

ABB

3 | 16  
de

# review

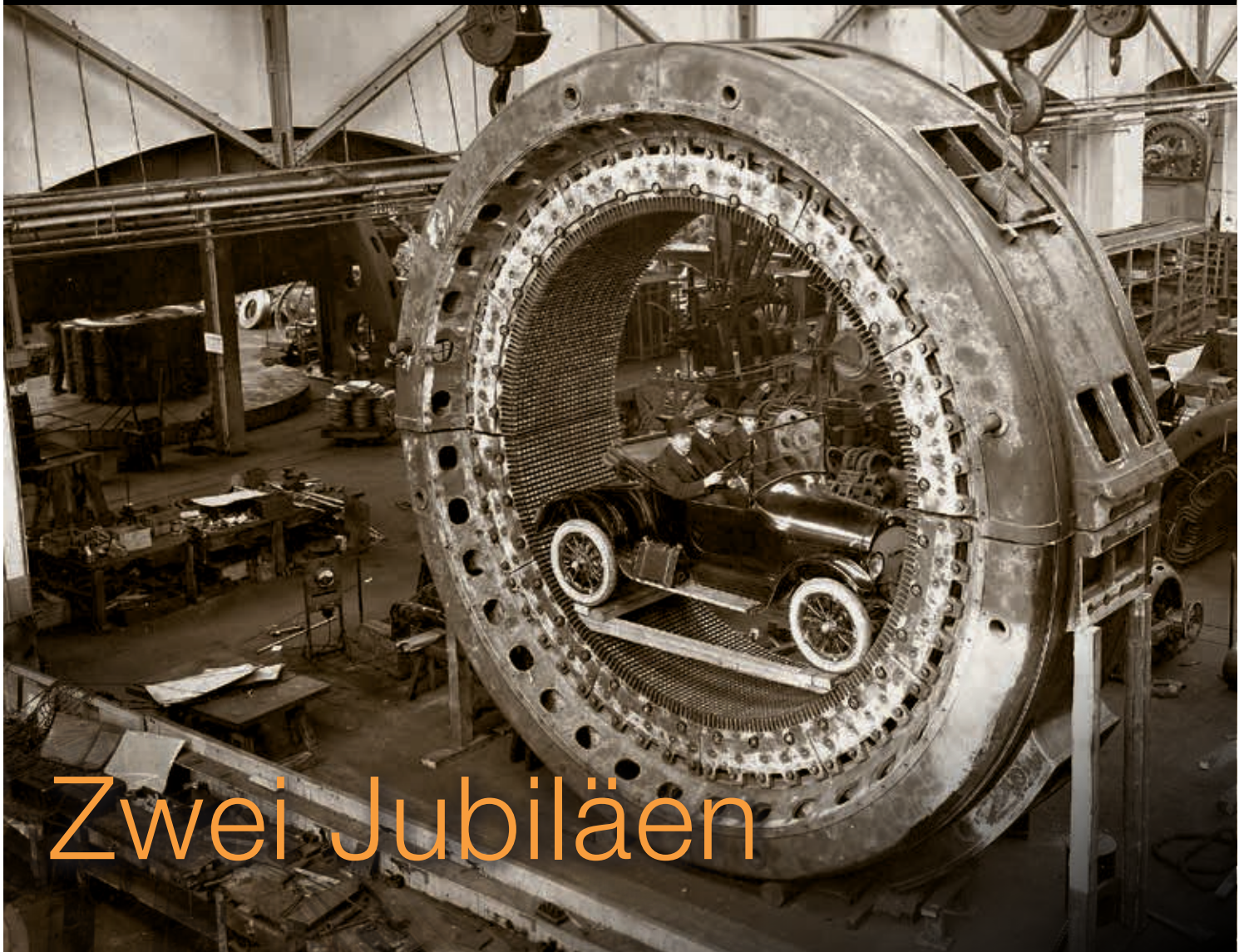
**125 Jahre in der Schweiz 7**

100 Jahre Konzernforschung 13

**Errungenschaften, die die Welt veränderten 16**

Ein Blick auf die Zukunft 55

Die technische  
Zeitschrift des  
ABB Konzerns



## Zwei Jubiläen

**125**

YEARS SERVING  
THE WORLD FROM  
SWITZERLAND  
[www.abb.com](http://www.abb.com)

Power and productivity  
for a better world™





Das Jahr 2016 hält zwei Jubiläen für ABB bereit: Die Gründung des ABB-Vorgängerunternehmens BBC vor 125 Jahren in der Schweiz und die Eröffnung des ersten ASEA-Forschungszentrums im schwedischen Västerås und damit die Gründung der ABB-Konzernforschung vor 100 Jahren.

Die Titelseite zeigt den Stator eines 22-MVA-Generators, der 1919 von ASEA nach Glomfjord in Norwegen geliefert wurde. Das Bild auf dieser Seite zeigt den Stator eines modernen Generators für eine Windenergieanlage beim Bau in Lingang (Shanghai), China.

## Zwei Jubiläen

- 7 **125 Jahre und eine Hundertjahrfeier**  
ABB feiert ihr 125-jähriges Bestehen in der Schweiz und 100 Jahre Konzernforschung
- 13 **Die Denkfabrik**  
Vor 100 Jahren eröffnete das erste ABB-Forschungszentrum

## Die treibende Kraft

- 16 **Die treibende Kraft**  
Innovationen von ABB auf dem Gebiet der Elektromotoren
- 17 Digitale drehzahlgeregelte Antriebe
- 19 Sanftanlasser
- 21 An der Spitze der Motorentwicklung

## Die direkte Verbindung

- 23 **Die direkte Verbindung**  
HGÜ-Technik für eine bessere Energieübertragung
- 24 Effiziente Energieübertragung mit HVDC Light®
- 27 Ultraschneller Trennschalter für HGÜ-Hybridschalter
- 29 Fortschrittliche extrudierte HGÜ-Kabel

## Transformieren & Schalten

- 31 **Transformieren und Schalten**  
Die Wissenschaft der Transformatorisierungen und innovative Stufenschalter für Hochleistungsanwendungen
- 32 Vakuumbasierte Laststufenschalter
- 35 Grundlagenforschung für UHGÜ-Stromrichtertransformatoren

## Forschung

- 38 **Mikronetze**  
Wie Mikronetze dabei helfen, Kosten und Emissionen zu reduzieren und die Netzzuverlässigkeit zu verbessern
- 41 **Biografie eines Roboters**  
Die Geschichte des elektrischen Industrieroboters gestern, heute und morgen
- 45 **Eine bewegte Geschichte**  
Fortwährende Innovation bestimmt die Geschichte der elektromagnetischen Produkte von ABB
- 49 **Die Erzfabrik**  
Mining 2.0 – Automatisierungslösungen für den Bergbau

## Energie

- 55 **Eine neue kompakte HGÜ-Lösung für die Offshore-Windenergie**  
Nur halb so schwer und ohne die Notwendigkeit von AC-Umspannplattformen
- 57 **Die Sonne speichern**  
Energiespeicherung ebnet den Weg für private Solarenergie
- 62 **Mehrwert-Speicher**  
Umfangreiche Studie eines netzgekoppelten Mikronetzes mit Dieselgenerator und Batteriespeicher

# Reflektion der Zukunft



Bazmi Husain

## Liebe Leserin, lieber Leser,

es heißt, die einzige Konstante sei die Veränderung. In keinem anderen Bereich zeigt sich dies besser als in der Technik.

Wenn wir versuchen, die langfristige Dynamik und die Auswirkungen von Veränderungen zu verstehen und zu kontextualisieren, ist ein Blick in die Geschichte häufig ein guter Ausgangspunkt. In Anlehnung an die drei vorherigen industriellen Revolutionen – die Mechanisierung (Ende des 18. Jahrhunderts), die Massenfertigung (Anfang des 20. Jahrhunderts) und die elektronische Automatisierung (Ende der 1960er Jahre) – wird die derzeitige digitale Revolution auch gern als Industrie 4.0 bezeichnet. All diese Revolutionen haben zu grundlegenden Veränderungen geführt, nicht nur in der Industrie selbst, sondern auch in den betreffenden Wirtschaftssystemen, der Gesellschaft und sogar im allgemeinen Denken. Für diejenigen, die bereit sind, sich darauf einzulassen, eröffnen Revolutionen neue Chancen und neue Anwendungsbereiche, von denen viele bislang undenkbar waren.

ABB hat die Anfänge von dreien der vier großen industriellen Revolutionen miterlebt und dabei stets eine führende Rolle eingenommen. So brachte das Unternehmen 1974 mit dem IRB 6 den ersten voll elektrischen und mikroprozessorgesteuerten Roboter auf den Markt. Dieser Durchbruch ermöglichte grundlegende Paradigmenwechsel in verschiedenen Bereichen der Fertigung mit enormen Auswirkungen auf die Arbeitssicherheit und Produktivität.

In diesem Jahr feiert ABB ein doppeltes Jubiläum. Vor 125 Jahren, im Jahr 1891, gründeten Charles Brown und Walter Boveri (die beiden „Bs“ in unserem Firmennamen) eines der Vorgängerunternehmen von ABB, das schon bald eine führende Rolle auf dem Gebiet der elektrischen Energieerzeugung, -übertragung und -umwandlung einnahm. Die Elektrizität war keine neue Erfindung, doch dank bahnbrechender Entwicklungen

war eine wirtschaftliche Stromübertragung möglich geworden, deren Vorteile sich sowohl auf das Leben der Menschen als auch auf die Leistungsfähigkeit der Industrie auswirkten. Die Situation ist vergleichbar mit der heutigen digitalen Revolution. Weder der Mikroprozessor noch die drahtlose Kommunikation sind wirklich neue Erfindungen, doch erst durch das Zusammentreffen von Erschwinglichkeit der Technik und visionärem Denken konnte ihr Potenzial freigesetzt werden.

Das zweite bedeutende Jubiläum in diesem Jahr ist der 100. Geburtstag der ABB-Konzernforschung. Im Jahr 1916 eröffnete ASEA (das andere ABB-Vorgängerunternehmen und das „A“ in unserem Firmennamen) ihre erste eigene Forschungseinrichtung im schwedischen Västerås. Zu den Errungenschaften dieses Zentrums gehören frühe synthetische Diamanten ebenso wie bahnbrechende Beiträge zur Automatisierung und zur HGÜ. In unseren Forschungszentren manifestiert sich die Entschlossenheit von ABB, durch hervorragende Forschungsarbeit auch in Zukunft eine Spitzenposition einzunehmen. Heute beschäftigt ABB weltweit rund 8.500 Mitarbeiter im Bereich Forschung und Entwicklung.

Unser Blick zurück auf die Geschichte von ABB ist gleichzeitig ein Blick nach vorn auf die vor uns liegenden Herausforderungen und Gegebenheiten. Ich hoffe, diese Ausgabe der ABB Review hält einige interessante Einblicke für Sie bereit.

Eine angenehme Lektüre wünscht Ihnen



Bazmi Husain  
Chief Technology Officer  
ABB Group





# 125 Jahre und eine Hundertjahrfeier

ABB feiert ihr 125-jähriges Bestehen in der Schweiz und 100 Jahre Konzernforschung

**DOMINIC SIEGRIST – 2016 ist ein bedeutendes Jahr für ABB. Es markiert nicht nur das 125-jährige Jubiläum der Gründung von Brown Boveri & Cie (BBC) in der Schweiz, sondern auch das 100-jährige Bestehen der Unternehmensforschung von ASEA in Schweden. Im Laufe der Jahre sind BBC und ASEA – sowohl getrennt voneinander als auch gemeinsam als ABB (seit 1988) – erstaunliche technische Fortschritte gelungen. Während anlässlich dieser Jubiläen verschiedene Feierlichkeiten rund um die Welt vorgesehen sind, stellen wir einige der bedeutendsten Fortschritte in dieser und in kommenden Ausgaben der ABB Review vor. Werfen Sie mit uns einen Blick auf die technischen Highlights von BBC aus den vergangenen 125 Jahren und die Errungenschaften der schwedischen Forscher aus den letzten 100 Jahren – es lohnt sich.**

**P**ower and automation for a better world – so lautet der Slogan von ABB, und schon die von den beiden Vorgängerunternehmen entwickelten Produkte spiegeln die Vision dieser Maxime wieder.

Im Jahr 1883 wurde ASEA von Ludvig Fredholm im schwedischen Västerås gegründet. Die ersten Produkte des Unternehmens – für elektrisches Licht und die Stromerzeugung – trugen erheblich zu einer besseren Welt bei. Gleichermassen

ermöglichten auch die elektrischen Produkte der 1891 von Charles Brown und Walter Boveri im schweizerischen Baden gegründeten Brown Boveri & Cie bedeutende Verbesserungen im

Leben von Millionen Menschen. Indem sie die breite Nutzung einer neuen Ressource – der Elektrizität – ermöglichten, lieferten die Produkte der Gründungsväter von ABB einen wichtigen Beitrag zum größten technologischen Wandel, den die Menschheit bis dato gesehen hatte → 1.

Bei BBC folgte ein technologischer Durchbruch auf den anderen: Im Jahr 1891 wurde das erste Kraftwerk in der

Stadt Baden gebaut; 1895 lieferte BBC die elektrische Ausrüstung für die Straßenbahn der Stadt Lugano → 2; 1897 kam der erste von vielen ölgefüllten Hochspannungs-Leistungsschaltern auf den Markt → 3; und 1911 präsentierte das Unternehmen eine elektrisch angetriebene Lokomotive, die eine neue Ära der Bahnelektrifizierung einläutete. Tatsächlich nahmen Lokomotiven bis zum Ende des 19. Jahrhunderts einen bedeutenden Teil der Forschungs- und Entwicklungsarbeit von BBC ein.

---

## 1911 läutete die elektrisch angetriebene Lokomotive von BBC eine neue Ära der Bahnelektrifizierung ein.

Im Jahr 1905 schlug BBC der staatlichen schweizerischen Eisenbahngesellschaft SBB vor, den im Bau befindlichen Simplon-Tunnel zu elektrifizieren. Als die SBB dies ablehnte, bot BBC an, die Elektrifizierung auf eigene Kosten vorzunehmen. Es wurde zwar kein finanzieller Erfolg, doch das Projekt führte zur ersten elektrifizierten internationalen Eisenbahnverbindung der Welt, und die dabei gewonnenen Erfahrungen verliehen dem Eisen-

#### **Titelbild**

Größe stellte für BBC und ASEA kein Hindernis dar. Das Bild zeigt einen 2-MW-Drehstromgenerator von BBC in einem deutschen Stahlwerk im Jahr 1912.

Produkte von ASEA und BBC ermöglichten bedeutende Verbesserungen im Leben von Millionen Menschen.

1 Walter Boveri in Begleitung seiner Frau (Mitte) und einer Bekannten bei der Besichtigung der Baustelle des ersten Fabrikgebäudes im Jahr 1891



bahn-Elektrifizierungsgeschäft von BBC einen bedeutenden Impuls, wie die vielen Aufträge in den Folgejahren – darunter auch ein Großauftrag für den Gotthardtunnel 15 Jahre später – zeigten → 4.

#### Zwischen den Kriegen

Die Jahre 1918 bis 1939 waren für BBC sehr wechselhaft. Nach dem Arbeitskräfte- und Rohstoffmangel während des Ersten Weltkriegs erlebte BBC einen kurzen Aufschwung, bis 1920 die Aufträge für einige Jahre nahezu vollständig einbrachen. Die anschließende Erholung war auch nur von kurzer Dauer, denn der Börsencrash an der Wall Street von 1929 brachte neues Unheil. Doch das Unternehmen kam wieder auf die Beine, und 1939 wurden nach sieben Jahren wieder die ersten Dividenden an die Aktionäre ausbezahlt.

#### Krieg und Expansion 1939 – 1970

1936 stieg BBC spät in den Markt für Funktechnik ein, etablierte sich aber schnell und präsentierte 1939 ihre erste Senderöhre. Im Jahr 1943 wurde die Röhrenproduktion vom Labor in eine eigens dafür gebaute Fabrik verlegt. Der Anwendungsbereich der Röhrentechnik erweiterte sich allmählich von der reinen Funkübertragung auf die Wärmeerzeugung für industrielle Anwendungen und die Strahlentherapie und gipfelte zum

Ende des Jahrzehnts schließlich in der Entwicklung eines medizinischen Elektronenbeschleunigers (Betatron).

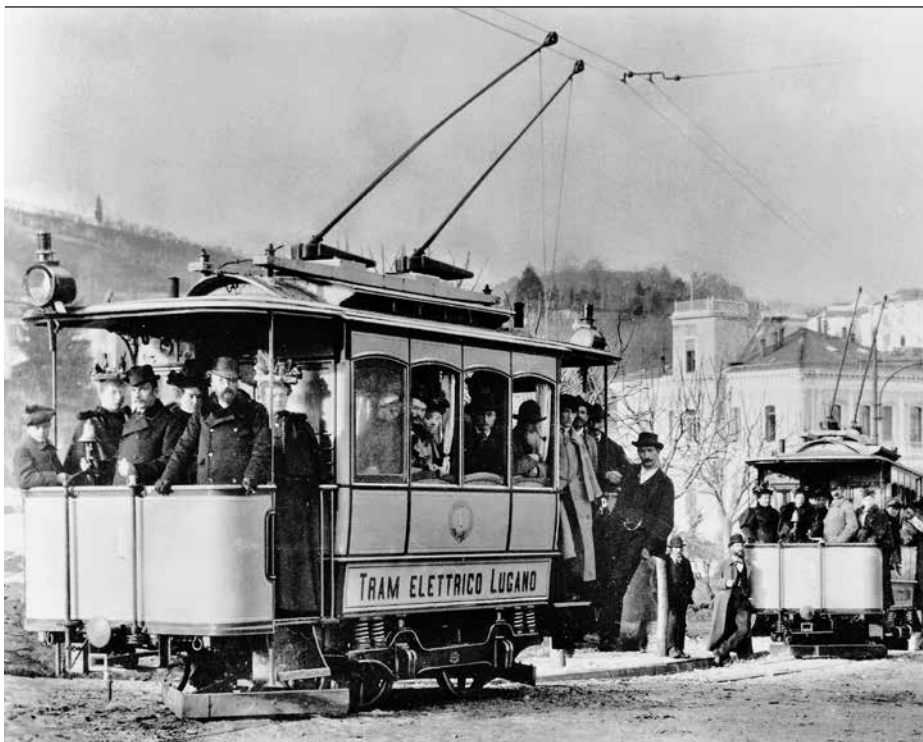
Im Jahr 1939 baute BBC die erste Gasturbine der Welt, die bis zum Jahr 2002 der Stadt Neuenburg als Notstromerzeuger diente. Heute ziert sie als stolze Erinnerung an die Geschichte von BBC den Pavillon des ALSTOM-Werks im schweizerischen Birr.

Der Ausbruch des Zweiten Weltkriegs brachte das Unternehmen erneut in Turbulenzen. Wieder einmal mangelte es aufgrund des allgemeinen Wehrdienstes an Arbeitskräften – und das bei steigenden Auftragszahlen. Dabei befand sich das Unternehmen in der pikanten Lage, sowohl die Alliierten als auch das Dritte Reich zu beliefern. Die inländischen Aufträge erreichten jedoch ein Rekordniveau (40% aller Aufträge in den Jahren 1942/43 gingen an Schweizer Kunden). Dies galt besonders für Stromerzeu-

gungsprodukte. Darüber hinaus wurde Spanien, das sich nach dem Bürgerkrieg im Wiederaufbau befand, zu einem der größten Kunden von BBC. In der Mitte des Zweiten Weltkriegs gelang es dem Unternehmen, die Zeit und die Ressourcen für den Bau eines Hochspannungslabors in Baden zu finden – eine Einrichtung, die sich in den kommenden Jahren als außerordentlich wertvoll erweisen sollte.

Im Jahr 1935 war die BBC in Mannheim so weit gewachsen, dass sie dem ursprünglichen Standort in Baden den Rang ablief. Dank der Aufträge des Militärs blühte das Geschäft: Antriebe für U-Boote, Turbinen für Kriegsschiffe, Kompressoren für Düsentriebwerke usw. – bis im Jahr 1944 die Anlagen durch Bombenangriffe schwer beschädigt wurden. Doch zehn Jahre nach Kriegsende florierte das Unternehmen wieder.





## Die Elektrifizierung des Simplon-Tunnels und die dabei gewonnenen Erfahrungen verliehen dem Eisenbahn-Elektrifizierungsgeschäft von BBC einen bedeutenden Impuls.

Gegen Ende des Zweiten Weltkriegs überstiegen die Aufträge die Kapazität, und als der Krieg 1945 zu Ende ging, stand das Unternehmen geschäftlich gut da, und die meisten Geschäftsbereiche expandierten. Mitte der 1950er Jahre erlebten Dampfturbinen einen regelrechten Boom mit immer leistungsstärkeren Anlagen und Großaufträgen von Kunden wie der Tennessee Valley Authority (an die BBC 1967 einen Turbogenerator mit der Rekordleistung von 1.300 MW lieferte). Ein ähnliches Wachstum – sowohl im Hinblick auf das Geschäftsvolumen als auch das technische Leistungsvermögen – gab es bei den Turboladern.

Im Jahr 1953 eröffnete das BBC-Speziallabor für Aerodynamik und Verbrennungsforschung, und 1965 brachte BBC den weltweit ersten wassergekühlten Wasserkraftgenerator auf den Markt. Im Haushaltssektor produzierte BBC Kochgeräte, Waschmaschinen, Luftbefeuchter und Bettwärmer. Dieser Geschäftszweig wurde 1972 an AEG verkauft (obwohl die Fertigung von Kaffeemaschinen bis in die 1980er Jahre weiterlief).

Wie BBC kann auch ASEA auf eine Vielzahl von bahnbrechenden Innovationen zurückblicken. Vor genau 100 Jahren wurde die Unternehmensforschung von ASEA gegründet – Anlass genug, einen

Blick auf einige der bedeutendsten Produkte zu werfen, die das Unternehmen hervorgebracht hat.

### Fortschrittliche Antriebe

Ende der 1960er Jahre hatten das Tempo und der Umfang des technologischen Fortschritts bei BBC und ASEA deutlich zugenommen. Gleichzeitig eröffneten Fortschritte auf dem Gebiet der Elektronik völlig neue Möglichkeiten zur Lösung industrieller Probleme. Ein frühes Beispiel für die Vorteile, die die Elektronik mit sich brachte, waren digitale drehzahlgeregelte Antriebe.

Elektromotoren sind in der Industrie allgegenwärtig. Tatsächlich werden rund zwei Drittel der weltweit erzeugten elektrischen Energie von Elektromotoren in mechanische Energie umgewandelt. Ein Großteil dieser Motoren wird genutzt, um Lüfter, Pumpen und Kompressoren anzutreiben. Die meisten dieser Geräte laufen ständig mit konstanter Drehzahl, auch wenn sie gerade nicht benötigt werden, während der Fluid- oder Gasstrom mithilfe von Drosselklappen oder Ventilen geregelt wird. Dadurch geht viel Energie verloren.

Hier kommen drehzahlgeregelte Antriebe ins Spiel. Seit 1969 auf dem Markt und ausgestattet mit einer revolutionären Technik, der sogenannten direkten Dreh-

momentregelung (DTC), passen diese elektrischen Antriebe die Drehzahl und das Drehmoment des Motors an die Bedürfnisse der jeweiligen Anwendung an. Neben Qualitätsverbesserungen sind so typische Energieeinsparungen von rund 50 % möglich.

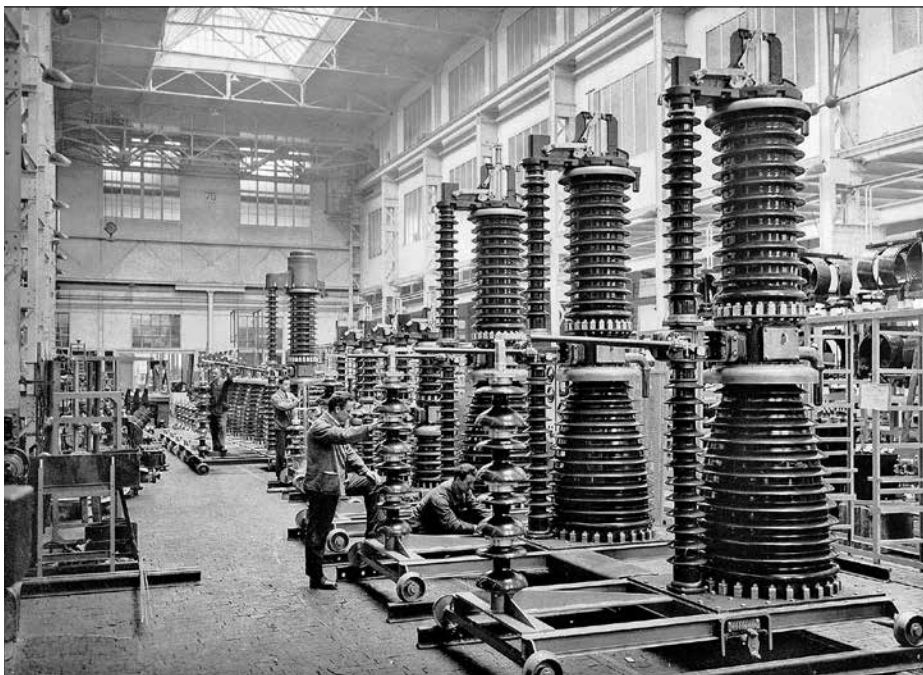
Im Jahr 2011 gelang ABB mit der Einführung des Synchronreluktanzmotors (SynRM) ein weiterer bedeutender Schritt auf dem Gebiet der Motortechnik.

### SynRM

Asynchronmotoren sind mit Abstand die am häufigsten in der Industrie eingesetzten Motoren. Diese leistungsstarken und effizienten Motoren besitzen weder einen Kommutator noch Bürsten, was sie besonders zuverlässig und wartungsarm macht. Sie haben jedoch gewisse Nachteile, die mit einem Permanentmagnet-Drehstrommotor umgangen werden können.

Permanentmagnetmotoren stehen erst seit den 1980er Jahren mit Asynchronmotoren in Konkurrenz, als eine neue Generation von Permanentmagneten auf der Basis von Seltenen Erden (SE) wie Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) auf den Markt kam. (Interessanterweise erfordern solche Motoren ausgeklügelte Drehstromantriebe in Form von Frequenzum-

1967 lieferte BBC der Tennessee Valley Authority einen Turbogenerator mit der Rekordleistung von 1.300 MW.



richtern – ein weiterer bedeutender Innovationsbereich von ABB). Permanentmagnetmotoren sind Synchronmotoren, d.h. der Rotor dreht sich synchron mit dem Magnetfeld. Dies ermöglicht eine präzisere Drehzahlregelung, einen höheren Wirkungsgrad, eine niedrigere Rotor-/Lagertemperatur sowie eine Vielzahl weiterer Vorteile.

Doch es gibt – natürlich – auch hier einen Haken: SE sind teuer und können Preisschwankungen unterliegen. Außerdem kann ihr starkes Rotormagnetfeld die Wartung erschweren.

In den vergangenen Jahren hat ABB mit dem SynRM → 5 und dem permanentmagnetunterstützten Synchronreluktanzmotor (dem seit 2014 erhältlichen SynRM<sup>2</sup>) zwei Motoren ohne Seltenerdelemente auf den Markt gebracht, in denen Ferritmagnete zum Einsatz kommen.

SynRMs sind leistungsfähiger als herkömmliche Asynchronmotoren. Sie können für einen höheren Wirkungsgrad oder eine höhere Leistungsdichte bei geringem Platzbedarf ausgelegt werden als ein vergleichbarer Asynchronmotor. Außerdem haben sie einen geringeren Wartungsbedarf, eine geringere Trägheit und sind extrem zuverlässig.

### Sanftanlasser

Ein Nachteil der oben genannten Asynchronmotoren ist das Problem ihres Anlassens. Die gängigste Methode ist der Anlauf mit direktem Einschalten mithilfe eines Hauptschützes und eines thermischen Überlastrelais. Dabei kann der Anlaufstrom jedoch auf das Sech- oder Siebenfache des Nennstroms ansteigen. Vor etwas mehr als 30 Jahren brachte ABB den Sanftanlasser auf den Markt. Ein Sanftanlasser reduziert das Drehmoment des Motors beim Starten. Dadurch werden Spannungsabfälle in Stromnetzen reduziert, Anlaufströme minimiert, Stromspitzen eliminiert und eine optimierte Verkabelung ermöglicht.

## Ein frühes Beispiel für die Vorteile der Elektronik waren digitale drehzahl-geregelte Antriebe.

Im Laufe der Jahre hat ABB das Sanftanlasserkonzept stetig verbessert und neue Modelle auf den Markt gebracht. Im Jahr 2010 präsentierte ABB das äußerst erfolgreiche PSE-Modell, gefolgt vom PSTX mit neuen Kommunikationsfunktionen und einer neuen Bedienschnittstelle mit Diagnoseinformationen im Jahr 2014.

#### 4 Eine Neuheit im Jahr 1919: eine Elektrolokomotive für die Strecke durch den Gotthardt-tunnel bei einer Probefahrt im schweizerischen Thun



#### Gleichstromtechnik

Zur Zeit der Gründung von ASEA und BBC tobte gerade der sogenannte „Stromkrieg“ zwischen dem etablierten, von Edison unterstützten Gleichstrom (DC) und der neuen Wechselstromtechnik (AC), die unter anderem von Westinghouse (später ein Teil von ABB) propagiert wurde. Zunächst basierte die Stromverteilung auf der Mittelspannungsebene aufgrund der höheren Effizienz und besseren Handhabung üblicherweise auf Gleichstrom. Doch schon bald setzte sich die Wechselstromtechnik durch.

Dank jüngster technischer Fortschritte – insbesondere auf dem Gebiet der Halbleitertechnik – hat der Gleichstrom wieder an Bedeutung gewonnen. Dies und die Notwendigkeit zur Übertragung großer Mengen elektrischer Energie rund um den Globus waren eine bedeutende Triebfeder für die Einführung der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnik (HGÜ) von ABB, die auf der Reihenschaltung von druckkontaktierten IGBTs (bipolare Transistoren mit isoliertem Gate) basiert.

Die zur Ansteuerung eines IGBT benötigte Leistung ist sehr gering und kann der parallelen Schutzbeschaltung (Snubber-schaltung) entnommen werden. Somit muss keine Hilfsenergie für die Ansteuerungseinheit vom Grundpotential geliefert werden. Darüber hinaus kann die Ansteuer-

einheit den IGBT sehr präzise ein- und ausschalten, was eine Reihenschaltung von IGBTs und die individuelle Steuerung von Hunderten IGBTs im Bruchteil einer Mikrosekunde ermöglicht.

Diese Technologie bildete die Grundlage von HVDC Light®, einer selbstgeführten HGÜ-Technologie auf der Basis von Zweipunktumrichtern, die mit Spannungen von bis zu  $\pm 80$  kV arbeitet und im Mai 1997 eingeführt wurde. Neunzehn Jahre nach den ersten zaghaften Versuchen ist die HVDC-Light-Technologie von ABB mit insgesamt 25 HVDC-Light-Anlagen weltweit, die über 10 GW elektrische Leistung übertragen, ein Milliardengeschäft.

#### Transformatoren

ABB gehört seit Jahrzehnten zu den führenden Anbietern von Transformatoren-technik. Die jüngsten Fortschritte wurden hier im Bereich der Ultra-HGÜ mit Leistungstransformatoren mit Nennleistungen von bis zu 1.100 kV erzielt.

Transformatoren sind häufig mit einem Stufenschalter ausgerüstet – ein weiterer zukunftsweisender Bereich für ABB, der sich im Laufe der Jahre kontinuierlich

weiterentwickelt hat. Die neuesten Vakuum-Laststufenschalter von ABB reduzieren den Wartungsbedarf und erhöhen die Leistungsfähigkeit, indem sie dafür sorgen, dass die Lichtbogenbildung nicht wie bisher im Isolieröl, sondern in einer Vakuumschaltkammer stattfindet. So wird eine Verschmutzung des Öls durch Lichtbögen verhindert.

#### HGÜ-Kabel

Bei der HGÜ wird die elektrische Energie nicht nur mithilfe von Freileitungen, sondern auch durch Kabel übertragen – z. B. um Offshore-Windparks mit dem Festland oder Stromnetze durch Seekabel miteinander zu verbinden. Da die praktikable Länge von Wechselstromkabeln durch kapazitive Effekte begrenzt ist, liegt die Zukunft der elektrischen Energieübertragung über große Entfernungen in der HGÜ-Technologie.

In den vergangenen 30 Jahren hat ABB erhebliche technische Fortschritte auf dem Gebiet der HGÜ-Kabel erzielt – z. B. mit einem extrudiertem 525-kV-Kabelsystem auf der Basis von hochwertigem vernetztem Polyethylen (XPLE), das 2014 eingeführt wurde. Darüber hinaus hat

---

Die zur Ansteuerung eines IGBT benötigte Leistung ist sehr gering und kann der parallelen Schutzbeschaltung entnommen werden.

ABB eine dynamische Kabelstruktur für die HGÜ entwickelt, die sich besonders für Offshore-Plattformen eignet.

#### Hybride Leistungsschalter

HGÜ-Systeme müssen im Fehlerfall getrennt werden. Die meisten heutigen HGÜ-Anlagen sind Punkt-zu-Punkt-Verbindungen und können mithilfe von Wechselstrom-Leistungsschaltern an jedem Ende abgeschaltet werden. Dies bedeutet jedoch, dass die komplette Leitung ausfällt. Mit zunehmender Verbreitung von HGÜ-Netzen könnte ein Fehler so zum Ausfall des gesamten Netzes führen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Trennung in einem HGÜ-System wesentlich schneller erfolgen muss als in einem entsprechenden AC-System.

## Die von ABB entwickelte HGÜ-Schlüsseltechnologie war die Reihenschaltung von druckkontaktierten IGBTs.

### 5 Der einzigartige Rotor des SynRM



Diese Faktoren lieferten die Motivation für ABB zur Entwicklung des hybriden Leistungsschalters. Erneut wurden die Vorzüge von Leistungshalbleitern genutzt: Der hybride Leistungsschalter von ABB umfasst einen Hauptleistungsschalter aus leistungselektronischen Schaltern und Überspannungsableitern sowie einen parallelen Zweig mit einem ultraschnellen Trennschalter (UFD) und einem leistungselektronischen Kommutierungsschalter. Diese „hybride“ Anordnung ermöglicht eine schnelle, für HGÜ-Anwendungen geeignete Trennung.

#### Automatisierung

Energietechnik ist eine Säule der ABB-Technologie, Automatisierungstechnik ist die andere. Ohne Übertreibung kann man sagen, dass die von ABB erzielten Fortschritte das Gesicht der Industrieautomatisierung verändert haben. So war das Unternehmen nicht nur für viele Innovationen auf dem Gebiet der digitalen Leitsysteme (DCSs) und der Anlagenautomatisierung verantwortlich, ASEA brachte 1973 auch den ersten kommerziell erfolgreichen elektrischen Industrieroboter der Welt auf den Markt.

Das Ergebnis der frühen Versuche anderer auf dem Gebiet der Robotik in den 1950er und 1960er Jahren waren klobige, laute, hydraulische Ungeheuer, die ständig Öl verloren. Anfang der 1970er Jahre erkannte ASEA das Potenzial elektrisch angetriebener Roboter und entwickelte den ersten Roboter dieser Art, den IRB 6 (IndustrieRoBoter mit 6 kg Trag-

kraft), der gleich nach seiner Markteinführung zum Erfolg wurde. Die erste Lieferung ging an ein kleines schwedisches Unternehmen, bei dem vier der seinerzeit fünf bestellten Roboter nach über 40 Jahren an gleicher Stelle noch immer die gleiche Arbeit verrichten – was für die herausragende Verarbeitung des IRB spricht.

Dem IRB 6 folgten ganze Generationen neuer ABB-Roboter für Automatisierungsaufgaben in verschiedenen Industrien.

