

ABB review

2|14
de



100 Jahre ABB Review 7

40 Jahre ABB-Roboter 24

60 Jahre HGÜ 33

Wissen über Randbedingungen 68

Die technische
Zeitschrift des
ABB Konzerns



100 Jahre ABB Review

Power and productivity
for a better world™





Liebe Leserin, lieber Leser, seit der Gründung unserer Vorgängerunternehmen Ende des 19. Jahrhunderts ist technische Innovation der Grundstein für den Erfolg von ABB. Heute investieren wir jedes Jahr 1,5 Milliarden USD in F&E und haben 8.500 Technologen, die sich rund um die Welt mit innovativen Lösungen für die Energie- und Automatisierungstechnik befassen.

Seit 100 Jahren informiert die *ABB Review* unsere Aktionäre, Kunden und Mitarbeiter über unsere Innovationen und Errungenschaften im Bereich der Energie- und Automatisierungstechnik.

Wie ABB arbeitet auch die *ABB Review* kontinuierlich daran, in puncto Inhalt und Design auf dem neuesten Stand zu bleiben.

Der nächste Schritt ist eine Stärkung der Online-Präsenz der *ABB Review*, um den Möglichkeiten und Anforderungen der digitalen Welt, z. B. durch mehr interaktive Kommunikation, gerecht zu werden. Wir freuen uns, Ihnen heute unsere Jubiläumsausgabe präsentieren zu können.

A handwritten signature in blue ink, reading 'Ulrich Spiesshofer'.

Ulrich Spiesshofer
Chief Executive Officer
ABB Group

Jubiläum

- 7 **100 Jahre ABB Review**
Rückblick auf ein Jahrhundert in gedruckter Form
- 21 **Favoriten der Redaktion**
Schätze aus den Archiven

Pionier- leistungen

- 24 **Roboter auf Erfolgskurs**
40 Jahre Industrieroboter von ABB
- 33 **60 Jahre HGÜ**
Der Weg von ABB vom Pionier zum Marktführer

Produkte & Anwendungen

- 42 **Effizienter Pumpen**
Ein 100-MW-Umrichter für das Pumpspeicherwerk Grimsel 2
- 48 **Das Kraftpaket**
Optimiertes Motordesign setzt neue Maßstäbe in puncto Leistungsdichte
- 54 **Multitalent**
Die Leistungselektronik des ACS800 kann mehr als nur Motoren antreiben

Forschung & Entwicklung

- 58 **Heiße Sache**
Ein neuer Infrarotsensor misst die Temperatur in Generatorleistungsschaltern
- 65 **Auf höherer Ebene**
Eine USV für die Mittelspannungsebene sorgt für einen kompletten Leistungsschutz
- 68 **Wissen am Rande**
Wissen über Randbedingungen ist entscheidend für zuverlässige Simulationen
- 74 **Grenzen verschieben**
Turbinensimulation für Turbolader der nächsten Generation

100 Jahre *ABB Review*



Claes Ryttoft

Liebe Leserin, lieber Leser,

In der Geschichte liegt häufig der Schlüssel zum Verständnis der Gegenwart. Manchmal zeigt ein Blick in die Vergangenheit, dass Ideen, die wir irrtümlicherweise für neu halten, tatsächlich viel älter sind, als wir denken. Andererseits kann uns ein Studium der Geschichte daran erinnern, wie schnell bestimmte Entwicklungen große Teile der Industrie verändern können.

2014 ist ein Jahr mit mehreren bedeutenden Jubiläen für ABB. Wie Sie sicher am Umschlag dieser Ausgabe gesehen haben, feiert die *ABB Review* in diesem Jahr ihren 100. Geburtstag. Diesem Anlass widmen wir in diesem Heft eine ganze Rubrik (und planen weitere Veranstaltungen im Laufe des Jahres).

Eine Ausgabe der *ABB Review* reicht nicht aus, um auch nur annähernd die Fülle des Materials widerzuspiegeln, das in den Archiven schlummert. Wir hoffen dennoch, dass Ihnen unsere kleine Auswahl einen Eindruck von der Bandbreite der Entwicklungen vermittelt, die unsere Zeitschrift im Laufe der Jahre begleitet hat. Aus Platzgründen mussten selbst diese wenigen Artikel in der gedruckten Ausgabe gekürzt werden, doch Lesern der Tablet-Version stehen sie in voller Länge zur Verfügung.

Die beiden anderen großen Jubiläen in diesem Jahr betreffen die Robotik und die HGÜ. 1974, also vor 40 Jahren, brachte ABB mit dem IRB 6 den ersten kommerziellen, vollständig elektrisch angetriebenen Roboter mit Mikroprozessorsteuerung auf den Markt. Nahezu alle heutigen Industrieroboter fallen in diese Kategorie und weisen die menschenähnliche Konfiguration des IRB 6 auf.

Vor 60 Jahren baute ASEA die erste kommerzielle HGÜ-Verbindung der Welt, die die Insel Gotland mit Strom vom schwedischen Festland versorgte. Die Leitung hatte eine Kapazität von 20 MW bei 100 kV und eine Länge von 98 km. Im Vergleich zu späteren HGÜ-Projekten erscheinen diese Zahlen bescheiden, doch diese erste Verbindung war in mehr als einer Hinsicht wegbereitend. So wurden für die Seekabel Konzepte verwendet, die noch heute gültig sind.

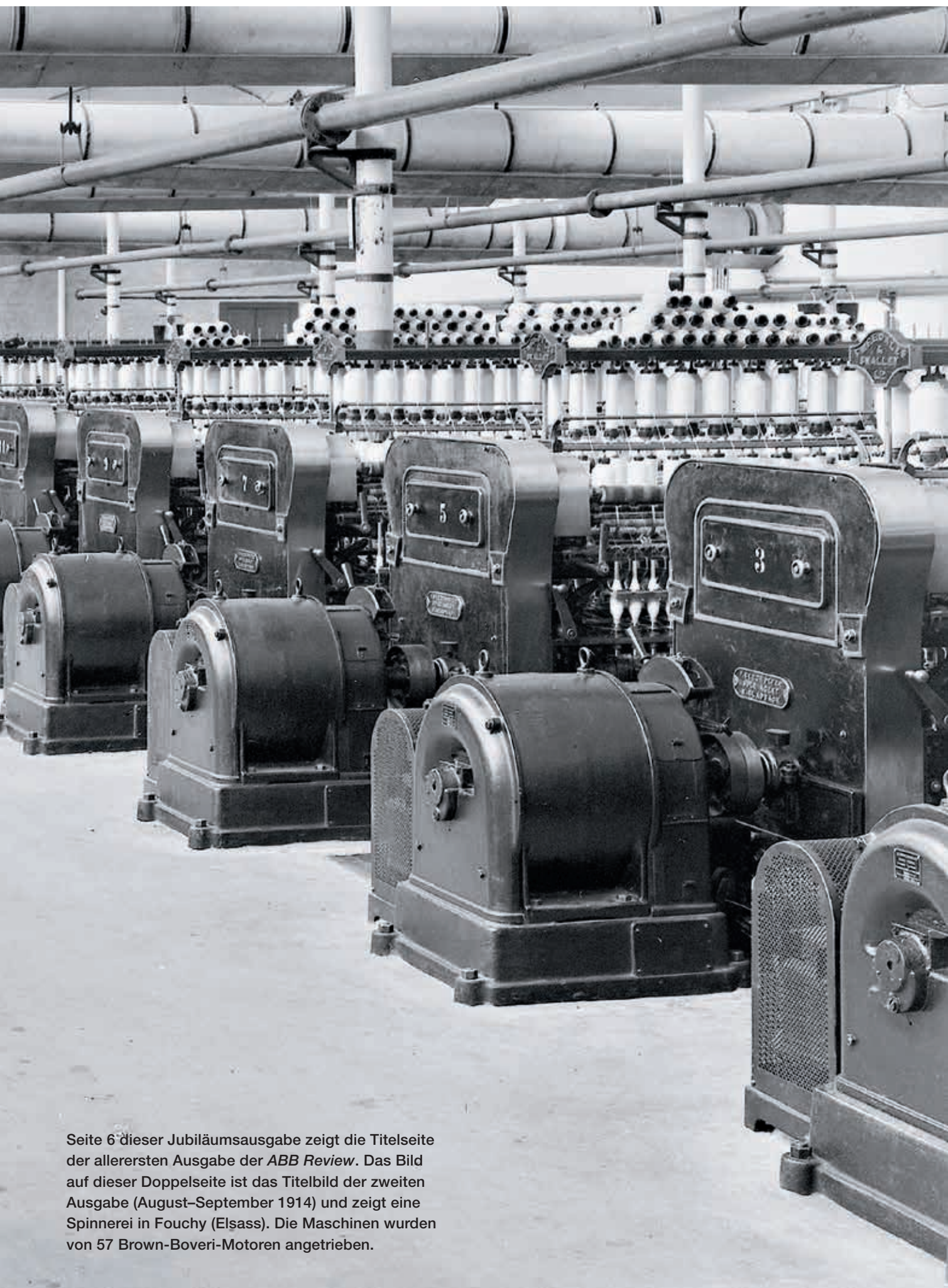
Beide Jubiläen werden in diesem Heft in besonderen Artikeln gewürdigt. Darüber hinaus lesen Sie Beiträge über aktuelle Entwicklungen in so unterschiedlichen Bereichen wie Pumpspeicherwerke, Motordesign, Leistungselektronik, Sensoren, USV und Simulation.

Ich hoffe, diese Jubiläumsausgabe der *ABB Review* mit ihren Einblicken in vergangene, gegenwärtige und zukünftige Entwicklungen ist bei der Entdeckung und Wiederentdeckung der bekannten und unbekannten Seiten von ABB für Sie ebenso inspirierend wie für uns.

Eine interessante Lektüre wünscht Ihnen

Claes Ryttoft
Chief Technology Officer &
Group Senior Vice President
ABB Group

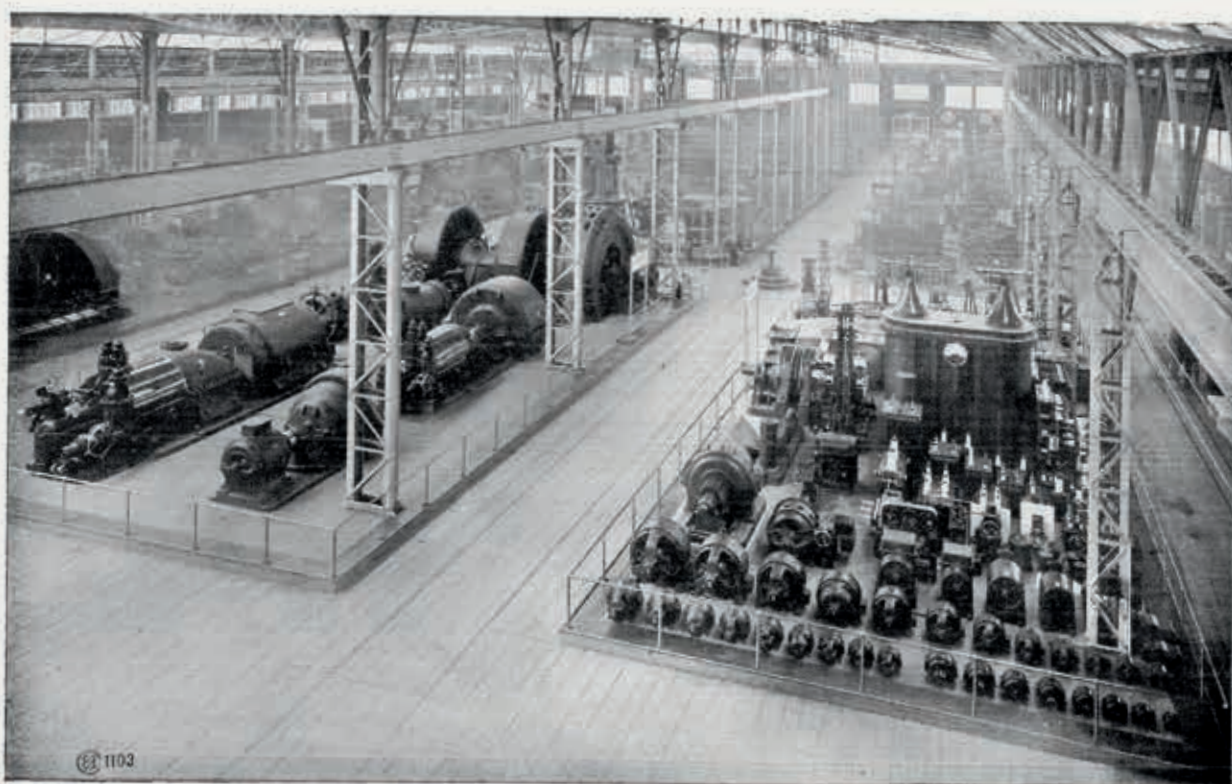




Seite 6 dieser Jubiläumsausgabe zeigt die Titelseite der allerersten Ausgabe der *ABB Review*. Das Bild auf dieser Doppelseite ist das Titelbild der zweiten Ausgabe (August–September 1914) und zeigt eine Spinnerei in Fouchy (Elsass). Die Maschinen wurden von 57 Brown-Boveri-Motoren angetrieben.

REVUE BBC

Publiée par la Société Anonyme BROWN, BOVERI & Cie., à BADEN (Suisse)



Les stands BBC dans la galerie des machines de l'Exposition Nationale Suisse, à Berne.

SOMMAIRE:

	page
Programme	3
La participation de BBC à l'Exposition Nationale Suisse à Berne, mai-octobre 1914	3
Emploi de commutatrices sur les réseaux à courant continu à trois conducteurs	14
Nouvelles publications de propagande	16
Nomenclature des articles les plus importants parus dans les périodiques techniques, 1 ^{er} trimestre 1914	17

100 Jahre ABB Review



Rückblick auf ein Jahrhundert in gedruckter Form

ANDREAS MOGLESTUE – Geschichte ist mehr als die Aufzeichnung chronologischer Ereignisse. Auch wenn die großen Meilensteine politischer Veränderungen, von Kriegen und bahnbrechenden Errungenschaften das Rückgrat der Geschichte bilden, sind es die kleinen Dinge und Ereignisse, die unser Verständnis der Vergangenheit mit Leben und Kontext füllen – Erinnerungen, Fotografien, alltägliche Gegebenheiten und Gegenstände, die eine Geschichte erzählen. Hier liegt auch ein Großteil der Faszination, die ein Blick in die 100-jährige Geschichte der ABB Review ausübt.



1914

Die Vorgängerzeitschrift der ABB Review, die *BBC Mitteilungen*¹, erschien erstmalig im Juli 1914. Ihr ursprünglicher Zweck war es, Vertriebs- und Geschäftspartner über die Produkte, Entwicklungen und Aktivitäten des Unternehmens zu informieren. Später wuchs der Kreis der Leserschaft und umfasste schließlich auch Kunden und Lieferanten, Berater und Journalisten sowie Hochschulen, Lehrer, Studenten und technisch interessierte Laien. Viele Ingenieure, die später bei ABB arbeiteten, haben während ihres Studiums die ABB Review gelesen und wurden dadurch bei ihrer Karrierewahl inspiriert. Auch veröffentlichten Fachjournalisten regelmäßig Artikel, die erstmalig in der ABB Review erschienen sind, und einige Abbildungen und Diagramme aus der ABB Review haben den Weg in Lehrbücher gefunden. Ein Teil der Attraktivität der Zeitschrift liegt in ihrem Bestreben nach größtmöglicher Objektivität. Auch wenn sie aus der Sicht von ABB geschrieben ist, bemüht sich die ABB Review stets um Sachlichkeit und Unbefangenheit.

In den vergangenen 100 Jahren hat die ABB Review in zahllosen Beiträgen über eine Vielzahl von Themen berichtet. Einige Artikel befassten sich mit den Vorgängern von Produkten, die noch immer von ABB hergestellt werden. Und viele der in den Artikeln getroffenen Aussagen sind noch heute überraschend gültig. Andere Beiträge berichteten über Entwicklungen, die nicht weiter verfolgt wurden oder sich anders entwickelt haben als erwartet. Der Blick in die Archive liefert aber noch andere Erkenntnisse. So hat sich auch der Stil der Zeitschrift im Laufe der Zeit entwickelt – nicht nur im Hinblick auf die Typografie, die allmähliche Einführung von

Titelbild

Dies ist die Titelseite der allerersten Ausgabe der *Revue BBC*. Das Bild zeigt die Schweizerische Landesausstellung, die von Mai bis Oktober 1914 in Bern stattfand.

