd linear von etwa null im Jahr 1960 auf 6.000 V und 900 kW im Jahr 1980 → 10.

GTO-Thyristoren

GTO-Thyristoren werden seit Mitte der 1980er Jahre hergestellt. Ein GTO-Thyristor (Gate Turn-Off Thyristor) ist ein Thyristor, der mittels eines negativen (d. h. dem Einschaltstrom entgegengesetzten) Stromimpulses am Gate abgeschaltet werden kann. Die Entwicklung von Bauelemen-

ten, die ohne einen künstlichen Nulldurchgang abschalten können, hat den Anwendungsbereich von Leistungshalbleitern erweitert und z. B. DC/DC-Wandler und selbstgeführte Wechselrichter ermöglicht. Außerdem kann durch mehrere Schaltzyklen während einer AC-Halbschwingung die rechteckige AC-Wellenform am Ausgang abgerundet werden. Ferner kann die Breite der Stromimpulse zur Modulation der gewünschten Wellenform variiert werden, sodass Oberschwingungen reduziert werden.

Halbleiterherstellung

Die Halbleiterfertigung von BBC befand sich zunächst in Ennetbaden, Schweiz. Ende der 1960er Jahre errichtete BBC ein modernes Halbleiterwerk in Lampertheim, in dem die gesamte Fertigung konzentriert werden sollte. Ein Teil der Produktion

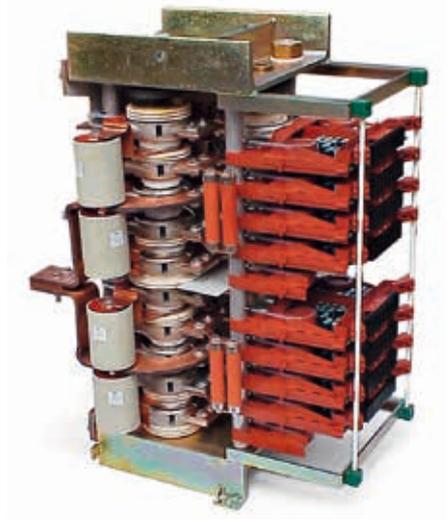
in Ennetbaden (hauptsächlich Entwicklung und Pilotfertigung, aber auch ein kleiner Teil der Fertigung) wurde jedoch in das schweizerische Birr verlegt und fand im Jahr 1981 schließlich den Weg in ein neues Werk in Lenzburg, Schweiz.

Nach der Fusion von ASEA und BBC zu ABB im Jahr 1988 wurde das Werk in Lampertheim an IXYS verkauft und das ASEA-Werk im schwedischen Västerås geschlossen, woraufhin die gesamte Produktion in Lenzburg zusammengezogen wurde. Die Stärke von ASEA waren Thyristoren und Gleichrichterkomponenten mit negativer Anstrahlung im Randbereich (negative bevelling), während BBC auf Dioden, GTOs und Thyristoren spezialisiert war. Abgesehen von einigen Überschneidungen ergänzten sich die beiden Produktpaletten hervorragend.

14 GTO-Thyristoren mit verschiedenen Durchmessern

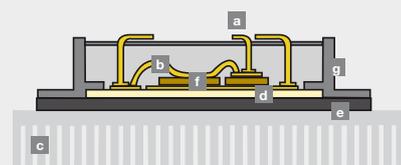


15 GTO-Thyristoren in einem Stack mit Gate-Einheiten und Kühlelementen



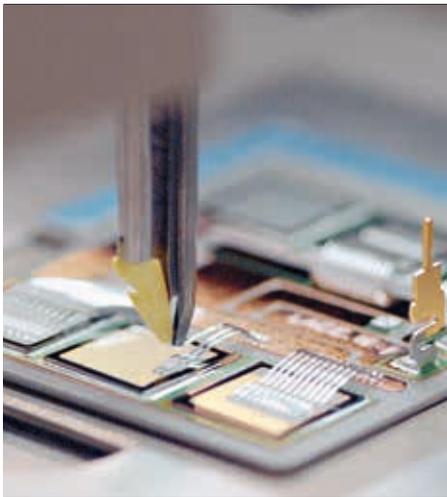
16 Querschnitt durch ein Hi-Pak IGBT-Modul

Bei Modulen mit **isoliertem Gehäuse** ist der Halbleiter **f** galvanisch vom Kühlkörper **c** getrennt. Die elektrische Verbindung innerhalb des Moduls erfolgt durch Bonddrähte.