#### Kontinuierliche Innovation rund um die Welt

Die Energie- und Automatisierungstechnik von ABB wird von Herausforderungen in allen möglichen Bereichen vorangetrieben – in Haushalten und Büros, auf Öl- und Gasfeldern in entlegenen Wüsten, in Wasseraufbereitungsanlagen, in Bergwerken unter Tage, auf dem Meeresboden (z. B. mit Transformatoren, die in 3.000 m Tiefe arbeiten), in belebten, beengten Städten, auf Feldern und in Fertigungs- und Verarbeitungsanlagen, die sich in den vergangenen Jahren bis zur Unkenntlichkeit verändert haben. Sogar in einem Satelliten in der Erdumlaufbahn ist Technologie von ABB zu finden.

Eine bedeutende neue Herausforderung, von der Brown, Boveri oder Fredholm nichts ahnten, ist der Klimawandel. Die geistige Energie, die in die Minderung der vom Menschen verursachten Klimawirkungen investiert wird, eröffnet völlig neue Innovationsbereiche für ABB.

Ein solcher Bereich sind erneuerbare Energien. Die zunehmende Nutzung von Wind, Sonne, Biomasse und anderer Formen der Erzeugung veranlassen ABB, entsprechende Energie- und Automatisierungslösungen zu entwickeln.

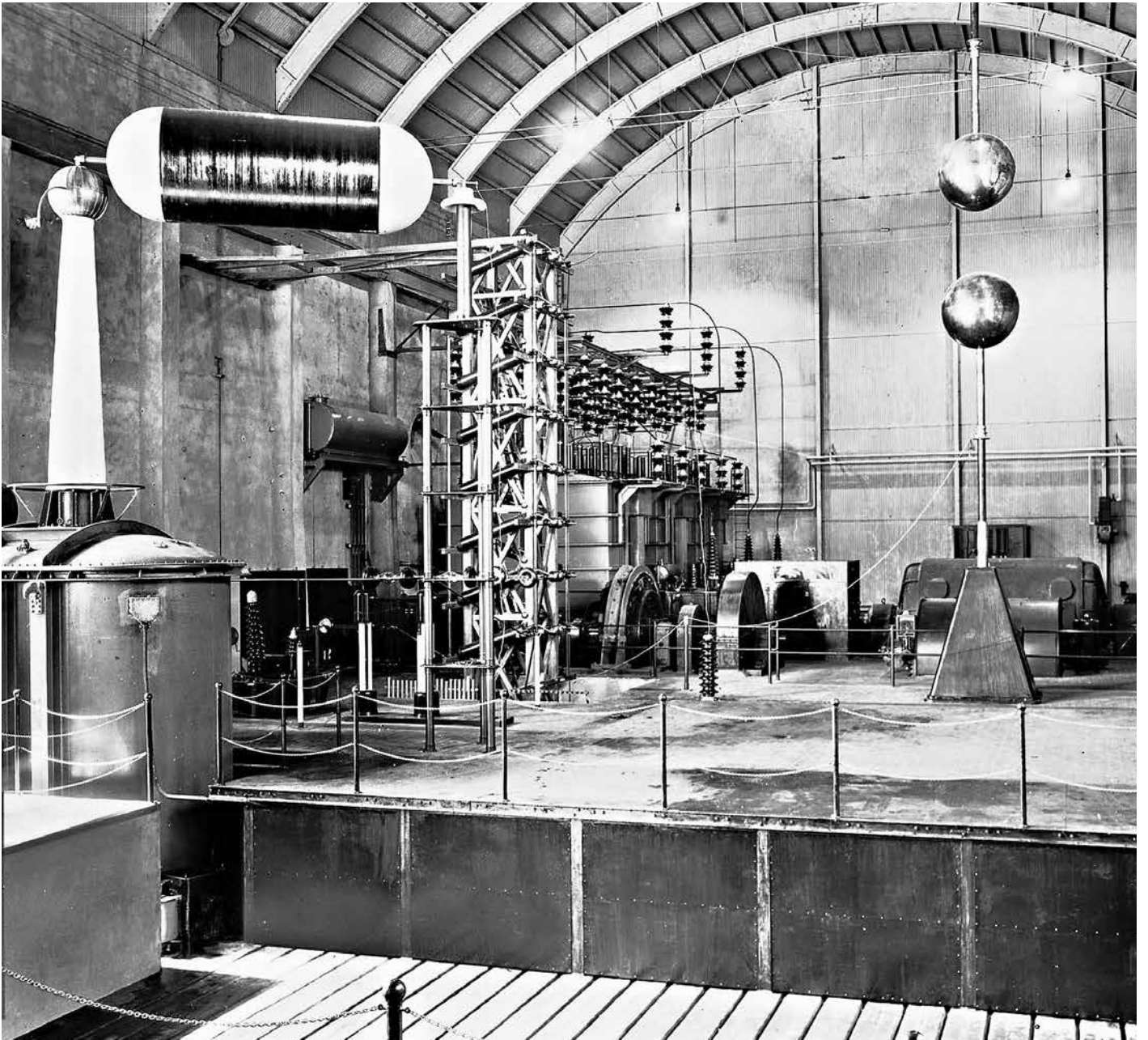
Neben den Erzeugungsanlagen selbst gehören die dezentrale regenerative Stromerzeugung und damit verbundene Technologien wie Mikronetze, Energiespeicher, Lastausgleich, Spannungsaufbereitung, Vermarktung, Betriebsplanung usw. zu den Bereichen, in denen ABB-Innovationen eine Rolle spielen.

Seit der Fusion von ASEA und BBC zu ABB im Jahr 1988 konnte das Unternehmen seine Technologie- und Marktführerschaft in vielen Bereichen durch kontinuierliche Innovation auf dem Gebiet der Energie- und Automatisierungstechnik untermauern. Viele Vorzüge des modernen Lebens wurden erst durch die Bemühungen der ABB-Forscher in den letzten 125 Jahren ermöglicht.

**125**  
YEARS SERVING  
THE WORLD FROM  
SWITZERLAND  
[www.abb.com](http://www.abb.com)

#### Dominic Siegrist

ABB Asea Brown Boveri Ltd.  
Zürich, Schweiz  
[dominic.siegrist@ch.abb.com](mailto:dominic.siegrist@ch.abb.com)



# Die Denkfabrik

Vor 100 Jahren  
eröffnete das erste  
ABB-Forschungs-  
zentrum

ANDERS JOHNSON – Es heißt, Notwendigkeit sei die Mutter der Erfindung. Im Ersten Weltkrieg war das schwedische ABB-Vorgängerunternehmen ASEA von seinen Rohstofflieferanten abgeschnitten und somit gezwungen, andere Möglichkeiten zu finden, die Bedürfnisse seiner Kunden zu erfüllen. Dazu gründete es 1916 im schwedischen Västerås das so genannte „Zentrallabor“, das nicht nur die Krise überlebte, aus der es hervorging, sondern sich in den folgenden 100 Jahren erfolgreich an neue Herausforderungen und Veränderungen anpasste. Zu den besonderen Errungenschaften zählen die ersten synthetischen Diamanten der Welt (1950er Jahre), der erste elektrische Industrieroboter (1970er Jahre) und eine Reihe von richtungsweisenden Innovationen, mit denen sich ASEA – und später ABB – als Pionier und führende Kraft in der HGÜ etablierten. Heute arbeitet das Zentrum an mehreren bedeutenden Projekten auf dem Gebiet der Energie- und Automatisierungstechnik mit dem Ziel, die Nachhaltigkeit zu verbessern.



1a 1949 begann ASEA ein streng geheimes Projekt zur Herstellung synthetischer Diamanten. 1953 gelang es, eine Stunde lang einen Druck von 8,4 GPa aufrechtzuerhalten und erste Diamanten zu gewinnen. Das Projekt war so geheim, dass die Ergebnisse erst in den 1980er Jahren veröffentlicht wurden.



1b Frühe synthetische Diamanten aus dem ASEA-Forschungszentrum

In der Zeit zwischen den Kriegen spielte das Zentrallabor vorwiegend eine unterstützende Rolle für die Fertigungseinheiten von ASEA. Man befasste sich in erster Linie mit Problemen, die wiederholt in verschiedenen Bereichen des Unternehmens auftraten, wie z. B. Fragen der Materialfestigkeit und der Korrosion.

Daneben betrieb das Labor qualifizierte Forschungs- und Entwicklungsarbeit, unter anderem in den Bereichen elektrische Isolierung und Hochfrequenzöfen.

Während des Zweiten Weltkriegs wurde das Zentrallabor stark erweitert. Da

die Lieferwege wieder unterbrochen und Rohstoffe knapp waren, befasste man sich erneut mit der Entwicklung und Erprobung von Ersatzstoffen.

In den 1950er Jahren → 1 begann ASEA in Västerås mit dem Bau einer neuen „Wissenschaftsstadt“ und errichtete in Tegner mehrere moderne Laborgebäude. Anfang der 1960er Jahre war das gesamte Zentrallabor am Standort Teg-

ner untergebracht, der noch heute von der Konzernforschung genutzt wird.

In den 1960er Jahren hatte das Zentrallabor drei Hauptaufgaben: erstens Materialprüfung; zweitens Werkstattservice und -beratung einschließlich neuer Fertigungsmethoden, Kontrolle von Enginee-

---

Zu den Errungenschaften zählen die ersten synthetischen Diamanten der Welt, der erste elektrische Industrieroboter und eine Reihe von richtungsweisenden Innovationen auf dem Gebiet der HGÜ.

ring-Prozessen und Fehlerbeseitigung und drittens Forschung und Entwicklung einschließlich damit verbundener Probleme in den Bereichen Werkstoffe, Fertigung, Maschinen- und Gerätestrukturen und Systeme → 2.

Mitte der 1960er Jahre war das Labor an 70 großen Forschungsprojekten beteiligt, die sich unter anderem mit Brennstoffzellen befassten. Das Projekt erwies

---

**Titelbild**

Das Kurzschlussprüflabor von ASEA im schwedischen Ludvika (gebaut 1930–33). Die Prüfanlage im Hintergrund konnte eine Kurzschlussleistung von 1 Million kVA erzeugen.

2 Ein Thyristorventil aus den frühen 1980er Jahren für die HGÜ Inga-Shaba in Zaire (heute Demokratische Republik Kongo)



3 Der IRB-6 mit 5 Achsen und 6 kg Tragkraft wurde 1974 vorgestellt. Viele der 1.900 gebauten Roboter sind heute noch in Betrieb.



## In den 1980er Jahren spielte das Zentrum eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung faseroptischer Sensoren.

sich jedoch als seiner Zeit zu weit voraus und musste zurückgestellt werden. In den 1970er Jahren verlagerte sich der Schwerpunkt auf Industrieroboter → 3 und die digitale Drehzahlregelung für Papiermaschinen und Walzwerke. In den 1980er Jahren spielte das Zentrum eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung faseroptischer Sensoren zur Messung der Temperatur in Transformatoren.

Im Jahr 1988 fusionierte ASEA mit Brown Boveri zu ABB. Eines der erfolgreichsten Entwicklungsprojekte in den 1990er Jahren war HVDC Light. Die erste kommerzielle Anlage dieser Art wurde 1999 auf Gotland installiert.

Zu den Innovationen, die in den 2000er Jahren unter maßgeblicher Beteiligung des Forschungszentrums entstanden, gehören:

- 2008: Einführung richtungsweisender Vakuum-Stufenschalter für Transformatoren
- 2010: Transformator für die Ultra-Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (UHGÜ) mit 800 kV
- 2011: ABB demonstriert den revolutionären Synchronreluktanzmotor (SynRM).
- 2012: ABB präsentiert den ersten HGÜ-Leistungsschalter der Welt.
- 2014: ABB stellt mit dem neuen 525-kV-HGÜ-Kabel einen Weltrekord auf.
- 2014: Der Abschluss eines umfangreichen Projekts macht das Bergwerk in Garpenberg zum effizientesten Bergwerk der Welt.
- 2015: Einführung des Zweiarml-Industrieroboters YuMi

In den folgenden Artikeln werden verschiedene Technologiebereiche und Errungenschaften des Forschungszentrums genauer behandelt. Im Zentrum der Feierlichkeiten im Jahr 2016 steht die Vergangenheit ebenso wie die Zukunft – oder, um es mit dem Jubiläumsmotto des Zentrums zu sagen: „Das Beste kommt erst noch“.

## Mitte der 1960er Jahre war das Labor an 70 großen Forschungsprojekten beteiligt und befasste sich unter anderem mit Brennstoffzellen.

**Anders Johnson**  
Geschichtsautor  
Stockholm, Schweden

Anfragen bezüglich dieses Artikels bitte an:  
Erik Persson  
erik.persson@se.abb.com



# Die treibende Kraft

## Innovationen von ABB auf dem Gebiet der Elektromotoren

Seit der Einführung der elektrischen Antriebstechnik vor über 100 Jahren, zu deren Pionieren auch ABB zählt, hat dieser Bereich immer wieder bedeutende Innovationsschübe erlebt – ein Trend, der nicht nur bis heute anhält, sondern sich in den vergangenen fünf Jahren noch intensiviert hat. Drehzahl-geregelte Antriebe, direkte Drehmomentregelung, Sanftanlasser und völlig neue Arten von Motoren, die ein Höchstmaß an Leistung auf kleinstem Raum bieten, sind nur einige Beispiele für den Beitrag von ABB zu diesem Technologiebereich.

Im Jahr 2012 machten Pumpen, Lüfter und Kompressoren 79% des weltweiten Umsatzes auf dem Markt für Niederspannungs-(NS-)Motoren aus [1]. Auch die Energieumwandlung wird von NS-Motoren bestimmt: 28 bis 30% der gesamten verfügbaren elektrischen Energie wird durch NS-Motoren in mechanische Energie umgewandelt, weshalb ihrem Wirkungsgrad besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird und in allen bedeutenden Industrieregionen bestimmte Mindeststandards gelten. Die enorme Menge an Energie, die von diesen Geräten weltweit verbraucht wird, zeigt, warum die Umwandlung von elektrischer Energie in Bewegung mithilfe von Elektromotoren ein solch lohnendes Feld für Innovationen ist.

### Reference

- [1] M. Meza: „Industrial LV Motors and Drives: A Global Market Update – January 2014, IHS“. Präsentiert auf der *Motor and Drive Systems 2014 – Advancements in Motion Control and Power Electronic Technology*. Orlando, Florida, 2014

### Titelbild

Der Wirkungsgrad und die Leistungsdichte des neuen SynRM und SynRM<sup>2</sup> stellen einen bedeutenden Fortschritt in der Elektromotortechnik dar. SynRMs sind nur ein Beispiel für ABB-Innovationen auf dem Gebiet der Elektromotoren und der elektrischen Motorregelung.



Die treibende Kraft

# Digitale drehzahl-geregelte Antriebe

**SJOERD BOSGA, HECTOR ZELAYA DE LA PARRA – AC-Motoren sind seit mehr als einem Jahrhundert die Arbeitspferde der Industrie und heute mit Abstand der in der Industrie am häufigsten eingesetzte Elektromotortyp. In der Vergangenheit konnten AC-Motoren jedoch nicht so einfach geregelt werden wie DC-Maschinen, bei denen das Drehmoment proportional zum Ankerstrom ist, was die Regelung vereinfacht. Ein Beweggrund für die Entwicklung drehzahl geregelter AC-Antriebe war der Wunsch, die Eigenschaften des DC-Antriebs – wie eine schnelle Drehmomentanregelzeit und Drehzahlgenauigkeit – mit den Vorteilen des AC-Motors zu verbinden.**

**D**ie Grundfunktion eines drehzahl geregelten Antriebs (engl. Variable Speed Drive, VSD) besteht darin, das Drehmoment bzw. die Drehzahl an der Welle eines Elektromotors zu regeln. DC-Motoren können als VSDs genutzt werden, weil sie leicht zu betreiben sind (sie benötigen keine komplizierte Regelelektronik) und die erforderliche Drehzahl und das erforderliche Drehmoment mühelos erreichen können. Doch mit dem Aufkommen der Leistungselektronik vor einigen Jahrzehnten wurde eine wirksame AC-VSD-Technologie möglich, mit der die hervorragende Leistungsfähigkeit von DC-Motoren unter Verwendung robuster, kostengünstiger und wartungsfreier AC-Motoren erreicht werden konnte.

## Traditionelle VSD-Verfahren

Bei der Frequenzregelung für AC-Antriebe werden Spannungs- und Frequenzsollwerte in einen Modulator eingegeben, der eine AC-Sinuswelle erzeugt und diese in die Statorwicklungen des Motors einspeist. Dieses Verfahren heißt Pulsweitenmodulation (PWM) und nutzt die Tatsache, dass es netzseitig einen Diodengleichrichter gibt und die DC-Zwischenkreisspannung konstant gehalten wird. Ein Wechselrichter regelt den Motor in Form einer PWM-Impulsfolge, die die Spannung und Frequenz vorgibt → 1.

---

Die enorme Menge an Energie, die von NS-Motoren verbraucht wird, zeigt, warum dies ein solch lohnendes Feld für Innovationen ist.

Bezeichnend ist, dass bei diesem Verfahren keine Rückmeldeeinrichtung erforderlich ist, die an der Motorwelle die Drehzahl oder die Position misst und den Wert als Rückmeldung an die Regelung überträgt. Eine solche Anordnung ohne Rückmeldeeinrichtung heißt „Antrieb ohne Signalarückführung“. Dieses Verfahren ist kostengünstig, einfach und eignet sich für Anwendungen, die keine hohe Präzision erfordern, wie z. B. Pumpen und Lüfter.

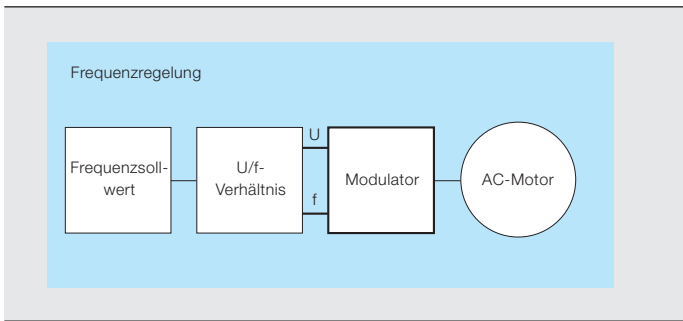
Ein weiteres gängiges und leistungsfähigeres Verfahren ist die sogenannte Flussvektorregelung mit PWM, die jedoch kostenintensiv ist und ein Rückführsignal erfordert.

## Direkte Drehmomentregelung (DTC)

Die revolutionäre DTC-Technologie von ABB bietet viele Vorteile gegenüber traditionellen Methoden der Motorregelung. Zum Beispiel wird die Feldorientierung ohne Rückmeldung und ohne Modulation durch Anwendung fortschrittlicher Motortheorie zur direkten Berechnung des Motormoments erreicht. Die Regelgrößen sind der Magnetisierungsfluss des Motors und das Motormoment.

Außerdem kommt die DTC ohne Modulator aus und benötigt keinen Drehzahlmesser oder Positionsgeber zur Rückmeldung der Drehzahl oder Position der Motorwelle → 2. Die DTC nutzt die schnellste verfügbare Hardware für die Verarbeitung digitaler Signale und ein innovatives mathematisches Konzept über die Funktionsweise des Motors. Das Ergebnis ist ein Antrieb mit einer Drehmomentanregelzeit, die typischerweise 10-mal schneller ist als bei einem AC- oder DC-Antrieb → 3–4. Die dynamische Drehzahlgenauigkeit eines DTC-Antriebs ist 8-mal besser als bei AC-Antrieben ohne Signalarückführung und vergleichbar mit der eines DC-Antriebs mit Signalarückführung. Damit ermöglicht die DTC den ersten „universellen“ Antrieb, der in der Lage ist, wie ein AC- oder ein DC-Antrieb zu agieren.

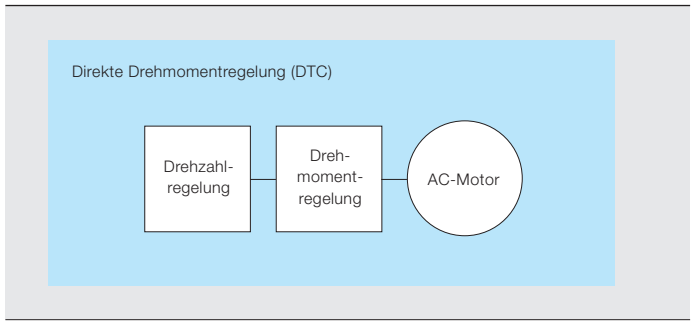
### 1 Regelkreis eines AC-Antriebs mit Frequenzregelung durch PWM



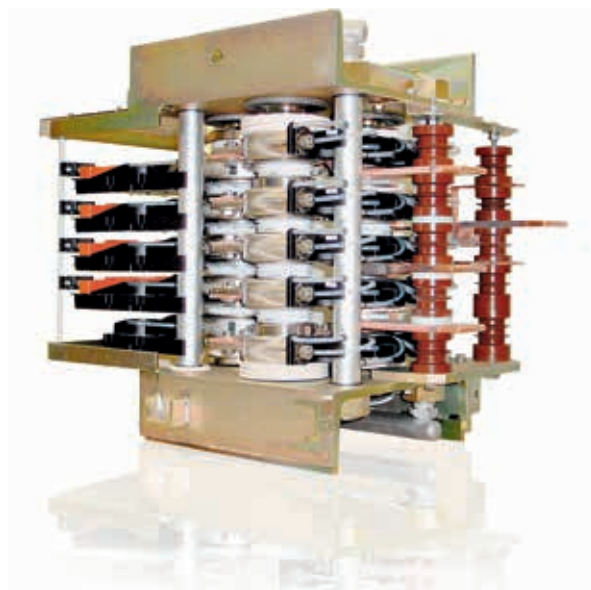
### 3 ABB-Frequenzumrichter vom Typ ACS550



### 2 Regelkreis eines AC-Antriebs mit DTC



### 4 Leistungselektronischer 9-MVA-Baustein von ABB



Die revolutionäre DTC-Technologie von ABB bietet viele Vorteile gegenüber traditionellen Methoden der Motorregelung.

#### VSDs von ABB

Der erste drehzahlgeregelte Antrieb mit PWM wurde Anfang der 1960er Jahre von Strömberg in Finnland unter dem Markennamen SAMI entwickelt, doch der Name verschwand, als ASEA Strömberg 1987 übernahm. Im Laufe der Jahrzehnte ermöglichten verbesserte Generationen von leistungselektronischen Bauteilen ABB die Entwicklung neuer VSD-Familien sowie eine Erweiterung der Anwendungsgebiete von VSDs. Im Bereich der Mittelspannungs-Antriebe geht der Trend in Richtung kompakterer Baugrößen, einer höheren Zuverlässigkeit und Redundanz sowie einer verbesserten Energieeffizienz. Angesichts des Beitrags von ABB in diesem Bereich – z. B. der Einsatz von IGCTs (Integrated Gate-Commutated Thyristors) und die DTC – ist es wenig verwunderlich, dass das Unternehmen weltweit zu den größten Anbietern von VSDs für die Industrie gehört.

Sjoerd Bosga

Hector Zelaya De La Parra

ABB Corporate Research

Västerås, Schweden

sjoerd.bosga@se.abb.com

hector.zelaya@se.abb.com

Die treibende Kraft

# Sanftanlasser

HECTOR ZELAYA DE LA PARRA, MARIA WIDMAN, SÖREN KLING, GUNNAR JOHANSSON – AC-Asynchronmotoren sind die in der Industrie am häufigsten eingesetzten Elektromotoren. Oft werden sie durch direktes Einschalten mithilfe eines Hauptschützes und eines thermischen Überlastrelais angelassen. Hierbei tritt jedoch ein Anlaufstrom auf, der um ein Vielfaches höher sein kann als der Nennstrom. Solch ein Einschaltstrom kann Spannungseinbrüche verursachen und andere Verbraucher beeinträchtigen. Außerdem können beim Anlassen extreme mechanische Belastungen auftreten, die zu Schäden führen können. Sanftanlasser bieten eine alternative Anlassmethode, die diese Einschaltströme und mechanischen Überlastungen verhindert. ABB hat eine breite Palette dieser Geräte erfolgreich auf dem Markt etabliert.

**E**in Sanftanlasser ist ein Gerät auf der Basis von leistungselektronischen Bauteilen, das die Eingangsspannung eines Motors beim Anlassen regelt und dadurch das Anlaufmoment und den Anlaufstrom reduziert, die ein Vielfaches der Nennwerte betragen können → 5.

Das Herzstück eines Sanftanlassers bilden Thyristoren. Diese bipolaren Halbleiter – entwickelt in den 1950er Jahren – stehen heute für sehr hohe Spannungen und Ströme zur Verfügung. Ein Sanftanlasser besitzt in jeder Phase zwei antiparallel geschaltete Thyristoren, deren Zündwinkel zur Regelung der Anlaufspannung angepasst wird. Dabei wird der Zündwinkel allmählich verändert, sodass die Spannung und das Drehmoment langsam ansteigen und der Motor sanft anläuft.

Ein Vorteil des Sanftanlassers ist, dass das Drehmoment genau auf den erforderlichen Wert eingestellt werden kann. Diese Art der Drehmomentregelung stellt ein wichtiges Wettbewerbsmerkmal dar.

Ein weiteres bedeutendes Merkmal des Sanftanlassers ist seine Sanftauslauffunktion. Diese ist besonders nützlich zum Anhalten von Pumpen in Wassersystemen, bei denen es bei direktem Anhalten mit einem Stern-Dreieck-Anlasser oder Direktstarter

## Der Zündwinkel wird allmählich verändert, sodass die Spannung und das Drehmoment langsam ansteigen und der Motor sanft anläuft.

zu Druckschlägen in den Leitungen kommt. Die Sanftauslauffunktion kann zudem dabei helfen, Materialschäden beim abrupten Anhalten von Förderbändern zu verhindern.

### ABB-Sanftanlasser

Nach umfangreicher eigener und fremder Pionierarbeit in den 1970er Jahren entwickelte und produzierte Fairford Electronics in England als eines der ersten Unternehmen eine Drehstrom-Motorregelung mit automatischer Energieoptimierung, die in der Lage war, den Motor sanft anlaufen zu lassen, um Energie zu sparen. ASEA erkannte das Potenzial dieser Idee und startete eine Kooperation mit einem kleinen schwedischen Unternehmen namens Elfi, um mit Komponenten von Fairford Electronics und dem Know-how von Elfi einen eigenen Sanftanlasser zu entwickeln.

Das Projekt war erfolgreich, und 1984 wurde der erste Sanftanlasser von ASEA mit der Bezeichnung DEHE auf der Elfack-

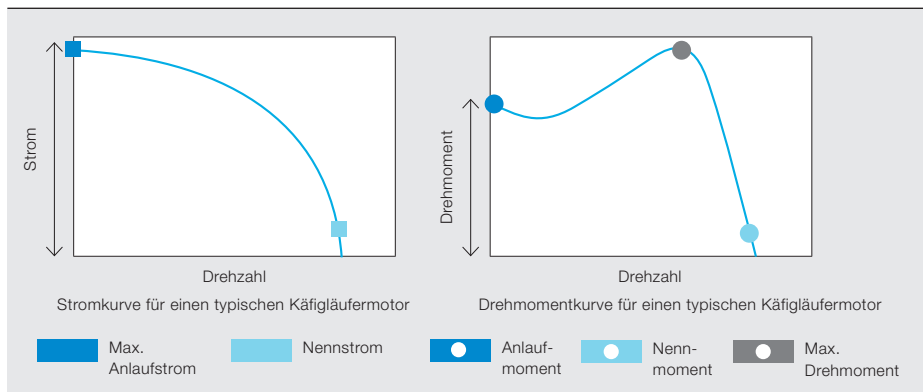
Messe vorgestellt. Zu der Zeit waren sich nur wenige der Vorteile eines Sanftanlassers bewusst, sodass ASEA die zusätzliche Aufgabe hatte, den Markt zu schulen. Die ersten

Verkäufe beschränkten sich überwiegend auf schwedische Kunden im Bergbau und in der Papierindustrie.

Die Grundkomponenten eines modernen Sanftanlassers sind größtenteils die gleichen wie bei den frühen Versionen: ein Schütz, ein Überlastrelais und die antiparallelen Halbleiterbauelemente (Thyristoren) → 6. Hinzu kommen eine Leiterplatte, ein Kühlkörper, Lüfter und ein Gehäuse.

Im Jahr 1993 wurde eine neue Version – der PSD – mit zusätzlichen Funktionalitäten eingeführt. Dieser war für verschiedene Spannungen erhältlich und eröffnete neue Märkte in aller Welt. Der Erfolg des PSD hielt durch die 1990er Jahre hindurch an, und obwohl Fairford Electronics noch immer für die technischen Aspekte verantwortlich war, nutzte ABB ihre starke Marktorganisation und Erfahrung für einen breiten Vertrieb des Produkts.

## 5 Strom und Drehmoment eines Asynchronmotors – ohne Sanftanlasser können die Werte beim Starten ein Vielfaches der Nennwerte betragen.



## 7 Die Sanftanlasser-Palette von ABB



Der erste Sanftanlasser von ASEA mit der Bezeichnung DEHE wurde 1984 auf der Elfack-Messe vorgestellt.

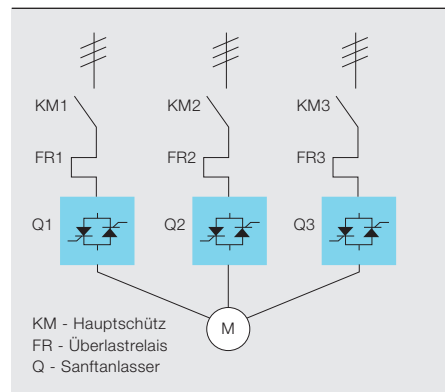
Der erste ABB-Sanftanlasser, der Typ PSS, wurde in einer eigens dafür eingerichteten Fabrik in Örjan, einem Vorort von Västerås in Schweden, entwickelt und gebaut und kam 2000 auf den Markt. Zwei Jahre später wurde das Produkt weiter verbessert und die Produktpalette in Low-End- (PSS) und High-End-Produkte (PSD) unterteilt.

Im Jahr 2004 avancierte ABB mit einer neuen Version – dem PST – zum Marktführer für Sanftanlasser, insbesondere in

China. Der PST war der erste Sanftanlasser mit einem integrierten Bypass für den Normalbetrieb. So können Thyristor-Durchlassverluste vermieden und Energie gespart werden. Die weitere Entwicklungsarbeit konzentrierte sich auf neue Algorithmen zur Verbesserung der Funktionalität und die Verwendung von Modellierungs- und Simulationswerkzeugen zur Untersuchung des Einsatzes von Sanftanlassern in Verbindung mit Wasserpumpen. Ein weiterer Schwerpunkt war die Kostensenkung, und als im Jahr 2010 der PSE auf den Markt kam, hatte sich ABB klar als führendes Unternehmen auf dem allgemeinen Sanftanlassermarkt etabliert.

Bis zum Jahr 2014 hatte man die Bedeutung der Gerätekommunikation erkannt, und viele der heutigen Sanftanlasser verfügen über einen entsprechenden Anschluss für die Kommunikation, die typischerweise über Glasfaserkabel erfolgt → 7. Viele verschiedene Kommunikationsprotokolle werden unterstützt, darunter PROFIBUS, DeviceNet, Interbus-S, LonWorks usw. Außerdem hat sich gezeigt,

## 6 Sanftanlasser (vereinfachte schematische Darstellung)



dass Diagnosefunktionen, die Bedien-schnittstelle (HMI) und die Integration von Sanftanlassern und anderen Geräten wie speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) ebenfalls eine wichtige Rolle spielen. All diese Aspekte wurden beim allerneuesten Sanftanlasser von ABB, dem PSTX, berücksichtigt.

Wie bei vielen anderen industriellen Geräten wird mit der wachsenden Bedeutung von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Bedarf an Diagnosefunktionen in Zukunft zunehmen. Neue umwälzende Technologien wie das Internet der Dinge, Dienstleistungen und Menschen (IoTSP) treiben den Trend zur allgemeinen Konnektivität voran und werden eine bessere vorbeugende Instandhaltung und Integration in die Fabrikumgebung ermöglichen.

### Hector Zelaya De La Parra

ABB Corporate Research  
Västerås, Schweden  
hector.zelaya@se.abb.com

### Maria Widman

ABB Electrification Products,  
Protection and Connection  
Västerås, Schweden  
maria.widman@se.abb.com

### Sören Kling

ABB Electrification Products,  
Sales & Marketing  
Västerås, Schweden  
soren.kling@se.abb.com

### Gunnar Johansson

ABB Electrification Products,  
Protection and Connection  
Västerås, Schweden  
gunnar.c.johansson@se.abb.com

Die treibende Kraft

# An der Spitze der Motorentwicklung

**FREDDY GYLLENSTEN, DMITRY SVECHKARENKO, REZA RAJABI MOGHADDAM – Eine von ABB entwickelte revolutionäre Technologie ist der Synchronreluktanzmotor, oder kurz SynRM. Dank ihrer besonderen Konstruktion sind diese Elektromotoren äußerst zuverlässig, hoch effizient und bieten eine hohe Leistungsdichte auf kleinstem Raum.**

**A**synchronmotoren sind der in der Industrie vorherrschende Motorentyp. Dies gilt auch für drehzahlgeregelte Anwendungen wie Pumpstationen → 8. Der Grund hierfür ist, dass Asynchronmotoren direkt am Netz gestartet werden können – historisch gesehen die gängigste Anlassmethode, die auch nach Einführung moderner Frequenzumrichter noch immer weit verbreitet ist. Doch diese Motoren haben aufgrund ihrer asynchronen Betriebsweise einige inhärente Nachteile, die zu relativ hohen Rotorverlusten und zur Erwärmung von Lagern und Wicklungen führen, was sich wiederum auf die Wartungsintervalle auswirkt und die Lebensdauer der Lager und der Isolierung verkürzt.

Der Synchronreluktanzmotor hat diese Nachteile nicht und ist wesentlich besser für den drehzahlgeregelten Betrieb geeignet.

## SynRM-Motortechnologie

Obwohl AC-Motoren mit Permanentmagneten bereits seit Langem bekannt sind, wurden sie erst in den 1980er Jahren zu einer ernsthaften Konkurrenz für den Asynchronmotor, nachdem eine neue Generation von Permanentmagneten auf der Basis von Seltenen Erden (SE) entwickelt wurde. Eine Vorausset-

---

**Der Synchronreluktanzmotor hat diese Nachteile nicht und ist wesentlich besser für den drehzahlgeregelten Betrieb geeignet.**

zung für den Einsatz dieser neuen Magnete in Elektromotoren war die parallele Entwicklung von AC-Antrieben, die für die Regelung und den Betrieb der Motoren erforderlich waren.

Seltene Erden sind jedoch teuer und können Preisschwankungen unterliegen. Außerdem kann ihr starkes Rotormagnetfeld die Wartung (ein wichtiges Merkmal bei Industriemotoren) erschweren. Hier kommt nun der SE-freie Synchronreluktanzmotor ins Spiel.

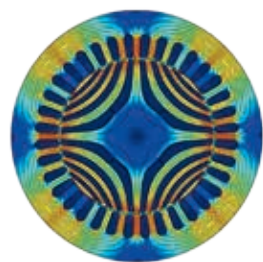
Der Synchronreluktanzmotor ist ein Drehstrom-Elektromotor mit einer magnetisch anisotropen Rotorstruktur bestehend aus übereinander geschichteten Elektroblechen mit ausgestanzten Löchern als Flussbarrieren. In der vierpoligen Ver-

sion besitzt der Motor vier Achsen mit einer hohem Permeanz und vier Achsen mit einer niedrigen Permeanz. Eine hohe Permeanz bedeutet eine hohe magnetische Leitfähigkeit und eine höhere Induktivität, während eine niedrige Permeanz eine niedrigere Induktivität bedeutet. Reluktanz, also der magnetische Widerstand, ist der Kehrwert der Permeanz. Folglich führt eine hohe Reluktanz zu einer niedrigen Induktivität. Die Achsen mit hoher Permeanz (Eisen) können als direkte oder d-Achsen und die Achsen mit hoher Reluktanz (Luft) als Quadratur- oder q-Achsen bezeichnet werden → 9.