Fußnote

- ¹ Der vollständige Name lautete *Brown Boveri Mitteilungen* (später *Brown Boveri Technik*). Der Titel der französischen Ausgabe war *Revue BBC*, der der englischen *BBC Review*.

1914

Die BBC Mitteilungen werden erstmalig veröffentlicht

Der Panamakanal wird offiziell eröffnet

1918

Reader's Digest wird ins Leben gerufen

1921

Frauen erhalten das Wahlrecht in Schweden

1922

Sir Frederick Grant Banting isoliert das Hormon Insulin

1923

Das TIME-Magazin erscheint erstmalig

Farbfotos oder Fragen des Stils und der Darstellung, sondern auch der Art und Weise, wie die Artikel präsentiert werden. So war der Umgang mit mathematischen Beweisen, detaillierten Schaltplänen und Konstruktionszeichnungen früher wesentlich freier als heute. Dies mag auf die Notwendigkeit zum Schutz geistigen Eigentums, aber auch auf veränderte Erwartungen seitens der Leser und eine leichte Veränderung in der Positionierung der Zeitschrift zurückzuführen sein. Das BBC-Schwesterunternehmen ASEA (das 1988 mit BCC zu ABB fusionierte)

besaß mit dem ASEA Journal eine eigene Zeitschrift. Diese erschien erstmalig im Jahr 1909 und ist somit etwas älter als die BBC Mitteilungen. Bei der Fusion der Unternehmen wurden auch die beiden Redaktionen zusammengeschlossen, sodass die ABB Review auf den Traditionen beider Zeitschriften aufbaut. Heute erscheint die ABB Review in fünf Sprachen und wird in über 120 Länder verschickt. Jede Ausgabe hat eine Auflage von rund 60.000 gedruckten Exemplaren. Außerdem steigt die Zahl der elektronisch verteilten Exemplare im „klassischen“

PDF-Format und als fortschrittliche Tablet-Version für iOS und Android. Aus Platzgründen erscheinen die historischen Ausschnitte auf den folgenden Seiten in der gedruckten und der PDF-Version in gekürzter Form. Die Tablet-Version enthält umfangreichere Versionen von einigen Beiträgen.

Andreas Moglestue
 Chefredakteur, ABB Review
 Zürich, Schweiz
 andreas.moglestue@ch.abb.com

Erinnerung an die Gründer

Charles Eugene Lancelot Brown und Walter Boveri gründeten BBC am 2. Oktober 1891. Obwohl beide Ingenieure waren, kümmerte sich Boveri zunehmend um die kaufmännische Seite des Unternehmens, während sich Brown mit den technischen Belangen befasste. Beide Gründer starben 1924, und soweit es der Redaktion bekannt ist, sind ihre Nachrufe die beiden einzigen, die jemals in dieser Zeitschrift veröffentlicht wurden. Ihre Namen leben den zwei „Bs“ von ABB weiter.

Die Gründer von ASEA, Ludwig Fredholm und Jonas Wenström starben 1891 bzw. 1893 noch bevor das ASEA Journal ins Leben gerufen wurde.



Mit C. E. L. Brown, der am Morgen des 2. Mai in Montagnola bei Lugano einem Herzschlag erlag, ist eine Gestalt dahingegangen, die innerhalb der Elektrotechnik bereits der Legende angehörte. Das rührt wohl daher, dass Brown sich schon vor 13 Jahren von der praktischen Tätigkeit zurückgezogen hatte, mehr noch aber daher, dass die jüngere Generation, in stolzem Glauben an die vermeintliche Höhe des Erreichten und in ungestümem Drang nach vorwärts zu pietätvollem Rückblick keine Zeit findet und nur zu schnell vergessen hat, wessen Konstruktionsgenie es vielleicht zum allergrössten Teil zu verdanken ist, dass im besonderen der Elektromaschinenbau das werden konnte, was er heute ist.

Charles Eugen Lancelot Brown wurde am 17. Juni 1863 als Sohn des als Erfinder des Bajonetttrahmens und der Sulzerschen Ventildampfmaschine rühmlichst bekannten Ingenieurs Charles Brown in Winterthur geboren. Nach einer einjährigen Lehrzeit bei Bürgin in Basel trat er im Frühjahr 1885, kaum 22-jährig, bei der Maschinenfabrik Oerlikon ein, wo er zwei Jahre später die Leitung der elektrotechnischen Abteilung übernahm. Diese Stellung bildete den Ausgangspunkt einer durch ausserordentliche Erfolge gekrönten Laufbahn.

Die ersten Jahre seiner Oerlikoner Tätigkeit widmete Brown dem Ausbau des Gleichstromsystems und vor allem der konstruktiven Durchbildung technisch brauchbarer Gleichstrommaschinen. Seine ersten Maschinen baute Brown nach dem zweipoligen Manchester-type mit Grammeringanker, mit denen auch die erste Kraftübertra-

Wenige Monate erst sind vergangen, seit C. E. L. Brown, der geniale Erfinder und Konstrukteur, aus dem Leben geschieden ist, und nun ist auch sein nächster und unmittelbarer Mitarbeiter und der Mitbegründer unserer Firma, Walter Boveri, dahingegangen. Mit ihm verschwindet heute wohl die überragendste Gestalt aus der schweizerischen Elektroindustrie und Elektrizitätswirtschaft, die durch seinen Tod einen Verlust erleidet, wie er härter und schwerer nicht hätte sein können.

W. Boveri, im Jahre 1865 in Bamberg geboren, bildete sich in Nürnberg zum Maschinentechniker aus und kam 20-jährig in die Schweiz. Hier trat er zuerst als Volontär bei der Maschinenfabrik Oerlikon ein, wo damals gerade unter der Leitung von C. E. L. Brown die Fabrikation elektrischer Maschinen aufgenommen wurde. Boveri, der später die Leitung der Montageabteilung der Firma übernahm, machte dort die ganze Entwicklung der Gleichstrommaschine mit und führte im Jahre 1888 Montage und Inbetriebsetzung der denkwürdigen ersten Kraftübertragung von Kriegstetten nach Solothurn durch. Im Jahre 1891 erfolgte auf seine Initiative gemeinsam mit C. E. L. Brown, an den er sich enge angeschlossen hatte, die Gründung der Kommanditgesellschaft Brown, Boveri & Cie. in Baden.

In den ersten Jahren des Bestehens der jungen Firma widmete sich Boveri noch wie in Oerlikon der Projektierung, Montage und Inbetriebsetzung kleinerer und grösserer Anlagen. Der ausserordentliche Erfolg der Brown'schen Konstruktionen aber und die dadurch bedingte rapide Zunahme der Beschäftigung der Badener Fabrik führte



1924

1924

Charles E. L. Brown, Mitbegründer von BBC, stirbt

Erste Olympische Winterspiele

1925

John Logie Baird präsentiert seinen Fernsehapparat

1928

Der Flying Doctor Service nimmt in Australien seinen Dienst auf

1931

Eröffnung des Empire State Buildings in New York

1935

Elektrische Beleuchtung ermöglicht erstes Nachtspiel in der Major League Baseball

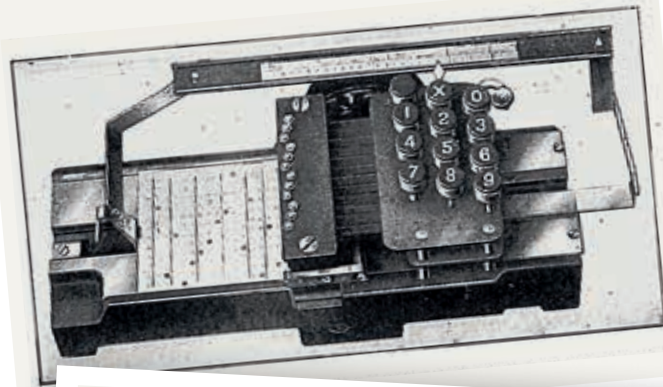
Die Hollerith-Maschine

Das Hollerith-Klassifizierungssystem ermöglichte die automatische Erstellung von Statistiken. Die Daten wurden auf Lochkarten gespeichert. Zähler wurden durch elektrische Anschlüsse ausgelöst. Die Maschinen von Herman Hollerith kamen bei der Volkszählung in den USA im Jahr 1880 zum Einsatz und ermöglichten den Abschluss der Zählung binnen eines Jahres (die vorherige Zählung im Jahr 1880 dauerte acht Jahre). Die Hollerith-Maschine kann als früher Computer angesehen werden.

Holleriths Erfindung war anfänglich patentiert, aber aufgrund ihrer allgemeinen Bedeutung für die Verarbeitung von Daten hob die US-Regierung diese Einschränkung im Jahr 1910 auf. Eines der Unternehmen, die davon profitierten, war BBC.

Lochkarten kamen erstmalig im 18. Jahrhundert auf, als sie zur „Programmierung“ von Webmaschinen und Musikautomaten verwendet wurden. Später wurden sie zur Datenspeicherung und Programmierung von Computern genutzt. Interessant ist, dass auch die heutigen DVDs mikroskopische Löcher nutzen, um Daten zu speichern.

Brown Boveri Mitteilungen, November–Dezember 1914



Im Laufe ihrer langjährigen Geschichte hat ABB zahllose Kraftwerke ausgerüstet, von denen viele noch heute Strom erzeugen. Dieses hier steht im Santa Eulalia Valley in Peru.

Brown Boveri Mitteilungen, Oktober 1939

BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

HERAUSGEGEBEN VON DER A.-G. BROWN, BOVERI & C^{ie} IN BADEN

XXVI. JAHRG.

OKTOBER 1939

Nr. 10

Die Brown Boveri Mitteilungen erscheinen in monatlichen Hefen. Der Nachdruck von Aufsätzen und die Wiedergabe von Abbildungen sind unter Zustimmung gestattet. Jahresabonnement für die Schweiz Fr. 35.—, Einzelheft für die Schweiz Fr. 1.—, einschließlich Verpackung und Postgebühren.

MODERNES HYDROELEKTRISCHES GROSS-KRAFTWERK JUAN CAROSIO IN PERU.

Destinationsindex 621.501.31 (85).

Es wird die konstruktive Ausführung der Generatoren und Transformatoren sowie der Aufbau der Schaltanlage des neu errichteten Wasserkraftwerkes Juan Carosio in Peru näher erläutert. Ferner werden die vorgesehenen Schutz- und Regelvorrichtungen für die Maschinen und das Netz sowie die PE-Einrichtungen der Zentrale beschrieben.

Im Santa Eulalia-Tal in 1400 m Meereshöhe, ca. 60 km von Lima entfernt, haben die Empresas Eléctricas Asociadas in Lima ein neues hydroelektrisches Hochdruckwerk von 3x17150 PS Leistung errichtet (Abb. 1). Es ist eines der grössten Wasserkraftwerke, das bis heute in Südamerika gebaut wurde. Dank der vielseitigen Erfahrungen in hydroelektrischen Anlagen wurde der Auftrag auf das gesamte elektrische Material an Brown Boveri erteilt. Das Kraftwerk ist nach den modernsten Gesichtspunkten ausgebaut, unter weitgehender Ausschaltung von Öl als Isoliermittel für die Apparate durch Verwendung von Druckluftschaltern und Stabstromwandlern. Ferner sind besondere Erleichterungen für die Bedienung und Überwachung vorgesehen durch Anwendung eines Leuchtschaltbildes, von elektropneumatischer Fernsteuerung der Schalter, zweckmässigen Schutz- und Reguliereinrichtungen und weitgehender Automatisierung der Hilfsbetriebe. Die Anlage ist seit Frühjahr 1938 zur vollen Zufriedenheit des Kunden in Betrieb. Die Inbetriebsetzung dieser neuen hydroelektrischen Anlage ermöglicht den Empresas Eléctricas Asociadas die Stillsetzung des Dampfkraftwerkes in Lima, sodass das letztere vorläufig nur noch zur Reservehaltung und zur Spitzendeckung zugezogen werden muss.



Abb. 1. — Hydroelektrische Zentrale „Juan Carosio“ in Peru.

I. AUFBAU DER ANLAGE.

Abb. 2 gibt das Prinzipschema des elektrischen Anlagenteils wieder. Drei Generator-Transformatorgruppen von 17500 kVA Leistung arbeiten direkt auf eine 64-kV-Doppelsammelschiene, von der aus fünf Hochspannungsleitungen abzweigen, wovon vier nach Lima führen. Vorläufig sind jedoch nur drei dieser Leitungen ausgebaut. Zwei 250-kVA-Eigenbedarfs-Transformatoren, eine diesel-elektrische Notstromgruppe und eine Akkumulatorenbatterie sorgen für die Deckung des Eigenbedarfs. Abb. 3 zeigt die Anordnung der Zentrale, welche aus einem Maschinenhaus mit angebautem Schalthaus besteht. Auf die räumliche Anordnung wird bei der näheren Beschreibung der einzelnen Anlagenteile eingetreten.

II. GENERATOREN.

Wie aus Abb. 4 hervorgeht, enthält der Maschinenraum drei hydroelektrische Gruppen mit horizontaler Achse. Die Generatoren sind direkt

gekoppelt mit Freitrahlturbinen von 17150 PS Leistung und für folgende Daten gebaut:
Klemmenleistung in 1400 m Meereshöhe 17500 kVA
Wirteleistung bei $\cos \varphi = 0,7$ 12250 kW
Verkettete Spannung 6 bis 6,5 kV
Frequenz 60 Per/s
Normale Drehzahl 514 U/min
Schwunmoment 82 tm²

100 Jahre unter Spannung

Drei BBC-Transformatoren, die genauso alt sind wie die *ABB Review*

SALLY DURRANT – Sie haben ihren Dienst aufgenommen, bevor der Toaster, das Fernsehen und das Internet erfunden waren. Auch Qantas und Canberra gab es noch nicht. Zwei Weltkriege, die Beatles, Britney Spears, Monty Python, die Raumfahrt, das Penizillin und das Klettband haben unsere Welt seitdem zum Besseren oder Schlechteren verändert.

Was ist es, das all die Jahre überdauert hat?

100 Jahre lang leisteten drei ABB-Leistungstransformatoren im ländlichen Victoria dem lokalen australischen Stromversorger SP AusNet treue Dienste. Die Transformatoren gehörten zu einem Umspannwerk für eine Region, in der sich auch zwei Wasserkraftwerke befinden.

Neil Sequeira, Projektleiter für Capital Delivery und Engineering bei SP AusNet ist sich sicher: „Diese ABB-Transformatoren sind überentwickelt und für die Ewigkeit gebaut.“ Die einzige Zuwendung, die sie anscheinend benötigen, ist ab und zu einmal ein Schluck Öl – aber wer wollte schon einem 100-jährigen einen gelegentlichen Drink verwehren.

Die drei großen alten Damen (oder Herren, je nach Standpunkt) gehen nicht in den Ruhezustand, weil sie ihre Aufgabe nicht mehr erfüllen, sondern weil das Umspannwerk erneuert wird. Einer der Transformatoren wird zur ABB-Niederlassung in Moorebank, Sydney, transportiert, wo er als Teil einer Ausstellung von alter und neuer Technik seinen Lebensabend im Schatten eines Eukalyptusbaums verbringen wird – ein



Zeugnis für die großartige Technologie, die ABB entwickelt und entwickelt hat.

Herzlichen Glückwunsch zum 100. Geburtstag, Transformator 1, 2 und 3. Genießt euren wohlverdienten Ruhezustand!

Sally Durrant

ABB Corporate Communications
Moorebank, Australien
sally.durrant@au.abb.com



Die drei Maschinentransformatoren für 9 MVA und 22/66 kV wurden 1914 von BBC geliefert und sind genauso alt wie die *ABB Review*.

BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

HERAUSGEGEBEN VON DER A.-G. BROWN, BOVERI & C^{IE} IN BADEN

XXVIII. JAHRG.

APRIL/MAI 1941

Nr. 4/5

Die Brown Boveri Mitteilungen erscheinen in monatlichen Heften. Der Nachdruck von Aufsätzen und die Wiedergabe von Abbildungen sind unter Quellenangabe gestattet. Jahresabonnement für die Schweiz Fr. 10.—, Einzelheft für die Schweiz Fr. 1.—, ausserhalb Verpackung und Postgespen.