- | | |
|--|------------------------------------|
| a Leistungs- und Steueranschlüsse | d Keramik (meist AlN) |
| b Bonddraht | e Bodenplatte (meist AlSiC) |
| c Kühlkörper | f Halbleiter |
| | g Gehäuse |

17 Verlöten von Kontakten auf IGBT-Chips



Zu jener Zeit war die Halbleiterfertigung bei ABB kein eigenständiger Geschäftsbereich, sondern unterstützte andere Produktbereiche wie Antriebe oder HGÜ. Die Produktentwicklung und Investitionen waren daher größtenteils an die Anforderungen anderer Geschäftsbereiche gekoppelt. Dies änderte sich schnell, als Anders Nilarp zum Leiter der Halbleiter- sparte bei ABB ernannt wurde. Er verwandelte den Geschäftsbereich in ein eigenständiges Unternehmen, das in direkten Wettbewerb mit anderen Halbleiterherstellern auf dem Markt trat. Mit seinem charismatischen Führungsstil schuf er eine neue Arbeitskultur im Lenzburger Werk, indem er kontinuierlich versuchte, die Belegschaft zu motivieren und zu stärken. Im Jahr 1995 stand das Werk in Lenzburg im Finale des European Quality Award, und im Jahr 1996 erhielt

es den Titel „Supplier of the Year“ von General Electric.

IGBTs

Nilarps größte Errungenschaft war das neue BiMOS-Werk, das 1998 in Lenzburg eröffnet wurde und eigens auf die Fertigung von IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) zugeschnitten war. Die Einführung von IGBTs brachte zwar eine Zunahme der Fertigungskomplexität und der beteiligten Technologien mit sich, führte aber gleichzeitig auch zu einem sprunghaften Anstieg der Leistungsfähigkeit und Kapazität der Bauelemente. Ein IGBT ist ein Leistungshalbleiter, der nicht über einen Strom, sondern über eine Spannung gesteuert wird, was die Leistungs- und Platzanforderungen der Gate-Einheiten (der externen Ansteuereinheiten, die den Schalter über das Gate ein- und aus-

schalten) reduziert und so kompaktere und leichtere Umrichter ermöglicht. IGBTs besitzen zudem eine höhere inhärente Stabilität als GTO-Thyristoren, was die Notwendigkeit von Schutzbeschaltungen reduziert. Außerdem sind sie in der Lage, schneller ein- und auszuschalten, was höhere Schaltfrequenzen ermöglicht.

IGCTs

Um auch in höheren Leistungsklassen ein hartes Schalten zu ermöglichen, führte ABB Mitte der 1990er Jahre den IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) ein. Das neue, auf Basis der GTO-Technik entwickelte Bauelement ermöglichte wesentlich schnellere Schaltvorgänge als herkömmliche GTO-Thyristoren. Dies wurde unterstützt durch eine integrierte Gate-Einheit mit niedriger Induktivität. Bemerkenswerterweise fand diese Entwick-



lung zu einer Zeit statt, als andere Hersteller von einer Weiterentwicklung des GTO-Thyristors absahen, weil sie darin keine Zukunft sahen.

Im Jahr 2010 stärkte ABB ihre Marktpräsenz durch die Akquisition des tschechischen Halbleiterherstellers Polovodiče, womit das Unternehmen einen zweiten Fertigungsstandort in Prag erwarb. Gleichzeitig wurde die Kapazität in Lenzburg durch den Bau eines weiteren Werks erhöht → 11.

Fertigung und Design

Die Fertigung von Halbleitern ist ein äußerst sensibler Prozess. Der Silizium-Grundwerkstoff muss von sehr hoher Qualität und extremer Reinheit sein, und das Einbringen der erforderlichen p- oder n-Materialien (Dotierung) erfordert höchste Präzision bei korrekter Dauer und Temperatur. Deshalb findet die Fertigung in sogenannten Reinräumen unter einer sorgfältig kontrollierten Atmosphäre statt, um Verunreinigungen so weit wie möglich auszuschließen → 12.

Die meisten größeren Halbleiter (einschließlich Thyristor, GTO-Thyristor und IGCT) besitzen ein sogenanntes druckkontaktiertes Gehäuse (engl. „free-floating“), bei dem der Siliziumwafer in einer Keramikhülle mit Kupferkontakten verkapselt ist → 13, → 14. Die Kontakte müssen mit einer bestimmten externen Kraft gegen das Silizium gedrückt werden, um eine optimale elektrische und thermische Leitfähigkeit zu gewährleisten. Um diesen Druck herzustellen, werden die Halbleiter-Bauelemente in Stapeln (sog. Stacks) mit dazwischen angeordneten Kühleinheiten



montiert → 5. Fällt ein Bauelement aus, schließt es sich selbst kurz. Dies sorgt in einem typischen Stack mit in Reihe geschalteten Elementen für ein gewisses Maß an Redundanz, sodass der normale Betrieb bis zur nächsten geplanten Wartung fortgesetzt werden kann.

Mit der Einführung des IGBT wandte man sich von dieser Praxis ab. Anstelle von Wafern mit großer Oberfläche bestehen IGBT-Module aus einer größeren Anzahl kleiner Chips. Die Kontaktdrähte werden direkt auf die Chips gelötet → 16–18, sodass auf die Montage im Spannverband verzichtet werden kann. Dies vereinfacht die Umrückermontage, reduziert das Gewicht und den Platzbedarf und erleichtert den Austausch einzelner Module bei der Wartung. Dennoch werden IGBTs auch in druckkontaktierten Gehäusen für Anwendungen angeboten, die solche Baugruppen (StakPaks) erfordern, z. B. für die HGÜ → 19.