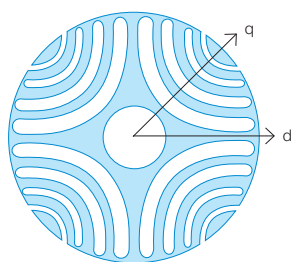
Wird durch Anlegen von Erregerströmen an den Statorwicklungen im Luftspalt ein Magnetfeld erzeugt, versucht der Rotor, seine magnetisch leitfähigste Achse – die d-Achse – am angelegten Feld auszurichten, um die Reluktanz im Magnetkreis zu minimieren. Mit anderen Worten, immer wenn der angelegte Feldvektor und die d-Achse nicht aneinander ausgerichtet sind, wird ein Drehmoment im Luftspalt zwischen Stator und Rotor erzeugt, das den Rotor in Drehung versetzt. Der Rotor läuft synchron mit dem angelegten Magnetfeld beim Versuch, die Reluktanz im Magnetkreis zu minimieren. Diesem Funktionsprinzip verdankt die Technologie ihren Namen – synchrone Reluktanz.



9 Vierpoliger Synchronreluktanzmotor



9a Querschnitt durch einen vierpoligen Synchronreluktanzmotor



9b Definition der magnetischen d- und q-Achsen des Rotors



9c Motor mit eingesetztem Rotor

Da der Rotor keine Wicklungen besitzt und folglich keine Joule-Verluste aufweist, läuft er erheblich kühler, effizienter und zuverlässiger als ein Asynchronmotor. Aufgrund der sinusförmigen Feldverteilung im Luftspalt und dem Betrieb mit einem sinusförmigen Strom laufen Synchronreluktanzmotoren zudem besonders ruhig. Ein Nachteil ist, dass der Motor nicht durch direkten Netzanschluss gestartet werden kann, da die Position des Rotors bekannt sein muss.

**Entwicklungsgeschichte des SynRM**

Das Engagement von ABB für den SynRM begann im Jahr 2004, als man auf dem florierenden Markt für drehzahlregelte Antriebe neue Möglichkeiten für Synchronreluktanzmotoren erkannte. Die Technologie versprach einen höheren Wirkungsgrad und eine höhere Zuverlässigkeit ohne die Notwendigkeit von SE-Permanentmagneten. Die positiven

Ergebnisse erster Untersuchungen führten schließlich zum Start eines Technologieprojekts im Jahr 2007. Gleichzeitig wurde die Marktnachfrage für ein solches Produkt geprüft.

Zur Vertiefung der Kenntnisse wurde 2006 ein MSc-Projekt zum Motorkonzept initiiert, das anschließend in einem PhD-Projekt fortgesetzt wurde.

Bis 2009 wurden gute technische Fortschritte erzielt. Zum Beispiel wurden aufgrund von Lager- und Rotorblechversagen umfangreiche Lebensdauertests und Ausfallartanalysen durchgeführt. Im Jahr 2011 war die Entwicklung so weit fortgeschritten, dass der SynRM auf der Hannover Messe präsentiert werden konnte. Im selben Jahr wurde die Technologie auf der SPS IPC Drives in Deutschland mit dem Automation Award ausgezeichnet. 2012 kamen die ersten Produkte auf den Markt.

## Das Engagement von ABB für den SynRM begann im Jahr 2004.

Im Jahr 2014 wurde die SynRM-Produktpalette durch den SynRM<sup>2</sup> erweitert. Ein besonderes Merkmal dieses hauptsächlich von den ABB SynRM-Experten Alessandro Castagnini, Pietro Savio Termini und Giulio Secondo entwickelten Motors ist der Einsatz von Magneten aus Ferrit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), die allgemein kostengünstiger und verfügbarer sind als SE-Magnete. Das Ergebnis ist ein äußerst leistungsstarkes und gleichzeitig wirtschaftlich und ökologisch nachhaltiges Produkt.

Im Jahr 2015 wurde die SynRM-Familie mit der Einführung der DOLSynRM-Technologie erneut erweitert. Dieser Motor verfügt über einen Käfig im Inneren der SynRM-Rotorbarrieren und kann mit direktem Netzanschluss gestartet werden.

Obwohl der SynRM seit seinen Anfängen eine große Entwicklung durchgemacht hat, ist er im kommerziellen Einsatz noch immer eine relativ junge Technologie. Die aktuellen Produkte von ABB bieten das Potenzial für weitere Leistungssteigerungen durch weiterentwickelte Designs und Konstruktionen und ermöglichen somit optimierte Lösungen für vielfältige Kundenbedürfnisse.

**Freddy Gyllensten**

**Dmitry Svechkarenko**

**Reza Rajabi Moghaddam**

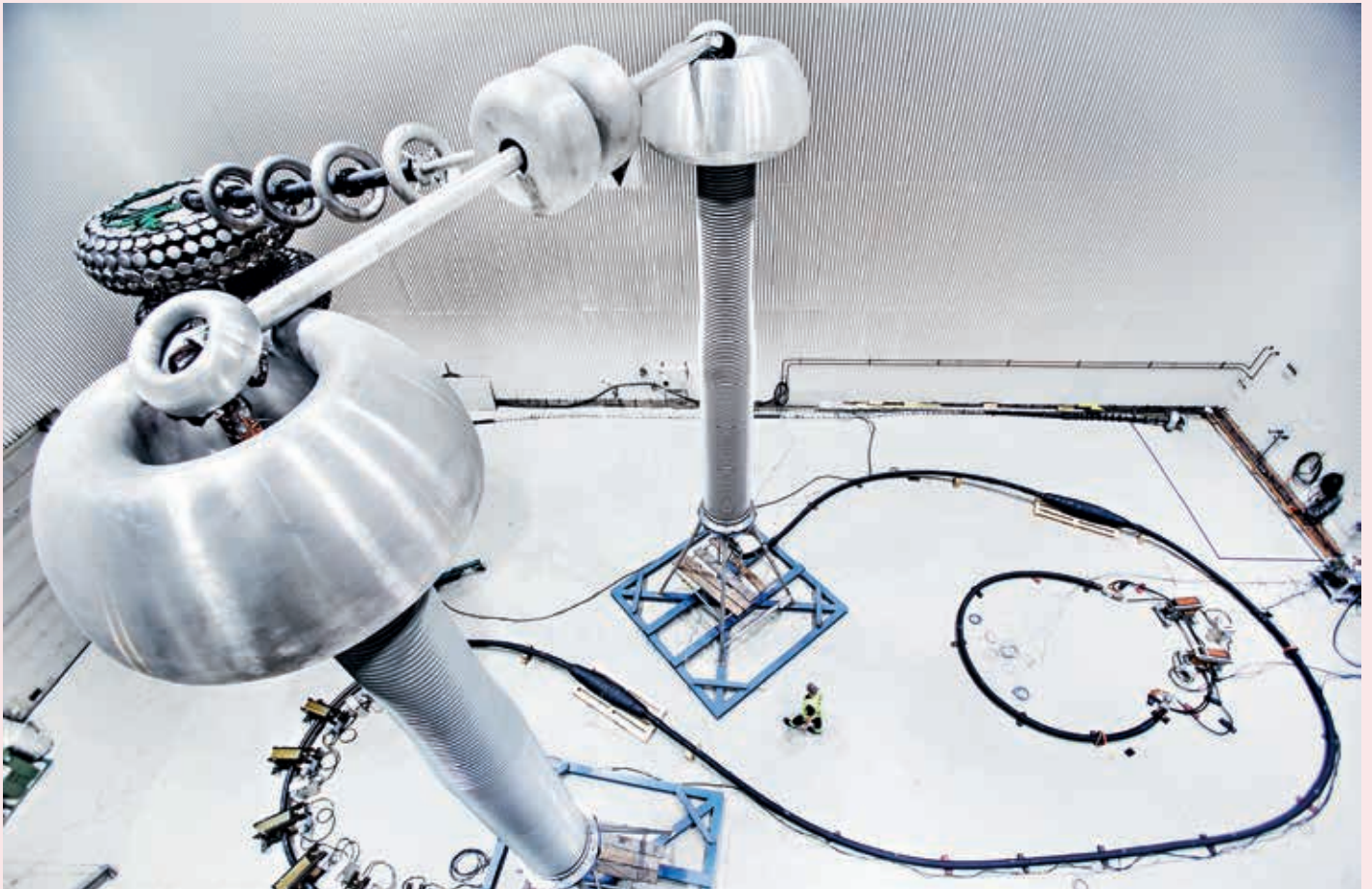
ABB Discrete Automation and Motion,  
Motors and Generators

Västerås, Schweden

freddy.gyllensten@se.abb.com

dmitry.svechkarenko@se.abb.com

reza.r.moghaddam@se.abb.com



# Die direkte Verbindung

## HGÜ-Technik für eine bessere Energieübertragung

Mit fortschreitender Entwicklung unserer modernen Gesellschaft müssen immer größere Strommengen über Regionen und Kontinente hinweg transportiert werden. Hierfür ist die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) bestens geeignet. Die HGÜ bietet nicht nur eine höhere Effizienz, dank moderner Leistungselektronik ist die erforderliche Infrastruktur auch weniger komplex und sperrig als bei der Hochspannungs-Drehstromübertragung (HDÜ) und lässt sich außerdem leichter in Konzepte wie Smart Grids einbinden.

### Titelbild

Weltweit werden immer mehr HGÜ-Verbindungen installiert, um große Strommengen effizient zu transportieren. Das Bild zeigt ein extrudiertes 525-kV-HGÜ-Kabel im Test.

Nachdem sich die Gleichstromtechnik Anfang des 20. Jahrhunderts auf dem Gebiet der elektrischen Energieübertragung der Wechselstromtechnik geschlagen geben musste, erlebte sie erst in den 1950er Jahren ihr Comeback, als geeignete Umrichtertechnik zur Verfügung stand.

Zuvor hatte der Gleichstrom gegenüber dem Wechselstrom an Einfluss verloren, weil er mit verschiedenen Schwierigkeiten verbunden war – z. B. das Auf- und Abspannen, eine Aufgabe, die mit Wechselstrom relativ einfach ist. Doch Gleichstrom stellt eine wesentlich bessere Möglichkeit zur Energieübertragung dar, da der Betrieb mit hohen Spannungen – und somit niedrigen Strömen – effizienter ist.

Im Laufe der Jahrzehnte wurde die HGÜ für die Übertragung unter Wasser und für Kurzkupplungen eingesetzt, doch die dafür notwendige Technik war elektromechanisch und sperrig. Erst mit dem Aufkommen leistungselektronischer Komponenten wie IGBTs wurden kompakte HGÜ-Systeme wirtschaftlich und praktisch machbar. Die Lösung von ABB im Bereich der selbstgeführten HGÜ heißt HVDC Light®.

Ein HVDC-Light-System ist jedoch mehr als nur ein einzelnes Produkt. Zur Realisierung einer HGÜ ist eine ganze Palette innovativer Produkte und Lösungen – wie geeignete Kabel, Leistungsschalter und die hochentwickelte Leistungselektronik im Herzen des Systems – erforderlich.

Die direkte Verbindung

# Effiziente Energieübertragung mit HVDC Light®

JAN R. SVENSSON – Die Tätigkeit von ABB auf dem Gebiet der HGÜ in der Neuzeit geht zurück auf eine Studie von Gunnar Asplund, Leiter der HGÜ-Forschung, aus dem Jahr 1993 über die Nutzung von Spannungszwischenkreis-Umrichtern (Voltage Source Converters, VSCs) für die HGÜ. Seitdem wurden immer größere und aufwändigere HGÜ-Verbindungen rund um die Welt realisiert, und die HGÜ hat sich für ABB zu einem Milliardengeschäft entwickelt.

**A**uf der Grundlage der positiven Ergebnisse aus Asplunds Studie startete ABB im August 1994 ein groß angelegtes Forschungsprojekt zur weiteren Untersuchung des VSC-Ansatzes.

Das „Arbeitspferd“ der neuen Technologie war der Bipolartransistor mit integriertem Gate (IGBT). IGBTs sind Metalloxid-Halbleiterbauelemente, bei denen die zur Ansteuerung erforderliche Leistung sehr gering ist und aus der parallelen Schutzbeschaltung (Snubberschaltung) entnommen werden kann. Somit muss keine Hilfsenergie für die Ansteuereinheit (Gate Unit, GU, die auf hohem Potential liegt) vom Grundpotential geliefert werden. Darüber hinaus kann das Ein- und Ausschalten des IGBT von der GU präzise gesteuert werden, was die Reihenschaltung von IGBTs ermöglicht.

Die von ABB entwickelte Schlüsseltechnologie war die Reihenschaltung von druckkontaktierten IGBTs zur Bewältigung hoher Spannungen zusammen mit der Entwicklung eines Kurzschlusszustandskonzepts (Short-Circuit Failure Mode, SCFM) und eines geeigneten Prüfverfahrens.

Die in Reihe geschalteten IGBTs müssen alle zur gleichen Zeit (ein- oder aus-) geschaltet werden, damit jeder IGBT die gleiche Spannungsbelastung erfährt. Für eine HGÜ-Umrichterstation bedeutet dies, dass Hunderte von IGBTs im Bruchteil einer Mikrosekunde einzeln geschaltet werden müssen.

Dazu wurde ein komplettes Reihenschaltungskonzept einschließlich Design, Fertigung und Abstimmung der GUs sowie der Snubberschaltungen und der Stromversorgung entwickelt. Anschließend

---

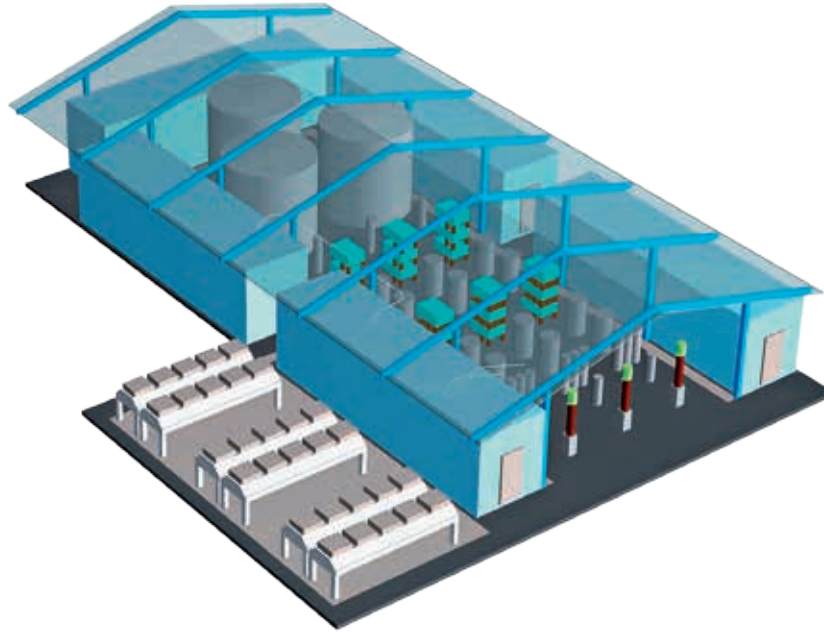
## Eine von ABB entwickelte Schlüsseltechnologie war die Reihenschaltung von druckkontaktierten IGBTs.

wurde das Konzept durch den Bau eines H-Brücken-Prototyps mit vier in Reihe geschalteten IGBTs pro Ventil verifiziert.

Die Machbarkeit des VSC-basierten HGÜ-Konzepts wurde im Jahr 1997 an einer Demonstrationsanlage nachgewiesen, die in Mittelschweden zwischen Hällsjön und Grängesberg an einer 10 km langen, vorübergehend außer Betrieb genommenen 50-kV-Drehstrom-



## 1 HVDC-Light-Pilotanlage auf Gotland



leitung installiert wurde. Die Demonstrationsanlage besaß:

- eine Nennleistung von 3 MW bei  $\pm 10$  kV und einer Schaltfrequenz von 1.950 Hz,
- zwei Stationen mit dreiphasigen Zweipunkt-VSCs,
- druckkontaktierte IGBTs für 2,5 kV/250 A,
- Kühlung der IGBTs mit entionisiertem Wasser,
- eine Mischung aus Freileitung und Kabelverbindung,
- DC-Leistungsschalter und DC-Chopper aus in Reihe geschalteten IGBTs.

Am 10. März 1997 wurde erstmalig Strom über die erste VSC-basierte HGÜ der Welt übertragen. Ein anschließendes umfangreiches Testprogramm zeigte, dass das Konzept alle Erwartungen erfüllte.

### Einführung von HVDC Light

Im Mai 1997 lancierte ABB HVDC Light und lud Kunden zu Seminaren und einem Besuch der Demonstrationsanlage nach Schweden ein. Das Design von HVDC Light basierte auf einem modularen Konzept mit einer Reihe von standardisierten Größen zwischen 10 und 100 MW und Zweipunkt-Umrichtern für bis zu  $\pm 80$  kV. HVDC Light wurde als umweltfreundliches Produkt präsentiert. Da der Strom

durch zwei Erdkabel übertragen wird, gibt es keine optische Beeinträchtigung. Aufgrund der ausgeglichenen Spannung gegen Erde ist keine Elektrode erforderlich, d. h. es gibt keinen Erdstrom, und von dem Kabelpaar geht kein elektromagnetisches Feld aus.

Die Stationen können unbemannt betrieben werden und sind im Prinzip wartungsfrei. Der Betrieb kann aus der Ferne erfolgen. Die erste HVDC-Light-Pilotanlage ging im November 1999 auf der schwedischen Insel Gotland in Betrieb und umfasste zwei extrudierte 80-kV-Kabel zwischen den Umrichterstationen mit einer Gesamtlänge von 140 km → 1.

### Anwendungen

Als synchroner Generator erzeugt der VSC seine eigenen Phasenspannungen. Eine kaskadierte Regelung ermöglicht eine schnelle Regelung der Wirk- und Blindströme unabhängig voneinander in einem inneren Regler, während der äußere – langsamere – Regler mithilfe des Wirkstroms den Sollwert der Wirkleistung bzw. der DC-Zwischenkreisspannung verfolgt. Der Blindstrom wird zur Regelung der AC-Spannung bzw. zur Einspeisung/zum Verbrauch von Blindleistung genutzt. In Verbindung mit äußeren Regelkreisen ermög-

licht die kaskadierte Regelung die Unterstützung einer Vielzahl von Anwendungen wie:

- die Kopplung von Stromnetzen
- die Anbindung von verbraucherfernen Erzeugungsanlagen, z. B. Offshore-Windenergieanlagen, und die Versorgung von entfernten Verbrauchern wie Öl- und Gasplattformen vom Festland aus
- DC-Verbindungen in AC-Netzen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit des AC-Netzes. HVDC Light beseitigt Engpässe in vorhandenen AC-Netzen und erleichtert die Trassierung für Kabelleitungen. Darüber hinaus erhöht HVDC Light die Stabilität und Zuverlässigkeit des AC-Netzes und trägt zur Verbesserung der Versorgungsqualität bei.
- Einspeisepunkte in Stadtzentren: HVDC Light benötigt wenig Platz, und die dazugehörige Kabeltechnologie erleichtert die Trassierung auf vorhandenen Strecken.

### Höhere Spannungen und Leistungen

Um der Nachfrage seitens der Kunden nach höheren Leistungen und niedrigeren Verlusten nachzukommen, wurden HGÜ-Leistungshalbleiter und ihre Aufbau- und Verbindungstechnik (Packaging) kontinuierlich weiterentwickelt. Dies hat die Optimierung von Umrichter-

Die Machbarkeit des VSC-basierten Konzepts wurde im Jahr 1997 an einer Demonstrationsanlage mit 10 km und 3 MW/±10 kV nachgewiesen.

2 Die Plattform Troll A. Die HVDC-Light-Station ist der graue Kasten zwischen den Kranen.



topologien und Regelalgorithmen einschließlich Strategien zur Pulsweitenmodulation (PWM) ermöglicht.

#### HVDC Light 2002–2005

Eine neue Generation von extrudierten polymerisolierten Kabeln wurde entwickelt, um eine DC-Zwischenkreisspannung von ±150 kV zu ermöglichen. Außerdem wurde eine Umrichterstation mit einem Dreipunkt-VSC mit ANPC-Technologie (Active Neutral Point Clamped) entwickelt. Beide kamen in zwei Projekten – Cross Sound Cable (330 MW) und Murraylink (220 MW) – zum Einsatz. Bei der zweiten Anlage liegen die Stationen 180 km auseinander.

#### HVDC Light 2005–2007

In einem weiteren Entwicklungsschritt ermöglichte eine neue Generation von Halbleitern die Rückkehr zur Zweipunkt-Umrichtertopologie mit einem optimierten PWM-Algorithmus. Eine Reihe von Projekten wurde realisiert, darunter Caprivi Link (950 km, 300 MW), die erste HVDC-Light-Anlage mit einer Freileitung, die die nordöstlichen und zentralen Landesteile Namibias verbindet.

#### HVDC Light ab 2007

Die neueste HVDC-Light-Technik ermöglicht noch höhere Leistungen bei geringeren Verlusten durch die Verwendung einer modularen Mehrpunkt-Umrichtertopologie (MMC) mit Halbbrücken-Umrichterzellen. Dieser technische Fortschritt hat Projekte wie DolWin1

(800 MW) – das erste HVDC-Light-Projekt mit extrudierten 320-kV-Kabeln – und North Sea Link (730 km, 1.400 MW), eine bipolare HVDC-Light-Verbindung zwischen Norwegen und Großbritannien, ermöglicht. Letztere soll 2021 in Betrieb gehen.

#### Antriebssysteme auf Offshore-Plattformen

Viele Offshore-Plattformen sind ideale Kandidaten für die HGÜ. Auf der Nordsee-Gasplattform Troll A werden z. B. Kompressoren genutzt, um den Gasdruck in den Pipelines zu erhöhen, die das geförderte Gas zum 70 km entfernten Festland transportieren. Normalerweise sind die zur Versorgung von Kompressoren erforderlichen Plattformgeneratoren sperrig und nicht sonderlich effizient. Doch ABB hat Elektromotoren für sehr hohe Spannungen (Very High Voltage, VHV) mit Statorwicklungen auf der Basis von extrudierten AC-Kabeln mit Polymerisolierung entwickelt. Ein VHV-Motor kann ohne Transformator direkt an die HVDC-Light-Anlage angeschlossen werden. Die Nutzung von Festlandstrom in Verbindung mit HVDC Light und VHV-Motoren bietet viele Vorteile:

- Bei der Erzeugung des Festlandstroms werden weniger Treibhausgasemissionen freigesetzt.
- Höherer Wirkungsgrad und geringerer Wartungsaufwand als bei Gasturbinen oder Dieselmotoren
- Gewichtsreduzierung und geringerer Platzbedarf auf der Plattform

Im Jahr 2005 wurden auf Troll A zwei parallele Systeme mit ±60 kV und einem VHV-Motor mit 44 MW/56 kV AC installiert. Zwei weitere Systeme mit einer Motorleistung von 50 MW und einer Spannung von 66 kV AC wurden 2015 fertiggestellt → 2.

#### HVDC Light gehört die Zukunft

In nur 19 Jahren sind aus der 3-MW-Demonstrationsanlage 25 HVDC-Light-Anlagen mit einer Übertragungskapazität von über 10 GW und ein weltweites Milliardengeschäft für ABB geworden. Aspekte wie der Klimawandel, die Einbindung erneuerbarer Energien in das Stromnetz, die Nachfrage nach einer höheren Versorgungsqualität sowie die enge Integration der Energiemärkte und der Versorgungsinfrastruktur werden die rasche Entwicklung von HVDC Light weiter vorantreiben.

Die Attraktivität von HVDC Light wird weiter zunehmen. Gleichzeitig wird die Technologie durch die Einführung neuer Halbleiter, neuer Werkstoffe für Kabel und neuer Hochspannungs-Umrichter weiter für steigende Leistungen und sinkende Verluste sorgen.

#### Jan R. Svensson

ABB Corporate Research  
Västerås, Schweden  
jan.r.svensson@se.abb.com

Die direkte Verbindung

# Ultraschneller Trennschalter für HGÜ-Hybridschalter

**LARS LILJESTRAND, JÜRGEN HÄFNER – Ein ultraschneller Trennschalter ist ein Schlüsselement des neuen hybriden HGÜ-Leistungsschalters von ABB. Die Entwicklungsgeschichte des Hybridschalters ist ein Musterbeispiel für die Stärken der Leistungselektronik.**

Jedes elektrische Netz muss in der Lage sein, Fehler durch Abschalten zu klären, wobei nur so viel wie nötig vom Netz isoliert werden sollte. In heutigen Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Verbindungen kann dies mithilfe von AC-Leistungsschaltern an jedem Ende erreicht werden → 3. Doch HGÜ-Systeme werden in Zukunft zunehmend als Netze konfiguriert, in denen eine Fehlerklärung mithilfe der AC-Leistungsschalter zum Ausfall des gesamten Netzes führen würde → 4. Hinzu kommt, dass HGÜ-Fehler binnen wenigen Millisekunden, also wesentlich schneller als in einem entsprechenden AC-System, geklärt werden müssen. Mit anderen Worten, es wird ein HGÜ-Leistungsschalter benötigt.

## Hybrider DC-Leistungsschalter

Bis vor Kurzem gab es aufgrund der mit der HGÜ verbundenen hohen Spannung, des hohen und schnell ansteigenden Kurzschlussstroms und der Notwendigkeit einer schnellen Trennung keinen DC-Leistungsschalter, der sich für die HGÜ eignete. Dies veranlasste ABB dazu, eine neue Art von Leistungsschalter zu entwickeln – den hybriden DC-Leistungsschal-

ter. Dieser innovative Schalter verbindet die geringen Verluste eines mechanischen Schalters mit der hervorragenden Stromunterbrechungsfähigkeit eines leistungselektronischen Schalters und erfüllt damit die Anforderung einer schnellen Trennung von Kurzschlussströmen in HGÜ-Netzen.

Der neue Schalter besteht aus einem Hauptschalterzweig mit leistungselektronischen Schaltern und Überspannungsableitern sowie einem parallelen Zweig mit einem ultraschnellen Trennschalter (Ultrafast Disconnecter, UFD) und einem leistungselektronischen Kommutierungsschalter → 5. Die einzigartigen Anforderungen, die an den mechanischen Schalter gestellt werden, konnten mit bisherigen Schaltern nicht erfüllt werden, was den UFD zu einer Schlüsselkomponente des Hybridleistungsschalters macht.

## Der ultraschnelle Trennschalter

Der UFD ist ein sehr schneller mechanischer Schalter, der in der Lage ist, hohe Nennströme mit vernachlässigbaren Verlusten zu führen. Nach dem Öffnen kann er binnen weniger Millisekunden einer hohen Spannung standhalten. Ermöglicht wird dies durch ein Kontaktsystem mit parallel und in Reihe geschalteten Kontakten.

Die parallel geschalteten Kontakte ermöglichen hohe Nennströme bei geschlossenem Schalter, während der in Reihe geschaltete Kontakt bei geöffnetem Schalter eine hohe Spannungsfestigkeit

ermöglicht → 6–7. Der kurze Antriebshub des in Reihe geschalteten Kontakts ermöglicht ein schnelles Öffnen und sorgt gleichzeitig für eine hohe mechanische Lebensdauer. Bei den Antrieben handelt es sich um Thomson-Antriebe, die sich in entgegengesetzter Richtung bewegen, um die Trenngeschwindigkeit zu verdoppeln. Zur Verbesserung der Spannungsfestigkeit ist der Schalter in unter Druck stehendem Gas installiert.

## Die Geschichte des UFD 2000–2002

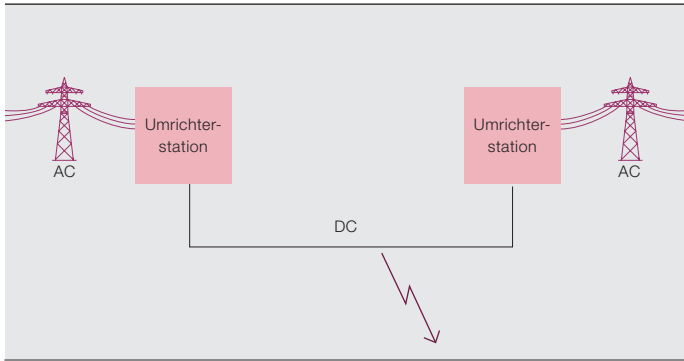
Nachdem sich im Jahr 1999 der Bedarf an einem schnellen Kommutierungsschalter zur Umgehung leistungselektronischer Schalter abzeichnete, wurde im Jahr 2000 ein Projekt zum Bau eines Demonstrationsmusters für Fehlerstrom-Begrenzeranwendungen im Mittelspannungsbereich (MS) ins Leben gerufen. Das erste Konzept mit Drehkontakten war so erfolgreich, dass sofort ein weiteres Projekt gestartet wurde, das noch im gleichen Jahr zu einem verbesserten linearen Kontakt design führte.

Im Jahr 2002 war die Technologieentwicklung für die 17,5-KV-MS-Anwendung abgeschlossen.

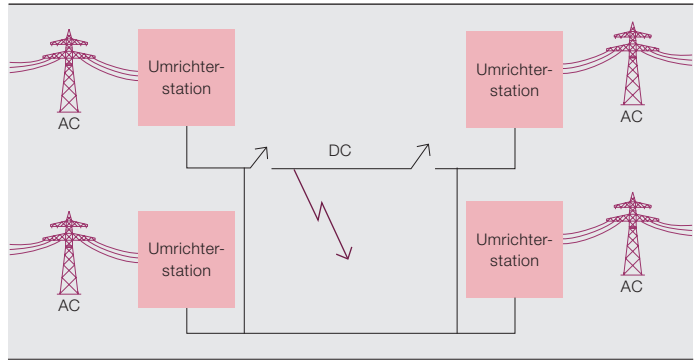
## UFD: 2010 bis heute

Bis zum Jahr 2010 waren HGÜ-Netze zwar im Gespräch, doch einen für die Anforderungen der HGÜ geeigneten Leistungsschalter gab es nicht. Ein hybrider DC-Leistungsschalter wurde zwar vorgeschlagen, doch der notwendige UFD

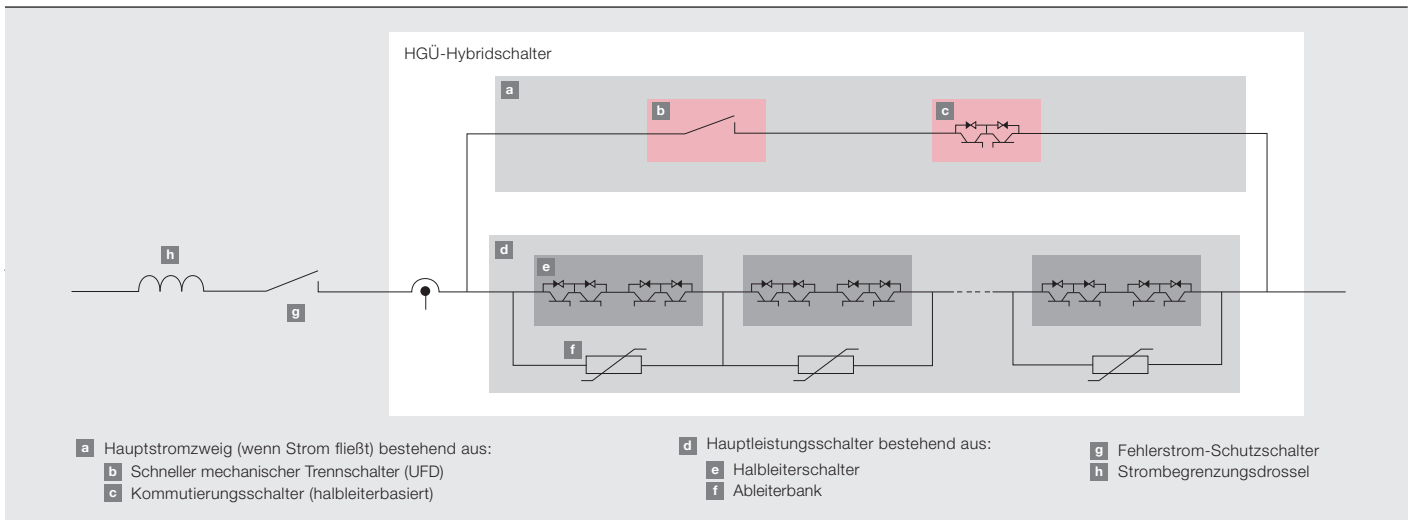
**3** Mithilfe von AC-Leistungsschaltern kann ein Fehler in einer Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Verbindung abgeschaltet werden.



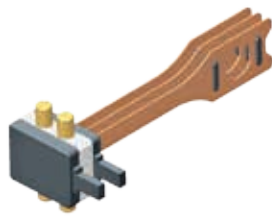
**4** Die Abschaltung eines Fehlers in einem HGÜ-Netz durch einen Leistungsschalter im AC-Teil würde das gesamte Netz lahmlegen.



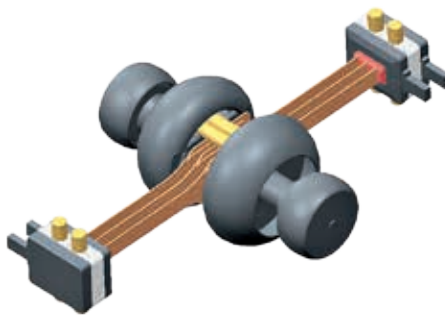
**5** HGÜ-Hybridschalter



**6** Parallel geschaltete Kontakte im UFD



**7** In Reihe geschaltete Kontakte im UFD



Die im Jahr 1999 begonnene Entwicklungsarbeit trägt noch immer Früchte.

fehlte. Schließlich kamen diejenigen, die mit der Arbeit am schnellen Kommutierungsschalter von vor 10 Jahren vertraut waren, auf die Idee, diesen Ansatz für Entwicklung eines UFD zu nutzen.

Im Rahmen eines Projekts sollte geprüft werden, ob das vorherige Konzept von 17 kV auf 320 kV hochskaliert werden konnte. Andere Konzepte wurden ebenfalls evaluiert und verglichen. Wie sich gezeigt hat, war der Kommutierungs-

schalter auf der Basis parallel und in Reihe geschalteter mechanischer Kontakte in der Lage, die Anforderungen zu erfüllen, und wurde für die Anwendung als am besten geeignet befunden. Die Produktion startete im Jahr 2011 in der Schweiz.

Die im Jahr 1999 begonnene Entwicklungsarbeit trägt noch immer Früchte, und man kann davon ausgehen, dass leistungselektronische Schalter in Kombination mit einem parallelen mechanischen Bypass-Schalter in einer Vielzahl weiterer elektrischer Anwendungen zum Einsatz kommen werden.

**Lars Liljestrand**  
 ABB Corporate Research  
 Västerås, Schweden  
 lars.liljestrand@se.abb.com

**Jürgen Häfner**  
 ABB Power Grids, Grid Systems  
 Ludvika, Schweden  
 jurgen.hafner@se.abb.com

Die direkte Verbindung

# Fortschrittliche extrudierte HGÜ-Kabel

**CARL-OLOF OLSSON – Fortschrittliche HGÜ-Systeme benötigen fortschrittliche Kabel. XLPE-Kabel bilden die Grundlage für hochentwickelte HGÜ-Technologien.**

**D**ie ersten extrudierten Stromkabel kamen Ende der 1940er Jahre auf. Als Isolierstoff wurde Polyethylen verwendet – vornehmlich weil es eine niedrige Permittivität, geeignete mechanische Eigenschaften und eine hohe thermische Leitfähigkeit besaß. Etwa 10 Jahre später stand die Technologie zur Vernetzung von Polyethylen zur Verfügung, und XLPE entwickelte sich zur gängigsten Isolierung für Hochspannungskabel, was es bis heute geblieben ist.