INHALT:

	Seite		Seite
Elektrische Grastrocknung, ein kriegswirtschaftliches Gegenwartsproblem der Schweiz	75	Dampfströmungen in den Anodenröhren von Mutatoren und ihr Einfluss auf das Betriebsverhalten	97
Druckgasolierte Wandler	84	Der Turbokompressor „Jettorm“	108
Die Anwendung von Valcohesin in Heizanlagen	89		

ELEKTRISCHE GRASTROCKNUNG, EIN KRIEGSWIRTSCHAFTLICHES GEGENWARTSPROBLEM DER SCHWEIZ.¹⁾

Dezimalindex 621.369.2:633.2.

Die Bedeutung der künstlichen Grastrocknung für die Gewinnung von Kraftfutter aus einheimischen Grünfütterpflanzen wird, besonders im Hinblick auf die derzeitige Ernährungslage in der Schweiz, dargestellt. Das bisher bekannte Trocknerverfahren mit einem relativ hohen Wärmeverbrauch wird das neue, von Brown Boveri entwickelte Trocknerverfahren mit Wärmerückgewinnung und elektrischer Heizung gegenübergestellt. Der dadurch erzielte, technische und wirtschaftliche Fortschritt wird zahlenmässig begründet.

I. FUTTERMittel-KNAPPHEIT.

Die Lebensmittelfuhr der Schweiz ist durch die gegenwärtigen Verhältnisse besonders schwer betroffen worden. Der Anbauplan „Wahlen“, der die weitgehende Selbstversorgung bringt, hat daher allgemeine Zustimmung gefunden.

Ein Teil dieses Planes betrifft die Beschaffung der für die Erzeugung unentbehrlicher Viehprodukte nötigen Futtermittel. Hier sind es die eiweissreichen Stoffe, die, sonst bequem vom Ausland her beschafft, heute infolge Ausbleibens der Zufuhren besondere Sorge bereiten. Alle kriegsführenden oder vom Kriege betroffenen Länder der regenreichen Zonen Europas stehen vor dem gleichen Problem. Überall aber ist es die Trocknung der einheimischen Grünfütterpflanzen, von der man eine Linderung des entstandenen Mangels erwartet.

Für die Schweiz stellt sich das Problem in einer besonderen Form. Da nämlich die Trocknung Wärme braucht, die Zufuhren an Brennstoffen aber kaum den für andere Zwecke erforderlichen Bedarf zu decken vermögen, so entsteht von selbst die Frage, wie weit man die Elektrowärme zu Hilfe nehmen kann.

An sich passen Grastrocknung und Elektrowärme gut zueinander, weil die erstere in die Sommermonate fällt

¹⁾ S. a. G. Brunner: Die wirtschaftliche Grastrocknung . . . Bulletin SEV. 1941, S. 41—48.

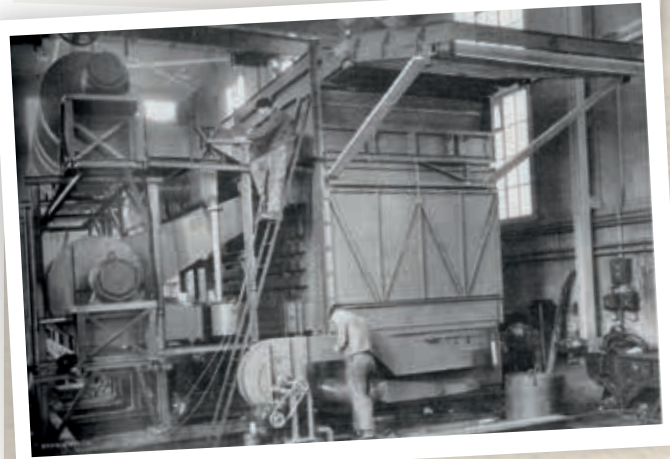
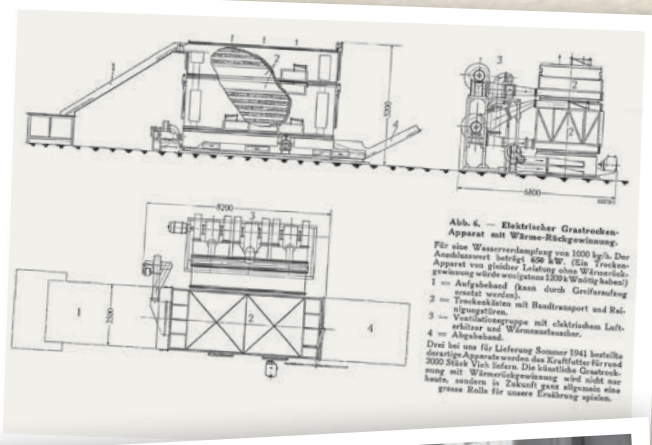
und zur gleichen Zeit auch ein Überschuss an Wasserkraft vorhanden ist; jedoch stehen dieser glückverheissenden Verbindung beträchtliche Hindernisse im Wege.

II. DAS TROCKENGRAß.

Der Gedanke, Gras durch Zufuhr künstlicher Wärme zu trocknen, liegt jedem nahe, der mit Anteilnahme das, was im regenreichen Sommer üppig gediehen ist, unter dem allzu reichlich gespendeten, himmlischen Nass verfaulen sieht. So einfach der Gedanke ist, so schwer ist es, ihn in der Praxis zu verwirklichen, denn diese verlangt „Wirtschaftlichkeit“.

Gras enthält, wie alle Vegetabilien, im frischen Zustande bestenfalls nur etwas weniger als 20% zuweilen nicht mehr als 10% nährstoffhaltige Trockensubstanz. Das übrige ist Wasser, das bis auf einen kleinen Rest ausgetrieben werden muss, wenn man den Nährstoff in eine für längere Zeit haltbare Form bringen will. Dieser Rest darf 10% der Trockensubstanz im Mittel nicht wesentlich überschreiten, wenn nicht schädliche Schimmelbildungen auftreten sollen.

Aus einer Grasmasse von 100 kg müssen also 80 kg oder mehr an Wasser entfernt werden. Durch Pressen erreicht man nur wenig und nicht ohne einen Verlust an wertvollem Saft, sodass nichts als die Austreibung in Dampfform möglich bleibt. Die Umwandlung von Wasser in Dampf aber kostet Wärme. Beträgt, wie bekannt, die Verdampfungswärme für das kg Wasser ungefähr 600 Wärmeeinheiten im luftfreien Raum, so steigt der Bedarf bei freiem Zutritt der atmosphärischen Luft theoretisch auf über 700 Wärmeeinheiten. Im praktischen Betrieb hat bisher noch kein Grastrocknerapparat weniger als 1000 Wärmeeinheiten ge-



Gras trocknen, um Viehfutter für den Winter herzustellen? Mithilfe von Elektrizität? Der ABB Review mangelt es nicht an Artikeln über ungewöhnliche Anwendungen.

Brown Boveri Mitteilungen,
April/Mai 1941



1942

1937

Das von Wallace Carothers erfundene Nylon wird patentiert

Chester Carlson erfindet ein Trocken-druckverfahren, die Elektro-fotografie – auch Xerox genannt

1939

BBC demonstriert die erste HGÜ (von Wettingen nach Zürich)

BBC baut die erste Verbrennungsgasturbine für die Stromerzeugung

1942

Gagnan und Cousteau entwickeln den Lungenautomaten zum Tauchen

1943

BBC baut den ersten Hochgeschwindigkeits-Druckluft-Leistungsschalter für 110 kV

Die Armbanduhr-Verbindung

Der Beitrag von BBC zur Flüssigkristallanzeige

ANDREAS MOGLESTUE – ABB und ihre Vorgängerunternehmen haben sich nie gescheut, neue Wege zu beschreiten und die Entwicklung neuer Technologien voranzutreiben. Dabei war das Unternehmen immer wieder auch außerhalb seines üblichen Marktsegments tätig. Es gab Zeiten, in denen BBC sogar Geräte wie Backöfen, Kühlschränke und Bohnermaschinen anbot. Und einmal ging es um eine modische Armbanduhr.



Prototyp eines patentierten Passiv-Matrix-LCD mit STN-Technologie (Super-Twisted Nematic) und 540 x 270 Pixeln

Heute verbinden die meisten Menschen das Konzept der Digitaluhr mit den 1980er Jahren. Dabei ist das Konzept der Flüssigkristallanzeige (Liquid Crystal Display, LCD) viel älter. Der österreichische Botaniker Friedrich Reinitzer gilt als der erste, der (1888) einen Stoff beobachtete, der einen merkwürdigen Zustand zwischen fest und flüssig aufwies. Er berichtete dem deutschen Physiker Otto Lehmann von seiner Beobachtung, der dies genauer untersuchte. Lehmann stellte fest, dass die Substanz (Cholesterylbenzonat) in der Zwischenphase die

Brechungseigenschaften eines Kristalls aufwies und nannte sie „Flüssigkristall“. 1962 zeigte Richard Williams von der Radio Corporation of America (RCA), dass sich die Ausrichtung der Flüssigkristalle von p-Azoxyanisol durch elektrische Felder beeinflussen lässt. Sein RCA-Kollege George Heilmeyer machte diese Neuausrichtung mithilfe von Farbstoffen sichtbar und ebnete so den Weg für LCDs. Um 1968 begann Sharp auf

diesem Gebiet zu forschen und erkannte das Potenzial der Technologie für Taschenrechner. Der erste Taschenrechner mit LCD kam 1973 auf den Markt.

1969 startete BBC ein gemeinsames Forschungsvorhaben mit Hoffmann-La Roche. Basis war das zwei Jahre zuvor eröffnete BBC-Forschungszentrum in Dättwil

(Schweiz). Die Arbeiten trugen bald erste Früchte, und Wolfgang Helfrich und Martin Schadt patentierten im darauf folgenden Jahr die nematische Drehzelle. Die Zellen wiesen eine höhere Schärfe und einen geringeren Stromverbrauch als vorherige LCDs auf. Als sich Hoffmann-La Roche 1972 sich aus der Kooperation zurückzog, führte BBC die Entwicklung der Technologie fort. 1973 wurde eine erste Produktionslinie in der Röhrenfabrik von BBC in Birrfeld (Schweiz) eingerichtet. Im darauf folgenden Jahr eröffnete eine neue

Fabrik in Lenzburg (Schweiz), die 1978 auf 4.370 m² erweitert wurde.

Mit ihrer kompakten Größe und dem geringen Stromverbrauch eigneten sich die Anzeigen ideal für Armbanduhren. In den ersten Jahren arbeitete BBC mit mehreren kleinen Schweizer Uhrenherstellern zusammen, doch der echte Durchbruch kam mit der Beteiligung von CASIO. Die innovative Casitron-Armbanduhr, die 1974 auf den Markt kam, verfügt über ein LCD von BBC. Die Casitron war nicht nur die erste LCD-Uhr, die in großen Stückzahlen hergestellt wurde, sondern auch die erste mit eingebautem Kalender (der sogar Schaltjahre berücksichtigte). Später fügte BBC das Hinterleuchtungskonzept hinzu, das noch heute für LCDs verwendet wird. 1983 erfand das Unternehmen das STN-LCD (Super-Twisted Nematic), das einen weiteren großen Fortschritt in puncto Schärfe und Auflösung darstellte. Diese Technologie kam auch im Nintendo Game Boy und frühen Mobiltelefonen zum Einsatz. Da BBC die eigene Produktion bereits heruntergefahren hatte, profitierte das Unternehmen in erster Linie von Patenterträgen. Die Fabrik in Lenzburg ist heute ein Zentrum für die Herstellung von Leistungshalbleitern.

Andreas Moglestue

ABB Review

Zürich, Schweiz

andreas.moglestue@ch.abb.com

Weiterführende Literatur

H. Kawamoto (April 2002): „The History of Liquid-Crystal Displays“. Proceedings of the IEEE, Vol. 90, No. 4: S. 460–500

P. J. Wild: „First-Hand: Liquid Crystal Display Evolution – Swiss Contributions“.

http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/First-Hand:Liquid_Crystal_Display_Evolution_-_Swiss_Contributions



Abb. 146. — Auf elektrischen Betrieb umgebauter Personenwagen „Fiat 500 Topolino“. Leistung 4,2 PS, Bleibatterie 90 Ah (bei zehnstündiger Entladung), 84 V. Ansicht des Battereeinbaues.
Für Kommissionsfahrten in Städten mit mässigen Steigungen. Auf ebener Strecke erreichbare Höchstgeschwindigkeit 60 km/h.

Was wir heute als Elektromobilität bezeichnen, ist für ABB kein Neuland.

Brown Boveri Mitteilungen,
Januar/Februar/März 1942



Transformatorenttransport im Jahr 1908 (oben) und 1937 (unten)

Brown Boveri Mitteilungen,
November/Dezember 1942



1944

1944

BBC entwickelt die erste Hochgeschwindigkeits-Lokomotive mit Direktantrieb

1945

Animal Farm von George Orwell erscheint



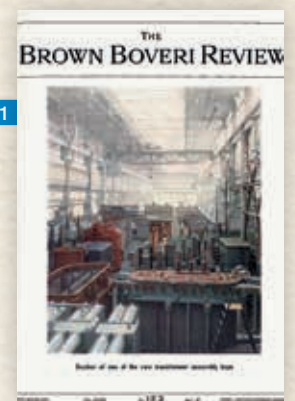
1946

1946

Marion Donovan erfindet die Einwegwindel

1947

Bardeen, Brattain und Shockley erfinden den Transistor



1951

1951

Erste BBC Mitteilungen mit farbiger Titelseite

EINIGE GEGENÜBERSTELLUNGEN DER ENERGIE-ÜBERTRAGUNG MIT DREHSTROM ODER GLEICHSTROM UND DIE TECHNISCH REIFE LÖSUNG DER GLEICHSTROM-ÜBERTRAGUNG.

Druckausgabe 521.315.051.024
521.315.051.025

Die Gleichstromübertragung und die Drehstromübertragung werden von wirtschaftlichen und rein technischen Gesichtspunkten aus miteinander verglichen. In dem letzten Jahre hat die Entwicklung beider Übertragungssysteme Fortschritte gemacht, dass eine eine Stützungsstation notwendig wird. Auf Grund des heutigen Entwicklungsstandes der Hochspannungsmotoren kann es technisch verwirklicht werden, dass eine sichere Übertragungsanlage nach dem Gleichstromsystem zu erstellen.

Das Problem der Fernübertragung von grossen Energiemengen wird heute immer aktueller, weil man infolge der Notwendigkeit, mit den Kohlenvorräten haushalten zu müssen, immer mehr dazu übergehen wird, bräunliche Wasserkraft zu auszunutzen. Infolge des bereits bestehenden starken Ausbaues der Wasserkraft in verschiedenen Ländern wird man gezwungen sein, fernliegende Wasserkraft zu erschliessen und die dort erzeugte elektrische Energie über weite Entfernungen zu den Verbraucherzentren zu leiten. Für die Überbrückung solch grosser Entfernungen von vielen Hunderten von Kilometern kommt nur der Gleichstrom wegen seiner wirtschaftlichen Überlegenheit gegenüber dem Drehstrom in Betracht. Von welcher Distanz an ist diese Überlegenheit des Gleichstromes vorhanden? Ist diese Grenzdistanz nicht allzulang, so eröffnet sich dem Gleichstrom ein weiteres Anwendungsgebiet für Verbundnetze, innerhalb welcher Länge, leistungsfähige Hauptleitungen erstellt werden müssen. Die Gleichstromübertragung wird dann Wirklichkeit, wenn es gelungen ist, genügend leistungsfähige und betriebssichere Anlagen- und Endstationen zu erstellen, in welchen die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom bzw. die Rückumformung des Gleichstromes in Drehstrom erfolgt. Es ist daher notwendig zu zeigen, wie weit die Entwicklung von Hochspannungsmotoren für solche Stationen schon gediehen ist.

a) Der wirtschaftliche Vergleich.