BIGTs

Die neueste Entwicklung in der IGBT-Familie ist der BIGT (Bimode Insulated Gate Transistor). Dies ist ein IGBT, in dem die rückwärts leitende Diode auf besonders platzsparende Weise integriert ist (der BIGT wird auf den Seiten 19–23 dieses Hefts näher beschrieben). Der BIGT ist ein wichtiger Bestandteil des Hybridleistungsschalters, einer der bedeutendsten Innovationen von ABB der letzten Jahrzehnte (mehr hierüber erfahren Sie auf den Seiten 6–13).

Der Hybridleistungsschalter ist ein weiteres Beispiel dafür, wie Halbleiter den Weg in völlig neue Anwendungen finden. Dabei

wächst der Anwendungsbereich der Leistungselektronik auf eine Art und Weise, die noch vor einigen Jahren kaum vorstellbar war.

Wir bedanken uns bei Björn Backlund, Jürgen Bernauer, Christoph Holtmann, Norbert Lang, Munaf Rahimo, Marco Rossinelli und Adriaan Welleman für ihren freundlichen Beitrag zu diesem Artikel.

Andreas Moglestue

ABB Review

Zürich, Schweiz

andreas.moglestue@ch.abb.com

Weiterführende Literatur

Zeller, H. R.: „Siegessägen der Chips: Die Geschichte der Leistungshalbleiter bei ABB“. *ABB Technik* 3/2008: 72–78

Linder, S.: „Leistungshalbleiter: Teil 1: Grundlagen und Anwendungen“. *ABB Technik* 4/2006: 34–39

Linder, S.: „Leistungshalbleiter: Teil 2: Gehäusetechnologien und zukünftige Entwicklungen“. *ABB Technik* 1/2007: 62–66

Anwand, E., Kloss, A.: „75 Jahre BBC-Leistungselektronik“. *Elektroniker* Nr. 11/1988

Wetzel, R.: „Die Geschichte des Quecksilberdampfgleichrichters bei BBC Deutschland 1913–1963“. Dissertation. Universität Stuttgart, 2001

Haglöf, L., Danfors, P.: „HVDC Veterans Presentation“. Visby, Gotland, 2004

Schiesser: „25 Jahre Brown Boveri Mutator“.

Brown Boveri Mitteilungen 5/6 1938

Editorial Board

Prith Banerjee

Chief Technology Officer and
Executive Vice President

Clarissa Haller

Head of Corporate Communications

Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

Eero Jaaskela

Head of Group Account Management

Andreas Moglestue

Chief Editor, *ABB Review*

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, Spanisch und Chinesisch. 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 © 2013
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 3|13

Simulation

Angesichts immer ausgeklügelterer Technologien, komplexerer Systeme und einer zunehmenden Wechselwirkung zwischen Komponenten steigen auch die Herausforderungen beim Testen. Auch wenn Simulationen das Testen nicht vollständig ersetzen können, gibt es viele Situationen, in denen Simulationen Zeit und Kosten sparen können (von potenziell gefährlichen Situationen ganz zu schweigen). Außerdem helfen Simulationen dabei, ein besseres Verständnis von Prozessen zu entwickeln, und ermöglichen so eine bessere Optimierung. Höhere Rechenleistungen und fortschrittliche Algorithmen eröffnen immer mehr Möglichkeiten zur Simulation von Systemen, die auch genutzt werden. Außer zur Unterstützung von Design und Engineering können Simulationen auch zur Schulung von Bedienpersonal und zur Analyse hypothetischer Situationen eingesetzt werden.

Die Ausgabe 3/2013 der *ABB Review* befasst sich schwerpunktmäßig mit dem Thema Simulation und zeigt, wie ABB diese Verfahren entwickelt und nutzt, um die rechtzeitige und qualitative Lieferung von Systemen und Lösungen an ihre Kunden weiter zu verbessern.

Bleiben Sie auf dem Laufenden ...

Haben Sie schon einmal eine Ausgabe der *ABB Review* verpasst? Lassen Sie sich jetzt auf bequeme Weise informieren, wenn eine neue Ausgabe der *ABB Review* (oder ein Special Report) veröffentlicht wird. Melden Sie sich unter folgender Adresse für die *ABB Review* Mailingliste an:
<http://www.abb.com/abbreview>





260 Millionen Tonnen weniger CO₂-Ausstoß pro Jahr?

Allein im Jahr 2011 haben unsere Antriebe den CO₂-Ausstoß weltweit um rund 260 Millionen Tonnen verringert. Diese intelligenten Steuerungen regeln die Drehzahl von Elektromotoren und senken so den Energieverbrauch in der Industrie und in Gebäuden. Das ist nur eine von vielen Technologien von ABB, um den CO₂-Ausstoß und die Kosten bei unseren Kunden zu senken.
www.abb.ch/betterworld

Absolut.