Für HGÜ-Seekabel kann eine masseimprägnierte (MI) Isolierung oder XLPE verwendet werden. Bei Landkabeln wird XLPE aufgrund des geringeren Gesamtgewichts und der einfacheren Verbindung bevorzugt.

## Verbesserungen des Isolationssystems

Bei den ersten Stromkabeln von vor über 150 Jahren wurde die Isolierschicht

**XLPE entwickelte sich zur gängigsten Isolierung für Hochspannungskabel, was es bis heute geblieben ist.**

direkt auf den Leiter aufgetragen. Schon bald entdeckte man jedoch, dass sich die Betriebsspannung erheblich steigern lässt, wenn man metallisiertes Papier um den Leiter legt, um lokale elektrische Feldeffekte auszuräumen. Die Kabelentwicklung schritt rasch voran, und Ende der 1960er Jahre wurde mit der Fertigung von XLPE-Kabeln in einem Dreifach-Extrusionsverfahren, bei dem die Isolierschicht zusammen mit einer inne-

ren und äußeren Schicht aus halbleitendem Polymer extrudiert wird, ein bedeutender Fortschritt erzielt.

Im Jahr 1997 brachte ABB extrudierte Gleichstrom-Kabelsysteme auf den Markt. Verbesserungen der dielektrischen Eigenschaften des XLPE ermöglichten höhere Spannungen, angefangen bei 80 kV bis mittlerweile 525 kV → 8. Dank einer verbesserten Effizienz in der Fertigung und bei der Installation gehen die Gesamtkosten von Kabelsystemen stetig zurück.

## HGÜ-Kabel für hohe Leistungen und große Entfernungen

Das maximale Spannungsniveau für die neuesten XLPE-isolierten Kabel von ABB liegt bei 525 kV. Ermöglicht wird dies durch den Einsatz eines Isolierstoffs mit geringerer elektrischer Leitfähigkeit und die Entwicklung spezieller Muffen und Endverschlüsse. Die Qualifikationsprüfungen wurden bei einer Leitertemperatur von 70 °C durchgeführt (die maximale Betriebstemperatur von MI-Kabeln beträgt 55 °C). Durch zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeit dürften noch höhere Betriebstemperaturen und Spannungen möglich werden. Gleichzeitig werden neue Investitionen in HGÜ-Kabelsysteme eine umweltfreundlichere und nachhaltigere Energienutzung ermöglichen.

**Carl-Olof Olsson**

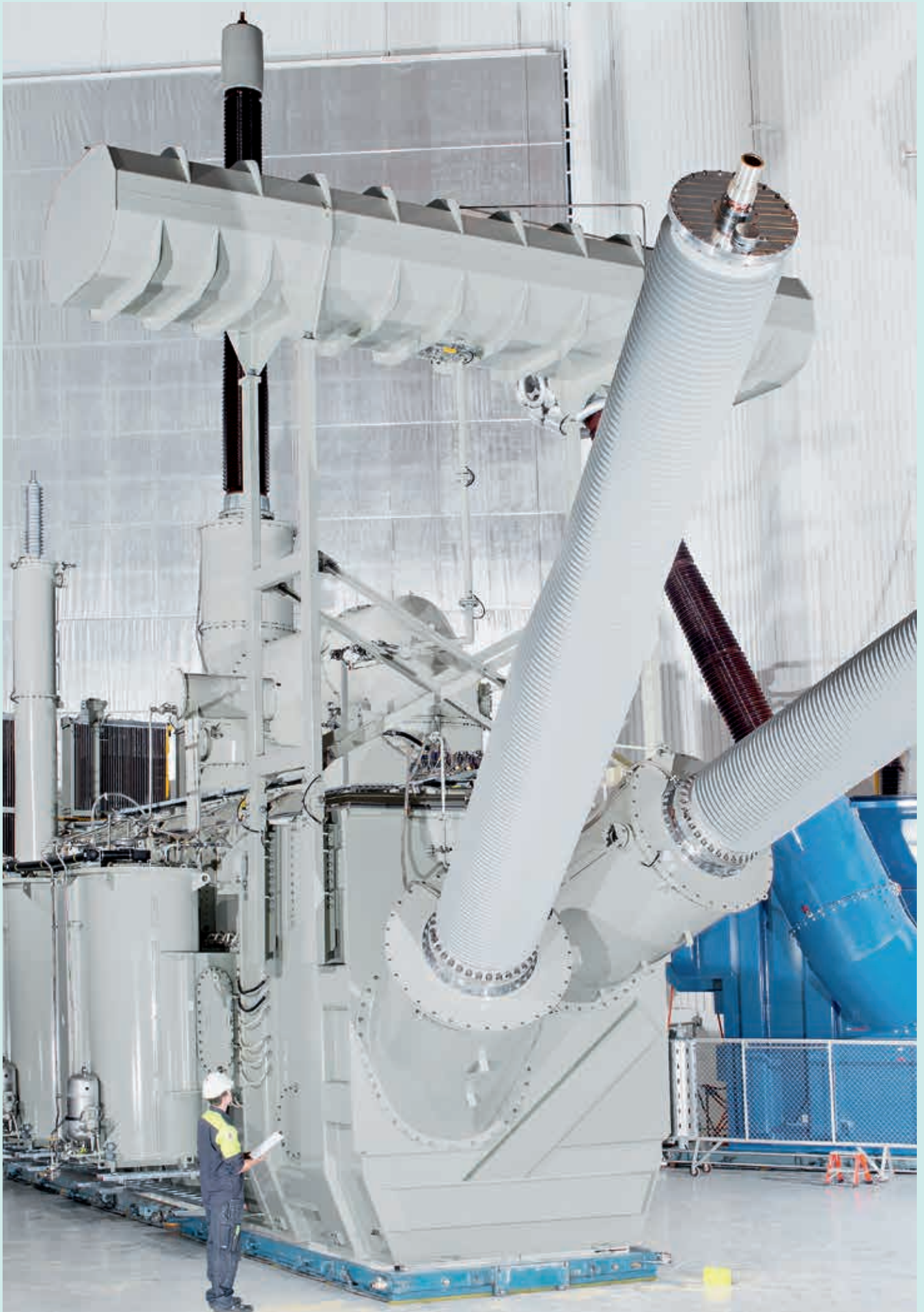
ABB Corporate Research

Västerås, Schweden

carl-olof.olsson@se.abb.com

**8 Moderne XLPE-Kabel besitzen eine ausgeklügelte Schichtstruktur, die an die jeweilige Anwendung angepasst werden kann, aber stets flexibel bleibt.**





# Transformieren und Schalten

## Die Wissenschaft der Transformatorisierungen und innovative Stufenschalter für Hochleistungsanwendungen

Mit dem Anstieg der Leistungen in elektrischen Übertragungsnetzen – auf mittlerweile mehrere GW – steigen auch die Anforderungen an die Transformatoren, die die Übertragung dieser großen Energiemengen ermöglichen. In extremen Fällen wie der Ultra-Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (UHGÜ) sind traditionelle Isolierungskonzepte nicht mehr ausreichend, sodass neue Grundlagenforschung erforderlich ist – zum Beispiel, um die Beeinträchtigung durch Ionendriveffekte bei hohen Spannungen zu untersuchen und zu mindern. Ebenso müssen neue Konzepte für Laststufenschalter entwickelt werden, um die Verschmutzung des Isolieröls zu verhindern, die bei der Verwendung traditioneller Schaltmethoden bei diesen hohen Spannungen auftritt.

Die UHGÜ stellt die effizienteste Möglichkeit zur Übertragung großer Energiemengen über lange Strecken dar. Die allererste von ABB installierte HGÜ-Anlage war die HGÜ Gotland in Schweden aus dem Jahr 1954. Ein bedeutender Fortschritt wurde 1984 mit der Erhöhung der Nennspannung von 400 kV DC auf  $\pm 600$  kV DC für das Itaipu-Projekt in Brasilien erzielt. Dies sollte 25 Jahre lang die Anlage mit der höchsten HGÜ-Übertragungsspannung der Welt bleiben. Im Jahr 2010 wurde in China eine Gleichstromleitung mit  $\pm 800$  kV gebaut, und nur zwei Jahre später wurde mit dem Prototyp eines Stromrichtertransformators für 1.100 kV DC im schwedischen Ludvika ein neuer Weltrekord aufgestellt.

Seit dem Bau des ersten ölgefüllten BBC-Transformators im Jahr 1893 hat ABB in über 100 Jahren Transformatorenentwicklung die notwendige Erfahrung zur Durchführung solcher Projekte gesammelt. In jüngster Zeit haben die Herausforderungen, die mit der HGÜ und UHGÜ einhergehen, neue Fortschritte in der Wissenschaft und Technik hervorgebracht, die die Position von ABB auf diesem Gebiet weiter stärken. So hat z. B. das wissenschaftliche Verständnis von physikalischen Phänomenen wie der Ionendynamik im Öl/Zellulose-Isoliersystem von Stromrichtertransformatoren erheblich zur technischen Führungsposition von ABB auf dem Gebiet der HGÜ- und UHGÜ-Stromrichtertransformatoren beigetragen.

Das Schalten von hohen Spannungen stellt ebenfalls eine Herausforderung dar. Dies gilt besonders für das Verändern der Windungsverhältnisse an einem spannungsführenden Leistungstransformator

mithilfe eines Laststufenschalters (On-Load Tap Changer, OLTC). Der OLTC ist darauf ausgelegt, die elektrische Leistung zu bewältigen, die beim Umschalten von einer Stufe zur anderen auftritt. In einem traditionellen OLTC erfolgt dieser Schaltvorgang mithilfe von Transformatorenöl als Schaltmedium. Dabei entstehen Lichtbögen, die langfristig zu Kontaktverschleiß führen und die Isoliereigenschaften des Öls beeinträchtigen.

ABB hat eine neue Produktpalette von OLTCs auf der Basis von Vakuumschaltkammern entwickelt. Dabei entstehen die beim Schaltvorgang erzeugten Lichtbögen in einer Vakuumschaltkammer, was eine Verschmutzung des Öls verhindert und die Lebensdauer der Kontakte verlängert (bis zu 1.000.000 Schaltvorgänge). Ein weiterer Vorteil ist die hohe Stromunterbrechungsfähigkeit von Vakuumschaltkammern, die den Bau von OLTCs mit höheren Nennleistungen ermöglicht.

### Titelbild

Vor welchen Herausforderungen stehen die Konstrukteure, wenn Transformatoren mit sehr hohen Spannungen betrieben werden sollen?

# Vakuumbasierte Laststufenschalter

**LARS JONSSON, MAGNUS BACKMAN, PETER NILSSON – ABB hat eine neue Produktpalette von Laststufenschaltern (OLTCs) auf der Basis von Vakuumschaltkammern entwickelt. Bei den neuen OLTCs entstehen die Lichtbögen in einer Vakuumschaltkammer, was die von traditionellen OLTCs bekannte Verschmutzung des Transformatoröls verhindert und den Kontaktverschleiß reduziert.**

**N**ormalerweise entstehen beim Umschalten des Windungsverhältnisses an einem spannungsführenden Leistungstransformator mithilfe eines OLTC Lichtbögen im Transformatoröl. Im Laufe der Zeit führen diese zu einer Abnutzung der Schaltkontakte und Verschlechterung der Isoliereigenschaften des Öls, sodass regelmäßige Wartungen und Ölwechsel erforderlich sind.

## **Vorteile der Vakuum-Schaltkammertechnologie**

Bei den neuen OLTCs von ABB entstehen die Lichtbögen in einer speziell entwickelten Vakuumschaltkammer, wodurch die Verschmutzung des Öls verhindert und die Lebensdauer der Kontakte (auf 1.000.000 Schaltvorgänge) verlängert wird. Außerdem besitzen OLTCs mit Vakuumschaltkammern eine wesentlich höhere Stromunterbrechungsfähigkeit als vergleichbare herkömmliche Ausführungen.

## **Entwicklungsgeschichte**

OLTCs und Vakuumschalter existierten bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts parallel, bevor sie in einem Produkt kombiniert wurden. In den 1970er Jahren patentierte ASEA verschiedene Aspekte der Vakuum-Schaltkammertechnologie, darunter auch OLTC-Anwendungen. Zuerst wurden OLTC und Vakuumschalter

in Stufenschaltern mit Überschaltdrosseln (Reaktor-Typ) kombiniert, die vorwiegend in den USA zum Einsatz kamen und kommen. Diese arbeiten auf der Niederspannungsseite des Transformators bei hohen Strömen.

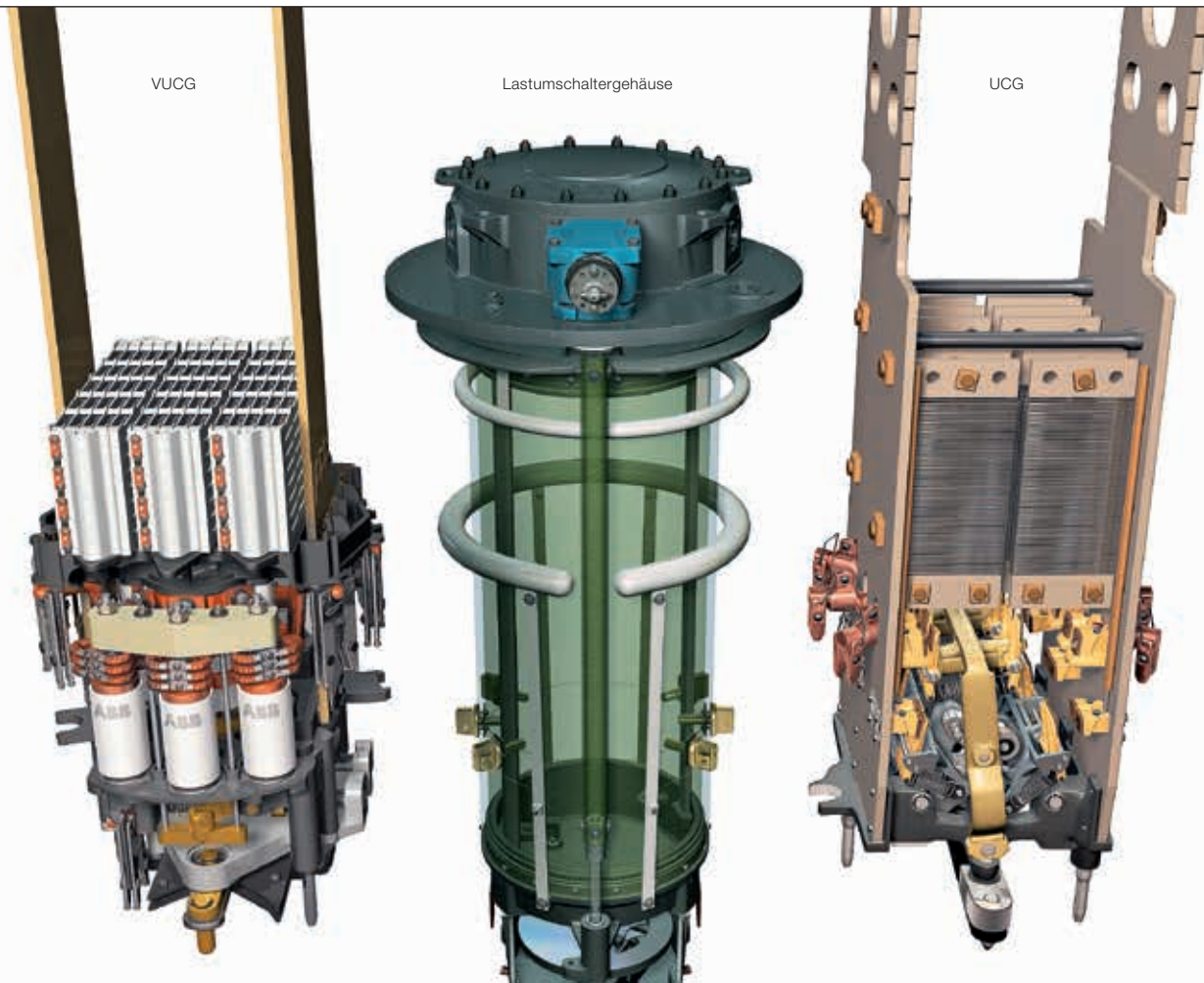
Die Technologie gewann jedoch erst später mit der Liberalisierung des Energiesektors in vielen Ländern und der anschließenden Forderung nach einer besseren Anlagennutzung, Reduzierung von Wartungsanforderungen und Verlängerung der Lebensdauer von Betriebsmitteln an Bedeutung.

Um diese neuen Anforderungen zu erfüllen, führte ABB Corporate Research in Schweden im Jahr 2002 eine Vorstudie zur Realisierung von OLTCs auf der Basis von Vakuumschaltkammern durch. Diese führte im darauffolgenden Jahr zur Gründung einer Projektgruppe und ersten Entwürfen für das VUCG-Konzept. Der VUCG beinhaltet Vakuumschaltkammern und Hilfskontakte, die über einen unidirektionalen Mechanismus betätigt werden, was ihn von Mitbewerberlösungen unterscheidet.

Im Jahr 2004 wurde der erste Prototyp eines VUCG-Lastumschalters entwickelt und gebaut. 2005 folgte ein neuer Federmechanismus mit Druckfedern, nachdem sich vorherige Lösungen mit Spiralfedern



## 1 Die Austauschbarkeit des Lastumschalters erleichtert die Umrüstung von herkömmlichen Stufenschaltern vom Typ UC auf den neuen Typ VUC.



als unzureichend erwiesen hatten. Außerdem wurde ein neuer mechanischer Gleichrichter entwickelt, der für eine unidirektionale Drehung sorgt. Der VUCG wurde auf der CIGRE-Konferenz 2006 vorgestellt.

Im selben Jahr entstand der erste Prototyp des neuen VUCL. Das Design glich dem VUCG, beinhaltete aber einen Schalter zur Umgehung der Vakuumschaltkammern im normalen Betrieb, was höhere Ströme ermöglicht. Im Jahr darauf entstand der erste Entwurf für den VUBB. Außerdem wurde ein Lastwähler mit Kompensation für die Position des Nockenschlitzes entwickelt.

Der 2008 auf dem Markt eingeführte VUCG ermöglicht eine einfache Umrüstung von der herkömmlichen auf die Vakuumtechnologie → 1. Im selben Jahr begann die Entwicklungsarbeit zur Optimierung des Kontaktmaterials für die Vakuumschaltkammer. Im Jahr 2009 erreichte der

Typ VUCG im Rahmen einer elektrischen Lebensdauerprüfung 600.000 Schaltvorgänge. Im darauffolgenden Jahr wurde die erste synthetische Prüfschaltung für Vakuumstufenschalter entwickelt und gebaut, die lange Testreihen bei hoher Leistung ermöglichte.

Im Jahr 2012 kamen der VUCL und der VUBB auf den Markt, und im Jahr 2016 präsentierte ABB mit dem VUCG 1800 den leistungsstärksten Stufenschalter der Welt. Darüber hinaus umfasst die Palette der vakuumbasierten Produkte den VRLTC, einen Stufenschalter nach dem Reaktorprinzip, der von ABB für den US-Markt entwickelt wurde.

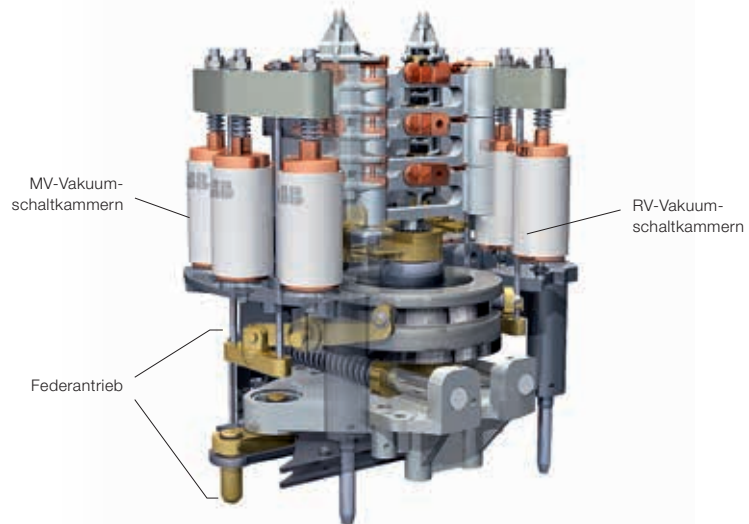
### Funktionsbeschreibung

Die beiden Hauptfunktionen des OLTC sind die Wahl der Stufe an einer Stufenwicklung und die Kommutierung der Last zwischen den Stufen einer Stufenwicklung. Bei OLTCs kommen zwei grundlegende Konstruktionsprinzipien zum Einsatz:

Der VUCG ermöglicht eine einfache Umrüstung von der herkömmlichen auf die Vakuumtechnologie.

## Die Verwendung paralleler Vakuum-schaltkammern in einphasigen Anwendungen reduziert den Kontaktverschleiß erheblich.

### 2 Lastumschalter



- Lastwählerprinzip: Kombiniert die Stufenwahl, Stromführung und Kommutierung in einem Gehäuse. Die geringe Anzahl von Teilen ermöglicht eine äußerst kompakte Ausführung. Dies ist jedoch mit Einschränkungen verbunden, die die Nutzung normalerweise auf Transformatoren beschränkt, deren Bemessungsdaten 100 MVA/145 kV nicht überschreiten. Der VUBB ist ein OLTC nach dem Lastwählerprinzip.
- Lastschalterprinzip: Trennt die Kommutierungseinrichtung vom Stufenwähler. Dieses Prinzip kommt in einer Vielzahl von Anwendungen zum Einsatz und ist die einzige Art von Stufenschalter, die für Hochspannungs- bzw. Hochleistungsanwendungen geeignet ist. Der VUCG und der VUCL gehören zu diesem Typ.

In einem OLTC nach dem Lastschalterprinzip ist nur der Lastumschalter, in dem die Schaltleistung bewältigt wird, mit Vakuum-schaltkammern ausgeführt. Der Stufenwählerteil ist identisch mit dem von herkömmlichen Stufenschaltern.

Der Lastumschalter besitzt zwei Sätze von Vakuumkontakten (Hauptkontakte, MV, und Widerstandskontakte, RV) und zwei Sätze von rotierenden Hilfskontakten → 2. Die Federantriebseinheit (Spring Drive Unit, SDU) wandelt die langsame Bewegung des Motorantriebs in die zum Schalten der Kontakte erforderliche schnelle Bewegung um und sorgt außer-

dem für die notwendige Synchronisierung. Die in den Federn gespeicherte Energie sorgt dafür, dass der Schaltvorgang auch bei Ausfall der Stromversorgung beendet wird. Ganz gleich, ob der Motorantrieb eine hebende oder senkende Bewegung startet, die SDU bleibt stets in derselben Richtung ausgerichtet, d. h. sie ist unidirektional. Die unidirektionale Bewegung sorgt dafür, dass der Schaltverlauf bei jeder Betätigung der gleiche ist, um die Schaltbeanspruchung der elektrischen Kontakte zu minimieren.

Die Hauptkomponente, die Vakuum-schaltkammer, basiert auf über 40 Jahren Erfahrung und vielen Millionen erfolgreich eingesetzten Einheiten und ist somit ein extrem zuverlässiges Produkt. Für den unwahrscheinlichen Fall, dass eine Vakuum-schaltkammer ausfallen sollte, ist das Hilfskontaktsystem darauf ausgelegt, eine bestimmte Anzahl von Stufenschaltungen durchzuführen und einen Alarm für ein Schutzrelais auszulösen.

Stärkster Vakuumstufenschalter der Welt Mit der Einführung des VUCG 1800, dem stärksten Stufenschalter der Welt, setzt ABB ihre 100-jährige Tradition als Pionier auf dem Gebiet der Stufenschalter fort. Der VUCG 1800 ermöglicht die Stufenumschaltung in Highend-Transformatorenanwendungen ohne die Notwendigkeit einer erzwungenen Stromteilung. Die Einführung einer parallelen Abschaltung mit Vakuum-schaltkammern stellt einen bedeutenden Schritt in der Anwendung

der Vakuumtechnologie dar. Die Verwendung paralleler Vakuum-schaltkammern in einphasigen Anwendungen reduziert den Kontaktverschleiß an Stufenschaltern erheblich, auch bei hohen Strömen und Stufenspannungen. Der Ausschaltstrom fließt anstelle von einer durch drei Vakuum-schaltkammern, wodurch der Verschleiß gleichmäßiger auf die Kontakte verteilt wird. Der neue Stufenschalter nutzt die gleichen bewährten Vakuum-schaltkammern wie bisher, sodass die gleiche hohe Qualität und lange Lebensdauer gewährleistet ist wie bei allen ABB-Vakuumstufenschaltern.

Andere Schaltverfahren, z. B. auf der Basis von Halbleitern, könnten einen weiteren Technologiewandel ermöglichen. Halbleiterbasiertes Schalten wurde bereits in einer Pilotanlage getestet, und genau wie bei der Vakuumtechnologie wird die Zeit kommen, in der dieses Verfahren allgemeine Anwendung in OLTCs findet.

**Lars Jonsson**

**Magnus Backman**

ABB Corporate Research

Västerås, Schweden

[lars.e.jonsson@se.abb.com](mailto:lars.e.jonsson@se.abb.com)

[magnus.backman@se.abb.com](mailto:magnus.backman@se.abb.com)

**Petter Nilsson**

ABB Power Grids, Transformers

Ludvika, Schweden

[petter.nilsson@se.abb.com](mailto:petter.nilsson@se.abb.com)

## Transformieren und Schalten

# Grundlagenforschung für UHGÜ-Stromrichtertransformatoren

JOACHIM SCHIESSLING, OLOF HJORTSTAM, MATS BERGLUND – Der Stromrichtertransformator, der das Stromrichterventil mit dem AC-Netz verbindet, ist eine der Schlüsselkomponenten einer UHGÜ-Stromrichterstation. Zur Entwicklung einer kostengünstigen und robusten Gleichstromisolierung für diesen Transformator sind fundierte Kenntnisse über das Material selbst sowie die physikalischen Vorgänge erforderlich, die unter Gleichstrombelastung in der Isolierung auftreten.

Die Hauptaufgabe des Stromrichtertransformators in einer UHGÜ-Stromrichterstation besteht darin, die Wechselspannungen vom AC-Netz auf die AC-Seite des Stromrichterventils zu transformieren. Die elektrische Isolierung eines Stromrichtertransformators unterscheidet sich von der eines normalen Leistungstransformators, da sie einer kombinierten AC- und DC-Belastung standhalten muss. Während die AC-Feldverteilung durch die Permittivität (dielektrische Leitfähigkeit) des Werkstoffs bestimmt wird, ist es der spezifische Widerstand oder die Resistivität, die die DC-Feldverteilung bestimmt. Presspappe und Öl unterscheiden sich in der Permittivität um den Faktor 2 und in der Resistivität um den Faktor 100, weshalb für einen Stromrichtertransformator eine massive Isolierung erforderlich ist.

---

Durch Ionenwanderung in DC-Feldern kommt es zu Raumladungen, die die elektrische Feldverteilung erheblich beeinflussen.

Eine bedeutende Eigenschaft des Verhaltens von Gleichstrom im Isolierstoff ist, dass die bestimmende Größe nicht konstant ist. So verändert sich die Resistivität von Öl mit der elektrischen Belastung, der Temperatur, der Bestromungsdauer, dem Feuchtigkeitsgehalt usw. Darüber

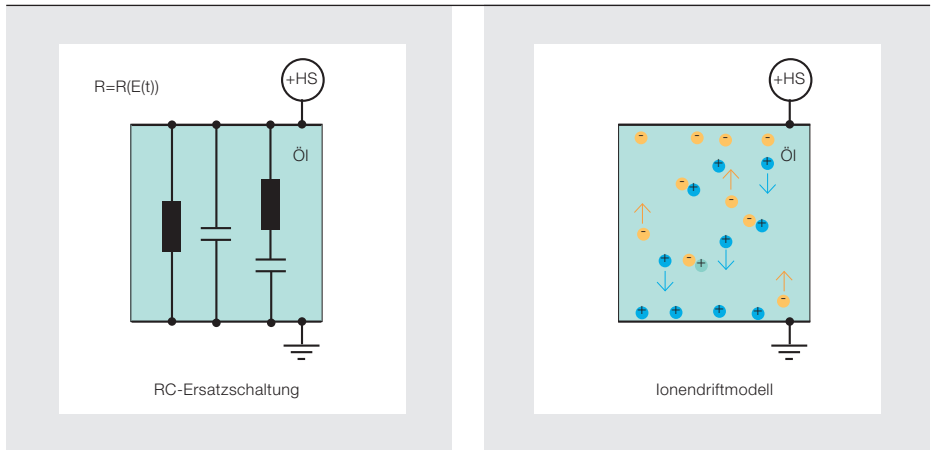
hinaus kommt es durch Ionenwanderung in DC-Feldern zu Raumladungen an Isolationsschnittstellen, die die elektrische Feldverteilung erheblich beeinflussen.

Zur Entwicklung einer kostengünstigen und robusten DC-Isolierung ist neben Werkstoffkenntnissen ein fundiertes Wissen über die physikalischen Vorgänge unter DC-Belastung unerlässlich. Üblicherweise wird eine elektrische Isolierung mithilfe vereinfachter Berechnungen auf der Grundlage einer RC-Ersatzschaltung entwickelt → 3. Dieses Verfahren ist jedoch nicht in der Lage, Aspekte wie die Ansammlung von Raumladungen und das komplexe Resistivitätsverhalten von Transformatorenöl zu berücksichtigen.

In den 1980er Jahren untersuchte das ASEA-Forschungszentrum in Västerås die DC-Eigenschaften elektrischer Isolierung.

Durch das nicht-lineare Verhalten von Isolierflüssigkeiten lässt sich die elektrische Feldverteilung mit herkömmlichen Modellen nur schwer vorher-sagen.

### 3 Zwei Simulationsmethoden für Gleichstrom-Isolationssysteme



3a RC-Ersatzschaltung

3b Ionendriftmodell

### 4 Gleichungen für die zeitabhängige Ionendichte in flüssiger Isolation. Für eine gute Genauigkeit der dreidimensionalen Berechnungen ist eine hohe Rechenleistung erforderlich.

#### Das Ionendriftmodell

Kontinuitätsgleichungen für die Konzentration von positiven (p) und negativen (n) Ionen:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\mu_p \bar{E} p - D_p \nabla p) = S$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \nabla \cdot (\mu_n \bar{E} n - D_n \nabla n) = S$$

mit  $\mu_n, \mu_p, D_n$  und  $D_p$  als elektrische Mobilitäts- und Diffusionskonstanten für positive und negative Ionen.

Quellterm einschließlich Erzeugung und Rekombination von Ionen:

$$S = K_D^0 c F(E) - K_R p n$$

mit  $F(E)$  als Onsagerfeld-abhängiger Beitrag zur Ionenerzeugungsrate

Poisson-Gleichung einschließlich Raumladungen (p-n):

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \bar{E}) = q(p - n)$$

mit  $\epsilon_0$  und  $\epsilon_r$  als Permittivität und relative Permittivität

gen und entwickelte ein Modell, das die Ionenerzeugung und die Ionendrift berücksichtigte. Das Modell wurde experimentell bestätigt und in einem Simulationswerkzeug implementiert. Dank dieses Wissens konnten einzigartige technische Lösungen entwickelt werden.

#### Ionendriftmodell für Öl-/Zelluloseisolationen

Die Resistivität von Isolierflüssigkeiten wie Mineralöl ist keine intrinsische oder

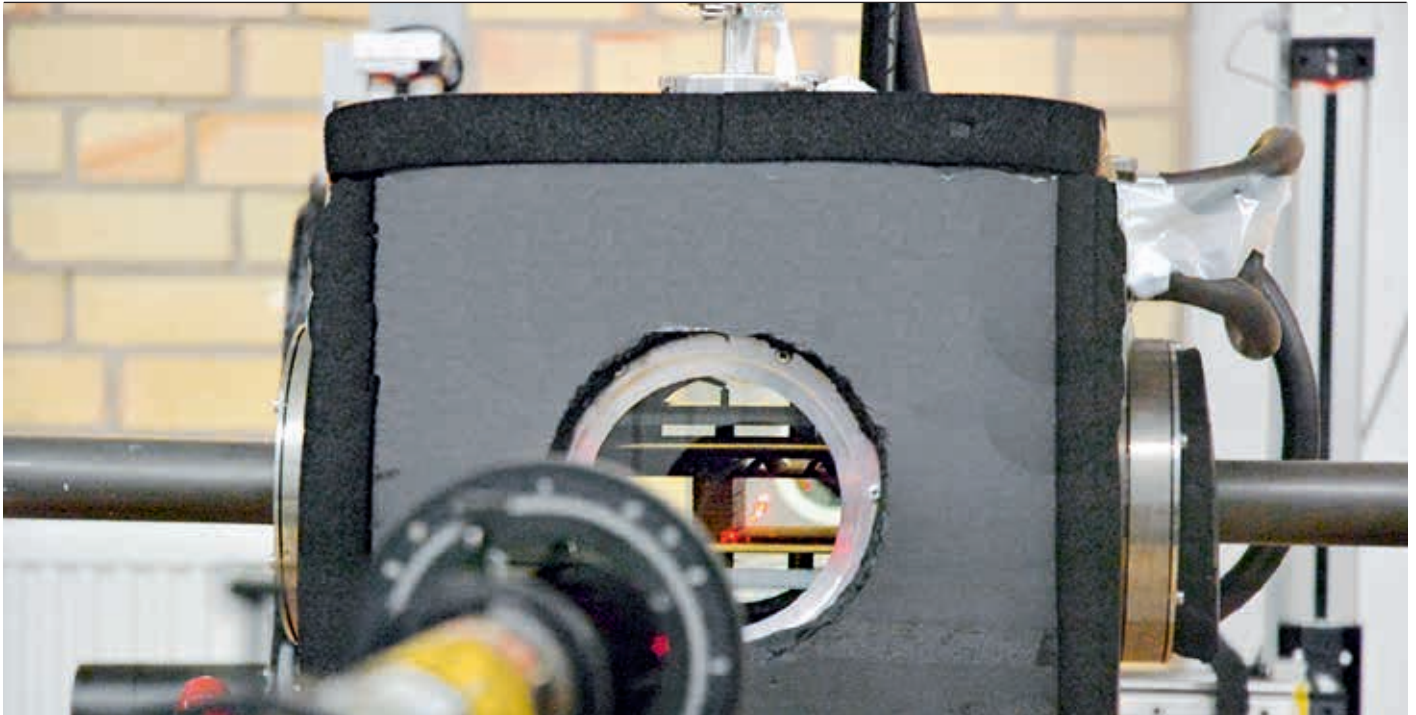
klar definierte Werkstoffeigenschaft. Die scheinbare Resistivität einer solchen Flüssigkeit wird bestimmt durch die Konzentration freier Ionen und deren elektrische

Beweglichkeit. Ist eine Flüssigkeit einem elektrischen Feld ausgesetzt, beginnen sich die freien Ionen in die Richtung des elektrischen Felds zu bewegen, was in bestimmten Bereichen zu Ionenverar-

## Das äußerst empfindliche System zur direkten Messung der elektrischen Belastung in Mineralöl nutzt den elektro-optischen Kerr-Effekt.

mung und somit einer reduzierten Resistivität führt. Dies bedeutet, dass die scheinbare Resistivität von der „elektrischen Belastungshistorie“ des Öls abhängt.

## 5 Versuchsanordnung zur Demonstration des Kerr-Messverfahrens



Aufgrund dieses nichtlinearen Verhaltens von Isolierflüssigkeiten lässt sich die elektrische Feldverteilung in ölbasierenden Isolationssystemen unter DC-Belastung mit herkömmlichen ohmschen Modellen nur schwer vorhersagen. Eine Alternative zu ohmschen Modellen – das Ionen-driftmodell – wurde 1980 von ASEA-Forschern eingeführt [1]. Beim Ionen-driftmodell werden Transportgleichungen verwendet, um das zeitabhängige Verhalten der Ionen-dichte in flüssigen Isolierungen zu berechnen → 4.