Anlässlich des Jubiläums unseres Unternehmens im Jahre 1941 haben wir bereits die Wirtschaftlichkeit der Drehstromübertragung und der Gleichstromübertragung verglichen¹⁾. Wir sind damals zum Schluss gekommen, dass oberhalb der 200–300 km Distanz der Gleichstrom dem Drehstrom wirtschaftlich überlegen sei. Seitdem haben wir sowohl an der Entwicklung der Drehstromübertragung als auch der Gleichstromübertragung weitergearbeitet. Insbesondere wurde studiert, ob nicht die früher fest verankerte Auffassung verlassen

¹⁾ Brown Boveri Mitt., Oktober 1941, S. 249.

werden könnte, dass die Stabilität beim Drehstromsystem nur durch Zwischenschaltung von längs der Leitung verteilten sog. Stützpunktstationen gelöst werden könne. Es ist uns auch gelungen, die gestellte Aufgabe zu lösen. Durch Anwendung von speziellen Asynchronmaschinen oder durch geeignete Regulierung der Erregung der Synchronmaschinen scheint es möglich, mit der Drehstromübertragung ohne Stützpunktstationen weit grössere Entfernungen zu überbrücken, als man dies bisher für möglich gehalten hätte²⁾. Dieser neue Gesichtspunkt zwingt uns dazu, unsere früheren Vergleichsrechnungen zu überprüfen, bzw. richtigzustellen.

Der wichtigste Grund, warum für grössere Entfernungen dem Gleichstrom gegenüber dem Drehstrom der Vorzug gebührt, ist die Tatsache, dass eine Gleichstromübertragungsleitung wesentlich weniger kostet als eine gleichwertige Drehstromleitung. Abb. 1 zeigt eine Gegenüberstellung der Leitungskosten bei Drehstrom und Gleichstrom in Abhängigkeit der Leistung. Verglichen wurden Leitungen mit zwei Stromkreisen, d.h. sechs Leiter für Drehstrom und vier, bzw. zwei Leiter für Gleichstrom. Dabei wurde die Voraussetzung gemacht, dass die verglichenen Leitungen gleiche Verluste aufweisen, nämlich 1% Verlust pro 100 km Distanz. Die angegebenen Leitungskosten beziehen sich auf Vorkriegspreise für das Jahr 1939 und verstehen sich für die fertig montierte Leitung³⁾. Die Kosten enthalten: Leiter aus Kupfer, Erdteile aus verzinktem Stahl, Erdung der Maste, Isolatoren, Klemmen und Armaturen, Maste aus verzinktem Stahl, Fundamente, Montagekosten, Durchleitsrechte, Plan- und Profilaufnahmen, Projektierung und Verschiedenes.

Wenn man die Kurven 1 und 2 miteinander vergleicht, so sieht man, dass die Gleichstromleitung über 30% billiger ist als die Drehstromleitung. Bei Defekt eines Leiters bleibt bei der Drehstromübertragung noch ein Stromkreis intakt. Im Falle der Gleichstromübertragung nach Kurve 2 bleibt anderthalb Stromkreis intakt, weil infolge des geerdeten Mittelpunktes der noch vorhandene gesunde Leiter der beschädigten Schleife weiter für die Energieübertragung mit vollem Strom

²⁾ Es ist zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen, über die Ergebnisse dieser Untersuchungen in einem Sonderheft der Brown Boveri Mitt.⁴⁾ zu berichten.

³⁾ Die notwendigen Preisunterlagen wurden aus seinerzeit von der Motor Columbus A.G. in verdankenswerter Weise zugebilligt.

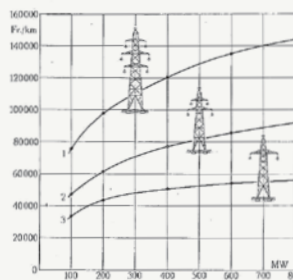


Abb. 1. — Erstellungskosten von Drehstrom- und Gleichstromleitungen in Funktion der Leistung nach Vorkriegspreisen aus dem Jahre 1939.
1 — Drehstromübertragung mit zwei Stromkreisen für Spannungen von 150–400 kV.
2 — Gleichstromübertragung mit zwei Stromkreisen für Spannungen von 500–600 kV.
3 — Gleichstromübertragung mit einem Stromkreis für Spannungen von 300–500 kV.
Die angegebenen Kosten beziehen sich auf verfertigte Leitungen, wobei ein Verlust von 1% pro 100 km angenommen wurde.
Die Preise von Freileitung und Kabelleitung sind nur wenig voneinander verschieden. Dank der Gleichstromübertragung wird es wirtschaftlich möglich, grosse Fernübertragungen mit Kabel auszuführen.

und Rückleitung durch die Erde verwendet werden kann. Man könnte bei konsequenter Verfolgung dieses Gesichtspunktes die Leitung nach Kurve 3 mit der zweisträngigen Drehstromleitung vergleichen, indem bei ersterer beim Defekt eines Leiters mit dem noch vorhandenen gesunden Leiter und Rückleitung durch die Erde ebenfalls noch die halbe Leistung übertragen werden kann. Die Betriebssicherheit der Gleichstromleitung nach Kurve 3 ist höher als die der Drehstromdoppelleitung, weil die Wahrscheinlichkeit eines Defektes bei einer Leitung mit nur zwei Leitern kleiner ist als bei einer Leitung mit sechs Leitern. Andererseits ist zugeben, dass infolge der Umformung am Anfang und Ende der Gleichstromleitung ein weiteres Glied in das Übertragungssystem eingeführt wird, das ebenfalls Störungen irgendwelcher Art unterworfen sein kann. Diesem Umstand kann aber durch Aufstellung von Reservegruppen Rechnung getragen werden. Aus Abb. 1 ergibt die Ordinatendifferenz der Kurven 2 und 3 die möglichen Ersparnisse für den Fall, dass vorübergehend Rückleitung durch die Erde gestattet ist. Vergleicht man nun die Kurven 1 und 3 miteinander, so erkennt man, dass die Gleichstromleitung weniger als die Hälfte der Drehstromleitung kostet.

Die Voraussetzung, dass die vorübergehende Rückleitung durch die Erde zulässig sei, muss nach unserer

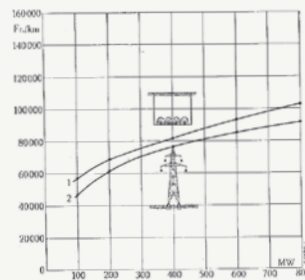


Abb. 2. — Erstellungskosten von Freileitung und Kabelleitung für Gleichstrom, in Funktion der Leistung nach Vorkriegspreisen aus dem Jahre 1939.
1 — Kabelleitung 400–700 kV.
2 — Freileitung 300–600 kV (identisch mit Kurve 2 aus Abb. 1).
Die angegebenen Kosten beziehen sich auf verfertigte Leitungen, wobei ein Verlust von 1% pro 100 km angenommen wurde.
Die Preise von Freileitung und Kabelleitung sind nur wenig voneinander verschieden. Dank der Gleichstromübertragung wird es wirtschaftlich möglich, grosse Fernübertragungen mit Kabel auszuführen.

Ansicht nicht nur für die Gleichstromübertragung, sondern auch in gleicher Weise für die Drehstromübertragung gemacht werden. Wir sind der Auffassung, dass bei Drehstromübertragung für ganz hohe Spannungen nur die direkte Sternpunktterdung in Frage kommt⁵⁾. Die befürchtete störende Beeinflussung von eiepligen Signal- und Telefonleitungen kann beim Drehstromsystem mit geerdetem Nullpunkt, wie auch beim Gleichstromsystem mit vorübergehender Rückleitung durch die Erde eintreten. Wir glauben, dass die Lösung dieses Problems ganz unabhängig von der Wahl des Übertragungssystems trotz allen Schwierigkeiten gefunden wird.

Der Grund, warum eine Gleichstromleitung so viel billiger zu stehen kommt als eine Drehstromleitung gleicher Verluste, liegt im Zusammenwirken von mehreren Vorteilen des Gleichstromes gegenüber dem Drehstrom. Diese Vorteile sind:

1. Kleinere Leiterzahl, also weniger Isolatoren und einfachere Mastkonstruktion.
2. Ausnützung der Isolation bis zum Scheitelpunkt, d.h., dass bei einer Leitung gegebener Isolation gegen Erde für Gleichstrom eine $\sqrt{2}$ mal höhere Spannung zulässig ist. Ebenso ist mit Rücksicht auf die Koronaerscheinungen bei gegebenem Leiterdurchmesser

⁴⁾ Th. Boveri: Bull. SEV. 1944, S. 270.
⁵⁾ Brown Boveri Mitt., Oktober 1941, S. 281, Zeilen 21–26.
Brown Boveri Mitt., Oktober 1941, S. 303.

Die Argumente für die Nutzung der Gleichstromübertragung zur Integration von erneuerbaren Energien sind bei Weitem nicht neu, wie dieser Beitrag zeigt. Trotz der frühen Aktivitäten von BBC war es ASEA, die sich zuerst als führendes Unternehmen auf dem Gebiet der HGÜ etablierte (siehe auch Seite 33 dieses Hefts).

Brown Boveri Mitteilungen, September 1945



1954

1953

ASEA stellt als erstes Unternehmen der Welt synthetische Diamanten her

1952

Jonas Salk entwickelt einen Impfstoff gegen Kinderlähmung (Polio)

1954

ASEA verlegt die erste kommerzielle HGÜ-Leitung

1960

Theodore Maiman erfindet den Laser

1961

Bob Dylan hat seinen ersten professionellen Auftritt in Greenwich Village, New York

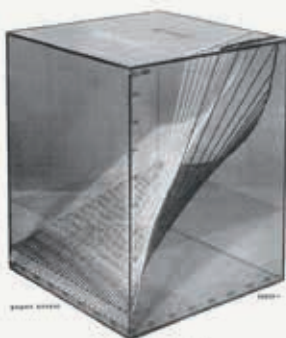


Abb. 6 — Ansicht von vorne

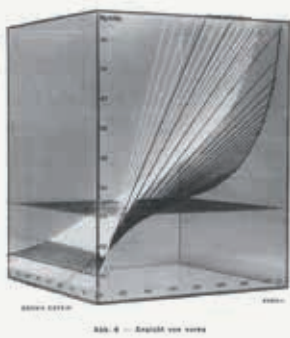


Abb. 6 — Ansicht von vorne

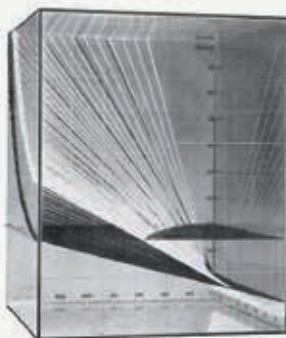


Abb. 7 — Ansicht von hinten

Abb. 6 und 7 — Darstellung der Wirtschaftlichkeit der Gleichstrom-Übertragung und der Gleichstromübertragung mit Hilfe eines Modells

Ordnung = Übertragungsleistung in kW, kWh
 Abzisse rechts (bei Abb. 7 links) = Abstand in km
 Abzisse links (bei Abb. 7 rechts) = Leistung in kW
 Mittels Regelfläche = Dreieck
 Dargest. Regelfläche = Dreieck
 Rechteckfläche = Dreieck
 Rechteckfläche = Dreieck

Das Modell zeigt oben auf Abb. 6 die Flächen der verschiedenen Leistungen. Man erkennt, wie die Startleistungsfläche (Abb. 7) mit größer werdender Distanz zunimmt, wie ein (Abb. 6) mit größer werdender Leistung abnimmt und dass bei Distanz Null die Endleistung beim Gleichstromsystem unendlich klein ist, während sie beim Drehstromsystem die Fläche des Dreiecks ausfüllt. Die Fläche kann zwischen den beiden gezeigten Regelflächen liegt die Grenze der wirtschaftlichen Übertragungsleistung des Gleichstroms gegenüber dem Drehstrom.

Für kleine Distanzen und Leistungen das System der Gleichstromübertragung und also auch des Gleichstromsystems unwirtschaftlich wird.

Für die Großübertragung auf weite Entfernungen ist die Gleichstrom-Übertragung überlegen. Die technische Entwicklung des Gleichstromsystems hat das Verdrängen des Drehstroms ermöglicht. Wir sind daher in der Lage, eine erste Gleichstromübertragungsanlage auf industrieller Basis mit guter Aussicht auf Erfolg zu erstellen. Mit Rücksicht auf die hohen finanziellen Risiken, die mit der Erstellung einer solchen Anlage verbunden sind, sollte ihre Leistung, auch auf die Gefahr hin, dass sie in den Bereich fällt, für welches sich das Gleichstromsystem wirtschaftlich noch nicht lohnt, bescheiden angesetzt werden. Wir sind bereit, zusammen mit einem oder mehreren Interessenten einen Teil der mit einer Erstaufstellung verbundenen Risiken zu übernehmen.

(W 150)

Ch. Ehrenberger

Drehstrom. Die Schnittkurve zwischen den beiden Regelflächen, also die Grenze der wirtschaftlichen Überlegenheit des Gleichstroms gegenüber dem Drehstrom ist in den Abb. 6 und 7 deutlich zu sehen. Verfolgt man diese Grenze in Abb. 7 in Richtung kleinerer Distanzen und Leistungen, so erkennt man, dass diese Grenze in der Nähe des Koordinatenanfangspunktes stark ansteigt. Es folgt daraus, dass

Lange vor der Erfindung von MATLAB™ nutzte die ABB Review bereits 3-D-Diagramme, um Ergebnisse darzustellen.

Brown Boveri Mitteilungen,
Oktober 1946

Auch die Nutzung von Abfall als Brennstoff ist nicht neu.

Brown Boveri Mitteilungen,
Juli 1969

Rationelle Müllbeseitigung durch Verbrennung, Dampf- und Stromerzeugung

626.493:621.182
626.493:621.311

Müllbeseitigung durch Verbrennung

Als erwiesenermaßen hygienischste Form der Müllbeseitigung bietet sich diejenige der Müllverbrennung an.

Durch den Verbrennungsvorgang entstehen Schlacke und Rauchgase. Die Schlacke kann auf Grund der hohen Temperaturen im Feuerungsraum als steril und unverrottbar bezeichnet werden. Sie lässt sich gefahrlos ablagern oder anderweitig verwenden.

Die Verbrennung des Mülls erfolgt bei Temperaturen zwischen 900 und 1000 °C. Die Sicherheit für geruchfreie Abgabe ist nur dann gegeben, wenn die von den Verbrennungsgasen einmal durchstrichene Temperaturzone über der Riechgrenze, d. h. 800 °C, liegt. Vor dem Ausströmen durch den Kamin in die Atmosphäre müssen die heißen Gase ausserdem abgekühlt und gereinigt werden. Für den Reinigungsprozess (Filtrierung der Gase) müssen dieselben auf ca. 300 °C abgekühlt werden. Nach üblichen Methoden erfolgt der Abkühlungsprozess z. B. durch Wasser- oder Kaltluftbeimischung. Die überschüssige Wärmemenge in den Rauchgasen wird somit nutzlos abgeführt.

Hier setzen nun unsere wirtschaftlichen Überlegungen ein. Die überschüssige Wärmemenge in den Rauchgasen ist Energie. Diese Energie soll und kann für die Dampf- und Stromerzeugung nutzbringend verwertet werden.

Gewinnung von Dampf und elektrischer Energie

Der Heizwert des Mülls nimmt von Jahr zu Jahr zu. Der jährliche Durchschnittswert, z. B. für städtische Verhältnisse, hat heute schon 2200 kcal/kg

Im Rahmen dieses Artikels wird das Thema der Müllverbrennung mit gleichzeitiger Erzeugung von Dampf und elektrischer Energie kurz behandelt und erläutert. Diese sehr interessante Methode der Müllbeseitigung sowie ihre Voraussetzungen und Auswirkungen sind vielerorts noch wenig bekannt.

Es ist eine erwiesene Tatsache, dass bei einer Müllverbrennungsanlage mit Erzeugung von Dampf und elektrischer Energie ab einer bestimmten jährlichen Müllverarbeitungs-menge die Betriebskosten einschließlich Kapitalkosten durch Dampf- bzw. Stromverkauf beträchtlich gesenkt werden können. Allerdings sollten die Elektrizitätswerke den Müllverbrennungsanlagen mit Stromerzeugung in der Tarifgestaltung für die Energieübernahme so weit entgegenkommen, dass durch den Stromerlös die spezifischen Verrichtungskosten pro Tonne Müll reduziert werden können. Im allgemeinen genügen Energieübernahmepreise von 0,05...0,05 Fr./kWh. Als Erläuterung der nachfolgenden Ausführungen, die primär zur Orientierung der öffentlichen Körperschaften gedacht sind, dient ein Planungsbeispiel, das von praktischen Daten ausgeht und die Vorteile der eingangs erwähnten Müllbeseitigungsmethode anschaulich darlegt.

Einleitung

Mit zunehmender Bevölkerungsdichte und Industrialisierung wachsen auch Probleme und Bedeutung der einwandfreien Müllbeseitigung. Der spezifische Müllanfall pro Kopf der Bevölkerung nimmt jährlich um mehrere Prozente zu, wobei gewissen Unterschieden in ländlichen, städtischen und industriellen Zonen Rechnung zu tragen ist. Das Problem in seiner Tragweite zu erkennen und trotz seiner Vielfalt eine einfache und zudem noch wirtschaftliche Lösung zu finden, ist Aufgabe der zuständigen Fachleute.

¹ Fr. = Schweizer Franken.

BBM 7-69

329

BROWN BOVERI REVIEW

750-487 Systeme



1964

1962

Rachel Carson veröffentlicht *Silent Spring*, das häufig als Ausgangspunkt der Umweltbewegung bezeichnet wird

Die Audio-kassette wird erfunden

1964

John George Kemeny und Tom Kurtz erfinden BASIC

1965

James Russell erfindet die Compact Disc

1967

Erfindung des ersten Taschenrechners

1968

Douglas Engelbart demonstriert die erste Computer-maus der Welt



Abb. 116 — Brown Boveri Radiotelephongeräte im Dienste der Polizei der Stadt Paris

Diese Geräte gestatten in einem Umkreis von etwa 50 km ausgezeichnete telephonische Verbindungen von Patrouillenwagen mit dem Polizeikommando.

Funkausrüstung für die Pariser Polizei

Brown Boveri Mitteilungen,
Januar/Februar 1949

Die Installation von elektrischer Ausrüstung in Nordkanada erfordert manchmal unkonventionelle Methoden.

Brown Boveri Mitteilungen,
Juli/August 1955

JULI/AUGUST 1955

BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

245



Bild 25 — Die neuen Verkehrsverhältnisse im Norden Kanadas erforderten einen Lufttransport der TFM-Ausrüstung für das Kraftwerk Snare River beim Großen Sklavensee



Bild 26 — Das kanadische Kraftwerk Snare River speist die Goldminenstadt Yellowknife über eine 150 km lange 115 kV-Leitung. Diese Leitung führt auch die hochfrequenten Wechselverbindungen, welche den ständigen Zusammenhang der in der Zentrale befindlichen Männer mit der Aussenwelt darstellen.



1974

1969

BBC
entwickelt
den ersten
getriebe-
losen
Zement-
mühlen-
antrieb



1975

ASEA JOURNAL 1975
Heft 4

1971

Frauen
erhalten
das
Stimmrecht
in der
Schweiz

1974

Erno Rubik
gibt der
Welt den
Zauber-
würfel

ASEA
bringt einen
der ersten
elektrischen
Industrie-
roboter der
Welt auf
den Markt

1975

Steve
Sasson von
Kodak
erfindet die
Digital-
kamera

1976

Erfindung
des
Tinten-
strahl-
druckers



BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

42. JAHRGANG

SEPTEMBER 1955

NUMMER 9

Herausgegeben von der A.B. Brown, Boveri & Co., AG., Basel. Die Brown Boveri Mitteilungen erscheinen in monatlichen Hefen. Der Aufdruck von Aufsätzen und die Weitergabe von Abhängigkeiten sind unter Zustimmung gestattet.

Inhaltsangabe

Die erste 150-MW-Turbogruppe in Europa	Seite 289
Die automatische Schutz- und Regelleitung im Kraftwerk Weisweiler	Seite 297
Der Einfluss der elektrischen Belastung auf die Lebensdauer der Turbinen	Seite 299
Brown Boveri Sonder- und Gleichstromturbinen in Industrieanlagen für die Hochdruckverstromung	Seite 300
Interessante in Kürze:	
Bemerkenswerte Strom- und Kurzschlussleistung eines Hochspannungs-Versuchstransformators	Seite 308
Neue interessante Aufsätze für Brown Boveri	Seite 309

Die erste 150-MW-Turbogruppe in Europa

621.163-018.332.003

In vorstehendem Aufsatz wird das Braunkraftwerk Weisweiler bei Aachen, Deutschland, beschrieben, an dem eine Reihe von Maschinen Europas größte Turbogruppe, ein Brown Boveri 150-MW-Apparat, in Betrieb steht. Die Autoren des Aufsatzes geben in einzelnen Darstellungen die Turbine, das Generator und die Ringmaschine.

Zu Anfang des Jahres 1955 kam in Kraftwerk Weisweiler bei Aachen des Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerks AG. (RWE), Essen, Deutschland, die erste 150-MW-Turbogruppe Europas in Betrieb. Sie arbeitet seither ohne Störung mit voller Wirkung auf das Netz.

Das Kraftwerk Weisweiler

Das vom RWE in eigener Planung neu erbaute 350-MW-Dampfwerk (1) verfeuert heizwertarme Braunkohle hoher Feuchtigkeit und hohen Aschegehalts. Bei Braunkohlekraftwerken mit so wenig hochwertiger Kohle als Brennstoff erfüllt ein hoher Prozentsatz der Stromerzeugungskosten auf den Kapitaldienst und die betrieblichen Aufwendungen. Beim Projektieren des Kraftwerks Weisweiler legte man daher größten Wert auf niedrige Erzeugungskosten, kurze Bauzeit (also verringerte Baukostenverzinsung), hohe Betriebssicherheit (also hohen Auslastungsfaktor) und niedrige Bedienungskosten.

¹⁾ W. Kerschmann: Braunkohle-Gas-Kraftwerke. Braunkohle, Wärme und Energie 1953, Nr. 19/20, S. 399...418. W. Kerschmann: Das Braunkohle-Kraftwerk Weisweiler, Elektrizitätswirtschaft Bd. 34 (1955), Nr. 11, S. 342...350.

Der ständig weiter wachsende Strombedarf des RWE-Netzes (etwa 8% pro Jahr) und die Forderung, für das aufzuwendende Kapital möglichst schnell und möglichst viel zusätzliche elektrische Energie erzeugen zu können, führten rasch zu einem Entschluss, die die spezifischen Kosten der Anlage mit der Größe der Erzeugungsleistung zu senken. Das Kraftwerk (siehe das Titelbild dieses Heftes) ist zunächst für eine Leistung von 350 MW gebaut; eine Erweiterungsmöglichkeit wurde bei der Planung bereits berücksichtigt. Da die Leistung grosser Turbogruppen stets in Beziehung zu jener des zugehörigen Stromversorgungsnetzes steht und das deutsche Verbundnetz über etwa 6 Mio. kW verfügt, ist die Wahl eines 150-MW- und zweier 100-MW-Maschinenpaars entsprechend 2,5 bzw. 1,7% der Netzleistung ein naheliegender Schritt in Richtung auf die Verwendung grosser Einheiten.

Die Wärmeleistungen der einzelnen Einheiten sind voneinander unabhängig und über Querschnitte; auch der Stromerzeugungsgrad und die der Aggregate in Blockschaltung gehalt, nämlich bis zu den Hochspannungsleistungen hinter den Transformatoren völlig voneinander getrennt. Zur Erhöhung der Ausfallsicherheit und um Teilelasten zu ermöglichen, wurden den beiden 100-MW-Turbinen je zwei 2004/3-Hochdruck-Trommelmotoren, der 150-MW-Turbine zwei 3004/3-Hochdruck-Trommelmotoren zugeordnet.

Bild 1 stellt das Wärmeleistungsschema der Brown Boveri 150-MW-Dampfturbine dar. Man sieht hierin den Drosselventil-Kondensationsstapel mit drosselndem Ablaufpumpen und mit sechs ungetriebenen Einheitsstapeln.

292

BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

Band 42, Nr. 9

Das Magnetostraktionselement und seine Verwendung in Oszillatoren und Filtern

598.452

621.373.1-136.452

621.373.14-136.452

Magnetostraktionselemente sind elektromechanische Schwingungssysteme, bei denen die elektrischen und mechanischen Größen durch magnetostraktive Gesetze verknüpft sind. Der folgende Aufsatz enthält theoretische und praktische Betrachtungen über solche Elemente und berichtet über ihre Ausfertigung und ihre Anwendung.

erbringt; z. B. sind die Einheitsband-TFH-Geräte von Brown Boveri durchweg mit Magnetostraktionsoszillatoren ohne Thermostaten ausgerüstet.

Theorie der magnetostraktiven Schwinger

Durch das Zusammenwirken der magnetostraktiven Effekte mit den mechanischen Eigenschaften eines (longitudinal) schwingenden Stabes sind die elektrischen Größen in der den Stab umgebenden Spule mit den mechanischen Größen verknüpft. Je nachdem, ob der Stab mit einer oder mit zwei nicht magnetisch miteinander gekoppelten Spulen umgeben ist, spricht man von einem magnetostraktiven Zweipol oder Vierpol. Der Vierpol wird auch Magnetostraktionselement genannt.

Bereit wir die charakteristischen Gleichungen ableiten, sollen die magnetostraktiven Effekte kurz erklärt werden.

1. Wird in ein magnetisches Feld ein ferromagnetisches Material eingebracht, so verändert sich die geometrischen Abmessungen dieses Teils.

2. Befindet sich ein ferromagnetisches Material in einem Magnetfeld und werden in dem Material durch äussere Kräfte mechanische Spannungen erzeugt, so ändert sich der Magnetisierungsgrad des Teils.

Eine quantitative Formulierung der magnetostraktiven Erscheinungen ist für unsere Zwecke durch die Gesetze von Joule und Villari gegeben:

Gesetz von Joule: Bei einem in axialer Richtung magnetisierten Stab aus ferromagnetischem Material ist die axiale Längsänderung proportional der Feldstärkeänderung und der Länge des Stabes

$$\Delta l = \lambda l \Delta H \quad (\text{H = konst.}) \quad (1)$$

Gesetz von Villari: Wird ein in axialer Richtung magnetisierter Stab aus ferromagnetischem Material einer axialen mechanischen Spannung ausgesetzt, so ändert sich die magnetische Induktion proportional zu dieser Spannung

$$\Delta B = \lambda \Delta \sigma \quad (\text{H = konst.}) \quad (2)$$

JULI/AUGUST 1955

BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

293

Zu bemerken ist, dass die Magnetostraktion unabhängig von der Feldrichtung wirkt:

$$\Delta l = F(H) = F(-H) \quad (3)$$

Soll bei sinusförmigem Feldverlauf auch die Längsänderung sinusförmig sein, so ist eine Vermagnetisierung unerlässlich. Der Proportionalitätsfaktor λ in Gl. (1) und (2) ist identisch und wird als Magnetostraktionskonstante bezeichnet, obwohl λ von der Vormagnetisierung H_0 abhängig ist, λ kann je nach dem Werkstoff positiv oder negativ sein.

Ableitung der magnetostraktiven Vierpolgleichungen

Für ein Stabelement dx eines Stabes konstantem Querschnitts bestehen in der Stabachse x ohne Berücksichtigung der inneren Reibung die bekannten Bewegungsgleichungen:

$$\partial^2 \xi = -s \partial^2 x \quad (\text{H = konst.}) \quad (4)$$

$$\partial x = -\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (5)$$

wobei $\partial \xi$ = Längsänderung des Stabelementes dx
 s = Steifigkeit = $1/E$ (E = Elastizitätsmodul)
 ρ = mechanische Spannung
 ρ = spezifische Dichte.

Dass ist für ferromagnetischen Werkstoff noch die magnetostraktive Gleichung (1) in geeigneter Umformung hinzuzufügen:

$$\partial^2 \xi = \lambda \partial x \quad (\sigma = \text{konst.}) \quad (6)$$

Die gilt unter der Voraussetzung, dass der Stab durch das Gleichfeld H_0 magnetisiert sei und das Wechselfeld $h \ll H_0$ ist. Durch Zusammenfassen der Gl. (4) und (6) mit $\partial^2 \xi / \partial t^2 = \partial^2 x$ folgt für gleichzeitige Änderung der mechanischen Spannung und der magnetischen Feldstärke:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -s \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \lambda \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (7)$$

und aus Gl. (5) mit $\partial^2 \xi / \partial t^2 = \partial x / \partial t$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\rho \frac{\partial x}{\partial t} \quad (8)$$

Unter Berücksichtigung der magnetostraktiven Gesetze (Gl. 2) lässt die Gleichung des aus dem magnetostraktiven Stab, der von einer Spule mit der Windungszahl N umgeben ist, und dem Rückfluss des magnetischen Flusses bestehenden magnetischen Kreises:

$$\partial = 4\pi N^2 \int \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \partial x = \partial \sum \frac{l}{\mu_0 \mu} = \partial R_m \quad (9)$$

wobei mit

$$u = N \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{4\pi N^2}{R_m} \left[N \frac{\partial \xi}{\partial t} - \frac{\lambda}{\mu} \frac{\partial x}{\partial t} \right] \quad (10)$$

für die innere Feldstärke des Stabelementes dx folgt

$$\frac{\partial h}{\partial t} = s \frac{R_m}{N l} + \frac{\lambda}{\mu} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (11)$$

wobei l = Länge des Stabes
 R_m = magnetischer Widerstand des Stabes.

Damit ist durch Einsetzen in Gl. (7) der Anschluss der mechanischen an die elektrischen Größen gewonnen:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -s \frac{\partial x}{\partial t} + \lambda \frac{R_m}{N l} u \quad (12)$$

mit $s' = s(1 - 4\pi N^2 \lambda / \mu)$. Für sinusförmige eingeprengte Spannung $u = U e^{j\omega t}$ liefert das Gleichungssystem (8), (12) die Lösung

$$x = a_1 \cos \gamma x + j a_2 \sin \gamma x - j a_3 u (1 - \cos \gamma x) \quad (13)$$

$$v = \frac{a_1}{j} \sin \gamma x + a_2 \cos \gamma x + k a_3 \sin \gamma x \quad (14)$$

wobei $s = \sqrt{\frac{R_m}{s}}$ $\gamma = \omega \sqrt{\rho s}$ $k = \frac{\lambda R_m}{N l}$

a_1, a_2 = mechanische Spannung bzw. Geschwindigkeit am Stabende. Aus Gl. (13) und (14) lässt sich mit Gl. (10) das Gleichungssystem der elektromechanischen Übertragung (Transduktorgleichungen) ableiten. Mit der Randbedingung $a_3 = 0$ (d. h. freier Stabende) wird:

$$u = \frac{N l}{j \lambda R_m} \left[\frac{\cos \gamma l}{1 - \cos \gamma l} + j a_2 \frac{\sin \gamma l}{1 - \cos \gamma l} \right] \quad (15)$$

$$i = \frac{R_m}{j \lambda N l} + \frac{j \lambda}{j \lambda N l} \left[\frac{a_1 \gamma l \cos \gamma l - \sin \gamma l}{1 - \cos \gamma l} + a_2 \frac{\gamma l \sin \gamma l - 2(1 - \cos \gamma l)}{1 - \cos \gamma l} \right] \quad (16)$$

Einen magnetostraktiven Vierpol kann man sich durch Zusammenfassen von zwei elektromechanischen Transduktoren entstanden denken, die auf der mechanischen Seite aneinandergefügt werden (Bild 1). Durch sinnvolle Entwicklung lassen sich aus Gl. (15) und (16) die Gleichungen eines solchen magnetostraktiven Vierpols gewinnen. Der besseren Übersichtlichkeit halber sei das Ergebnis als Kettenmatrix bzw. als Produkt dreier Kettenmatrizen dargestellt:

¹⁾ G. W. Pierce: Magnetostraktion Oszillatoren, Proc. Inst. Radio Engs Bd. 17 (1959), Nr. 1, S. 42...48.

Leitwarte eines Wasserkraftwerks in Italien. Noch heute rüstet ABB Leitwarten aus – auch wenn sie heute anders aussehen.

The Brown Boveri Review,
Januar 1955



Fig. 49a. — Control room in the underground power station of Santa Massenza, belonging to the Società Idroelettrica Serce-Molveno, Italy. Right: the central control desk for generators, transformers and transmission lines; in the centre: the mimic diagram; and adjoining, the switch panels for measuring, recording, controlling and protection. Built by Tecnomasio Italiano Brown Boveri, Milan.