Mithilfe der Differenz zwischen der Dichte positiver und negativer Ionen kann das elektrische Feld in Abhängigkeit der Zeit für jede Position im System berechnet werden. Aus → 4 wird deutlich, dass die Lösung der Gleichungen in drei Dimensionen für viele Punkte rechnerisch anspruchsvoll ist. Doch dank moderner Computer in Verbindung mit verbesserten numerischen Verfahren kann das Ionen-driftmodell für den Entwurf kritischer Teile des Isolationssystems in Stromrichtertransformatoren eingesetzt werden.

### Messung elektrischer Felder unter DC-Belastung in Transformatorenöl

Das Ionen-driftmodell musste durch experimentelle Messungen bestätigt werden. Dazu wurde im ABB-Forschungslabor in Västerås ein äußerst empfindliches Sys-

tem zur direkten Messung der elektrischen Belastung in Mineralöl entwickelt. Das System nutzt den elektrooptischen Kerr-Effekt, der die Doppelbrechung von Licht in einem flüssigen Dielektrikum in einem elektrischen Feld beeinflusst → 5. Mithilfe dieses Verfahrens kann die Richtung, Stärke und zeitliche Entwicklung der elektrischen Felder bestimmt werden.

Die Ergebnisse des Kerr-Verfahrens zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Vorhersagen des Ionen-driftmodells und weichen erwartungsgemäß deutlich von den elektrischen Feldern ab, die mit ohmschen Modellen vorhergesagt wurden.

Das Kerr-Verfahren und das Ionen-driftmodell, die erstmalig im Rahmen des Itaipu-Projekts eingesetzt wurden, sind zu wichtigen Werkzeugen in der kontinuierlichen Entwicklung von Isolationssystemen für Stromrichtertransformatoren geworden. Diese Werkzeuge sowie die dazugehörigen Simulationen haben die Entwicklung des Prototyps für den 1.100-kV-DC-Stromrichtertransformator in sehr kurzer Zeit ermöglicht. Die Designwerkzeuge und ein fundiertes Wissen über die beteiligten Phänomene haben erheblich zur Technologieführerschaft von ABB auf dem Gebiet der HGÜ- und UHGÜ-Stromrichtertransformatoren beigetragen.

Die Ergebnisse des Kerr-Verfahrens stimmen gut mit den Vorhersagen des Ionen-driftmodells überein.

**Joachim Schiessling**

**Olof Hjortstam**

ABB Corporate Research

Västerås, Schweden

joachim.schiessling@se.abb.com

olof.hjortstam@se.abb.com

**Mats Berglund**

ABB Power Grids, Transformers

Ludvika, Schweden

mats.g.berglund@se.abb.com

### References

- [1] U. Gäfvert et al. (1992): „Electrical field distribution in transformer oil“. IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 27, No. 3, S. 647

# Mikronetze

Wie Mikronetze dabei helfen, Kosten und Emissionen zu reduzieren und die Netzzuverlässigkeit zu verbessern

**TILO BUEHLER, RITWIK MAJUMDER – Ist Köpfchen besser als Muskelkraft? Oder brauchen wir beides? In der Vergangenheit ließen traditionelle Stromnetze dem Endverbraucher bei beidem nur wenig Spielraum. Erzeugungsanlagen und Regelentscheidungen waren weit entfernt, und der Verbraucher hatte nur wenig Einfluss auf Herkunft und Kosten. Heute ist die Stromerzeugung nicht mehr die alleinige Domäne großer Kraftwerke. Dachmontierte Solaranlagen und andere Formen der dezentralen Erzeugung verwischen die klare Unterscheidung zwischen Erzeugern und Verbrauchern. Doch es ist nicht nur die Energie, die für alle zugänglich wird. Zunehmende eingebettete Intelligenz ermöglicht auch die Dezentralisierung von Regelentscheidungen. Eigentümer von großen Einrichtungen wie Krankenhäusern oder Fabriken sind nun in der Lage, ihre eigenen Stromnetze zu steuern und so Kosten und Emissionen zu senken.**

**S**tromnetze befinden sich in einem Wandel, wie er seit Einführung der Energieverteilung nicht da gewesen ist. Der zunehmende Anteil lokaler Erzeugung verändert die Art und Weise, wie Stromnetze betrieben werden.

Dass Einrichtungen wie Krankenhäuser und Fabriken eine Notstromversorgung – meist in Form von Dieselgeneratoren – vorhalten, ist nicht neu. In den vergangenen Jahren wurden viele lokale Erzeugungsanlagen durch die Installation von Solarzellen, teilweise in Verbindung mit einem Batteriespeicher, erweitert. Anders als bei den Notstromgeneratoren, die in erster Linie die Versorgungssicherheit gewährleisten sollen, wünschen sich die Eigentümer solcher Anlagen eine möglichst intensive und profitable Nutzung dieser zusätzlichen Investitionen. Dazu ist eine Strategie zur optimalen Nutzung von interner und externer Erzeugungskapazität erforderlich.

Mikronetze können verschiedene Formen annehmen und eine unterschiedliche Größe und geografische Ausdehnung besitzen. Obwohl es unterschiedliche formale Definitionen für Mikronetze gibt → 1, sind allen Mikronetzen folgende Merkmale gemein:

- Sie umfassen mehrere Quellen und Verbraucher.
- Sie sind dezentral.
- Sie sind regelbar und besitzen eine gewisse Regelaufonomie.

Der Zweck eines Mikronetzes kann ebenso unterschiedlich sein. Typischerweise werden Mikronetze installiert, um:

- Kosten zu senken,
- den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren,
- die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Mikronetze können netzgekoppelt (wie im Beispiel des oben genannten Krankenhauses und der Fabrik) oder komplett eigenständig sein – z. B. in geografisch entlegenen Regionen → 2. ABB war an der Realisierung eines Mikronetzes für Kodiak Island, einer Insel vor der Küste Alaskas, beteiligt. Die Insel mit 15.000 Einwohnern besitzt keine externe Netzanbindung und deckt praktisch ihren gesamten Strombedarf durch erneuerbare Energiequellen. Die Lieferung von ABB umfasste unter anderem ein schwungradbasiertes Energiespeichersystem.

In gewisser Weise kann ein Mikronetz als eine kleine Version des öffentlichen Stromnetzes betrachtet werden, denn ihre Herausforderungen sind nahezu

1 Definition von Mikronetzen

Für Mikronetze existieren verschiedene Definitionen:

Die Microgrid Exchange Group des US-Energieministeriums definiert ein Mikronetz als eine Gruppe miteinander verbundener Verbraucher und dezentraler Energieressourcen innerhalb klar definierter elektrischer Grenzen, die im Hinblick auf das öffentliche Stromnetz als eine regelbare Einheit fungieren. Ein Mikronetz kann an das Stromnetz angebunden oder davon getrennt werden, um im netzgekoppelten oder Inselbetrieb betrieben zu werden.

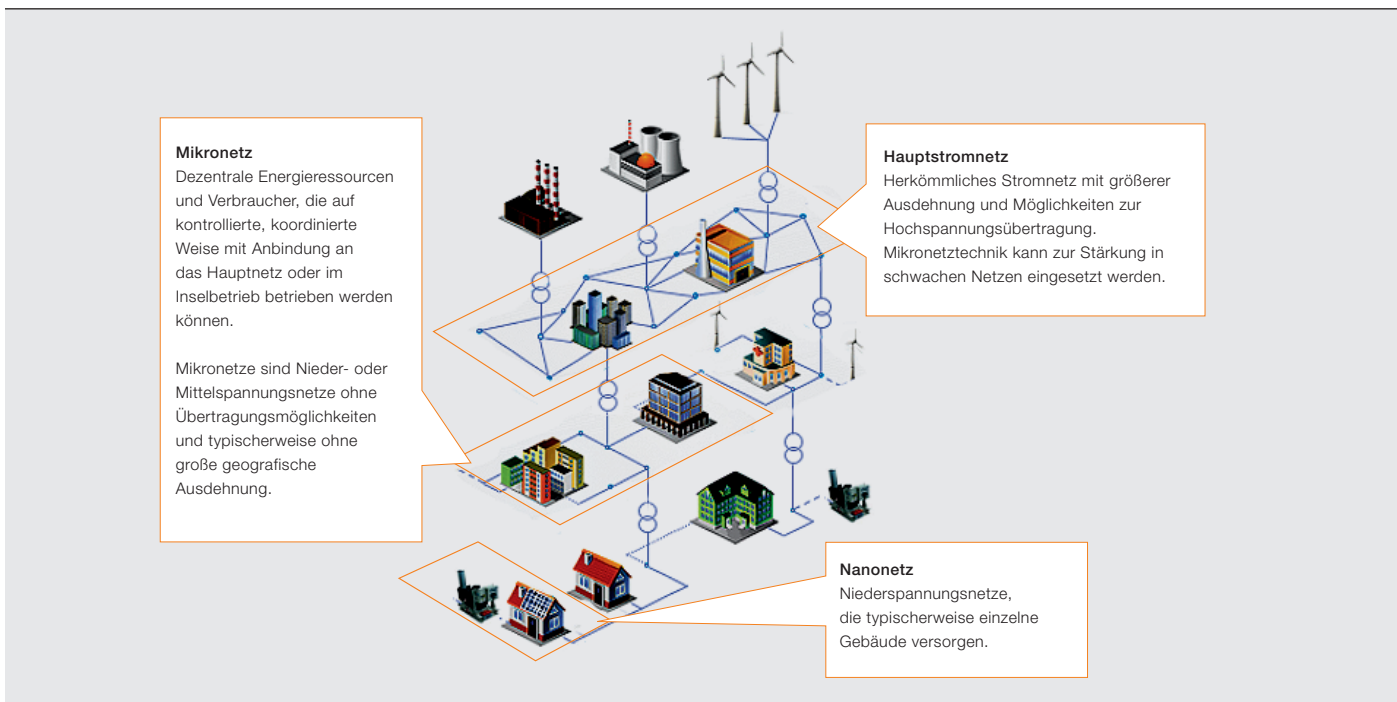
Die CIGRÉ Arbeitsgruppe C6.22 „Microgrid Evolution Roadmap“ definiert Mikronetze als Stromverteilungssysteme mit Verbrauchern und dezentralen Energieressourcen (z. B. dezentrale Erzeugungsanlagen, Speichersysteme oder regelbare Lasten), die auf eine kontrollierte, koordinierte Weise entweder mit Anbindung an das Hauptstromnetz oder als Inselnetz betrieben werden können.

2 Mikronetz-Segmente und Haupttreiber decken ein breites Spektrum von Anwendungen ab.

		Haupttreiber				
		Sozial	Wirtschaftlich	Ökologisch	Betrieblich	
Segmente	Typische Kunden	Zugang zu Elektrizität	Brennstoff- & Kosteneinsparungen	Reduzierung CO <sub>2</sub> -Fußabdruck und Verschmutzung	Brennstoff-unabhängigkeit	Unterbrechungsfreie Versorgung
Netze Schwachstrom Netzgekoppelt	Inselversorger		✓	✓	✓	(✓)
	Entlegene Kommunen	✓	✓		✓	
	Industrie und Gewerbe			(✓)	✓	✓
	Verteidigung		(✓)	(✓)	✓	✓
	Städtische Kommunen			(✓)		✓
	Institutionen und Hochschulen		(✓)	✓		(✓)

IPP = Independent Power Producer (unabhängiger Stromerzeuger)      ✓ Haupttreiber      (✓) Sekundärtreiber

3 Ein Mikronetz kann als Zwischenstück zwischen großräumigen Stromnetzen und sehr lokalen Nanonetzen betrachtet werden.



gleich. Es besitzt unterschiedliche Energiequellen und Verbraucher und kann in vielen Fällen durch Kopplungen Energie mit anderen Netzen austauschen. Es gibt aber auch erhebliche Unterschiede wie eine geringe Trägheit, ein hoher Anteil erneuerbarer Ressourcen und der Einsatz regelbarer Leistungselektronik. Aufgabe der Mikronetz-Regelung ist es, die verfügbaren Ressourcen so einzusetzen, dass die Versorgung auf sichere und wirtschaftliche Weise gewährleistet ist → 3.

In einigen Fällen werden Mikronetze eingerichtet, um die Zuverlässigkeit des Versorgungsnetzes zu unterstützen. In einem Krankenhaus kann eine lebensrettende Operation nicht unterbrochen werden, weil das Licht ausgeht, und in einer Industrieanlage kann ein ungeplanter Stillstand große finanzielle Verluste nach sich ziehen. Eine entsprechende Mikronetz-Regelung kann für einen nahtlosen Übergang vom netzgekoppelten zum Inselbetrieb sorgen. Sie setzt verfügbare

Erzeuger und Speicher ein, schaltet ggf. Verbraucher ab und verhindert die Auslösung von lokalen Schutzgeräten. Gleichmaßen muss sie den Wiederanschluss an das Netz unterstützen, sobald dieses wieder zur Verfügung steht.

ABB kann auf über 25 Jahre Erfahrung und mehr als 30 realisierte Mikronetz-Projekte zurückblicken → 4. Das Unternehmen ist ein führender Anbieter von Produkten und Lösungen für die Strom-

Viele lokale Erzeugungsanlagen werden durch die Installation von Solarzellen, manchmal in Verbindung mit einem Batteriespeicher, erweitert.

#### 4 ABB geht mit gutem Beispiel voran.

ABB installiert zurzeit ein integriertes Solar-Diesel-Mikronetz am Standort Longmeadow in Johannesburg, Südafrika. Auf dem 96.000 m<sup>2</sup> großen Areal befinden sich die Landeshauptniederlassung und ein Werk zur Fertigung von Mittelspannungsschaltanlagen und Montage von Schutzschaltungen. Insgesamt 1.000 Mitarbeitende sind dort tätig.

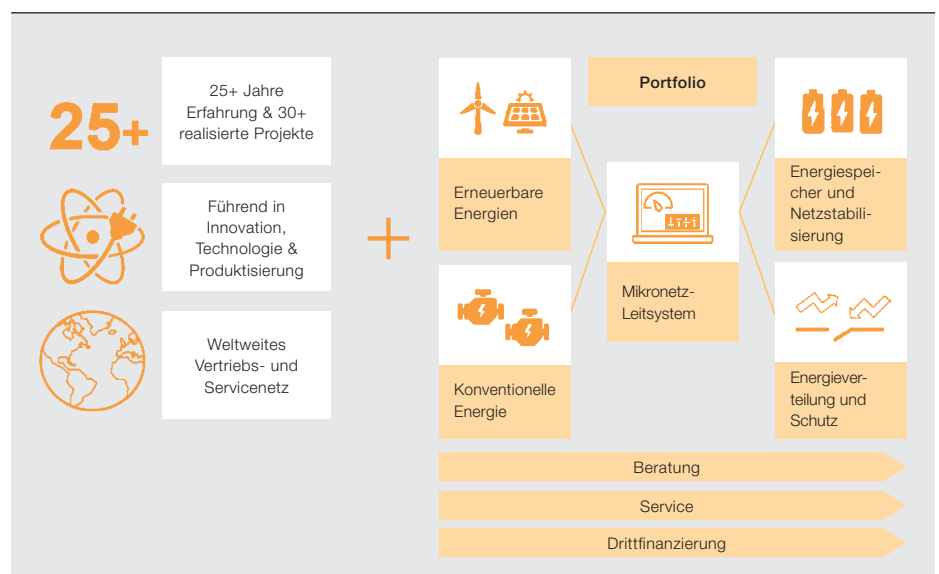
Die Lösung umfasst eine dachmontierte Photovoltaikanlage und einen PowerStore™-Netzstabilisator, die dabei helfen sollen, eine maximale Nutzung sauberer Sonnenenergie

und eine unterbrechungsfreie Stromversorgung auch bei einem Ausfall des Hauptversorgungsnetzes sicherzustellen.

Eine dachmontierte 750-kW-Photovoltaikanlage und ein batteriebasierter PowerStore mit 1 MVA/380 kWh ergänzen die vorhandenen Notstrom-Dieselmotoren.

Dies optimiert den Anteil erneuerbarer Energien und sorgt für eine kontinuierliche Versorgung im Falle eines Stromausfalls oder beim Übergang vom Netzbetrieb zum Inselbetrieb.

#### 5 Mit über 25 Jahren Erfahrung und mehr als 30 realisierten Mikronetz-Projekten weltweit ist ABB der führende Anbieter von Produkten und Lösungen für Mikronetze.



erzeugung einschließlich der Bereiche erneuerbare Energien, Automatisierung, Netzstabilisierung, Energiespeicherung und intelligente Leittechnik. Darüber hinaus bietet ABB Beratungsleistungen zur Realisierung von Mikronetzen weltweit → 5. Die Position des Unternehmens im Mikronetzsegment wurde durch die Akquisition von Powercorp im Jahr 2011 zusätzlich gestärkt.

Die ABB-Forschungszentren arbeiten an vorderster Front daran, die Mikronetztechnologie durch Forschung in Bereichen wie Speicherung, Stabilität, Schutz und Netzkopplung voranzutreiben.

Die Microgrid Plus-Lösung von ABB umfasst das Regelsystem Microgrid Plus System™ sowie das schwungrad- bzw. batteriebasierte Netzstabilisierungssystem PowerStore™. Die Regelung bestimmt die wirtschaftlichste Netzkonfiguration, die

einen Ausgleich von Angebot und Nachfrage gewährleistet und gleichzeitig den Anteil der regenerativen Ressourcen maximiert (bis zu 100 %) und ein hohes Maß an Stabilität und Sicherheit gewährleistet.

Neben den Regel- und Energiespeichersystemen bietet ABB zahlreiche weitere Komponenten für Mikronetze wie die Leistungsschalter vom Typ EMAX2, Solarwechselrichter und Technologien zur Netzintegration sowie Support- und Beratungsleistungen.

#### Tilo Buehler

ABB Power Grids  
Baden-Dättwil, Schweiz  
tilo.buehler@ch.abb.com

#### Ritwik Majumder

ABB Corporate Research  
Västerås, Schweden  
ritwik.majumder@se.abb.com



# Biografie eines Roboters

Die Geschichte des elektrischen Industrieroboters  
gestern, heute und morgen

**TOMAS LAGERBERG, JAN JONSON – Als der elektrische Industrieroboter Anfang der 1970er Jahre im schwedischen Västerås geboren wurde, war dies der Beginn eines neuen Zeitalters der Industrieautomatisierung. Dieser Artikel beleuchtet die Geschichte des Industrieroboters von den Anfängen bis heute und wirft einen Blick auf eine spannende und vielversprechende Zukunft im Dienste des Menschen.**

Die Geschichte des Industrieroboters begann im Jahr 1954, als George Devol den ersten lernfähigen Roboter patentierte. Im Jahr 1956 gründeten Devol und Joseph Engelberger (der später als „Vater des Industrieroboters“ betitelt wurde) das erste Roboterunternehmen (Unimation). Der erste Roboter von Unimation war hydraulisch angetrieben und wurde 1961 an General Motors verkauft. Interessant wurde es für Unimation, als General Motors 1964 nicht weniger als 66 Roboter bestellte. Der erste Roboter in Europa wurde 1967 bei Svenska Metallverken im schwedischen Upplands Väsby installiert.

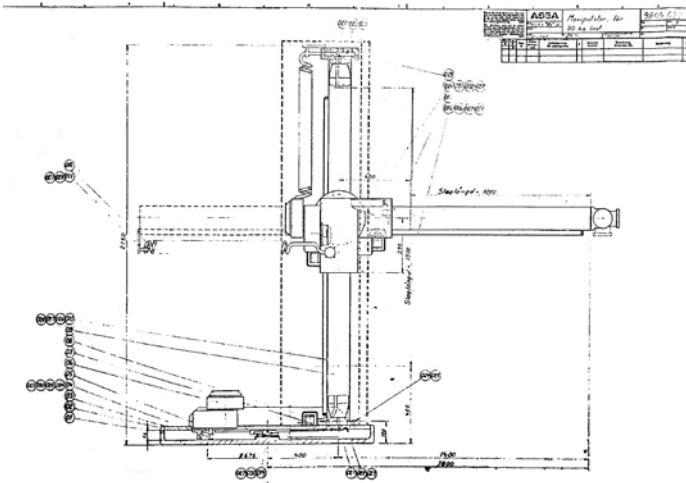
Curt Nicolin, CEO von ASEA, erkannte das Potential von Robotern und kam zu dem Entschluss, dass ASEA einen eigenen Roboter entwickeln sollte. Dies war die Geburtsstunde des elektrischen Industrieroboters. Im Sommer 1971 beauftragte Nicolin zwei seiner führenden Ingenieure, Ove Kullborg und Curt Hansson, damit neue Möglichkeiten der Roboterkonstruktion zu untersuchen, da die Produkte von Unimation große, laute, energiehungrige Ungetüme waren, die ständig Öl verloren.

Kullborg und Hansson skizzierten einige erste Ideen, aus denen schließlich ein fünfachsiger „Manipulator“ entstand (das Wort „Roboter“ tauchte erstmalig im Jahr 1972 auf Zeichnungen auf). Er besaß einen Arm, der vertikal und horizontal bewegt und um seinen Sockel herum geschwenkt werden konnte → 1–2.

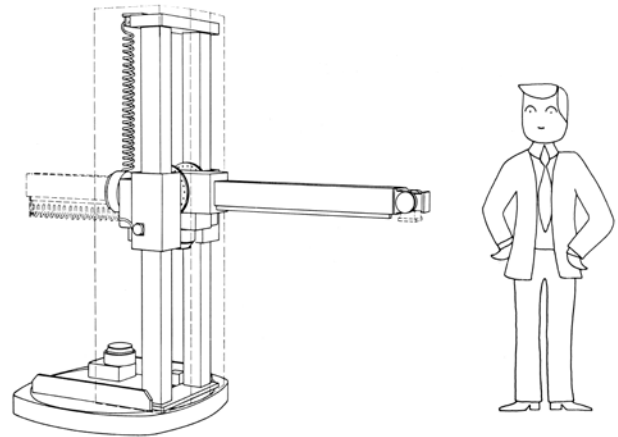
---

**Klarer Sieger war das von Kullborgs Team entwickelte elektrische Antriebssystem.**

Im April 1972 beschloss der Vorstand von ASEA, ein umfassendes Roboterentwicklungsprojekt ins Leben zu rufen, und ernannte den aufstrebenden Automatisierungsspezialisten Björn Weichbrodt zum Projektleiter. Im Februar 1973 wurde dem Vorstand ein erster Prototyp vorgestellt. Das Projekt umfasste von Beginn an alles von der mechanischen Konstruktion und der Elektronik bis hin zum Marketing und der Anwendungsentwicklung. Die Entwicklung der Mechanik übernahmen die Konstrukteure Ove Kullborg und Bengt Nilsson, die jeweils für ein Team aus etwa 10 Maschinenbauingenieuren verantwortlich waren.



1a Frühe Entwurfszeichnung eines ASEA-Roboters



1b Der ursprüngliche ASEA-Roboter sollte etwas über 2 m hoch werden.

Mittlerweile hat ABB weit über 250.000 Roboter geliefert und installiert.

Eine grundlegende Frage war die nach dem Antriebskonzept – hydraulisch, pneumatisch oder elektrisch? Ein pneumatisches Konzept schloss sich aufgrund mangelnder Steifigkeit im Antriebsstrang aus, denn eine hohe Genauigkeit und Wiederholbarkeit waren damit praktisch unmöglich. Hydraulische Roboter waren zu der Zeit vorherrschend, und elektrisch angetriebene selten. Um zu entscheiden, welches Konzept gewählt werden sollte, wurde ein interner Wettbewerb abgehalten. Dazu entwarfen und bauten zwei Teams unter der Leitung von Kullborg und Weichbrodt jeweils einen Prototyp der unteren drei Achsen eines elektrischen und eines hydraulischen Antriebsstrangs. Anschließend wurden diese nebeneinander betrieben. Klarer Sieger war das von Kullborgs Team entwickelte elektrische Antriebssystem.

Eine weitere wichtige Entscheidung betraf das grundsätzliche Design des Roboters. In seiner Zeit in den USA hatte Weichbrodt Prototypen von anthropomorphen Robotern gesehen, d. h. Robotern, die das Bewegungsmuster des menschlichen Arms nachahmten. Für ihn war dies das Konzept, das auch der ASEA-Roboter verfolgen sollte.

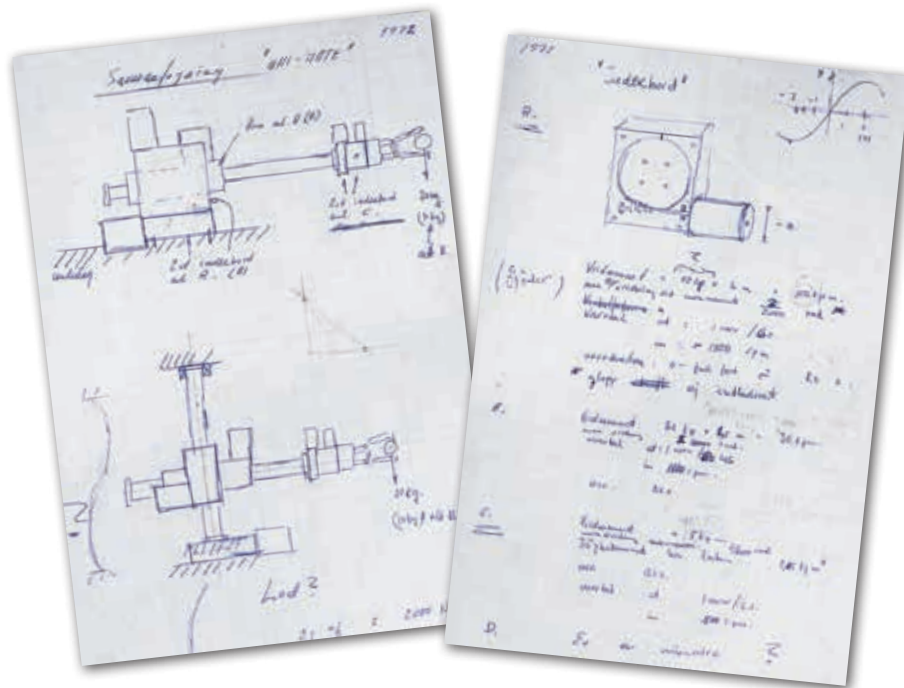
Die dritte Entwicklungsentscheidung betraf die Elektronik und die Programmierbarkeit des Roboters. Schon früh war klar, dass herkömmliche Elektronik nicht die notwendige Flexibilität, Genauigkeit und Stabilität bot. Doch ein Teammitglied hatte von einem neuen Gerät –

dem Mikroprozessor 8008 – gelesen, der von einem merkwürdigen amerikanischen Unternehmen namens Intel entwickelt worden war. Der Prozessor war klein und konnte in eine Steuerelektronik integriert werden, um eine vollständige Programmierbarkeit des gesteuerten Geräts zu ermöglichen. Das Handbuch, das das Team bei Intel anforderte und auch bekam, war von Hand getippt, enthielt handgeschriebene Korrekturen und war viele Male fotokopiert worden, weshalb es schwer zu lesen war. Doch die Entwickler verstanden genug um zu erkennen, dass der 8008 genau das war, was sie benötigten.

Prototypenplatinen wurden mit der Elektronik verdrahtet, doch da noch keine Mikroprozessoren zur Verfügung standen, konnten das Design und der Code nicht getestet werden. Letzten Endes musste Weichbrodt zu Intel nach Kalifornien reisen, um zwei Mikroprozessoren abzuholen. Das daraus resultierende Design war ein elektronisches Steuersystem auf dem neuesten Stand der Technik mit einem einfachen Programmierhandgerät und einer einfachen Bedienschnittstelle.

Damit waren drei grundlegende Entwicklungsentscheidungen getroffen: Der ASEA-Roboter sollte elektrisch angetrieben, anthropomorph und mikroprozessorgesteuert sein – alles Merkmale, die heute selbstverständlich sind.

## 2 Frühe Entwurfsskizzen



Der IRB 6 (IndustrieRoBoter mit 6 kg Tragkraft), wie er mittlerweile hieß, sorgte bei seinem ersten öffentlichen Auftritt im Oktober 1973 für viel Aufmerksamkeit, als er in einer Demonstration Ventilblöcke aufnahm und in Mustern absetzte. Magnussons i Genarp, ein kleiner Betrieb in Südschweden, erkannte das Potenzial des IRB 6 und gab am Silvestertag 1973 die erste Bestellung für einen IRB 6 auf. Später, im Jahr 1974, orderte Magnussons vier weitere IRB 6. Heute, über 40 Jahre später, verrichten vier dieser Roboter noch immer dieselbe Tätigkeit – das Polieren von Edelstahlrohren. Vor einigen Jahren kaufte ABB den ersten IRB 6 zurück, um ihn als Museumsstück auszustellen.

Wie bei allen neuen und revolutionären Produkten dauerte es einige Zeit, bis größere Stückzahlen erreicht wurden, doch 1978 waren die Verkäufe so weit gestiegen, dass das ASEA-Roboter-geschäft Gewinne erzielte.

Zeitsprung in das Jahr 2014 zum ABB Capital Markets Day in London. Neben den üblichen Finanzzahlen und Strategiepräsentationen wurde auch ein neues Mitglied der ABB-Roboterfamilie der

## Der ASEA-Roboter sollte elektrisch angetrieben, anthropomorph und mikroprozessorgesteuert sein – alles Merkmale, die heute selbstverständlich sind.

Weltöffentlichkeit vorgestellt: YuMi®, der erste wirklich kollaborative Roboter der Welt. YuMi wurde von Anfang an dafür entwickelt, mit Menschen zusammenzuarbeiten. Daher auch der Name YuMi – you and me.

Die Motivation für YuMi entstand 2006, als man bei ABB den Bedarf für einen Roboter erkannte, der z. B. in der Kleinteilmontage von Mobiltelefonen und elektronischen Geräten in China eingesetzt werden kann. Dort stehen typischerweise Tausende von Arbeitern

nebeneinander und montieren die Geräte nahezu vollständig von Hand. Also musste der neue Roboter in der Lage sein, Seite an Seite mit Menschen zu arbeiten, und durfte nicht mehr Platz beanspruchen als seine menschlichen Kollegen. Diese Vision, die von einem professionellen Illustrator festgehalten wurde → 3, inspirierte das Team während des gesamten Projekts.

Von größter Bedeutung waren die Sicherheitsmerkmale des Roboters. Dazu gehören zwei Arme (zur Geschwindigkeitsreduzierung), weiche Schutzpolster an den Armen, Gelenke ohne Quetsch- und Klemmstellen, eine begrenzte Handhabungskapazität sowie eine begrenzte Motordrehzahl und ein begrenztes Motordrehmoment. Camilla Kullborg, eine am Projekt beteiligte Ingenieurin, erkannte, dass es nicht ausreichte, dass der Roboter sicher war – er musste auch sicher aussehen und sich sicher anfühlen. Aus dieser Erkenntnis entstand der erste Entwurf, der schließlich zur Entwicklung des heutigen YuMi führte → 4. Im Jahr 2011 wurden Camilla Kullborg und das YuMi-Entwicklungsteam mit dem renommierten Industriedesignpreis „red dot: best of the best“ ausgezeichnet.



Der IRB 6 sorgte bei seinem ersten öffentlichen Auftritt im Oktober 1973 für viel Aufmerksamkeit.

YuMi kam extrem gut an, und als das Produkt auf der Hannover Messe 2015 für den Verkauf freigegeben wurde, war er der Star der Messe. Man kann ohne Übertreibung sagen, dass YuMi den Beginn einer neuen Ära der Robotik markiert – die Ära der wirklich kollaborativen Roboter.

Heute verfügt ABB über eine große Familie von Industrierobotern und hat mittlerweile weit über 250.000 Einheiten geliefert und installiert, darunter einige Weltneuheiten wie den ersten Lichtbogen-Schweißroboter, den ersten elektrischen Lackierroboter, das erste Programmierhandgerät mit Joystick, das erste AC-Antriebssystem für Roboter, die erste virtuelle Robotertechnologie, die erste Hochsprache zur Programmierung von Robotern und die erste modulare Roboterfamilie. All dies ist aus den bescheidenen Anfängen im Jahr 1972 mit Björn Weichbrodt, dem „Vater des elektrischen Roboters“, und seinem ersten Roboter hervorgegangen.

Der Markt für Industrieroboter wird in den nächsten Jahren voraussichtlich stark wachsen, und völlig neue Arten von Robotern werden erwartet: fliegende Roboter, schwimmende Roboter, gehende Roboter, rollende Roboter, Mikro-roboter, auf Fahrzeugen montierte Roboter, Roboter, die die menschliche Kraft

verstärken, und Roboter, die den Menschen unterstützen und mit ihm zusammenarbeiten – vielleicht sogar im Welt-raum.

Agnes Kullborg, die neunjährige Tochter von Camilla Kullborg und Enkelin von Ove Kullborg brachte es auf den Punkt, als man sie nach der Zukunft der Roboter fragte: „Roboter sind wirklich cool, und sie helfen Menschen. Ich glaube, in der Zukunft werden sie den Menschen noch mehr helfen. Ich würde gern mit Robotern arbeiten. Vielleicht ihr Aussehen gestalten. Vielleicht so etwas wie ein zukünftiger YuMi, denn er sieht wirklich freundlich aus“. Damit liegt Agnes als Vertreterin der dritten Generation der Kullborg-Roboterfamilie natürlich völlig richtig.

#### **Tomas Lagerberg**

ABB Corporate Research  
Västerås, Schweden  
tomas.lagerberg@se.abb.com

#### **Jan Jonson**

Ehemaliger ABB-Mitarbeiter  
ABB Discrete Automation and Motion, Robotics  
Västerås, Schweden

# Eine bewegte Geschichte

## Fortwährende Innovation bestimmt die Geschichte der elektromagnetischen Produkte von ABB

REBEI BEL FDHILA, ULF SAND, JAN ERIK ERIKSSON, HONGLIANG YANG – Die Entwicklung der elektromagnetischen Produkte von ABB für die Metallindustrie ist eine lange und eindrucksvolle Geschichte, die von vielen Patenten, Pioniergeistern, angesehenen Persönlichkeiten, bedeutenden Beiträgen zur Branche und marktführenden Innovationen gekennzeichnet ist. Nachdem sich ABB in der Metallindustrie etabliert hatte, nutzte das Unternehmen die Gelegenheit zur produktiven Zusammenarbeit mit Kunden, um seine Position als Innovationsführer zu stärken. Dieses stolze Erbe dient ABB als Grundlage für die kontinuierliche Entwicklung hervorragender Lösungen für die Metallindustrie und den möglichen Einstieg in neue Märkte.

**D**er elektromagnetische Rührer (Electromagnetic Stirrer, EMS) wurde Anfang der 1930er Jahre von Dr. Ludwig Dreyfus, einem hoch geschätzten Mitarbeiter von ASEA, erfunden. Er hatte erkannt, dass mithilfe eines magnetischen Wanderfelds eine ausreichende elektrodynamische Kraft in geschmolzenem Metall erzeugt werden kann, um eine effektive Rührwirkung zu erzielen. Sein Patent für elektromagnetisches Rühren in Lichtbogenöfen, das 1937 in Schweden erteilt wurde, gilt als Geburtsstunde des elektromagnetischen Rührens und die Grundlage für alle anderen elektromagnetischen Rühranwendungen in der Metallindustrie → 1.

### Installation des ersten Rührers

Der erste elektromagnetische Rührer für den Einsatz in der Praxis wurde 1947 in Schweden an einem Elektrolichtbogenofen installiert, der sowohl als Schmelz- als auch als Raffinationsgefäß diente. Der Rührer homogenisiert die Schmelztemperatur und beschleunigt die Schlacke-Metall-Reaktionen. Seitdem wurden mehrere Tausend elektromagnetische Rührer in verschiedenen Metallverarbeitungsanwendungen wie Lichtbogenöfen, Pfanneöfen, Stahlstranggießanlagen und Aluminium-Umschmelzöfen installiert.