Bild 2 — Für das letzte Wegerück bis hinauf zum rund 1600 m hoch gelegenen Gebäude des Fernsehensender La Dôle halfen keine Maschinen mehr; mit Muskelkraft werden die einzelnen Teile des Brown Boveri Bildsenders, die insgesamt etwa 5 t wiegen, den Hang hinaufgeschoben. Der Fernsehender La Dôle nahe der französischen Landesgrenze wird mit je einer Richtantenne die Gebiete um Lausanne und um Genéve mit einem Fernsehprogramm versorgt.

Transport von Ausrüstung auf Schlitten für den Fernsehender auf dem Berg La Dôle in der Schweiz

Brown Boveri Mitteilungen,
März 1955



1984



1987

1978

Das erste Retorten-baby wird geboren

1987

Erste
BBC
Technik
auf
Spanisch

1988

ASEA und
BBC
fusionieren
zu ABB

Stephen
Hawking
veröffentlicht
A Brief
History of
Time

1990

ABB
bringt das
elektrische
Schiffs-
antriebs-
system
Azipod®
auf den
Markt



1991

1991

Erste
ABB
Review
auf
Russisch

NEWS IN BRIEF

German-Swedish-Swiss working group develops HVDC circuit-breaker

High-voltage direct-current (HVDC) transmission will have an increasingly important role to play in the future in meeting the needs for electrical energy. All existing HVDC transmission lines have so far been two-terminal systems, but in the future multi-terminal systems will also be required. However, up to now there has not existed on the market any suitable d.c. circuit-breaker capable of interrupting the service current, disconnecting unloaded transmission lines and, together with the converter control system, clearing any faults.

"Arbeitsgruppe HGÜ-Schaltwerk," the working group established in 1975, by AEG-Telefunken, ASEA, Brown Boveri (BBC) and Siemens, has now developed and tested, in co-operation with Institut für Hochspannungstechnik der TU Braunschweig (the Institute for High-Voltage Technology at Brunswick, West Germany), a model assembly of an HVDC circuit-breaker.

Each breaking unit consists of an oil-immersed a.c. breaker serving as a commutating switch, connected in parallel with a commutating circuit comprising

a spark gap and capacitor as well as with an energy absorption circuit incorporating a surge arrester. The latter serves at the same time as a breaker for the residual current. Development work on the new HVDC breaker has proceeded in three stages. The first stage involved the testing of the serviceability of the individual breaker components, where series-connected pairs were used as far as possible. During the second stage, the interaction of the individual components with one another was investigated. The development work during these first two stages took place at Brunswick. Finally, a complete breaking unit underwent tests at FGH (Forschungsgemeinschaft für Hochspannung und Hochstromtechnik e.V.), Mannheim-Rheinheim, West Germany. This testing involved breaking tests at full voltage on a complete breaking unit and at reduced voltage per unit on an arrangement consisting of two breaking units connected in series. All these tests were successful in every respect.

Breaking tests were performed on one

breaking unit involving the interruption of 300 to 250 A at inductances in the d.c. circuit varying between 0.5 and 1.5 mH. At 1.5 mH and 250 A, 7.1 MWs was thus developed in the surge arrester. In addition, a test series involving a $Q = 3 \text{ mH} \pm 0.3 \text{ mH} \pm 0.3 \text{ mH}$ cycle was performed at 1500 A and 0.5 mH. The stresses resulting from this duty do not in any way limit the interruption capability of the breaker. In the model assembly, one breaking unit with commutating and energy-absorbing circuit is designed for a service voltage of up to 200 kV. HVDC breakers for higher system voltages can be obtained by connecting two or more breaking units in series. Thus, the model assembly with an additional surge arrester could already be used for a 400 kV HVDC system. A special high-speed disconnector assures full isolation of the breaker in the open position. The breaker is designed so that the overvoltage factor 1.6 (p.u.) will not be exceeded for any interruption duty. Thus, the breaker voltage for a 400 kV HVDC breaker will not exceed $2 \times 120 \text{ kV}$.

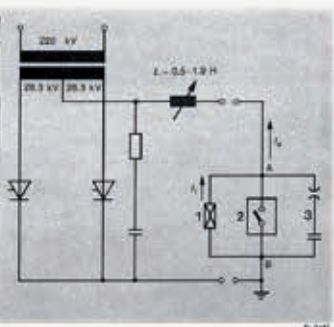
ABB Rep. 14

Fig. 1. Model assembly of an HVDC breaker developed by "Arbeitsgruppe HGÜ-Schaltwerk" in co-operation with Institut für Hochspannungstechnik der TU Braunschweig (the Institute for High-Voltage Technology at Brunswick, West Germany). From left to right: d.c. surge arrester, oil-immersion circuit-breaker and commutating capacitor.



Fig. 2. Design of the breaking unit for HVDC circuit-breaker.

1. Energy absorption circuit with d.c. surge arrester
2. Oil-immersion circuit-breaker
3. Commutating circuit with spark gap and capacitor



1988 fusionierten ASEA und BBC zu ABB. Doch dies war nicht die erste Kooperation zwischen den beiden Unternehmen. Wie dieser Artikel dokumentiert, arbeiteten beide Unternehmen in den 1970er Jahren an einem Projekt zur Entwicklung eines HGÜ-Leistungs-schalters zusammen.

ASEA Journal, Vol 48, No. 3, 1975



1997

Der Computer Deep Blue besiegt den Schachweltmeister Gary Kasparow

1998

In Japan wird die längste Hängebrücke der Welt, die Akashi Kaikyo (1.990 m), eröffnet

2001

Erste vollständige Internetpräsenz der ABB Review

Apple bringt den iPod auf den Markt

2002

ABB verbindet die AC-Netze von South Australia und Victoria durch das längste unterirdische Übertragungskabel der Welt

2003

Erste ABB Review auf Chinesisch



ABB-Antriebe können mit Ihrem Auto auf Probefahrt gehen.

Brown Boveri Technik, März 1986

Vierrollen-Prüfstand für Allrad-Fahrzeuge

Die Zahl der vierradgetriebenen Fahrzeuge nimmt zu. Um ihre Entwicklung zu beschleunigen, brauchen die Fahrzeugindustrie geeignete Prüfstände. Brown Boveri hat einen dynamischen Vierrollen-Prüfstand für Allrad-Fahrzeuge entwickelt und ausgeführt. Er ist mit vier Einzelantrieben für je 110 kW Leistung ausgerüstet und eignet sich zur Erprobung von Fahrzeugen mit 2 bis 3,5 t Achslast bis 240 km/h.



Dr.-Ing. Gert Rüdiger, Vorsitzender des Aufsichtsrates der Brown Boveri AG, ist seit 1986 an der Projektleitung und Abwicklung von Prüfständen Mannheim/Bundesrepublik Deutschland

Vierradgetriebene Fahrzeuge kommen zunehmend häufiger auf den Markt. Da eine Reihe von Fahrzeug-erprobungen heute auf Prüfständen verlagert werden, war es nötig, geeignete Prüfstände zu entwickeln und zu bauen. Für die Prüfstandserprobung sprechen folgende wichtige Gründe:

- Die Prüfbedingungen, wie sie bei Fahrversuchen auftreten, lassen sich mit modernen Prüfständen sehr gut nachbilden.
- Die Prüfkosten sind auf Prüfständen viel besser reproduzierbar als bei Fahrversuchen.
- Erprobungen auf Prüfständen sind wirtschaftlicher als Straßenversuche und zeitparend.

Ein universeller Fahrzeugprüfstand muß folgende Grundforderungen erfüllen:

- Jedes Rad des Fahrzeuges steht auf einer einzeln angetriebenen Rolle.
- Verbindungen zwischen den Rollen sind im Hinblick auf die freie Zugänglichkeit von unten zu vermeiden.

Daraus resultieren Vorgaben für den Gleichlauf der Rollen und für ihre tragfähige Verschiebbarkeit. Den hier vorgestellten Prüfstand hat Brown Boveri daher sowohl für die «klassischen» Antriebsvarianten Heck- und Frontantrieb als auch für den Allradantrieb konzipiert und ausgeführt. Der Prüfstand ist für straßengerechte Erprobungen von Fahrzeugen, deren Funktionsgruppen und Einzelkomponenten bestimmt.

Unsere Lieferungen und Leistungen umfassen:

- mechanische und elektrische Konzeption und Ausführung des Prüfstandes mit Steuerung, Regelung und Fahrdynamiksimulator.
- die schwingungstechnische Berechnung und Auslegung der Prüfstandfundamente.
- die Stahlbaukonstruktion.

Der Kunde wählt in Abstimmung mit Brown Boveri alle Bauteile aus, z.B. Ven- und Erdschwingungseinsparungen für die Fahrzeuge.

Prüfstandsverbreiter und -ausbauer bezeichnen diese Art der Prüfstände u.a. auch als «Rollen- oder Leistungs-Rollenprüfstände».

Bild 1 - Fahrzeug mit Heckantrieb auf dem Vierrollen-Leistungsprüfstand



Vierrollen-Prüfstand für Allrad-Fahrzeuge

Brown Boveri Technik S. 151

Brown Boveri wurde von der Swissair mit der Lösung der leistungstechnischen Aufgaben der neuen Gepäcksortieranlage im Fingertock A des Flughafens Zürich betraut. Dank Verwendung des BBC-PARTNERBUS® und des Leitsystems INOACTIC® 15 ergibt sich eine zuverlässige und übersichtliche Anlage mit dezentralen, vernetzten Sortierrechnern.



Betriebs-Ing. HTL
Martha Heuer leitet die Sektion Spezialprojekte innerhalb der Swissair-Abteilung «Flughafenentwicklung». Projektleiter der bestehenden Anlage.

Kloten/Schweiz



Kurt Kiening ist Projektleiter des von Brown Boveri geleiteten Anlagenteils Turgo/Schweiz

Zum sicheren, pünktlichen und komfortablen Fliegen gehört auch der zuverlässige Gepäcktransport. Daß das Gepäck mit dem Passagier reist, gilt als unabdingbare Forderung. Um diese Bedingung erfüllen zu können, besitzt der Flughafen Zürich seit dem 1. November 1985 eine der modernsten Gepäcksortieranlagen der Welt.

Im Konzept gleicht die neue Sanierranlage im Terminal A jener im Terminal B, welche seit über 10 Jahren mit recht großer Zuverlässigkeit läuft. Damit bietet der Flughafen Zürich den Passagieren nun folgenden Komfort:

- Am Reisetag zu jeder beliebigen Zeit bis kurz vor Abflug einzuchecken.
- An den Schiffsgruppen der entsprechenden Klasse frei den Schiffer mit der kürzesten Warteschlange auszuwählen.

Dieser Dienst am Kunden bedingt aber auf der anderen Seite entsprechende Einrichtungen, welche die große Zahl der Gepäckstücke genügend schnell auf die einzelnen Flüge aussortieren. Dies wird unter anderem durch die Verwendung von Hochgeschwindigkeitsförderbrettern gewährleistet, welche insbesondere die beiden Terminals A und B miteinander verbinden. Als wichtige weitere Bedingung ist natürlich größtmögliche Betriebsicherheit zu gewährleisten, damit das Schlagwort »Das Gepäck reist mit dem Passagier« gelten kann.

In der neu gestalteten Abflughalle des Terminals A sind die Check-in-Schalter in zwei Gruppen aufgestellt. Jede ist mit einer Förderstraße mit



© 2001 John Wiley & Sons, Inc.

2008 Annual Meeting



Fig. 91. — 1100 h.p. d.c. locomotive of the Viação Férrea Federal Leste Brasileiro em Salvador
Ten locomotives of this type were equipped by Brown Boveri with driving motors, circuit breakers and voltage converters with quick-acting regulators.

The Brown Boveri Review,
Januar 1955

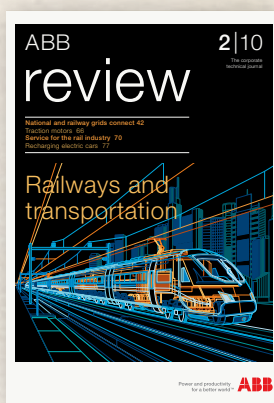
Brown Boveri Technik,
Maj 1986



2008

2008

Das größte
Riesenrad
der Welt,
der
Singapore
Flyer, wird
in Singapur
eröffnet



2010

2009

Usain Bolt
läuft einen
neuen
Weltrekord
von 9,58 s
auf 100 m.

2010

ABB eröffnet
das höchst-
gelegene
Umspannwerk
im höchsten
Gebäude der
Welt, dem
Burj Khalifa
in den VAE



2013

2012

ABB entwickelt einen hybriden DC-Leistungsschalter, der sich für den Aufbau großer überregionaler DC-Netze eignet

2013

Die **ABB Review** steht im e-Reader-Format zur Verfügung

Favoriten der Redaktion

Schätze aus den Archiven



Freie Bahn im Winter

SARAH STOETER – Als Leser dieser Zeitschrift sind Sie wahrscheinlich bestens vertraut mit den zahllosen Produkten von ABB aus dem Bereich der Energie- und Automatisierungstechnik – Industriemotoren und -antriebe, Transformatoren, Schaltanlagen, Roboter, Steuerungen, Schiffsantriebe, HGÜ, Automatisierungssysteme usw. Doch würden Sie glauben, dass ABB einst auch Schneepflüge hergestellt hat? Dieses interessante Detail aus der Geschichte des Unternehmens ist ein gutes Beispiel für den Innovationsgeist, der auch heute noch fest zu ABB gehört. Für mich als Redakteurin ist es ein Privileg, Artikel über Technologien wie diese mitzugestalten und somit ein Teil des Innovationsgeistes von ABB zu sein.

Die ABB-Vorgängerunternehmen ASEA und BBC haben beide Lokomotiven hergestellt und waren maßgeblich an der Elektrifizierung vieler Eisenbahnen, insbesondere in Schweden und der Schweiz, beteiligt. Ein interessantes Element aus der Eisenbahnvergangenheit von ABB ist der elektrische Schneepflug für Lokomotiven, der 1932 in einem Artikel in den *BBC Mitteilungen* beschrieben wird.

Die 12,2 km lange Bahnstrecke in den Pyrenäen, die von der Talstation in Ribes de Fresser (Ribas) bis zum Vall de Núria in 1.960 m Höhe 1.055 Höhenmeter überwindet, erschließt eine Region, die von vielen Wallfahrern, Höhenkurgästen, Bergwanderern und Wintersportlern besucht wird – eine Reise, die im Winter ohne eine praktikable Befreiung der Gleise vom Schnee nicht möglich wäre. Dies war der Anstoß für BBC und SLM zur Entwicklung des elektrischen Schneepflugs, der 1931 in Betrieb genommen wurde.

E. Hugentobler, (G.A.W.): „Elektrische Schneeschleudermaschine für die Bergbahn Ribas-Nuria in Spanien“. *BBC Mitteilungen*, Feb. 1932: S. 63–65



Sarah Stoeter hat einen BA in Englisch und Psychologie von der University of Minnesota (USA). Seit 2007 ist sie Redakteurin bei der ABB Review.
sarah.stoeter@ch.abb.com

FEBRUAR 1932 BROWN BOVERI MITTEILUNGEN SEITE 63

ELEKTRISCHE SCHNEESCHLEUDERMASCHINE FÜR DIE BERGBAHN RIBAS-NURIA IN SPANIEN.

Destinationsdes 625.174.

Im Sommer des Jahres 1930 erhielt die Sociedad Española de Electricidad Brown Boveri in Madrid von der Sociedad de Ferrocarriles de Montaña a Grandes Pendientes in Barcelona, im Anschluss an den Auftrag auf die Lieferung der Fahrleitung, der Gleichrichter

sich an der Hauptlinie Barcelona-Toulouse befindlichen Ausgangspunkt Ribas nach dem in den spanischen Pyrenäen in 1960 m ü. M. gelegenen Ort Nuria, der für Wallfahrten, Höhenkuren, Berg- und Wintersport in Spanien bekannt ist und viel besucht wird. Der Höhenunterschied zwischen Nuria und der Talstation beträgt 1055 m. Er wird durch eine Zahnradbahn von 12,2 km Länge mit gemischtem Adhäsions- und Zahnstangenbetrieb überwunden.