### Erster Pfannenofen der Welt

In den 1960er Jahren entwickelten Ingenieure von SKF und ASEA den ersten Pfannenofen der Welt, den ASEA-SKF, um das Problem der geringen Qualität bei der Herstellung von Lagerstahl mit Lichtbogenöfen zu lösen. Das ASEA-SKF-Verfahren, das sich durch eine Kombination aus magnetischem Rühren, Vakuumbehandlung, Lichtbogenerwärmung und Argon-Gasspülung auszeichnet, markierte den Beginn einer neuen Ära der Qualitätsstahlerzeugung. Der erste ASEA-SKF-Pfannenofen ging 1968 bei SKF Hällefors in Schweden vollumfänglich in Betrieb. Zwischen den 1960er und 1980er Jahren wurden weltweit rund 70 weitere ASEA-SKF-Öfen installiert. Obwohl das ASEA-SKF-Verfahren später durch modernere Pfannenraffinationsverfahren abgelöst wurde, blieb das elektromagnetische Rühren in der Pfanne (LF-EMS) ein wichtiges Werkzeug für die Herstellung von Handelsstahl und hochlegiertem Stahl [1] → 2. Heute sind rund 140 elektromagnetische Rührer in verschiedenen Pfannenraffinationsprozessen installiert.

### Elektromagnetische Bremse

In den 1970er Jahren begann man, elektromagnetische Rührer in Knüppel-/Vorblockgießanlagen zu implementieren, um die festen Strukturen und die Oberflächenqualität zu verbessern. In den 1980er Jahren nutzten ASEA und Kawasaki Steel ein elektromagnetisches Feld an einem konventionellen Brammengießprozess, um die Brammenqualität weiter zu verbessern. Dieses Gleichstrom-Magnetfeld, das auf den aus dem Tauchrohr

---

Heute verfügt über die Hälfte der weltweit 70 Dünnbrammengießanlagen über eine EMBR von ABB.

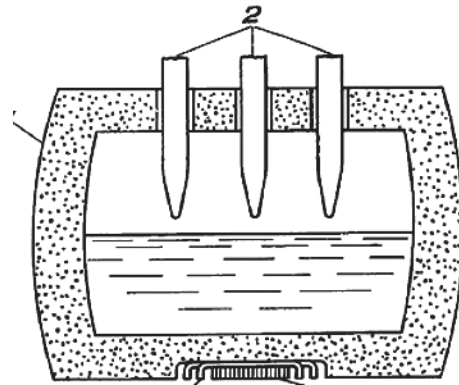
strömenden, hochdynamischen Gießstrahl wirkt, reduzierte die Strahlgeschwindigkeit und stabilisierte die Strömungsfuktuationen in der Kokille → 3. Die Technologie, die später zu einer elektromagnetischen Bremse (EMBR) weiterentwickelt wurde, fand breitere Anwendung beim Gießen von Dünnbrammen. Die EMBR stabilisiert Fluktuationen am Badspiegel und reduziert Gießpulvereinschlüsse, was für eine hohe Gießgeschwindigkeit und eine hohe Brammenqualität unerlässlich ist. Heute verfügt

**PATENT N<sup>o</sup> 102 334 SVERIGE** **KLASS 21: h: 18-10**  
 BESKRIVNING  
 OFFENTLIGGJORD AV KUNGL.  
 PATENT- OCH REGISTRERINGSVERKET  
 BEVILJAT DEN 19 JUNI 1941  
 GILTIGT FRÅN DEN 22 JAN. 1937  
 PUBLICERAT DEN 19 AUGUSTI 1941  
 Ans. nr 281/1937. *Här till en ritning.*



**ALLMÄNNA SVENSKA ELEKTRISKA AKTIEBOLAGET, VÄSTERÅS.**  
**Omröringsanordning vid ugnar för metallurgiska ändamål.**  
 (Uppfinnare: L. Dreyfus.)

Det är bekant att vid s. k. virvelströmsugnar, d. v. s. ugnar vid vilka den huvudsakliga värmetillförseln till chargen sker genom i densamma inducerade elektriska virvelströmmar, vanligen av hög frekvens, åstadkomma en elektrodynamisk omröring av chargen eller löset i syfte att påskynda där förlöpande reaktioner. I de nämnda följande formerna av de i huvudsak kring en horisontal axel, så att nya delar av detsamma oppbörigt komma upp till ytan samt där utsätts för uppvärmning resp. reaktioner. Samtidigt hålles periodiskt av strömmen i omröringslinningen väsentligt lägre än läge på kommersiella periodtal, varigenom effekten i nämnda linning hålles låg. Någon väsentlig uppvärmning avses såväl i linning



## FC Mold G3 ist das fortschrittlichste Strömungsregelungssystem für Brammengießanlagen auf dem Markt.

über die Hälfte der weltweit 70 Dünnbrammengießanlagen über eine EMBR von ABB.

### Flow Control Mold

In den 1990er Jahren entwickelten Kawasaki Steel (später JFE) und ABB das Flow Control Mold (FC Mold) System. FC Mold nutzt ein DC-Magnetfeld im unteren Bereich der Kokille und ein zusätzliches Magnetfeld im oberen Bereich zur Stabilisierung der Fluktuationen am Badspiegel, was die Flexibilität bei der Regelung der Strömungsbedingungen erhöht. Kawasaki Steel erzielte hervorragende Ergebnisse mit FC Mold, unter anderem eine höhere Gießgeschwindigkeit und eine bessere innere und äußere Brammenqualität. Heute profitieren über 70 Stranggießanlagen von der herausragenden Technologie von FC Mold für konventionelle Brammengießanlagen.

### Flow Control Mold G3

In den 2000er Jahren entwickelte ABB die dritte Generation von FC Mold (FC Mold G3), um neuen Marktanforderungen für konventionelle Brammengießanlagen nachzukommen. FC Mold G3 ermöglicht die Erzeugung eines zusätzlichen Wandermagnetfelds an der gleichen Stelle wie das obere DC-Magnetfeld beim FC Mold II-System. Durch den gleichzeitigen Einsatz von AC- und DC-Magnetfeldern kann die Strömungsgeschwindigkeit am Badspiegel bei nahezu allen Gießbedingungen im optimalen Bereich gehalten werden → 4. FC Mold G3 ist das fortschrittlichste Strömungsregelungssystem, das für Brammengießanlagen auf dem Markt

erhältlich ist. In diesem Jahr (2016) wird ABB mit OptiMold Monitor ein neues Produkt zur Messung der Kokillentemperatur beim Stranggießen auf den Markt bringen. Die Technologie liefert einen wertvollen Einblick in den Prozess und kann mit FC Mold kombiniert werden, um eine Prozessregelung in Echtzeit zu realisieren und die Qualität des Endprodukts noch weiter zu verbessern.

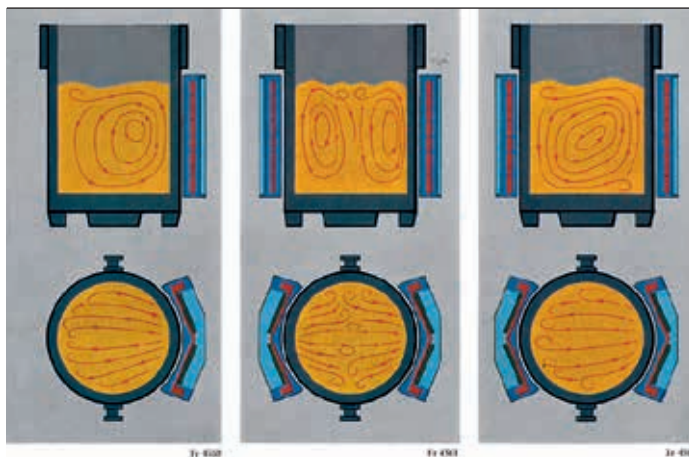
### Aluminium-Umschmelzöfen

In den 1960er Jahren entwickelte ASEA einen elektromagnetischen Rührer für Aluminium-Umschmelzöfen (AL-EMS), der überzeugende Ergebnisse in Form von Energieeinsparungen, Ertrags- und Produktivitätssteigerungen lieferte. Allerdings erfuhr das System erst in den 1990er Jahren die gebührende Beachtung, als die Aluminiumindustrie nach Möglichkeiten zur Energieeinsparung und Produktivitätssteigerung suchte. ABB brachte daraufhin eine Reihe von AL-EMS für das gesamte Spektrum von Ofengrößen und -typen auf den Markt → 5. Bei typischen Aluminium-Umschmelzöfen können mit dem AL-EMS Energieeinsparungen von 10 % und Produktivitätssteigerungen um 25 % erreicht werden. Bis heute hat ABB weltweit über 200 AL-EMS installiert.

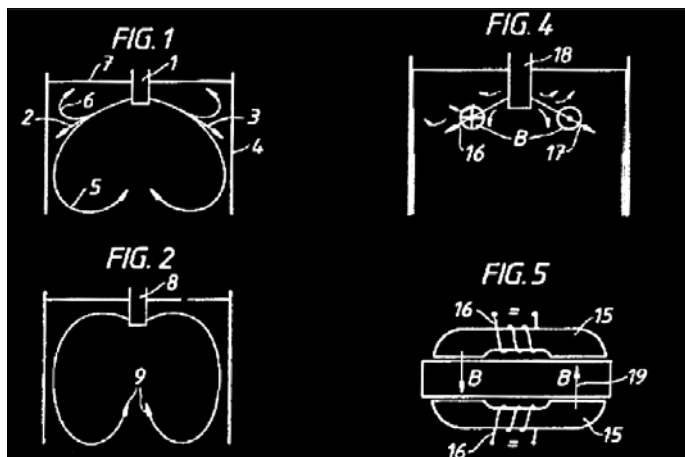
### ArcSave®

Seit den 1980er Jahren hat sich der Lichtbogenofen immer mehr zu einem reinen Schmelzgefäß mit einem hohen Stromverbrauch und einer kurzen Schmelzzeit entwickelt. Anfang der 2000er Jahre entwickelte ABB einen neuen Rührer mit einer deutlich höheren Rührleistung, der

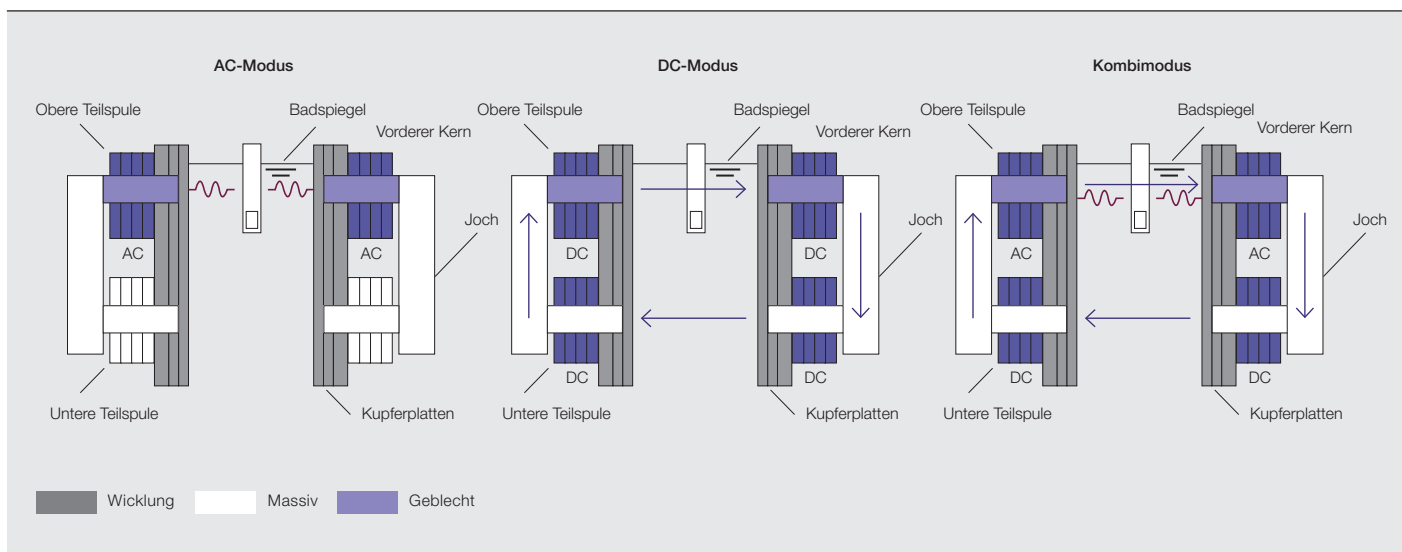
## 2 Skizze verschiedener Rührmuster in einer frühen Entwicklungsphase des ASEA-SKF-Prozesses



## 3 Erstes Patent für die EMBR an einer Brammengießanlage



## 4 Betriebsarten von FC Mold G3



Die engere Zusammenarbeit mit ABB Corporate Research hat zur Entwicklung fortschrittlicher Mess- und Simulationsverfahren geführt.

später unter dem Namen ArcSave® patentiert und vermarktet wurde. Installiert an einem modernen Lichtbogenofen bietet er dem Kunden deutliche Vorteile in puncto Energieeinsparungen, Eisenausbeute, Verbrauch von Legierungen usw.

### Branchenpioniere und fortwährende Innovation

Neben Dr. Dreyfus mit seinem elektromagnetischen Rührer gibt es noch eine ganze Reihe weiterer ABB-Mitarbeiter, die durch Innovationen einen wichtigen Beitrag zur Branche geleistet haben. Dazu gehören unter anderem:

- Yngve Sundberg, Mitarbeiter in den 1950er bis 1980er Jahren, entwickelte eine vollständige Theorie zur Berechnung und Konstruktion von Elektroöfen und elektromagnetischen Rührern. Er und seine ehemaligen ASEA-Kollegen besitzen mindestens sechs Patente, und auf sein Werk „Electric Furnaces and Inductive Stirrers“ [2] wird in der Branche noch heute regelmäßig verwiesen.
- Sten Kollbergs besonderer Fokus für Probleme im Gießprozess von Kunden in den 1980er–1990er Jahren berei-



tete den Weg für die Entwicklung der EMBR und des FC Mold-Systems. Seine soziale Kompetenz und seine Erfindungsgabe wurden hoch geschätzt.

- Göte Tallbäck, der etwa zur gleichen Zeit bei ASEA arbeitete wie Sten Kollberg, bezog die Magnetohydrodynamik (MHD) in metallurgische Verfahren ein. Seine Arbeit über die numerische Simulation des EMBR-Verfahrens, die vor 30 Jahren veröffentlicht wurde, wird noch immer zitiert. In den 2000er Jahren meldeten er und seine ASEA-Kollegen vier Patente für das elektromagnetische Rühren an.
- Jan-Erik Eriksson, seit 1980 bei ABB, hat zusammen mit seinen ABB-Kollegen 25 Patente. Er hat maßgeblich zur fortlaufenden Entwicklung von FC Mold, insbesondere der neuesten Generation, sowie der EMBR in Verbindung mit japanischen Industriepartnern beigetragen.
- Rebei Bel Fdhila kam 1995 zu ABB Corporate Research und kombiniert seine umfassende Modellierungskompetenz mit der Prozessenerfahrung seiner Kollegen, um ABB dabei zu helfen, ihre Modellierungs-, Simulations- und Designfähigkeiten neu aufzustellen, um bedeutende neue Funktionen in der elektromagnetischen Rührtechnik zu realisieren und die Marktposition des Unternehmens zu festigen.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat eine engere Zusammenarbeit mit ABB Corporate Research unter dem Einfluss von Rebei Bel Fdhila und Jan-Erik Eriksson zur Entwicklung fortschrittlicher Mess- und Simulationsverfahren, darunter mehrere Arten von laserbasierten Messungen und hochmoderne numerische Strömungssimulationen (CFD), geführt. Dank fundiertem Wissen über Metallurgie, das Stranggießen, die Wirkung elektromagnetischer Felder und die zugrunde liegenden komplexen Phänomene mehrphasiger Strömungen, in denen das flüssige Metall, das gasförmige Argon und Feststoffe miteinander interagieren, ist es dem F&E-Team von ABB gelungen, die EMS-Technologie weiter zu verbessern, zu modernisieren und mit neuen Funktionen auszustatten, die neue Märkte erschließen.

### Entwicklungsanforderungen und treibende Kräfte

Energieeffizienz, Produktivität und Qualität sind von grundlegender Bedeutung für die nachhaltige Entwicklung der Metallindustrie, und dem elektromagnetischen Rühren und Bremsen kommt dabei eine wichtige Rolle zu. Produkte wie ArcSave®, die neue Generation von FC Mold und OptiMold Monitor sind nur einige Beispiele für den Beitrag von ABB in diesem Bereich, die zeigen, dass ABB in der Lage ist, die Marktanforderungen zu verstehen und durch technologische Innovationen zu erfüllen. Da mit zunehmender Bedeutung des Internets der Dinge, Dienstleis-

tungen und Menschen (IoTSP) die Erwartungen in der Metallindustrie in den kommenden Jahren steigen werden, konzentriert sich ABB auf die Entwicklung von Produkten, die nicht nur für mehr Sicherheit und Zuverlässigkeit, Kosteneffizienz und Qualität sorgen, sondern auch benutzerfreundlicher sind, messen und analysieren können und die Leistungsfähigkeit der Prozesse unserer Kunden verbessern. ABB hatte das Privileg, mit nahezu allen führenden Stahlherstellern der Welt zusammenzuarbeiten, und ist bestrebt, auch weiterhin eine führende Rolle in der Innovation elektromagnetischer Produkte für die Metallindustrie einzunehmen.

#### Rebei Bel Fdhila

##### Ulf Sand

ABB Corporate Research  
Västerås, Schweden  
rebei.bel\_fdhila@se.abb.com  
ulf.sand@se.abb.com

#### Jan Erik Eriksson

##### Hongliang Yang

ABB Process Automation, Metallurgie  
Västerås, Schweden  
hongliang.yang@se.abb.com  
jan-erik.a.eriksson@se.abb.com

#### Literaturhinweise

- [1] Sundberg, Y. (1971): „Principles of the induction stirrer“. ASEA Journal 44 (4), S. 71–80
- [2] Sundberg, Y. (1969): „Electric furnaces and induction stirrers“. ASEA, Västerås



# Die Erzfabrik

## Mining 2.0 – Automatisierungslösungen für den Bergbau

**JAN NYQVIST – Aus den Augen, aus dem Sinn – dieses Sprichwort mag für viele gelten, es sei denn, sie haben ein Interesse am Bergbau, so wie ABB. Unter dem Schlagwort „Mining 2.0“ entwickelt ABB Automatisierungslösungen für die Bergbauindustrie, insbesondere für den Untertagebau. Mining 2.0 basiert auf der Vision einer „Erzfabrik“ → 1 und richtet sich mit einzigartigen Lösungen für die gesamte Wertschöpfungskette an eine im Wandel befindliche Branche. Die Grundidee bestand darin, Methoden der Prozessführung in diskrete Bergbaubetriebsabläufe einzuführen. Während dieser Ansatz anfangs neu für den Markt war, sucht die Bergbaubranche mittlerweile aktiv nach solchen Lösungen und treibt diese voran.**

**A**ls Lieferant der Rohstoffe für unseren Wohlstand spielt der Bergbau für die weltweite Entwicklung eine bedeutende Rolle. Die Branche ist global und für viele Regionen ein strategisch wichtiger Wirtschaftsfaktor. Weltweit gibt es rund 10.000 Untertagebergwerke, und Schwerpunkt für ABB ist der Metallbereich, der Rohstoffe wie Eisen, Kupfer, Nickel, Gold, Silber, Zink und Blei umfasst.

### Die Bergbauindustrie

Die Bergbauindustrie sieht sich zurzeit mit einem drastischen Verfall der Rohstoffpreise konfrontiert, und viele neue oder kürzlich begonnene Bergbauprojekte müssen verschoben oder aufgegeben werden. So sind die Preise für Rohstoffe zum Teil um 30 bis 50 %, für Eisen sogar noch weiter zurückgegangen. Außerdem wird die Branche von einem starken Wachstum in Schwellenländern bestimmt. Gleichzeitig finden Neuerschließungen an immer entlegeneren Standorten und in immer größeren Tiefen statt, während der Mineralgehalt bei manchen Rohstoffen um bis zu 50 % gesunken ist. Dies bedeutet, dass für die gleiche Wertschöpfung viel mehr Erz aus immer schwierigeren Lagerstätten gefördert werden muss.

### Die Prioritäten der Bergbauindustrie sind:

- Sicherheit
- Effiziente Produktion
- Umweltschutz
- Personalbeschaffung und -bindung

### Typische Merkmale eines Bergbaubetriebs sind:

- Raue Umgebung und Gefahrenbereiche
- Große Entfernungen und begrenzter Platz
- Hohes Maß an ungeplanten Tätigkeiten
- Hoher Anteil von menschlicher Tätigkeit und mobilen Maschinen
- Geringe Auslastung mobiler Maschinen (z. T. nur 20 bis 25 %)
- Geringe Nutzung von freien Abbaustößen (z. T. nur 20 bis 30 %)
- Begrenzte Transparenz des laufenden Betriebs in Echtzeit

### Bergbau und ABB

ABB verfügt über ein Portfolio von Lösungen für eine langfristige und nachhaltige Tätigkeit auf dem globalen Bergbaumarkt.

Das Portfolio ist darauf ausgelegt, sowohl mit der Technik als auch mit den Anforderungen des Marktes zu wachsen. Mining 2.0 war der Ausgangspunkt für die Ent-

wicklung des ABB-Geschäftszweigs für Bergwerksautomatisierung.

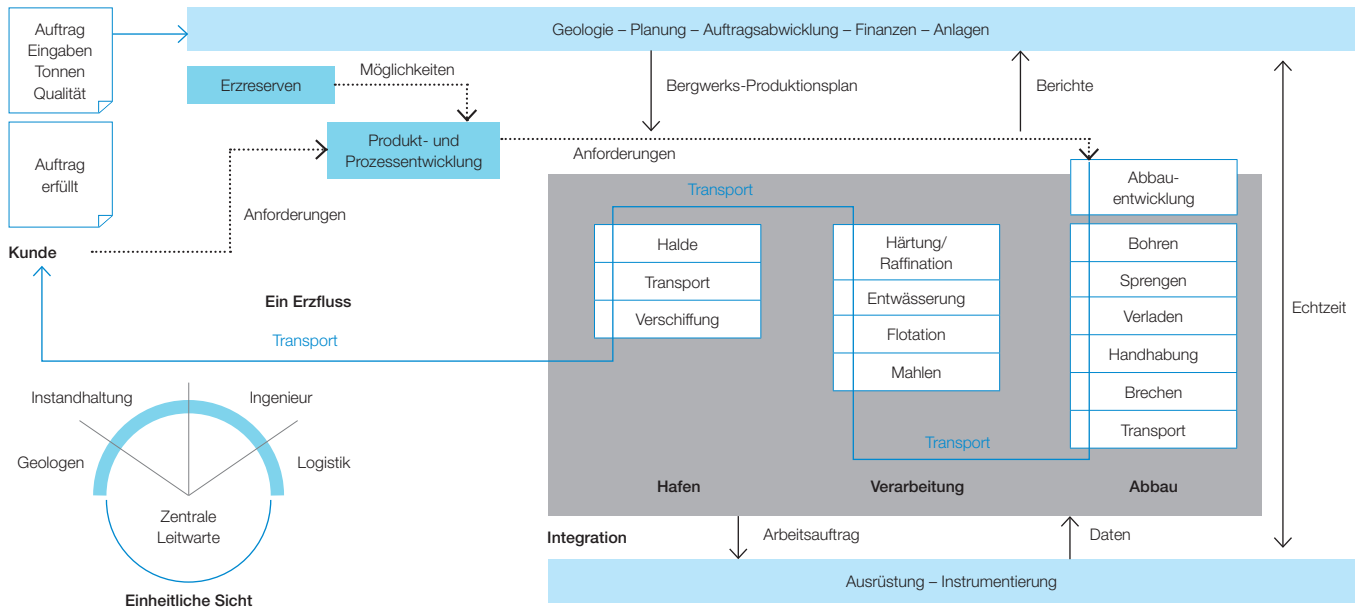
Das Konzept beinhaltet eine Reihe einzigartiger Lösungen für den Markt, oder, wie ein Vertreter des Bergbaukonzerns Anglo American sagte: „Wir haben noch nichts dergleichen gesehen. Ihr habt etwas Einzigartiges in eurem Konzept.“ Ein Vertreter von Rio Tinto formulierte es so: „Wenn wir diese Lösung hätten, könnten wir unsere Produktion um 10 bis 20 % steigern.“

Technologien, die im Rahmen von Mining 2.0 entwickelt wurden, haben zur Entstehung verschiedener Produktkonzepte wie MineInsight, Smart Ventilation und Integrated Mining Operations (IMO) geführt. Einige Bestandteile der Konzepte sind bereits auf dem Markt, und andere befinden sich noch in der Entwicklung.

---

**Für die gleiche Wertschöpfung muss viel mehr Erz aus immer schwierigeren Lagerstätten gefördert werden.**

Mining 2.0 ist das Ergebnis einer offenen Zusammenarbeit mit regem Austausch zwischen der ABB-Geschäftseinheit Mining und ABB Corporate Research



„Wir können nicht immer größere Maschinen bauen. Wir müssen über eine neue Art des Bergwerkbetriebs nachdenken.“

(CR) sowie dem Dialog mit Kunden, anderen Anbietern, Hochschulen, staatlich finanzierten Projekten und Projekten der Europäischen Kommission wie I<sup>2</sup>Mine und das damit verbundene SMIFU-Programm (Sustainable Mine and Innovation for the Future) des Rock Tech Centre.

### Herausforderungen

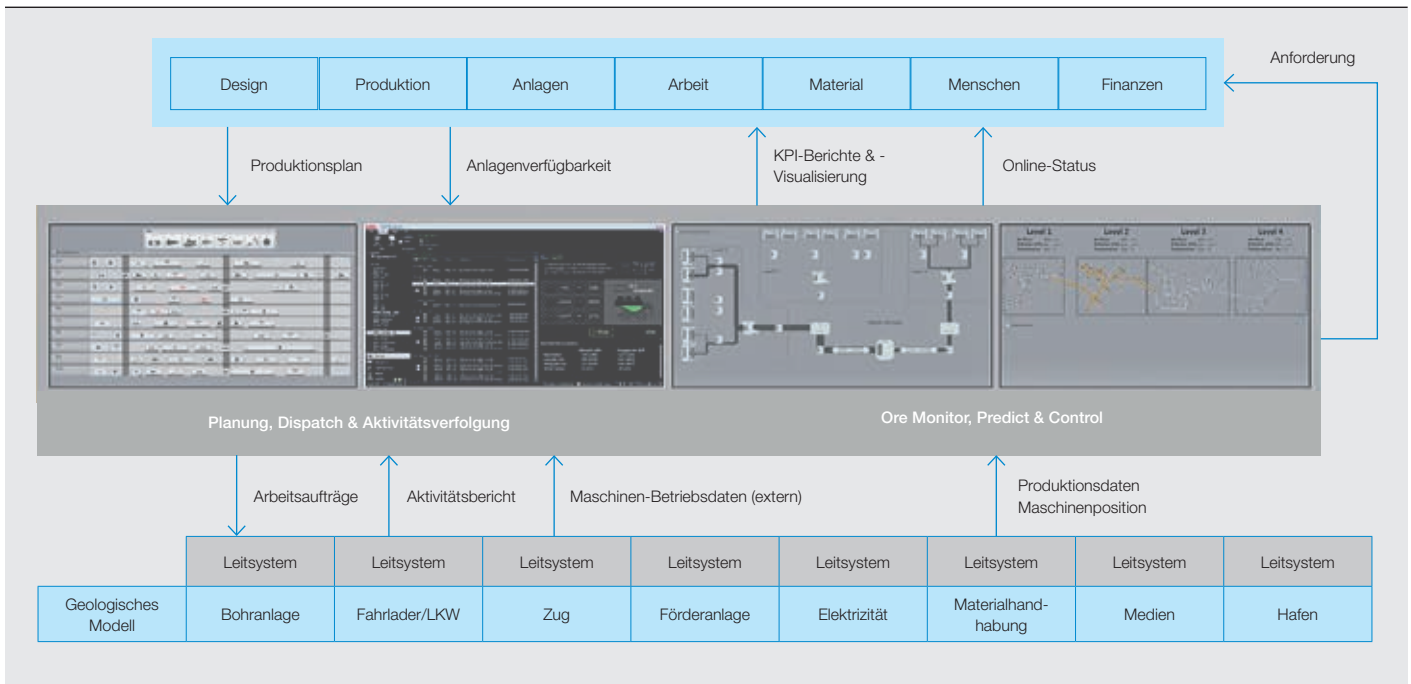
Eine anfängliche Herausforderung des Projekts bestand darin, die Probleme und schließlich die Lösungen genau zu verstehen und zu kommunizieren. Die Bergbauindustrie war sich ihrer Probleme und neuen Herausforderungen bewusst, hatte aber Mühe, ihre Erkenntnisse auszudrücken. Auf der anderen Seite hatte ABB als Lieferant Schwierigkeiten, Lösungen auf verständliche Weise zu präsentieren.

Der Schwerpunkt ist bis heute die Steigerung der Produktivität und Kapazität der Maschinen und der Bau größerer und mechanisch effizienterer Maschinen, doch diese Lösung hat ihre Grenzen schon fast erreicht. Gavin Yates von BHP Billiton sagt: „Wir können nicht immer größere Maschinen bauen. Wir müssen über eine neue Art des Bergwerkbetriebs nachdenken.“ Im Laufe der Zeit wurden folgende Interessensgebiete definiert → 1-2:

– *Neue Betriebsmethoden* – zur Umstellung auf einen eher kontinuierlichen Bergbau

- *Autonome Maschinen* – um mehr nutzbare Zeit für die Produktion zu gewinnen. Viel Zeit wird für nicht produktive Tätigkeiten wie Schichtwechsel, Pausen und das Lüften des Bergwerks nach dem Sprengen aufgewendet.
- *Maschineninstandhaltung* – Eine stärker vorbeugende Instandhaltung von Maschinen bietet die Möglichkeit einer besseren Maschinennutzung und Reduzierung ungeplanter Stillstände im Bergwerk.
- *Zentralisierte Steuerung und Fernsteuerung* – eine zentrale Steuerung mit einem Bediener, der die effiziente Koordinierung aller geplanten Aktivitäten überwacht und in Echtzeit auf Störungen reagiert. Erfolgt dies aus der Ferne, wird weniger Personal vor Ort benötigt, und mehrere Bergwerke können von derselben Leitwarte aus gesteuert werden. In einem großen Bergwerk können in jeder Schicht Hunderte von Maschinen in Betrieb sein und Tausende von Ereignissen auftreten.
- *Effizienter Erztransport* – ein stabiler Transportprozess, der Störungen wie das Leerlaufen von Silos und Erzrollen verhindert, effizientes Beladen von LKW, Zügen und Schachtförderanlagen. Effizienter Betrieb von Maschinen, nur wenn nötig bis an ihre Grenzen → 3.

## 2 Erzfabrik als ein Betrieb



### Technologie und Methoden

Zu den im Rahmen von Mining 2.0 verwendeten und entwickelten Technologien und Methoden gehören:

- *Feldstudien* – Bei einer Feldstudie besucht ein zwei- bis vierköpfiges Team einen Bergwerkstandort, wo es Beobachtungen und Befragungen vornimmt, um Informationen zu sammeln und Arbeitsabläufe zu erfassen. Diese Informationen bilden die Grundlage für weitere Entwicklungen:
- *Domänenmodelle und Architekturen* – als Referenz. Beschreiben aktuelle und zukünftige Betriebsabläufe.
- *Rollen und Szenarien*
  - Beschreibung der beteiligten Personen und eines Workflows zur Entwicklung benutzerzentrierter Automatisierungslösungen.
- *Visualisierung* – Verschiedene Konzepte wurden für verschiedene Lösungen und Szenarien entwickelt → 4.
- *Drahtlose Kommunikation* – wurde getestet, um die Grenzen und Installationsmöglichkeiten in einem Untertagebergwerk zu prüfen. Außerdem wurde der Einsatz drahtloser Kommunikationstechnologien für die bestehende Lokalisierung → 5 getestet.

- *Regelungsverfahren* – spielen eine wichtige Rolle bei der Grubenbewetterung, Wasserregulierung, Planungsoptimierung, Materialsteuerung und -verfolgung.
- *Optimierung und statistische Methoden* – zur kritikalitätsbasierten Optimierung der Instandhaltungsstrategie.

### Lösungen und Produkte

Die Grundlage für die Vision einer „Erzfabrik“ bildete die Einführung von Methoden der Prozessführung in einen diskreten Prozess, was der Bergbau ist. Zu den Schlüsselkomponenten gehören eine vertikale

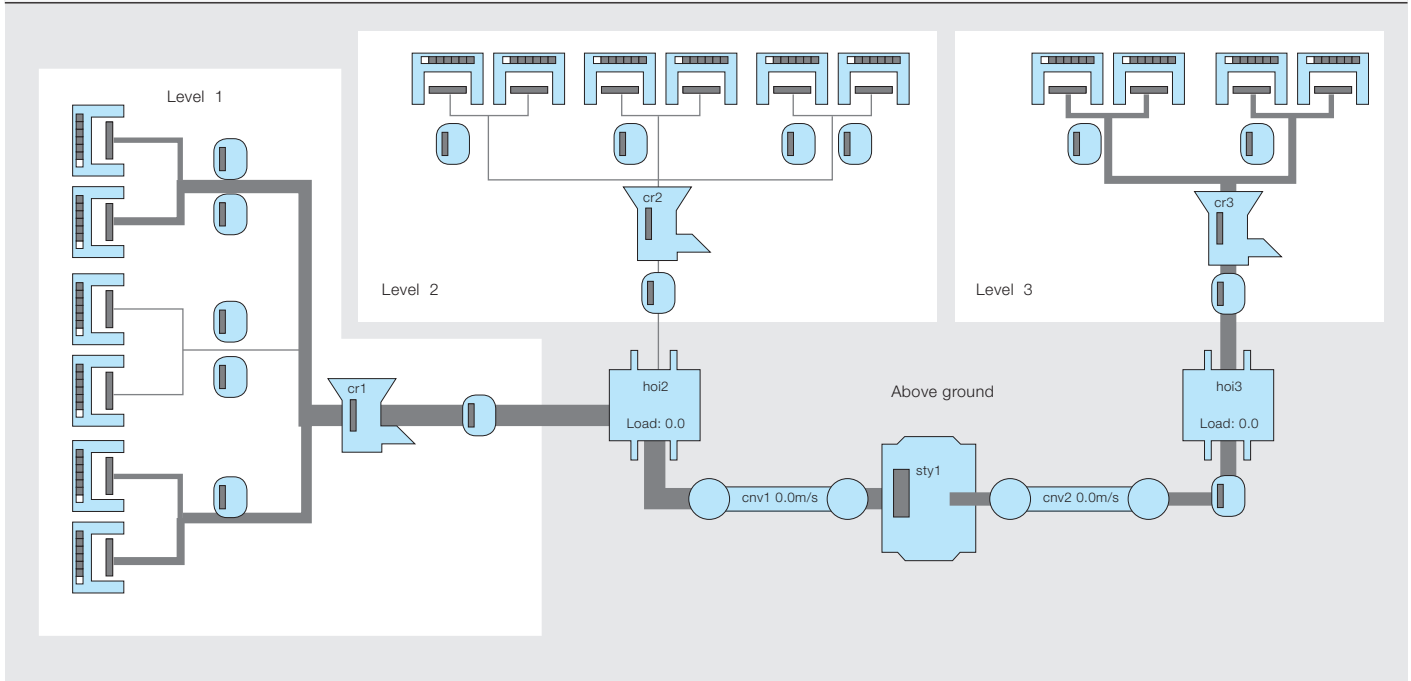
## Eine grubenweite drahtlose Kommunikation ermöglicht eine Echtzeitverbindung zu den mobilen Maschinen.

und horizontale Integration, eine zentralisierte Steuerung, eine einzige Datenquelle und der Echtzeit-Zugriff auf Maschinendaten. Was fehlte, war die Integration mobiler Maschinen mithilfe eines installierten drahtlosen Kommunikationsnetzwerks. Folgende Lösungen wurden entwickelt:

- *Optimierung der Instandhaltungsstrategie* – Ein auf einer Kritikalitätsanalyse basierendes Instandhaltungs-Opti-

mierungstool (CRIM) hilft dem Kunden, eine optimale Mischung aus prädiktiven, präventiven und ausfallbedingten Instandhaltungsstrategien für seine Anlagen zu finden. Das entwickelte CRIM-Optimierungsverfahren und -tool bietet eine Lösung des Problems in mehreren Schritten. Ausgehend von einer Kritikalitätsbeurteilung und endend mit einer Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) hilft das Tool Bergwerksbetreibern, die effizienteste Instandhaltungsstrategie für die gesamte Anlage zu bestimmen.

- *Lokalisierung* – von Personal (über deren Mobiltelefone) und Maschinen. Mithilfe eines Identifizierungssystems (Tagging-System) können Maschinen und Personal verfolgt und auf einer 3-D-Karte des Bergwerks dargestellt werden. Sicherheitsbereiche können im System mithilfe von geografischen Zäunen (Geofences) definiert werden. Die Produktisierung erfolgt in Zusammenarbeit mit Mobilaris. Ein Produkt mit der Bezeichnung ABB Mine Location Intelligence ist bereits auf dem Markt. Der größte Kundennutzen liegt in der Sicherheit, aber auch in der besseren Transparenz des Betriebs unter Tage.
- *Planungsoptimierer und Dispatch* – kurzfristige Planung sämtlicher Aktivitäten unter Tage und Online-Verteilung erstellter Arbeitsaufträge an das



Schlüsselkomponenten sind eine vertikale und horizontale Integration, eine zentralisierte Steuerung, eine einzige Datenquelle und der Echtzeit-Zugriff auf Maschinendaten.

Bedienpersonal. Rückmeldungen zum Fortschritt können ebenfalls online gegeben werden. Aufgrund des geschlossenen Wirkungskreises und des Optimierers kann die kurzfristige Planung automatisiert werden. Das Produkt nennt sich Minelnsight. Das Dispatch-System ist auf dem Markt, und das Planungssystem sollte bis Ende 2016 fertiggestellt sein. Der Kundennutzen besteht in einer Verkürzung der für eine Neuplanung bei ungeplanten Ereignissen erforderlichen Zeit von mehreren Stunden auf wenige Sekunden. Damit ist eine engere Zeitplanung möglich, was wiederum zu einer Steigerung der Produktion (laut Tests um 10 bis 20 %) und einer besseren Ressourcennutzung führt. Das System liefert stets den aktuellen Status in Echtzeit und ermöglicht eine Vorhersage der zukünftigen Produktion.

- *Erzflusssteuerung* – befindet sich aufgrund der geringeren Priorität für den Markt noch in der Entwicklung. Es wird ein Framework für die Materialverfolgung entwickelt, das zusammen mit Visualisierungskonzepten ein Bestandteil von Minelnsight werden soll. Der Kundennutzen liegt in der Online-Visualisierung der Erzproduktion, der Vorhersage der zukünftigen Produktion und zukünftiger Ereignisse, der Massenbilanzierung entlang der

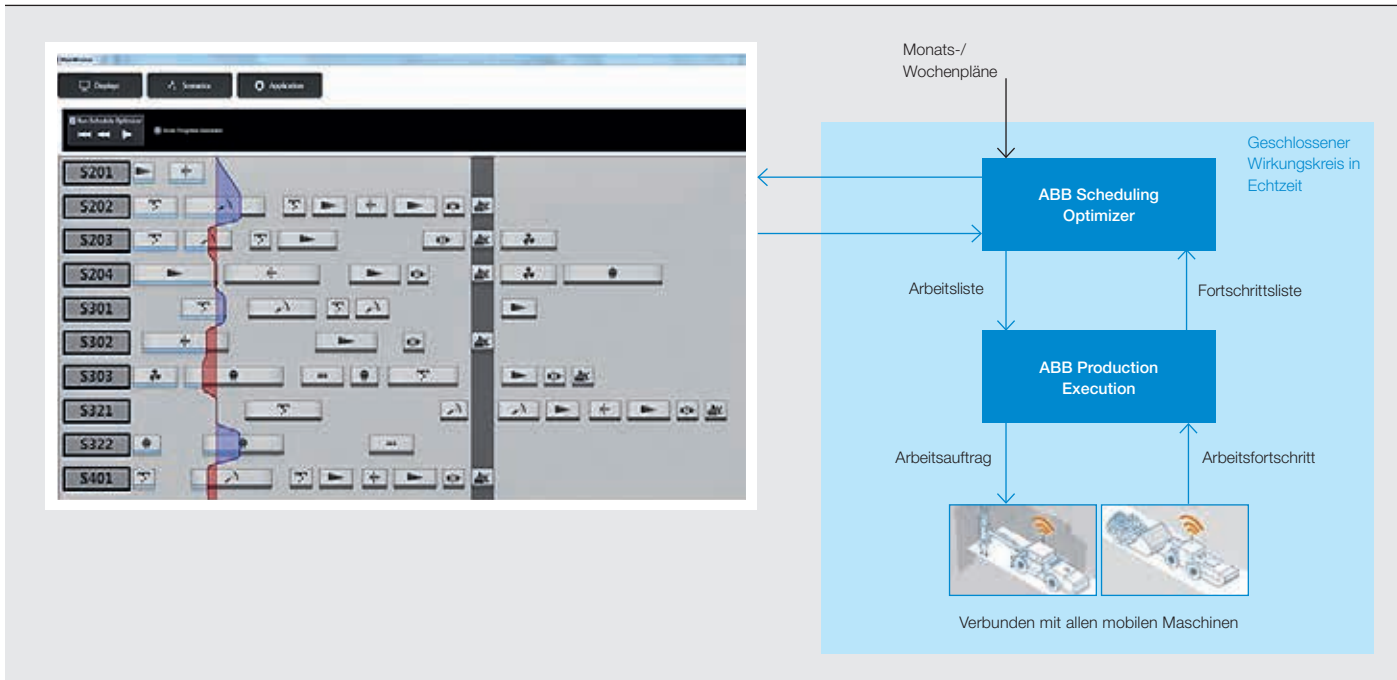
Wertschöpfungskette und einer effizienten Produktion mit minimalen Störungen.

Die fünfte entwickelte Lösung, die Bewetterungsregelung → 6, ist Bestandteil der ABB-Lösung *Smart Ventilation* und marktreif. Sie ermöglicht die Regelung sämtlicher Lüfter und Wetterdrosseln mit Istwert-Rückführung durch Sensoren. Der Kundennutzen ist ein robustes Bewetterungssystem, das in der Lage ist, sich an neue Bedingungen anzupassen. Damit ist eine Senkung des Energieverbrauchs von Lüftern um bis zu 50 % denkbar. Außerdem wird eine effizientere Nutzung der vorhandenen Bewetterungsinfrastruktur (Schächte) ermöglicht, sodass Neuinvestitionen und Erweiterungen des Bergwerks verschoben werden können.

#### Der Werdegang von Mining 2.0 – einige Fakten

Mining 2.0 begann im September 2009 als Vorstudie, als Rio Tinto sein Konzept „Mine of the Future“ mit einem Erzprojekt namens „A pit“ ins Leben gerufen hatte. Dieses sah die Steuerung eines kompletten Bergwerks in der nordwestaustralischen Region Pitbara von einem 1.500 km entfernten Betriebszentrum in Perth vor. Mining 2.0 war die Antwort von ABB auf die Initiative von Rio Tinto. Die Leitfrage lautete: „Mine of the Future – was bedeutet dies für ABB?“

#### 4 Automatisierte Betriebsplanung mit Visualisierung des aktuellen Status und der Maschinenverbindung in Echtzeit



#### 5 Lokalisierung von Maschinen und Personal in der 3-D-Darstellung



Das Ziel von Vattenfall war eine Prozessoptimierung, bei der alle Beteiligten auf ein- und dieselbe Informationsquelle zugreifen.

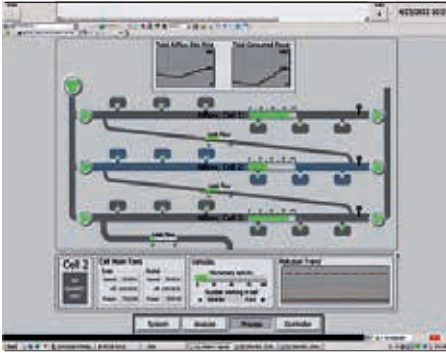
Im Frühjahr 2010 waren zwei Ereignisse von besonderer Bedeutung für die Fortführung der Initiative. Zum einen hatte ABB begonnen, Möglichkeiten für eine Zusammenarbeit mit Atlas Copco zu sondieren. Im April 2010 wurde das „optimiere Bergwerk“ präsentiert. Ein zentraler Aspekt war die Integration einer Verfolgung von mobilen Maschinen und Material zur Beschreibung des Prozessflusses. Das zweite Ereignis war ein Treffen mit der Vattenfall AG in Deutschland. Das Unternehmen hatte seine Maschinen so weit wie möglich automatisiert und arbeitete an einer Prozessoptimierung, bei der alle

Beteiligten auf ein- und dieselbe Informationsquelle zugreifen. Außerdem zog Vattenfall eine Steuerung nach dem Holprinzip (Demand Control) einer Steuerung nach dem Bringprinzip (Push Control) vor, die bei Bergwerksbetrieben und dem kontinuierlichen Abbau der Normalfall ist.

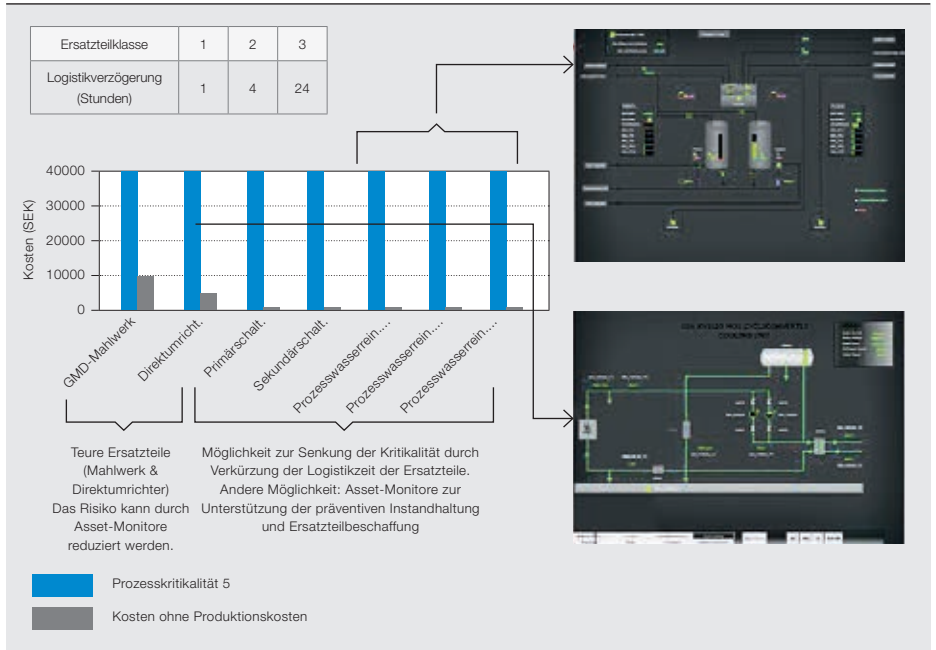
**Sommer 2011** – ABB entwickelt die Vision einer Erzfabrik für Kundenpräsentationen.

**Ende 2011** – ABB präsentiert die ersten Lösungskonzepte für eine Erzfabrik. Die ersten Ergebnisse sind das CRIM-Optimierungstool → 7 und das Verfahren zur Bestimmung einer kosteneffizienten In-

## 6 Bewetterungsregelung



## 7 CRIM



Das weltweit erste LTE-Netz in einem Untertagebergwerk im schwedischen Boliden soll zum Testen zukünftiger 5G-Kommunikation und -Lösungen genutzt werden.

standhaltungsstrategie. Beide werden erfolgreich vor Ort getestet und am Ende des Jahres vorgestellt.

**2012** – Die Demonstration des Konzepts ist fertig und umfasst eine Produktionssteuerung mit Planung, Materialverfolgung, Visualisierung und Bewetterung. Die Bewetterungsregelung wird ebenfalls erfolgreich vor Ort erprobt. Im Jahr 2012 beginnt die ABB-Geschäftseinheit Mining mit der Entwicklung des Dispatch-Auftragssystems, einem wesentlichen Bestandteil der automatisierten Betriebsplanung.

**2013** – Dispatch-Systeme werden entwickelt, und ein erster Prototyp wird installiert. CR beginnt damit, Planungsalgorithmen an realen Daten zu testen. Bis zum Ende des Jahres werden die Algorithmen vor Ort getestet.

**2014** – Minelnsight und Smart Ventilation kommen auf den Markt. Die ersten Produkte, die als Bestandteile der beiden Konzepte verkauft werden, sind das Dispatch-System und das Bewetterungssystem (Ventilation on Demand).

**2015** – ABB Scheduler wird bei bestimmten Kunden eingeführt. Die allgemeine Produktfreigabe ist bis Ende 2016 vorgesehen.

### Mining 2.0 geht weiter

Mining 2.0 richtet sich an den Bergbaumarkt, zu dem mehrere Beziehungen aufgebaut wurden. Dies kommt auch anderen Initiativen zugute, die auf den Berg-

baumarkt abzielen. Ein Beispiel ist die Initiative „Unman the Site“ zur Entwicklung einer industriellen mobilen Manipulations- und Fernsteuerungsplattform, aus der ein Robotersystem für das Laden von Sprenglöchern hervorgegangen ist. Die Ergebnisse werden zurzeit zu einer marktfähigen Lösung entwickelt.

Remote-Services einschließlich neuer Dienstleistungen wie Analysen und Serviceroboter sind Gegenstand eines neuen Start-ups. Zu den in der Entwicklung befindlichen Themen gehören die Grubenbewetterung und Energieanalysen sowie die Inspektion von Förderbändern.

Zurzeit wird das erste LTE-Netzwerk (Long-Term Evolution) in einem Untertagebergwerk im schwedischen Boliden installiert. Das Projekt mit dem Namen PIMM wird von der schwedischen Agentur für Innovation Vinnova gefördert und von einem Konsortium durchgeführt. Es handelt sich um das weltweit erste LTE-Netz in einem Untertagebergwerk, das zum Testen zukünftiger 5G-Kommunikation und -Lösungen genutzt werden

**Jan Nyqvist**

ABB Corporate Research  
Västerås, Schweden  
jan.nyqvist@se.abb.com

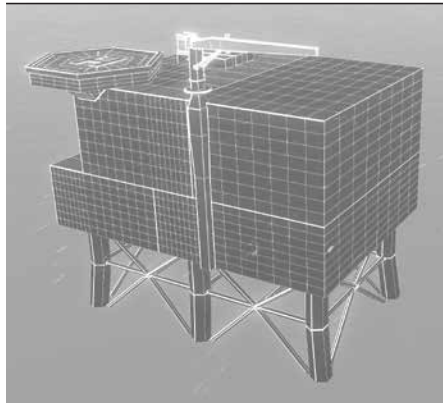


# Eine neue kompakte HGÜ-Lösung für die Offshore-Windenergie

Nur halb so schwer und ohne die Notwendigkeit von AC-Umspannplattformen

RYAN LADD, PETER SANDEBERG – Offshore-Windanlagen arbeiten in einer der schwierigsten Umgebungen unseres Planeten – dem offenen Meer. Sie müssen der ständigen Einwirkung von Wind, Wellen und Salzwasser standhalten und zuverlässig Strom zum oft viele Kilometer entfernten Festland übertragen. Die wohl größte Herausforderung ist die Aufstellung und Inbetriebnahme dieser Kolosse. Bei einem Gewicht von über 20.000 t müssen sie von den größten Schiffen und leistungsstärksten Kranen der Welt transportiert, positioniert und errichtet werden – Arbeiten, die nur bei günstiger Witterung durchgeführt werden können. Die neue kompakte HGÜ-Lösung für die Offshore-Windenergie von ABB verändert all dies.

### 1 Die neue kompakte ABB-Lösung reduziert das Gewicht der Plattform erheblich.



**M**it dem steigenden Bedarf an sauberem, zuverlässigem Strom gehören Windenergieanlagen in vielen Ländern zunehmend zum Landschaftsbild. An Land jedoch kann sich die Windstärke von einem Moment auf den anderen verändern, und Luftströmungen können durch Hügel, Bäume und Städte beeinträchtigt werden. Auf dem Meer hingegen ist der Wind wesentlich konstanter und eignet sich als zuverlässige und berechenbare Energiequelle. Hinzu kommt, dass die Zahl der geeigneten Standorte für Windturbinen an Land sowohl aus praktischen als auch aus ästhetischen Gründen begrenzt ist, wohingegen Windturbinen auf See weniger sichtbar sind und die Windausbeute offshore wesentlich größer ist. Aus diesen Gründen nimmt die Zahl der Offshore-Windturbinen rasant zu.

Natürlich ist die Offshore-Stromerzeugung und -übertragung mit Herausforderungen verbunden. Die Umgebung ist rau, die Anlagen müssen gewartet werden, und es gibt entscheidende technische Hürden bei der Energieübertragung über große Entfernungen unter Wasser. Das Problem der effizienten Stromübertragung zum Festland wurde größtenteils durch die Hochspannung-Gleichstrom-Übertragungstechnik (HGÜ) gelöst, die ohne die großen Verluste her-

kömmlicher Wechselstrom-(AC-)Systeme auskommt. Doch die HGÜ bietet noch viele weitere Vorteile wie eine hervorragende Regelbarkeit, schnelle Reaktion, Schwarzstartfähigkeit usw. Diese Vorteile machen die HGÜ in Projekten rund um den Globus zur bevorzugten Technologie für die Übertragung von Offshore-Strom zum Festland.

#### Ein neues modulares HGÜ-Konzept für den Offshore-Einsatz

Obwohl die HGÜ eine etablierte Technologie ist, die seit über 60 Jahren zur Verfügung steht, ist ihre Anwendung auf hoher See noch relativ jung. Das erste Offshore-HGÜ-Windprojekt ging 2009 in Betrieb, und seitdem unterschied sich jede Anlage deutlich von ihren Vorgängern – ein häufiges Phänomen bei einer sich rasch entwickelnden Technologie.

Die bei der Realisierung von HGÜ-Systemen in Offshore-Umgebungen gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse haben es ABB ermöglicht, eine neue kompakte HGÜ-Lösung zu entwickeln, die das Gewicht und das Volumen der Plattform im Vergleich zu bisherigen Konstruktionen um über 50% reduziert → 1. Darüber hinaus kann mit der neuen Offshore-HGÜ-Lösung auf die zurzeit in einem Windpark erforderlichen AC-Umspannplattformen verzichtet werden, da die Generatoren der Windturbinen nun über ein 66-kV-Sammelnetz direkt an die HGÜ-Plattform angeschlossen werden können. Durch den Wegfall der AC-Umspannplattform steigt die potenzielle Gesamtgewichtseinsparung auf bis zu 70% im Vergleich zu einer herkömmlichen Anordnung. Gleichzeitig sinken die Betriebskosten, da die langfristige Wartung dieser Stationen entfällt.

Das neue HGÜ-Konzept basiert auf einer modularen Produktstruktur, die die notwen-

dige Flexibilität zur Berücksichtigung unterschiedlicher Kundenvorgaben bietet. Die optimierte Basisplattform beinhaltet alle notwendigen Komponenten für eine voll funktionsfähige HGÜ-Plattform. Werden zusätzlich Wohnquartiere, ein Hubschrauberlandeplatz, ein leistungsstärkerer Kran o. Ä. benötigt, können diese problemlos hinzugefügt werden, ohne dass die Plattform von Grund auf neu konstruiert und gefertigt werden muss.

Die modulare Bauweise bietet noch weitere Vorteile. Im Gegensatz zur traditionellen Methode, bei der der gesamte Aufbau in einer speziellen Werft gefertigt wird, kann jedes Modul für sich und parallel zu anderen in verschiedenen kleineren Betrieben gefertigt werden. Dies erhöht die Zahl der geeigneten Lieferanten, was wiederum den Wettbewerb begünstigt und die mit solchen Großprojekten verbundenen Risiken erheblich reduziert.

Neben der Fertigung gibt es auch wesentliche Vorteile beim Transport. So gibt es nur wenige Schiffe, die in der Lage sind, die größten Plattformen zu transportieren und zu installieren. Doch mit dem halben Gewicht und der Möglichkeit, die Module auf mehrere Transporteure aufzuteilen, stellt das neue Konzept einen bedeutenden Fortschritt für das Logistikmanagement dar.

#### Eine Lösung für die Zukunft

Die großen Gewichtseinsparungen des neuen HGÜ-Konzepts wurden ermöglicht durch die enge Zusammenarbeit zwischen den führenden HGÜ-Ingenieuren und Forschern bei ABB. Dank ihrer Innovationskraft konnte die auf der Plattform installierte HGÜ-Hardware erheblich reduziert werden. Durch umfangreiche Studien und Tests ist es gelungen, Redundanzen zu reduzieren und gleichzeitig die erforderliche hohe Verfügbarkeit des Systems zu erhalten. Mit einem verbesserten Layout und der Beseitigung von überschüssigem Raum repräsentiert das revolutionäre neue Konzept die nächste Generation von Offshore-Lösungen für die Windenergie.

#### Ryan Ladd

ABB Power Grids, Grid Systems  
HVDC Market Communications  
Ludvika, Schweden  
ryan.ladd@se.abb.com

#### Peter Sandeberg

ABB Power Grids, Grid Systems  
HVDC Marketing and Strategy  
Västerås, Schweden  
peter.sandeberg@se.abb.com

#### Titelbild

Die neuen kompakten Lösungen ermöglichen eine modulare Bauweise von Offshore-Plattformen mit vereinfachtem elektrischem Konzept und reduziertem Gewicht. Die Plattformen unterscheiden sich im Aussehen deutlich von dem hier gezeigten bekannten Konzept.



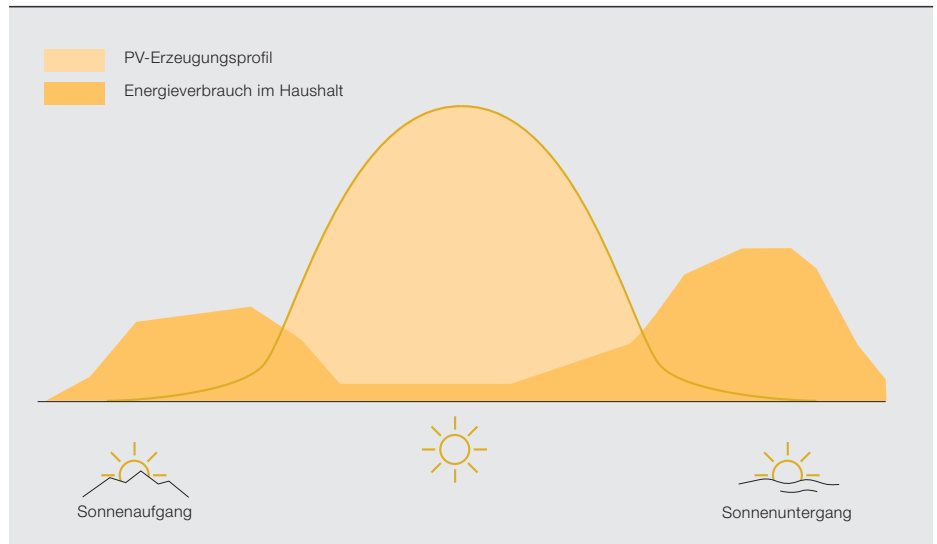


# Die Sonne speichern

Energiespeicherung ebnet den Weg für private Solarenergie

PAOLO CASINI – „Die Sonne ist die Quelle aller Energie. Die Welt muss sich der Sonnenenergie zuwenden, der Energie unserer Zukunft.“ Dieses Statement des indischen Premierministers Narendra Modi auf der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris unterstreicht ein Hauptziel der von Frankreich und Indien initiierten International Solar Alliance: den Ausbau erschwinglicher Solarenergie. Tatsächlich hat die Photovoltaik (PV) dank Maßnahmen wie Einspeisevergütungen seit 2004 einen enormen Aufschwung erlebt. Ein weiterer grundlegender Faktor, der dieses Wachstum weiter stützt und zur finanziellen und technischen Nachhaltigkeit der Photovoltaik beiträgt, ist die Energiespeicherung. So ist davon auszugehen, dass Energiespeicher die nächste Generation von PV-Anlagen vorantreiben werden. Die Nutzung der Solarenergie wird sich besonders im privaten Bereich in Zukunft deutlich von der heutigen Nutzung unterscheiden – eine Entwicklung, die ABB an vorderster Front begleitet.

## 1 Private Anwendungen zeichnen sich durch eine schlechte Übereinstimmung zwischen dem Energiebedarfsprofil über den Tag und der PV-Erzeugungskurve aus.



Seit Jahren sorgen feste Einspeisetarife im privaten Bereich dafür, dass die Vergütung für jede Kilowattstunde Solarstrom, die in das Netz eingespeist wird, deutlich über dem Endverbraucherstrompreis liegt – ohne dass ein Abgleich zwischen der eingespeisten Energie und dem tatsächlichen Bedarf des Haushalts erforderlich war, weder im Hinblick auf die Energiebilanz noch auf das Leistungsäquivalent zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dies ändert sich nun. Die Solarenergie entwickelt sich von einer Form des Investments hin zur Erfüllung eines Grundbedürfnisses. Dieser Wandel wird im Wesentlichen von folgenden Faktoren vorangetrieben: potenzielle Netzinstabilitätsprobleme infolge des wachsenden Anteils dezentraler Erzeugung, die nahende Parität zwischen Eigenerzeugung und gekauftem Strom sowie der Wegfall von Anreizen.

Die Energiespeicherung ebnet den Weg für die Planbarkeit von Solarstrom und die Optimierung der lokalen Stromerzeugung, was zu einer Reduzierung der Netzintegrations- bzw. Energiekosten führt, und

wird somit die nächste Generation von PV-Anlagen vorantreiben. Während die Eindämmung der Netzintegrationskosten eine Priorität der Energieversorger ist, wird die Senkung der Energiekosten dabei helfen, die Ausrüstung von Wohnhäusern mit PV-Anlagen zu erleichtern.

### Eigenverbrauch und Selbstversorgung

Es gibt zwei Faktoren, die für die nächste Generation von Solarlösungen für Wohnhäuser ausschlaggebend sind: Eigenverbrauch und Selbstversorgung. Der Eigenverbrauch ist die Menge an lokal erzeugter Solarenergie, die ein Haushalt selbst verbraucht. Selbstversorgung ist die Fähigkeit, den Energiebedarf des Haushalts autonom zu decken. Von der nächsten Generation von Solaranlagen wird erwartet, dass sie den Haushalt bedarfsgerecht mit Strom versorgen und gleichzeitig den Zukauf von Strom aus dem Netz minimieren. Um diese beiden Anforderungen zu erfüllen, muss die Diskrepanz zwischen dem täglichen Solarstrom-Erzeugungsprofil und dem Bedarfsverlauf des Haushalts überwunden werden → 1.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um einen akzeptablen Grad der Selbstversorgung und des Eigenverbrauchs in privaten Solaranwendungen zu erreichen:

- Lastmanagement der Haushaltsgeräte durch Verlagerung ihrer Nutzung auf

die Tageszeiten, in denen Sonnenenergie zur Verfügung steht.

- Speicherung der von der Quelle zur Verfügung stehenden Energie (immer wenn diese den Bedarf des Haushalts übersteigt) und Bereitstellung der Energie, wenn diese benötigt wird, häufig vor Sonnenauf- und nach Sonnenuntergang.
- Austausch traditioneller nicht elektrischer Lösungen gegen elektrische Verbraucher, z. B. thermische Lasten und/oder Elektrofahrzeuge.
- Bündelung lokaler Energiemanagementsysteme zu größeren netzgekoppelten dezentralen Systemen zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen.

Ein Eigenverbrauch und eine Selbstversorgung von über 30 % – dies ist der Wert, der mit traditionellen PV-Anlagen norma-

## Die Nutzung der Solarenergie wird sich besonders im privaten Bereich in Zukunft deutlich von der heutigen Nutzung unterscheiden.

lerweise erreicht werden kann – lassen sich nur durch Kombination von mehreren oder allen genannten Lösungen kostengünstig realisieren. Für eine Implementierung auf Produktebene kommen hierzu das Lastmanagement und die Energiespeicherung in Frage.

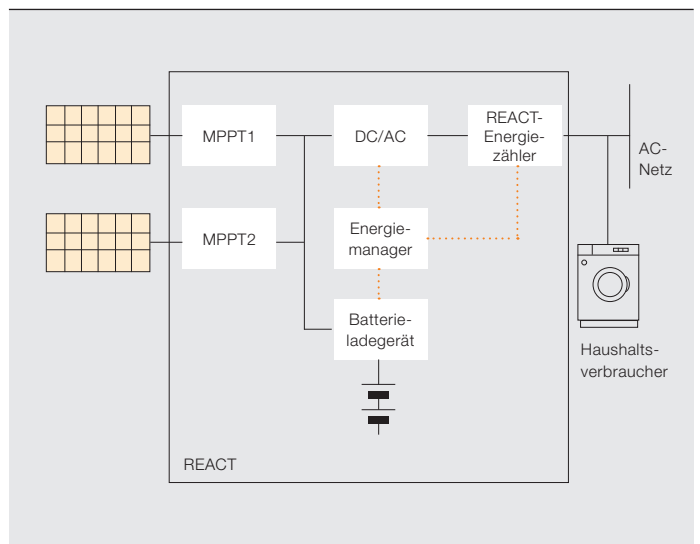
### Titelbild

Wie können die Energiespeicherlösungen von ABB dabei helfen, den Weg zu flexibleren und praktischeren PV-Anlagen für Wohnhäuser zu ebnet?

## 2 Das REACT-System (Renewable Energy Accumulator and Conversion Technology) von ABB



## 3 Blockbild von REACT. Das System nutzt einen eigenen Energiezähler zur Regelung von Eigenverbrauch und Selbstversorgung.



### Energiespeicherung in privaten Solaranwendungen

Eine der besten Möglichkeiten zur Speicherung überschüssiger Solarenergie bieten elektrochemische Batterien, denn sie sind praktisch und kostengünstig. Doch während das einfache Hinzufügen von Batterien zu einer PV-Anlage zwar dabei helfen kann, eine vollständige Selbstversorgung des Haushalts zu erreichen, ist ein positiver finanzieller Nutzen nicht immer garantiert. Dies liegt vornehmlich an den derzeitigen hohen Kosten von technisch tragbaren Lösungen verbunden mit der zum Laden der Batterie notwendigen Überdimensionierung der PV-Module.

Eine ökonomisch nachhaltige PV-/Speicherlösung für Wohnhäuser ist vielmehr das Ergebnis eines Kompromisses zwischen der Größe der installierten Batterie und dem finanziellen Nutzen, der durch Eigenverbrauch und Selbstversorgung mithilfe einer umfassenden maßgeschneiderten Energiemanagementstrategie erzielt werden kann. Mit anderen Worten, es dreht sich alles um den optimalen Mittelweg zwischen den Kosten für die Batterie (und der Größe der PV-Module) und der Reduzierung der aus dem Netz zugekauften Energie, die das System erreichen kann.

Das REACT-System (Renewable Energy Accumulator and Conversion Technology) von ABB wurde entwickelt, um Kunden diesen optimalen Mittelweg zu bieten → 2. Das System besteht aus einem netzgekoppelten PV-Wechselrichter (bis 5 kW), der von einem DC-Zwischenkreis gespeist

wird, und an den die MPPTs (Maximum Power Point Tracker) der PV-Module und ein bidirektionales Batterieladegerät angeschlossen sind → 3. Durch die Architektur mit integriertem DC-Zwischenkreis ist das REACT-System die kostengünstigste Lösung für neue Anlagen, kann aber auch zur Nachrüstung vorhandener PV-Anlagen als Batterieladegerät mit AC-Zwischenkreis verwendet werden, indem die PV-Module einfach nicht mit dem Eingang verbunden werden → 4.

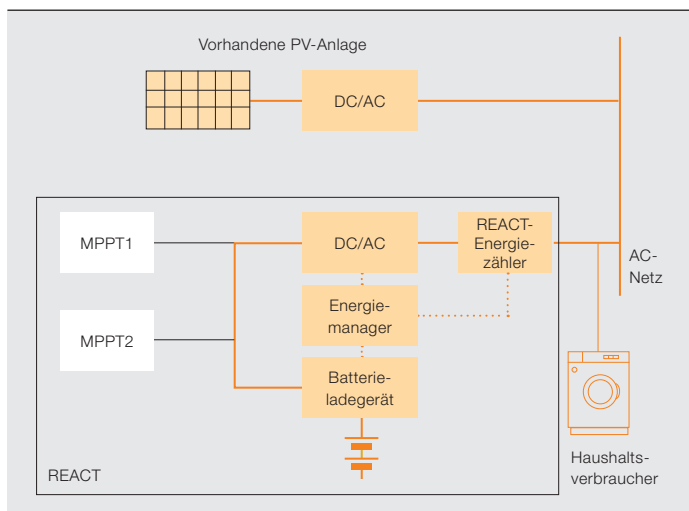
REACT besitzt eine modulare Bauweise, bei der die Elektronik im rechten und die Batterie im linken Abteil untergebracht sind. Bis zu drei Batterieabteile können in einem System installiert werden. Für den Fall eines Netzausfalls verfügt das Produkt über eine batteriegestützte Backup-Funktionalität.

### Effektive Produktimplementierung

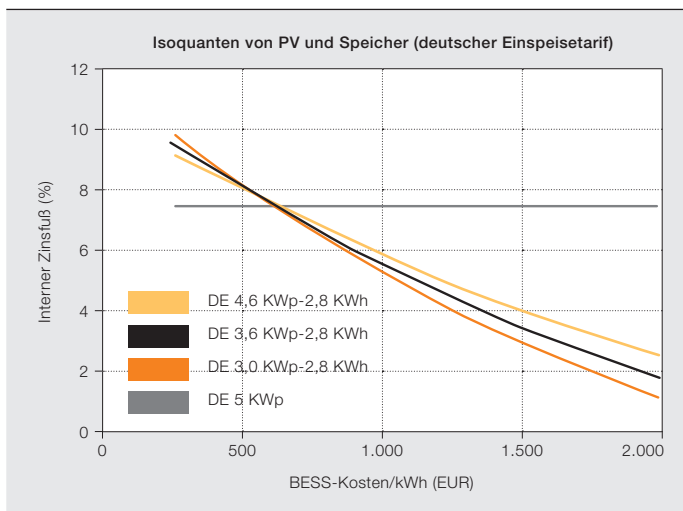
Das Energiespeichersystem von REACT besteht aus Lithium-Ionen-Batterien mit einer modularen Bauweise, die eine nachträgliche Erweiterung des Systems vor Ort von 2 kWh in der Grundversion auf 6 kWh ermöglicht. Ein effektives integriertes Lastmanagementsystem erlaubt die Interaktion mit ausgewählten Verbrauchern/Geräten, was eine Erhöhung der Energieunabhängigkeit des Haushalts auf bis zu 60 % in der Grundkonfiguration ermöglicht → 5. Der Kompromiss zwischen der Größe der Batterie und dem vom System gebotenen Grad der Selbstversorgung wird durch die Kostenentwicklung von Batterien bestimmt. Eine nachträgliche Erweiterung der Batterieleistung auf 6 kW

Zwei Faktoren sind für die nächste Generation von Solarlösungen für Wohnhäuser ausschlaggebend: Eigenverbrauch und Selbstversorgung.

4 Nachrüstung einer vorhandenen PV-Anlage mit REACT. Die PV-Eingänge des REACT (MPPT1/2) werden nicht genutzt.



5 Interner Zinsfuß für verschiedene private PV-Systeme mit Speicher gegenüber den Kosten für das Batteriesystem (Beispiel Deutschland)



ist daher möglich, wenn die Kosten für die Batterien einen besseren internen Zinsfuß für das System ermöglichen → 5.