Die Hauptdaten der Bahnanlage sind:

Spurweite	1,0 m
Grösste Steigung	
auf Adhäsionsstrecke	65‰
auf Zahnstange	150‰
Kleinsten Kurvenradius auf Adhäsionsstrecke und Zahnstange	80 m
Stromsystem	Gleichstrom
Mittlere Fahrdrachtspannung	1500 V

Abb. 1 gibt eine Gesamtansicht der betriebsbereiten Schneeschleudermaschine. Zu ihrer Fortbewegung ist eine elektrische Lokomotive nötig, da die Maschine selbst nur eine elektrische Ausrüstung für den Antrieb der Schleudervorrichtung, aber keine Triebmotoren für die Eigenbewegung aufweist. Während der Schleudertätigkeit wird das Fahrzeug mit einer Fahrgeschwindigkeit von rd. 5 km/h durch die Lokomotive gestossen, wobei der den Schleuderrädern zugeführte Schnee durch deren Drehbewegung fortwährend erfasst und weggeschleudert wird. Die Bahnanlage kann

unterstation sowie von vier Adhäsions- und Zahnradlokomotiven auch die Bestimmung auf eine elektrische Schneeschleudermaschine. Diese wurde im Januar 1931 in Betrieb gesetzt und hat sich von Anfang an und insbesondere in dem sehr schneereichen Spätwinter ausgezeichnet bewährt und als dringende Notwendigkeit für die Durchführung eines ungestörten Winterbetriebes erwiesen. Die Schneeschleudermaschine wurde von der A.-G. Brown, Boveri & Cie. in Baden als Generalunternehmerin gebaut, die ihrerseits den mechanischen Teil der Schweizerischen Lokomotiv- und Maschinenfabrik Winterthur zur Ausführung übergeben hatte.

Die von der erwähnten Bahngesellschaft neuerbaute Linie führt von dem

Abb. 1. – Ansicht der Schneeschleudermaschine für die Bergbahn Ribas-Nuria.

Abb. 2. Hauptabmessungen der Schneeschleudermaschine.

Weltweite Verwunderung

MICHELLE KIENER – Es heißt, man braucht neun Monate, um sich alle Kunstwerke im Louvre in Paris anzusehen. Mein Eindruck beim Besuch der Archive der ABB Review war sehr ähnlich. Seit 15 Jahren arbeite ich für ABB und lese die Review. Wenn ich alle Artikel lesen würde, die ich lesen möchte, wäre ich wahrscheinlich bis zur Rente und darüber hinaus beschäftigt. Es gibt so viel faszinierendes Material, dass es sehr schwer war, sich an die verfügbare Recherchezeit zu halten.

einer Zeit, als Stummfilme noch Stand der Technik waren.

Aus diesem Grund habe ich mich von den Tausenden, die ich hätte wählen können, für den folgenden Artikel entschieden. Für mich fasst er perfekt den Pioniergeist, die Unerschrockenheit und die „Can-do“-Einstellung der vielen Menschen zusammen, die ABB heute und in der Vergangenheit ausmachen. Und die Review ist ein wichtiges Instru-



Michelle Kiener studierte Elektrotechnik am Merchant Navy College (UK) und hat einen MSc in Umweltwissenschaften. Sie ist seit vier Jahren als Redakteurin für die Review tätig.
michelle.kiener@ch.abb.com

ment, um ihre Errungenschaften zu kommunizieren, Entwicklungen festzuhalten und Spitzenleistungen zu dokumentieren.

Das Bemerkenswerteste für mich war der globale Charakter sowohl der Review als auch von ABB. Heutzutage ist es normal, global zu denken, von globaler Reichweite und Globalisierung zu sprechen und einen „Brief“ binnen Sekunden von einem Kontinent zum anderen zu senden. Dabei waren die Review und ihre beiden Mutterunternehmen ASEA und BCC schon „global“, bevor es solche Schlagwörter, Hochgeschwindigkeitsverkehr und -kommunikation gab.

Auch 2014 ist die Auslieferung schwerer Hardware an Kunden noch immer mit Herausforderungen verbunden. Seien es geeignete Transportmittel und -wege, widrige Witterungsbedingungen oder niedrige Brücken – alles wird heute per E-Mail und Smartphone kommuniziert und koordiniert. Auch das Versenden der ABB Review in alle Welt hat seine Herausforderungen, sei es die Beachtung der vielen Importvorschriften oder die Verwaltung der weltweiten Abonnentenliste durch unsere 102 lokalen Distributoren. Man mag sich kaum vorstellen, was nötig gewesen wäre, um das gleiche Ergebnis vor 100 Jahren zu erzielen. Man denke nur an eine Turbine, die 1914 in der Schweiz hergestellt wird und nach Australien geliefert werden soll. Oder an das Inbetriebnahmepersonal, das dorthin geschickt werden muss, und wie lange es von zu Hause weg ist ohne die „lokale Hilfe“ von Google oder ein Wörterbuch im Smartphone. Und man denke an das Versenden der gedruckten Review an verschiedene Adressen rund um die Welt zu

SEITE 108
BROWN BOVERI MITTEILUNGEN
FEBRUAR 1931

KLEINE MITTEILUNGEN.

Überseetransport von Großtransformatoren.

Deinmalides 556, 626, 621, 714, 71.

Das Verpacken und der Transport von Transformatoren nach Übersee stossen wegen den wachsenden Grössenverhältnissen auf Schwierigkeiten, die sowohl an den Konstrukteur wie auch an das mit dem Versand betraute Transportunternehmen hohe Anforderungen stellen.

Die rationellste Art des Transportes ist die Versendung des Transformators mit seinem aktiven Teil im ögefüllten Kasten, die Durchführungsisolatoren, der Ölkonservator, das Fahrgestell und die Kühleinrichtung dagegen getrennt. Diese Versandart ermässigt die Montagekosten auf ein Mindestmass und erspart oder verkürzt das nochmalige Auskohlen des Transformators am Aufstellungsort.

Das Gewicht eines solchen ögefüllten Transformators übersteigt jedoch in manchen Fällen die Tragkraft der zur Verfügung stehenden Schiffs- und Hafenkranen, und die Abmessungen des Transformators überschreiten öfters die erlaubten Masse für Brücken, Unterführungen, Bahnladeprofile und Schiffslocken.

In solchen Fällen muss der Transformator ganz oder teilweise zerlegt zum Versand kommen und für besonders grosse Einheiten müssen die Kasten zwei- oder sogar dreiteilig konstruiert werden. Der obere Kastenteil und gegebenenfalls auch das obere Joch werden dann gesondert verpackt. An Stelle des demontierten oberen Jochs wird für den Transport eine Hilfspressvorrichtung für Gestell und Wicklungen angebracht.

Als Beispiel möge hier kurz der Transport von zwei nach Melbourne (Australien) bestimmten Großtransformatoren für das Unterwerk Richmond der Victoria State Electricity Commission beschrieben und illustriert werden. Es handelte sich um zwei Dreiphasen - Dreiwicklungs-Freiluft-Trans-

formatoren mit äusserer Wasser- und Ölanlaufkühlung für folgende Daten:

Leerlaufspannung: primär	120 000 V
sekundär	22 000 V
tertiär	11 000 V
Leistung: primär	31 000 kVA
sekundär	37 500 kVA
tertiär	30 000 kVA



Abb. 1. — Transformator am Schwindekran hängend, beim Einachiffen im Bremerhafen.

Die Periodenzahl beträgt 50.
Abmessungen: Höhe (einschl. Klemmen) 6,8 m
Länge 4,7 m
Breite 2,8 m

Gesamtgewicht (ohne Öl) einschliesslich Kühlgerät	66 500 kg	Netto	71 000 kg
Schwerstes zu beförderndes Stück	44 000 kg	Brutto	44 000 kg
Unterer Kastenteil mit aktivem Teil (ohne oberes Joch und Untergestell)			
Gewicht der Ölfüllung	20 000 kg		



Abb. 2. — Transformator am Hafenkran beim Ausladen in Melbourne.



Abb. 3. — Abtransport durch Trailoren in Melbourne.

Diese Transformatoren (siehe 2. Umschlageite dieses Heftes) wurden mit zweiteiligem Kasten und provisorischer Pressvorrichtung für das Gestell und die Wicklungen ausgeführt, um das Gesamtgewicht des schwersten Stückes

Lufterhitzer für die Raumfahrtforschung

ANDREAS MOGLESTUE – Die Archive der ABB Review bieten einen guten Überblick über die Aktivitäten des Unternehmens in den letzten 100 Jahren. Neben Bereichen, in denen BBC und ASEA über die gesamte Zeit tätig waren, gibt es auch Produktsegmente, die eingestellt oder verkauft wurden, während andere durch eigene Innovation oder Übernahmen anderer Unternehmen hinzugekommen sind. Darüber hinaus gibt es Artikel, die sich mit seltenen oder einmaligen Produkten befassen, die speziell auf eine bestimmte Anwendung zugeschnitten wurden.

Ein Beispiel hierfür ist ein Artikel über einen Lufterhitzer für die Raumfahrtforschung, der in der Lage ist, Luft bei 80 bis 100 Atmosphären Druck auf etwa 1.000 °C zu erhitzen und auf Mach 12 zu beschleunigen. Dieser Erhitzer wurde von Tecnomasio Brown Boveri S.A. in Mailand für das Centro Ricerche Aerospaziali in Rom gebaut.

Der Artikel in den *BBC Mitteilungen* aus dem Jahr 1968 beschreibt die Konstruktion und Prüfung des Erhitzers, macht aber nur Andeutungen über die Anwendung. Das Centro Ricerche Aerospaziali war zu jener Zeit das Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt der Universität La Sapienza in Rom und arbeitete an einem Satellitenprogramm namens San Marco. 1964 brachte Italien seinen ersten Satelliten (San Marco 1) ins All. Dabei handelte es sich um einen der ersten nicht amerikanischen oder sowjetischen Raumflugkörper. Der Start erfolgte von der Wallops Flight Facility in Virginia (USA) mit einer von der NASA gestellten Scout-Rakete. Der Satellit besaß eine Ionensonde zur Erforschung der Atmosphäre und Geräte zur Untersuchung von Langstrecken-Funkübertragungen.

In den darauf folgenden Jahren bauten die Italiener ihre eigene Raketenstartplattform (ebenfalls mit dem Namen San Marco) in der Nähe von Ras Ngomeni in Kenia, von wo zwischen 1964 und 1988 mindestens 27 Raketen gestartet wurden.

ABB ist auch heute noch in die Weltraumforschung involviert – z. B. durch ihre FTIR-Spektrometer, die zur Erforschung der Atmosphäre in Satelliten installiert werden.

Dieser kurze Einblick in die Hintergrundgeschichte zu einem ansonsten scheinbar willkürlichen Produkt zeigt anschaulich, wie die Errungenschaften von ABB häufig zu einem breiteren Kontext beigetragen haben.



Andreas Moglestue studierte Elektrotechnik an der ETH Zürich. Er arbeitete für ABB Semiconductors und entwickelte Software, bevor er Mitglied des Review-Teams wurde. andreas.moglestue@ch.abb.com

MÄRZ 1968

BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

155

Lufterhitzer für Zwecke der Raumfahrtforschung

621.365 : 629.78.001.5

Im «Centro Ricerche Aerospaziali» in Rom wurde ein im Werk des Tecnomasio Italiano Brown Boveri S.A., Mailand, gebauter Lufterhitzer für Untersuchungen auf dem Gebiet der Raumfahrtforschung mit Erfolg in Betrieb genommen. Mit dieser Anlage kann eine Luftmenge von 0,5 kg/s unter hohem Druck innerhalb weniger Sekunden auf eine Endtemperatur von rund 1000 °C gebracht werden. Auf diese Weise entsteht an der Düsen-Austrittsöffnung des Kanals eine Strahlgeschwindigkeit gleich der zwölffachen Schallgeschwindigkeit. Der folgende Artikel beschreibt den Aufbau der Anlage und die Versuchsergebnisse.

Problemstellung

Eine sehr interessante und originelle Anwendung eines elektrischen Lufterhitzers wurde durch das Tecnomasio Italiano Brown Boveri S.A., Mailand, für das «Centro Ricerche Aerospaziali» in Rom entwickelt. Der Lufterhitzer dient dort zur Erzeugung eines Luftstrahles von Überschallgeschwindigkeit. Das in diesem Zusammenhang zu lösende technische Problem stellte sich in ziemlich komplizierter Form, wenn man die schweren Anforderungen in Betracht zieht, denen das Material der aktiven Teile sowie die Abdichtungsorgane bei Beanspruchungen zu genügen haben, die über das normale Mass weit hinausgehen.

Die Anlage erlaubt, die unter 80...100 at Überdruck stehende Luft in wenigen Sekunden auf eine Temperatur von 1000 °C zu erhitzen, wodurch an der Austrittsöffnung in Form einer Lavaldüse¹ eine Luftgeschwindigkeit von ungefähr Mach 12 entsteht, die für einige der vorgesehenen Versuche benötigt wird.

Es waren in erster Linie die besonderen Probleme der Abdichtung und Kühlung sowie der richtigen Wahl der Wärmedurchgangszahlen abzuklären, die für die Dimensionierung des Lufterhitzers massgebend waren.

Aufbau

Die dem in Bild 1 dargestellten Lufterhitzer zu Grunde liegenden konstruktiven Gesichtspunkte unterscheiden sich grundsätzlich nicht von den für normale Lufterhitzer angewendeten Konstruktionsmerkmalen, die darin bestehen, dass die zu erwärmende Luft die Heizwiderstände direkt berührt. Diese Widerstandselemente sind als Spiralen gewickelt

¹ Nach De Laval benannte Düse, deren Querschnitt sich in Strömungsrichtung zunächst verengt und dann wieder erweitert.

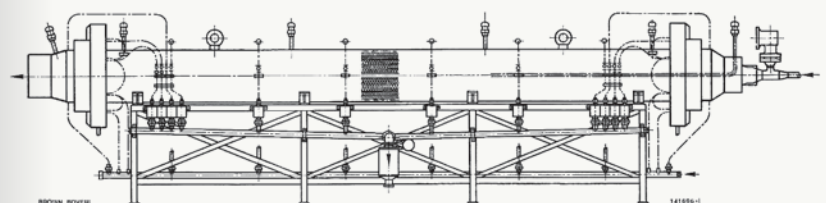


Bild 1 – Aufbauskeizze des Lufterhitzers

Heizleistung 600 kW, Überdruck 100 at Maximale Luftmenge 0,5 kg/s Maximaltemperatur 1250 °C



Roboter auf Erfolgskurs

40 Jahre
Industrieroboter
von ABB

DAVID MARSHALL, NICK CHAMBERS – Dieses Heft zum 100. Geburtstag der *ABB Review* erscheint zeitgleich mit einem weiteren bedeutenden Jubiläum: Vor 40 Jahren stellte ABB (damals ASEA) mit dem ASEA IRB 6 ihren ersten Roboter vor und schrieb damit das erste Kapitel einer faszinierenden Geschichte. Der IRB 6 erlangte als weltweit erster vollständig elektrischer kommerzieller Industrieroboter mit Mikroprozessorsteuerung historische Bedeutung. Seit seiner Einführung hat sich die Welt der Robotik jedoch drastisch verändert und ist heute kaum wiederzuerkennen. Unter den vielen bahnbrechenden Entwicklungen waren es vor allem die Technologien, die die Bedienung der Roboter erleichtert und ihre Implementierung vereinfacht haben, die für eine rasche Verbreitung der Robotertechnik gesorgt haben.



Die Entwicklung, die die Roboter-technik in den letzten vier Jahrzehnten genommen hat, ist erstaunlich.

In der diskreten Fertigung sind Roboter allgegenwärtig. Auf der ganzen Welt steigern sie die Produktivität, sorgen für eine durchgehend hohe Qualität und erhöhen die Sicherheit am Arbeitsplatz. Die Entwicklung, die die Robotertechnik in den letzten vier Jahrzehnten genommen hat, ist erstaunlich. Während früher nur einzelne Roboter für relativ einfache und monotone Aufgaben in gefährlichen Umgebungen eingesetzt wurden, erfüllen heute synchronisierte Systeme aus mehreren Robotern komplexe Aufgaben in flexiblen Produktionszellen. Eine der treibenden Kräfte hinter dieser Entwicklung ist ABB.

Titelbild

Die Robotertechnik hat sich in den letzten vier Jahrzehnten enorm weiterentwickelt. Besonders die Integration und Bedienung von Robotern sind wesentlich einfacher geworden.