**Fallbeispiel**

Für die Wahl von Lithium-Ionen-Batterien als Speicherelement sprechen:

- das günstige zu erwartende Kostenprofil in den kommenden Jahren → 6,

- Jahresverbrauch von 4.100 kWh (Kühl-/Gefrierschrank: 0,4 kW; Waschmaschine: 2,0 kW; Wärmepumpe: 2,0 kW; Elektroherd: 2,8 kW)
- Installierte PV-Kapazität von 5 kW DC
- Endverbraucherstrompreis von 0,23 EUR/kWh

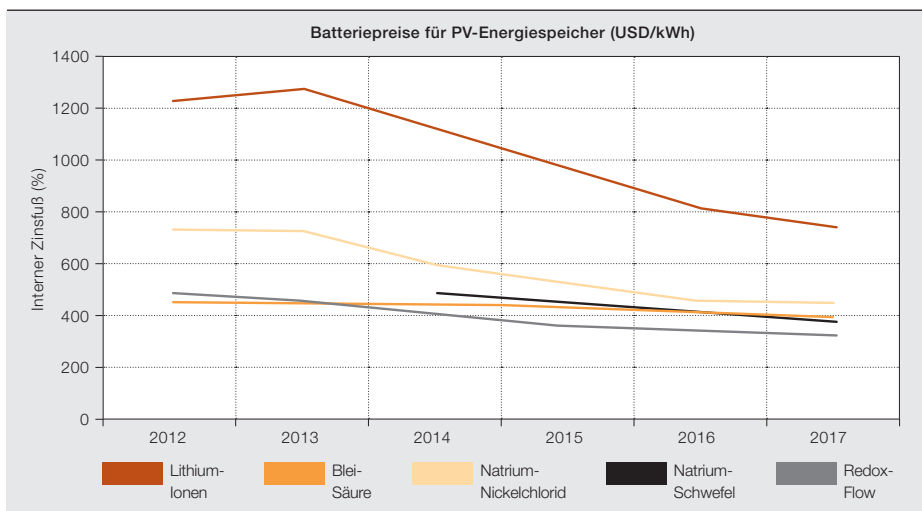
## Die Ergänzung eines herkömmlichen Solarwechselrichters um einen Energiespeicher ist eine entscheidende Entwicklung für private Solaranlagen in Richtung Autarkie.

- ihr Größen-Leistungs-Verhältnis,
- ihre Lade-/Entladerate (0,5 C bis 1 C sind ohne negative Auswirkungen auf die Lebensdauer möglich),
- ihre doppelt so lange Lebensdauer (10 Jahre),
- ihre Effizienz (Entlade- zu Ladeenergie) von über 95 %. → 7 zeigt das simulierte Ergebnis für einen Haushalt in München unter folgenden Annahmen:
- Jährliche Solarstromerzeugung von 990 kWh/kWp
- Vierköpfige Familie

Durch das Hinzufügen einer 2-kWh-Speicherkomponente zu einer 5-kW-Haushaltsanlage kann der Grad der Selbstversorgung und des Eigenverbrauchs dieses typischen Haushalts um 15 bzw. 10% erhöht werden. Eine weitere Verbesserung von 5 bis 7% lässt sich durch Hinzufügen einer weiteren Systemkomponente, dem Haushalts-Lastmanagement, erreichen → 7.

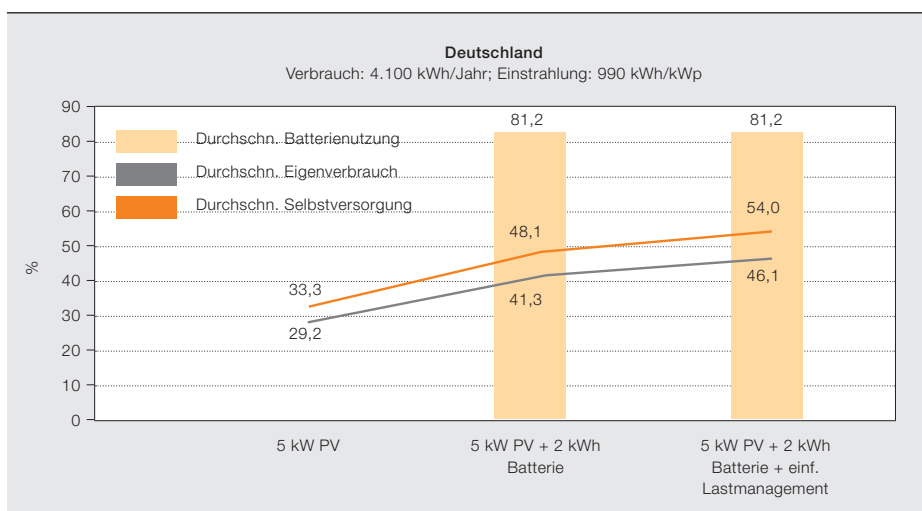
Der Haushalts-Lastmanager bewirkt eine Verschiebung des Strombedarfs des Haushalts durch Interaktion mit nichtkritischen, programmierbaren Geräten. Angesichts der in den meisten heutigen Großgeräten vorhandenen Mikroprozessorstuerung würde die Kommunikation mit dem Haushalts-Lastmanager idealerweise über eine Datenverbindung zwischen den Haushaltsverbrauchern und dem Lastmanager erfolgen. Dieser Kommunikationsstandard, der zwar von vielen Geräteherstellern genutzt und von verschiedenen Ausschüssen in Europa und den USA behandelt wird, ist jedoch noch nicht anerkannt und umgesetzt. Die wirksamste Möglichkeit zur Integration des Lastmanagers in REACT besteht daher darin, eine Reihe von Signalen zu nutzen, um die programmierbaren Verbraucher einzuschalten bzw. dem Betreiber mitzuteilen, wann ein bestimmter Verbraucher eingeschaltet werden sollte.

6 Erwartete Kostenentwicklung verschiedener Batterietechnologien. Lithium-Ionen weist die stärkste Kostensenkung verbunden mit einer der längsten Lebensdauern auf. Quelle: IMS



Energiespeicher werden die nächste Generation von PV-Anlagen vorantreiben.

7 Eigenverbrauch und Selbstversorgung bei typischen Anlagen in Deutschland mit unterschiedlichen PV-Systemkonfigurationen



Auf jedem Fall ist REACT voll „heimautomatisierungsfähig“ und bietet nicht nur die Möglichkeit zur Anbindung an kritische Haushaltsverbraucher, sondern auch an ein externes Energiemanagersystem über kommende Kommunikationsstandards via digitaler Verbindung, Wi-Fi oder ZigBee.

**Solarsysteme für Wohnhäuser entwickeln sich**

Die Ergänzung eines herkömmlichen Solarwechselrichters um einen Energiespeicher ist eine entscheidende Entwicklung für private Solaranlagen in Richtung Autarkie. Um eine positive Investitionsrendite zu erreichen, muss der richtige Mittelweg zwischen den Kosten für die Batterien und dem Grad der Selbstversorgung bzw. des Eigenverbrauchs gefunden werden.

Die sorgfältige Wahl der Batteriegröße muss einhergehen mit einer wirksamen Strategie für das Management der Energieflüsse im System, d.h. von der PV-Quelle zur Batterie, zum und vom Netz und zu den Haushaltsgeräten. Außerdem muss ein gewisses Maß an Interaktion zwischen dem Energiemanager des Wechselrichters und den Verbrauchern im Haus gewährleistet sein. Wie das Fallbeispiel zeigt, ist ABB in der Lage, eine vollständige Energiespeicherlösung mit neuester Lastmanagementtechnologie anzubieten, die den Weg zu praktischeren und flexibleren PV-Anlagen für Wohnhäuser ebnet.

**Paolo Casini**  
ABB Discrete Automation and Motion,  
Power Conversion  
Terranuova Bracciolini, Italien  
paolo.casini@it.abb.com



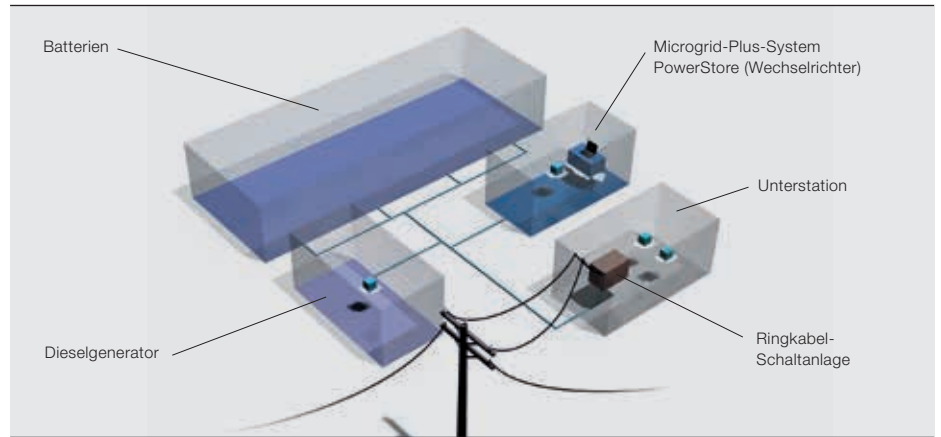
# Mehrwert-Speicher

Umfangreiche Studie eines netzgekoppelten Mikronetzes mit Dieselgenerator und Batteriespeicher

NIRUPA CHANDER, JACK GAYNOR – In jüngster Zeit wurden im Bereich der Großbatterietechnik große Fortschritte erzielt. Während die technische Entwicklung zunehmend Fahrt aufnimmt, machen größenbedingte Kostenvorteile die Technologie noch attraktiver. Dieser technische Fortschritt und die sich verändernde Kostenlandschaft haben dazu geführt, dass viele Energieversorger die Nutzung von Batterietechnik als Grundlage für ein Netzenergiespeichersystem (Grid Energy Storage System,

GESS) prüfen. Im Jahr 2013 entschied sich AusNet Services in Australien, das Potenzial der Technologie im Hinblick auf die Bewältigung von Spitzenlasten und die Verzögerung von Investitionen in den Netzausbau im Versuch zu testen. Ein Konsortium unter der Leitung von ABB und Samsung SDI erhielt den Auftrag über den Entwurf, den Bau und die Lieferung eines GESS, wobei ABB für die Integrationstechnologie und den Entwurf und Samsung SDI für die Batterien verantwortlich zeichnete.

## 1 Systemübersicht



die Fähigkeiten des GESS im Inselbetrieb zur Verbesserung der Stromversorgung und Stabilität im Falle größerer Netzstörungen geprüft.

### Systemaufbau

Das GESS besteht aus drei Hauptkomponenten: einem Lithium-Ionen-Batteriespeichersystem mit 1 MWh und 1 C („C“ bezeichnet die Lade-/Entladerate), das über einen 1-MVA-Wechselrichter mit dem Netz gekoppelt ist; einem 1-MVA-Reservedieselmotor; und einer Netzanschlussstation mit einem 3-MVA-Transformator, einer SF<sub>6</sub>-isolierten Ringkabel-Schaltanlage (RMU) und Leistungsschutzgeräten → 1. Sämtliche Systemkomponenten sind portabel. Der Generator, die Batterien und ein Vierquadranten-(4Q-)Wechselrichter vom Typ PowerStore™ PCS100 sind in Frachtcontainern mit integriertem HLK- (Heizung, Lüftung, Klima) und Brandschutzsystem untergebracht. Der Transformator und die RMU sind auf gestellmontierten Plattformen untergebracht.

Das Batteriesystem von Samsung SDI besteht aus vier eigenständigen Frachtcontainern. Die Batterien mit 1 MWh und 1 C ermöglichen symmetrische Lade- und Entladeraten von ±1 MW und können sehr schnell von Laden auf Entladen umstellen, was einen robusten Betrieb sichert.

### ABB PowerStore

Herzstück des GESS ist der IGBT-basierte (Insulated Gate Bipolar Transistor) 4Q-Wechselrichter vom Typ ABB PowerStore PCS100, der das Lithium-Ionen-Batteriespeichersystem von Samsung SDI über eine 1.000-V-DC-Sammelschiene an das Stromnetz anbindet. Mit einer symmetrischen Nennleistung von ±1.372 kVA ermöglicht PowerStore ein vollständiges bidirektionales Wirk- und Blindleistungsmanagement. Im GESS

Vorangetrieben von unterschiedlichsten Interessengruppen wie Energieversorgern, Automobilherstellern und Betreibern von Rechenzentren hat sich die Batterietechnik in den vergangenen zehn Jahren erstaunlich weiterentwickelt. Gleichzeitig ist die Zahl der neuen Batterieanwendungen gestiegen. Besonders interessant ist der Einsatz von netzgekoppelten Mikronetzen mit Großbatterien im Hinblick auf die Bewältigung von Spitzenlasten und die Verzögerung von Netzausbaumaßnahmen. Um diese beiden Aspekte zu prüfen, führte der australische Energieversorger AusNet Services eine Erprobung mit einem GESS durch, das von einem Konsortium unter der Leitung von ABB und Samsung SDI bereitgestellt wurde. Angesichts der Fähigkeiten des GESS im Hinblick auf die Spannungsqualität wurde auch die Auswirkung eines solchen „eingebetteten Erzeugers“ auf die lokale Versorgungsqualität untersucht. Außerdem wurden

Ein GESS ist in der Lage, durch lokale Versorgung vorgelagerter Lasten Unterstützung in Spitzenlastzeiten zu bieten.

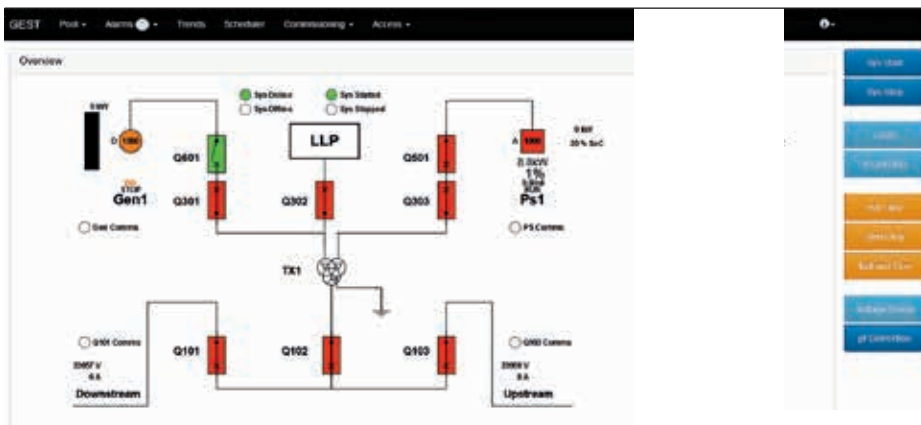
arbeitet PowerStore im „virtuellen Generatormodus“ (VGM), d. h. als Spannungs-zwischenkreis-Wechselrichter, der als synthetischer Generator fungiert. Dieser ist wie ein herkömmlicher Dieselmotor, aber mit einer außergewöhnlichen Reaktionszeit und erweiterten Fähigkeiten in puncto Leistungsbereitstellung und Stabilität – ähnlich in der Wirkung wie ein STATCOM (statischer synchroner Kompensator). Dadurch ist PowerStore in der Lage, als eine netzbildende Erzeugungsquelle zu fungieren, die von anderen Synchrongeneratoren wie Windturbinen oder Solarwechselrichtern als Referenz für die Netzspannung und -frequenz genutzt werden kann. Darüber hinaus reagiert PowerStore auf die gleiche Weise auf Fehler im Netz wie ein Synchrongenerator und liefert 2 s lang einen Fehlerstrom von bis zu 2 pu (per unit).

### Titelbild

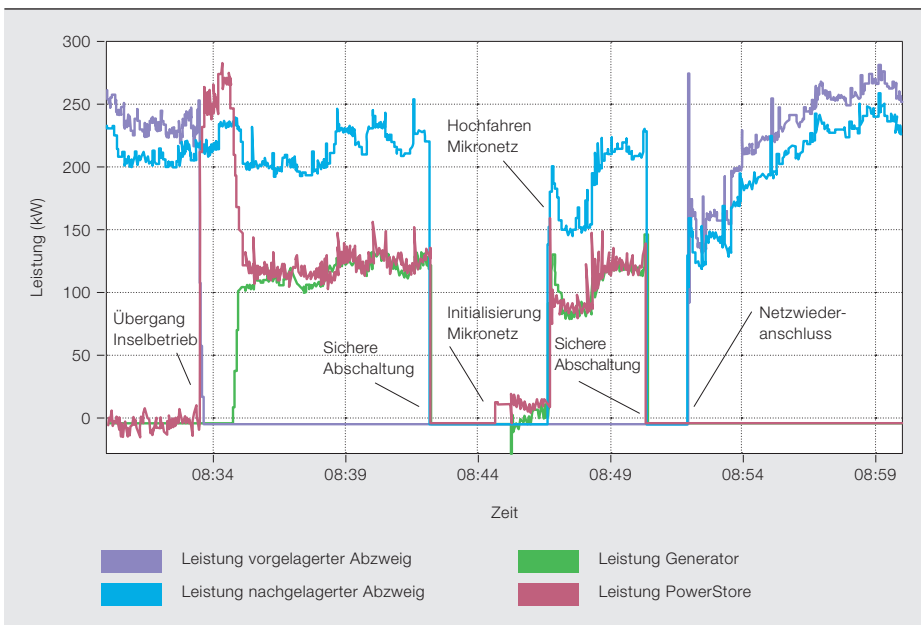
ABB war federführend an der Bereitstellung einer Großbatterieanlage (Bild) für AusNet Services im Norden von Melbourne, Australien, beteiligt. Wie hilft sie dem Energieversorger dabei, den Bedarf zu managen und Investitionen zu optimieren?

Das GESS ermöglicht den Betrieb des nachgelagerten Systems als Inselnetz, das allein vom GESS versorgt wird, oder als netzgekoppeltes System.

## 2 Übersicht des GESS in M+ Operations



## 3 Inselbetrieb: Übergang vom netzgekoppelten zum Inselbetrieb, Abschaltung des Mikronetzsystems, Initialisierung des Mikronetzes und Wiederanschluss an das Netz



Der 1-MVA-Dieselmotorgenerator hat die Aufgabe, die Entladedauer und die Leistungsabgabe des GESS zu verlängern bzw. zu erhöhen, entladene Batterien wieder aufzuladen und Leistung an das Mikronetz abzugeben.

Das PowerStore-System und der Generator sind über einen 3-MVA-Transformator mit primärseitigem Sternpunktsschalter und einer SF<sub>6</sub>-isolierten RMU mit drei Leistungsschaltern an das 22-kV-Stromnetz angebunden. Drei intelligente elektronische Leistungsschutzgeräte (IEDs) vom Typ ABB REF630 schützen und überwachen die Netzanbindung. Ein Synchronisiergerät vom Typ ABB Synchrotact® ermöglicht dem GESS die Synchronisierung mit dem Netz und den „stoßfreien“ Übergang vom Inselbetrieb in den netzgekoppelten Betrieb. Bei einem lokalen Stromausfall ist das GESS

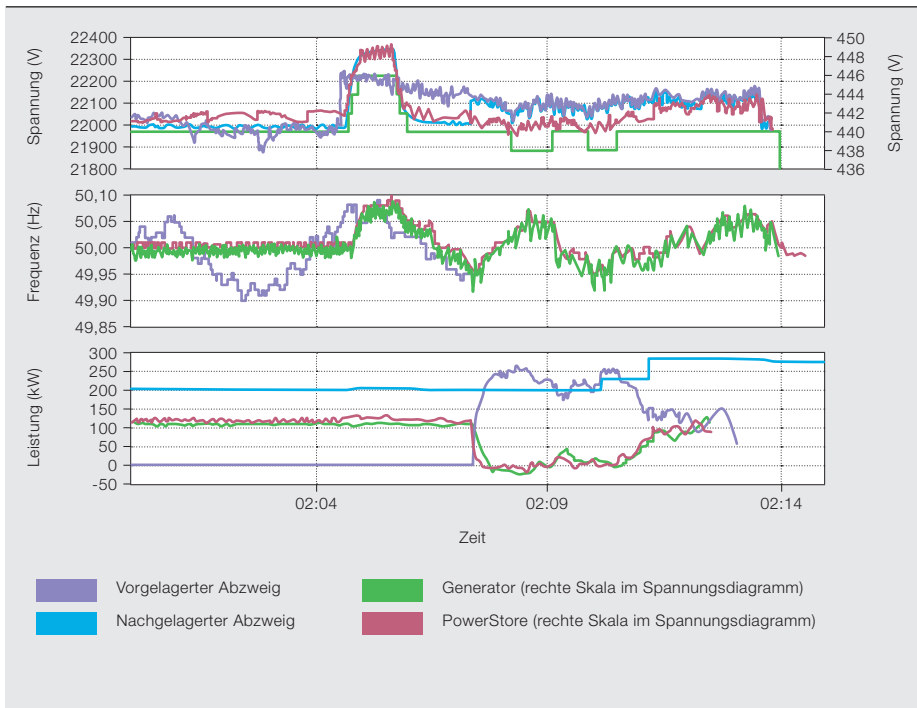
in der Lage, die 240-V AC-Hilfsstromversorgung für die Kommunikation und Steuerung mindestens acht Stunden lang selbst bereitzustellen.

### Microgrid Plus

Das ABB Microgrid-Plus-System verwaltet das GESS und sorgt dafür, dass eine durchgängige Netzversorgung und -stabilität gewährleistet ist. Das dezentrale Leitsystem ist mit allen wichtigen Komponenten der Anlage verbunden, von denen es Informationen erfasst und für das gesamte Netz veröffentlicht. Verteilte Microgrid-Plus-Controller sorgen dafür, dass das gesamte GESS als ein zusammenhängendes Ganzes funktioniert. Fernüberwachung und Fernmanagement werden ermöglicht durch ABB M+ Operations (eine HTML-basierte Webschnittstelle) und durch eine RTU-Verbindung (Remote Terminal Unit) zum Leitsystem



#### 4 Synchronisierung: Spannung, Leistung und Frequenz während des Übergangs und der Synchronisation vom Insel- zum netzgekoppelten Betrieb mithilfe einer Lastbank



Liegt die Netzspannung über dem Sollwert, nimmt das GESS Blindleistung auf. Liegt sie darunter, speist es Blindleistung ein.

von AusNet Services → 2. Zudem gewährleistet das Microgrid-Plus-System eine Regelreserve, indem es ständig die Leistungs- und Energieflüsse überwacht, um sicherzustellen, dass die erforderlichen Lastsprünge bewältigt werden können.

#### GESS-Schutz

Der Schutz wird mithilfe einer Reihe sich ergänzender Methoden gewährleistet. Das Samsung Batteriemanagementsystem (BMS) kommuniziert alle Alarmer an das Microgrid-Plus-System, das im Fall eines kritischen Alarms den Betrieb einstellt. Ein Schutz vor Inselbildung (Anti-Islanding) sorgt dafür, dass das GESS bei einem geöffneten Leistungsschalter am vorgelagerten Abzweig nicht versucht, das gesamte Verteilnetz zu versorgen, zu dem der Abzweig gehört. Verschiedene Netzschutzfunktionen sind durch Relais vom Typ REF630, ein empfindliches Reserve-Erdschlussrelais und Isolationsüberwachungsrelais realisiert.

#### Inselbetrieb

Beim Übergang vom netzgekoppelten zum Inselbetrieb erhöht das GESS seine Leistungsabgabe, sodass der Leistungsfluss durch den vorgelagerten Leistungsschalter auf null sinkt und das GESS die gesamte Last des nachgelagerten Abzweigs sowie den Eigenbedarf deckt (daher die Differenz von ~30 kW zwi-

schen der Leistung von PowerStore und dem nachgelagerten Abzweig und zwischen der Leistung des vorgelagerten Abzweigs und dem nachgelagerten Abzweig) → 3.

Ist der Leistungsfluss durch den vorgelagerten Leistungsschalter null, der Schalter geöffnet, und wird das Mikronetz allein von PowerStore versorgt, wird der Generator gestartet, und PowerStore und der Generator teilen sich die Last des nachgelagerten Abzweigs, bis eine sichere Systemabschaltung erfolgt. Bei der Initialisierung des Mikronetzes liefert PowerStore einen Referenzwert für die Synchronisierung des Generators. Anschließend wird der nachgelagerte Leistungsschalter geschlossen, und das GESS versorgt den nachgelagerten Abzweig, bis eine weitere sichere Systemabschaltung erfolgt.

Wenn die Erzeugungsquellen ihren Betriebszustand von „online“ zu „offline“ wechseln, werden die IED-Schutzgruppen automatisch geändert, um sicherzustellen, dass die IEDs vom Typ REF630 die richtigen Schutzeinstellungen verwenden.

Beim Übergang zu einem netzgekoppelten System und zurück passt das GESS die Spannung und Frequenz von PowerStore und vom Generator entsprechend

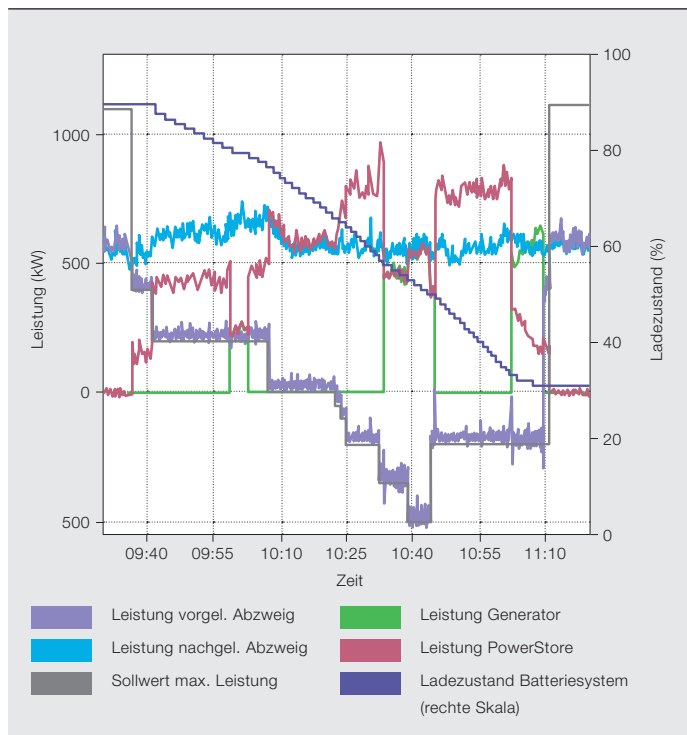
an, um sicherzustellen, dass die Spannung und Frequenz des nachgelagerten Abzweigs denen des vorgelagerten Netzes entsprechen → 4. Dazu sendet ein Synchronisiergerät vom Typ ABB Synchrotact Signale an das Microgrid-Plus-System, das daraufhin die Ausgangsspannung und -frequenz von PowerStore und vom Generator anpasst, um die beiden Netze zu synchronisieren. Der Übergang zurück zum Inselbetrieb verläuft wie oben beschrieben: Wenn der Leistungsfluss durch den vorgelagerten Leistungsschalter null ist, wird dieser geöffnet und der Hochspannungs-Sternpunktsschalter geschlossen.

#### Spitzenlastreduktion, Einspeisung und Korrektur

Im Spitzenlastbetrieb (d. h. das GESS wird verwendet, um Bedarfsspitzen in der primären Stromversorgung zu reduzieren) stellt das Microgrid-Plus-System Leistung von PowerStore oder vom Generator bereit, um die Last im vorgelagerten Abzweig auf einem vorgegebenen maximalen Sollwert zu halten und gleichzeitig den Bedarf des nachgelagerten Abzweigs zu decken → 5. Sind PowerStore und der Generator beide online, wird die Last passiv und proportional aufgeteilt.

Erreicht der Ladezustand der Batterien einen Mindestsollwert (35 % in → 5), erhöht Microgrid Plus die Generatorlast

## 5 Spitzenlastreduktion



und senkt die Last von PowerStore, um die Entladerate zu reduzieren.

Im sogenannten Voltage-Droop-Modus vergleicht das System die Netzspannung mit einem vorgegebenen Parameter, um aus der Differenz der beiden Werte die Blindleistungsmenge zu bestimmen, die in das Netz eingespeist oder daraus aufgenommen werden muss, um die Netzspannung zu stabilisieren → 6.

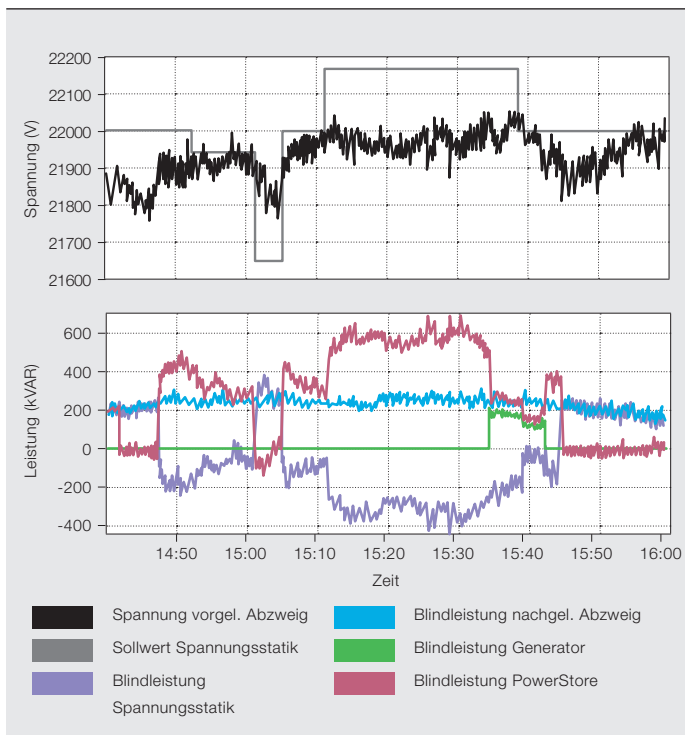
Eine Leistungsfaktorkorrektur wird ebenfalls dadurch erreicht, dass Blindleistung in das Netz eingespeist oder aufgenommen wird. Dies geschieht auf ähnliche Weise wie beim Voltage-Droop-Algorithmus.

Beim Laden bei minimaler Abzweiglast wird die Batterie geladen, während gleichzeitig die Lastanforderungen des nachgelagerten Abzweigs erfüllt werden. Ist der Bedarf im vorgelagerten Abzweig größer als der maximale Sollwert, geht das GESS wie oben beschrieben in den Spitzenlastbetrieb über. Beim zeitabhängigen Laden können die Batterien geladen werden, wenn die Energiekosten niedrig sind.

### Ergebnisse

Die vielversprechenden Ergebnisse der Erprobung zeigen, dass das GESS als Produkt in der Lage ist, das Stromnetz

## 6 Voltage-Droop-Modus



zu stärken und zu stabilisieren, während Netzausbaumaßnahmen verschoben werden oder gar ganz entfallen können. Die Fähigkeiten des GESS im Inselbetrieb helfen dabei, das Ausmaß und die Dauer von Ausfällen in größeren Makronetzen zu reduzieren, da schwerwiegende Fehler isoliert und beseitigt werden können, während das GESS die getrennten Bereiche weiterversorgt. Eine kompakte, portable Bauweise ermöglicht zudem die Platzierung des GESS in der Nähe der Kunden.

Batteriebasierte Energiespeichersysteme sind eine vielversprechende Lösung, wenn es darum geht, den Anteil der Solarstromerzeugung in größeren traditionellen Makronetzen zu erhöhen, da das schwankende Energiedargebot von Solaranlagen mithilfe eines GESS oder eines ähnlichen Systems geglättet werden kann. Tatsächlich lässt sich jegliche Form der dezentralen Erzeugung durch ein GESS unterstützen.

Neueste Fortschritte auf dem Gebiet der Lithium-Ionen-Batterietechnologie – insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung der Lade-/Entladeraten in Richtung 4 C (wobei eine 250-kWh-Batteriebank in der Lage ist, bei 1 MW zu entladen) und immer kompaktere Baugrößen – eröffnen spannende Möglichkeiten für eine kostengünstige Energiespeicherung in klei-

neren, entlegeneren Mikronetzen. Höhere Leistungen sind ebenfalls interessant für größere netzgekoppelte Systeme zur lokalen Unterstützung starker Spitzenlasten, z. B. bei Lichtbogenöfen, großen Kranen, Hebezeugen und anderen großen, schwankenden industriellen Lasten. ABB und Samsung SDI planen, ihre Entwicklung modularer und skalierbarer Energiespeichersysteme für den Einsatz in Mikronetzen und anderen Anwendungen fortzusetzen und weiter der Frage nachzugehen, wie solche Technologien Kunden dabei helfen können, ihre Umweltauswirkung zu reduzieren und den Anteil stabiler und nachhaltiger erneuerbarer Energien in ihren Netzen zu erhöhen.

Die Autoren danken den Projektleitern Yogendra Vashishtha (AusNet Services) und Hachull Chung (Samsung SDI) für ihren wertvollen Beitrag.

### Nirupa Chander

ABB Power Grids, Grid Automation  
Notting Hill, Australien  
nirupa.chander@au.abb.com

### Jack Gaynor

Ehemaliger ABB-Mitarbeiter

## Editorial Board

### Bazmi Husain

Chief Technology Officer  
Group R&D and Technology

### Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

### Christoph Sieder

Head of Corporate Communications

### Ernst Scholtz

R&D Strategy Manager  
Group R&D and Technology

### Andreas Moglestue

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

### Herausgeber

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

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

Die ABB Review erscheint viermal pro Jahr in Englisch, Französisch, Deutsch und Spanisch. Die ABB Review wird kostenlos an Personen abgegeben, die an der Technologie und den Zielsetzungen von ABB interessiert sind. Wenn Sie an einem kostenlosen Abonnement interessiert sind, wenden Sie sich bitte an die nächste ABB-Vertretung, oder bestellen Sie die Zeitschrift online unter [www.abb.com/abbreview](http://www.abb.com/abbreview).

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

Herausgeber und Copyright © 2016  
ABB Switzerland Ltd.  
Baden/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](http://www.abb.com/abbreview)



Vorschau 4|16

# Transport und Verkehr

Die zunehmende Globalisierung von Prozessen und Dienstleistungen verlangt eine entsprechende Beweglichkeit von Menschen und Waren – seien es Waren, die auf großen Schiffen um den halben Globus geschickt werden, oder Menschen in Elektroautos, Bussen oder Zügen auf ihrem täglichen Weg zur Arbeit. Wenn es nach ABB geht, sollten Transportsysteme möglichst umweltverträglich, nachhaltig und wirtschaftlich tragbar sein. ABB bietet eine Vielzahl innovativer Dienstleistungen und Produkte für das Transportwesen. Diese reichen von Antriebssystemen für große Schiffe bis hin zu Ladestationen für Elektroautos. Verschiedene Serviceleistungen und Remote-Services runden das Angebot ab.

Das Transportwesen und der Beitrag von ABB zu diesem Bereich sind das Schwerpunktthema der nächsten Ausgabe der ABB Review.



## Tablet-Ausgabe

Die ABB Review ist auch als Tablet-Version verfügbar.

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

## Bleiben Sie auf dem Laufenden ...

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



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



## Unser Beitrag zur Zukunft: die Welt bewegen, ohne die Erde zu verbrauchen.

Die Welt zu verändern erfordert Pioniergeist und bahnbrechende Innovationen. Genau das verbindet Solar Impulse und ABB. Unsere gemeinsame Vision: die Welt bewegen, ohne die Erde zu verbrauchen. Als führendes Technologieunternehmen in den Bereichen erneuerbare Energien, Energieeffizienz und nachhaltige Mobilität haben wir dies schon immer getan. Solar Impulse hat diese Botschaft um die Welt getragen. Für ABB geht die Reise weiter. Digitalisierung und Nachhaltigkeit sind feste Bestandteile einer vierten industriellen Revolution, bei der ABB wieder eine führende Rolle spielen wird – angetrieben durch Innovation. Erfahren Sie mehr unter [www.abb.com/betterworld](http://www.abb.com/betterworld)