Der erste Industrieroboter der Welt, der „Unimate“, war hydraulisch angetrieben und wurde 1961 von General Motors zur Bedienung einer Druckgussmaschine eingesetzt. Hydraulische Antriebe blieben vorherrschend in der Robotik, bis das schwedische Unternehmen ASEA (das später mit Brown Boveri zu ABB fusionierte) im Jahr 1974 mit dem IRB 6 den ersten vollständig elektrisch angetriebenen kommerziellen Industrieroboter mit Mikroprozessorsteuerung entwickelte → 1. Diese Maschine mit einer Handhabungskapazität von 6 kg war einzigartig – nicht nur im Hinblick auf das Antriebs-

system, sondern auch aufgrund ihrer menschenähnlichen Konfiguration und präzisen mikroprozessorbasierten Steuerung.

Hydraulische Antriebe blieben vorherrschend, bis ASEA 1974 den ersten vollelektrischen kommerziellen Industrieroboter mit Mikroprozessorsteuerung entwickelte.

Der Roboter setzte neue Standards in puncto Standfläche, Bewegungsgeschwindigkeit und Wiederholgenauigkeit und fand zahlreiche Nachahmer.

Das neueste Produkt unter den Lackierrobotern von ABB ist der kompakte IRB 5500 FlexPainter.

1 Erste Installation des IRB 6 – Blick auf die Zelle



Als bedeutender Anwendungsbereich kristallisierte sich bald das Punktschweißen heraus, und der 1982 eingeführte IRB 90 wurde eigens für diese Ausgabe entwickelt. Dieser Sechssachs-Roboter mit in den Arm integrierten Versorgungsleitungen für Wasser, Luft und Strom etablierte sich rasch auf dem Markt für Punktschweißanwendungen.

Lackierroboter

Es dauerte nicht lange, bis Roboter auch zum Lackieren eingesetzt wurden, und 1985 brachte ASEA ihren ersten Lackierroboter mit elektrischem Antrieb auf den Markt: den TR 5000. Später, in den 1990er Jahren, erfand ABB das Cartridge Bell System (CBS) zur Lackierung von Fahrzeugteilen. Dieses System nutzt einfach wechselbare Lackkartuschen, um Lack- und Lösungsmittelabfälle zu verringern und damit sowohl Kosten als auch Emissionen zu reduzieren. Gleichzeitig kann eine größere Farbauswahl genutzt werden.

Das neueste Produkt unter den Lackierrobotern von ABB ist der kompakte IRB 5500 FlexPainter → 2. Der wandmontierte FlexPainter verfügt dank seiner einzigartigen Bauweise und Konfiguration über den größten und flexibelsten Arbeitsbereich, der je von einem Roboter zur Außenlackierung von Karosserien erreicht wurde. Zwei FlexPainter IRB 5500 können Aufgaben erledigen, für die bisher vier Lackierroboter benötigt wurden. Das Ergebnis sind niedrigere Kosten – sowohl bei der Anschaffung als auch im Betrieb –, eine schnellere Installation, eine hohe Verfügbarkeit und eine bessere Zuverlässigkeit.

Robotermechanik

Das Design des IRB 6 war so elegant, dass sich seine menschenähnliche Kinematik mit Drehgelenken noch heute in ABB-Robotern wiederfindet. Was sich mit den Jahren verändert hat, sind Geschwindigkeit, Genauigkeit und Raumnutzung.

An den „Hüft-“ und „Schulterachsen“ wurden Kugelgewindetriebe durch rückschlagfreie Getriebe ersetzt, was zu einer besseren Raumkinematik führte. Eine weitere bedeutende Veränderung war der Wechsel von Gleichstrommotoren (DC-Motoren) zu Wechselstrommotoren (AC-Motoren) für den Antrieb. AC-Motoren sind kleiner, bürstenlos (also wartungsfreundlicher), leistungstärker und haben eine längere Lebensdauer – alles Eigenschaften, die von der Industrie verlangt werden.

Schwerlastroboter

Zwei der häufigsten Forderungen von Roboternutzern sind Flexibilität und Anpassungsfähigkeit. Dies erfüllte ABB 1991 mit dem Schwerlastroboter IRB 6000 (150 kg Handhabungskapazität). Der IRB 6000 war hauptsächlich für das Punktschweißen und die Handhabung großer Bauteile vorgesehen und basierte auf einem modularen Konzept. Dank einer Reihe von Fuß-, Arm- und Handgelenkmodulen konnte er an die individuellen Bedürfnisse der Nutzer angepasst werden – eine Designphilosophie, die ABB noch heute verfolgt. Da seine Merkmale bei einer breiten Kundenbasis Anklang fanden, etablierte sich der IRB 6000 in kürzester Zeit als erfolgreicher Punktschweißroboter. Mit einer im Segment von 150 bis 300 kg führenden Leistungsfähigkeit tritt das neueste Modell dieser



Familie, der IRB 6700, direkt in die Fußstapfen des IRB 6000. Dank einer robusten Bauweise, längeren Wartungsintervallen und vereinfachten Instandhaltung liegen die Gesamtbetriebskosten des IRB 6700 um 20 % unter denen seines unmittelbaren Vorgängers, des IRB 6640. Ein zentraler Aspekt bei der Entwicklung des IRB 6700 war die Zuverlässigkeit. So ist der Roboter für eine mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen (Mean Time Between Failures, MTBF) von 400.000 Stunden ausgelegt. Um dies zu erreichen, wurde jeder einzelne Ausfallbericht des IRB 6640 analysiert und die daraus gewonnenen Erkenntnisse für die Entwicklung des IRB 6700 genutzt. Sein um 15 % gesenkter Energieverbrauch wirkt sich zudem positiv auf die Umweltverträglichkeit und die Stromrechnung aus.

Gut verkabelt

Die Zuverlässigkeit des sogenannten „Dressings“, also der Kabel und Schläuche, mit denen Druckluft, Strom, Flüssigkeit, Schweißdraht usw. zum Ende des Roboterarms geführt werden, ist mindestens so wichtig wie der Roboter selbst. In vielen Fällen bereitet der Verschleiß dieser Leitungen den Serviceteams die größten Sorgen. Frei schwingende Kabel verschleiben nicht nur schneller, sondern schränken auch die Bewegungsfreiheit des Roboters ein. Vollständig in das Innere des Roboters integrierte Leitungen (Inte-

rated Dressings, IDs) sind teuer und bedeuten nicht selten eine Einschränkung hinsichtlich der durch die Leitungen geführten Medien. Die neue LeanID-Lösung von ABB erreicht eine Balance zwischen Kosten und Langlebigkeit, indem nur die besonders exponierten Teile des Leitungspakets in den Roboter integriert werden → 3. Dies erhöht die Vorhersehbarkeit bei der Programmierung und Simulation, sorgt für eine kompaktere Stellfläche und verlängert die Wartungsintervalle durch reduzierten Verschleiß. Der neueste ABB-Roboter, der IRB6700, wurde von Beginn an für den Einsatz von LeanID ausgelegt.

Klein ist auch schön

Manchmal müssen Roboter klein sein. Der kleinste Industrieroboter von ABB, der IRB 120, wiegt lediglich 25 kg und besitzt eine Handhabungskapazität von 3 kg (4 kg bei senkrechtem Handgelenk) bei einer Reichweite von 580 mm → 4. Eine weiß lackierte Reinraumausführung gemäß ISO 5 (Klasse 100) mit Zertifizierung durch das IPA (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung) steht ebenfalls zur Verfügung.

Die Variante IRB 120T ist für schnelle Pick-&-Place-Anwendungen vorgesehen, die eine extreme Flexibilität und eine hohe Wiederholgenauigkeit von 10 µm erfordern. Der sechssachsige IRB 120T zeich-

Das Design des IRB 6 war so elegant, dass sich seine menschenähnliche Kinematik mit Drehgelenken noch heute in ABB-Robotern wiederfindet.

Ein zentraler Aspekt bei der Entwicklung des IRB 6700 war die Zuverlässigkeit – er ist für eine MTBF von 400.000 Stunden ausgelegt.

4 IRB 120 bei ABB SACE in Frosinone



net sich durch eine erheblich höhere Maximalgeschwindigkeit der Achsen vier, fünf und sechs aus, was die Zykluszeiten um bis zu 25 % verkürzt.

Schnelle Pick-&-Place-Roboter

Im Jahr 1998 brachte ABB mit dem IRB 340 FlexPicker® einen Roboter auf den Markt, der als erster „Delta-Roboter“ für Pick-&-Place-Anwendungen ebenfalls historische Bedeutung erlangte. Mit einer eindrucksvollen Beschleunigung von 10 G und 150 Picks pro Minute war er bei der Handhabung kleiner Gegenstände wie Elektronikbauteilen und Lebensmittelprodukten menschlichen Arbeitskräften in Geschwindigkeit und Vielseitigkeit deutlich überlegen.

Die Software des FlexPicker umfasst eine leistungsstarke Bewegungssteuerung mit integrierter Kameraführung und Bandverfolgung (Conveyor Tracking). Das aktuelle Standardmodell, der IRB 360, ist außerdem mit längeren Armen und verschiedenen Handhabungskapazitäten von 1 bis 8 kg sowie einem Arbeitsbereich von bis zu 1,6 m erhältlich → 5. Dank dieser neuen Merkmale ist der Roboter in der Lage, Pick-&-Place-Aufgaben über noch größere Entfernungen auszuführen und dabei auch mehrere schwere Komponenten aufzunehmen.

Palettieren

Ein Anwendungsbereich für Roboter, der in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen hat, ist die Palettierung → 6. Der

neue IRB 460 von ABB ist der schnellste Palettierroboter der Welt. Der kompakte vierachsige Roboter mit einer Handhabungskapazität von 110 kg leistet bis zu 2,190 Zyklen pro Stunde und eignet sich damit perfekt für das schnelle Palettieren am Ende von Verpackungslinien und das Palettieren von Säcken. Der IRB 460 hat eine Reichweite von 2,4 m, benötigt 20 % weniger Stellfläche und ist um 15 % schneller als vergleichbare Roboter.

Moderne Robotersysteme gehen weit über den eigentlichen Roboter hinaus. So wird der IRB 460 mit dem Funktionspaket PalletPack 460 geliefert, einer Reihe vorkonfigurierter Produkte für das Palettieren am Ende von Verpackungslinien, die die Arbeit von Integratoren erheblich erleichtern.

Für die Hochleistungs-Lagenpalettierung bietet ABB den IRB 760. Mit einer Handhabungskapazität von 450 kg und einer Reichweite von 3,2 m zeichnet sich dieser Roboter durch ein hohes Trägheitsmoment am Handgelenk aus, das doppelt so hoch ist wie bei vergleichbaren Maschinen. Damit kann er schwerere und größere Produkte schneller drehen als jeder andere Roboter seiner Klasse. Dank seiner überragenden Geschwindigkeit ist der IRB 760 prädestiniert für die Palettierung kompletter Lagen wie Getränkekisten, Baumaterialien und Chemikalienfässer.

Fortschritte in der Steuerung

Die Steuerung des 1974 entwickelten IRB 6 bestand lediglich aus einem einzigen Intel 8008-Mikroprozessor mit 8 Bit, einer MMS mit vierstelliger LED-Anzeige und 12 Drucktasten sowie einer rudimentären Software für die Achseninterpolation und Bewegungssteuerung. Die Programmierung und Bedienung des Roboters erforderte speziell ausgebildete Fachleute. Vierzig Jahre und vier Generationen von Steuerungssystemen später bietet sich ein völlig anderes Bild: Die IRC5, die fünfte Generation der Robotersteuerung von ABB, ist speziell darauf ausgelegt, die Nutzung von Robotern und deren Integration in vorhandene Fabriken zu vereinfachen → 7.

Die IRC5 bietet eine überlegene Bewegungssteuerung und unterstützt eine schnelle Einbindung zusätzlicher Hardware. Die Bewegungssteuerungstechnologie mit TrueMove und QuickMove ist der Schlüssel zur hohen Leistungsfähigkeit der ABB-Roboter in Bezug auf Genauigkeit, Geschwindigkeit, Zykluszeit, Programmierbarkeit und Synchronisation mit externen Geräten. QuickMove ermittelt für jede Bewegung die höchstmögliche Beschleunigung und wendet sie auf mindestens eine Achse an, sodass die Endposition in der kürzestmöglichen Zeit erreicht wird. TrueMove stellt sicher, dass unabhängig von der Geschwindigkeit immer exakt die gleiche Bewegung ausgeführt wird, womit nach einer Veränderung der Geschwindigkeitsparameter im



Betrieb auf eine Feinabstimmung der Bahn verzichtet werden kann. Weitere Merkmale sind die bekannte FlexPendant-Schnittstelle von ABB mit Touchscreen und Joystick-Programmierung, die flexible Programmiersprache RAPID sowie leistungsstarke Kommunikationsfunktionen.

Vor Kurzem hat ABB eine Kompaktversion der IRC5 für Anwendungen auf den Markt gebracht, in denen der Platzbedarf minimiert werden muss, aber die volle Funktionalität der IRC5 gewährleisten sein muss.

Das Herzstück des Systems ist RobotWare mit einer Reihe optionaler Plugins zur Erweiterung der Funktionalität und Vereinfachung der Roboterbedienung. Dazu gehören u. a. Multitasking, die Übertragung von Informationen von Dateien auf den Roboter, die Kommunikation mit externen Systemen und erweiterte Bewegungsaufgaben.

Ein wesentliches Merkmal der IRC5 ist die Funktion MultiMove, mit der bis zu vier ABB-Roboter plus Werkstückpositionierer und andere Servogeräte – insgesamt bis zu 36 Achsen – vollständig koordiniert gesteuert werden können.

Die Einrichtung und Bedienung einer solchen Zelle mit mehreren Robotern und vollständig koordinierten Bewegungen ist zwar komplex, wird aber durch das FlexPendant, die weltweit erste offene Bedienerschnittstelle für Roboter,

die für die IRC5 entwickelt wurde, vereinfacht.

Robotersicherheit der nächsten Generation

Um die Sicherheit der Menschen zu gewährleisten, die mit Industrierobotern zusammenarbeiten, werden Mensch und Maschine traditionell durch Zäune und kostspielige Schutzvorrichtungen voneinander getrennt. Dank SafeMove von ABB kann zum Teil auf derartige Vorrichtungen verzichtet werden. SafeMove läuft auf einem unabhängigen Computer im Schaltschrank der IRC5 und ermöglicht eine zuverlässige, fehlertolerante Überwachung der Geschwindigkeit und Position des Roboters sowie die Erkennung ungewollter bzw. verdächtiger Abweichungen. Wird ein Sicherheitsrisiko erkannt, leitet SafeMove einen Nothalt ein, der den Roboter in Bruchteilen einer Sekunde zum Stillstand bringt.

FlexFinishing und Force Control

Ein weiterer Meilenstein in der jüngeren Geschichte der Robotertechnik ist das ABB FlexFinishing-System mit RobotWare Machining Force Control für feine Bearbeitungsvorgänge – insbesondere das Schleifen, Entgraten und Polieren von Gussteilen. Diese im Jahr 2007 vorgestellte Roboteranwendung enthält eine Programmierumgebung, die es dem Roboter ermöglicht, die optimale Bahn selbst zu finden. Dabei werden Werkzeuggeschwindigkeit und -druck über eine Rückkopplungsschleife geregelt.



Die Anwendung ermöglicht eine einfache und effiziente Programmierung, wobei der Kraftsensor zur Festlegung der Roboterbahn genutzt wird – der Bediener bewegt den Roboter einfach per Hand und gibt ihm so den groben Weg vor. Der Roboter tastet das Werkstück ab, zeichnet die genaue Bahn auf und generiert ein entsprechendes Programm.

Dieser innovative Ansatz verbessert nicht nur die Qualität der fertigen Teile, sondern verkürzt auch die Gesamtprogrammierungszeit um bis zu 80 %, reduziert die Zykluszeiten des Roboters um 20 % und verlängert die Lebensdauer der Schleifwerkzeuge um 20 %. Daneben stehen weitere Funktionspakete für Präzisionsarbeiten wie das Kleben zur Verfügung. Dieses Paket sorgt für eine perfekt koordinierte Roboterbewegung und Klebstoffdosierung bei gleichzeitiger Verfolgung des Förderbands durch Conveyor Tracking. Ein hochpräzises, konsistentes robotergestütztes Kleben/Dosieren erhöht nicht nur die Teilequalität, sondern verkürzt auch die Zykluszeiten → 8.

Computergestützte Programmierung

Im Laufe der Jahre erkannte man, dass es am einfachsten, schnellsten, genauesten und flexibelsten ist, Roboter zunächst an einem Computer im Büro zu programmieren, bevor man sich mit der „realen“ Ausrüstung befasst.

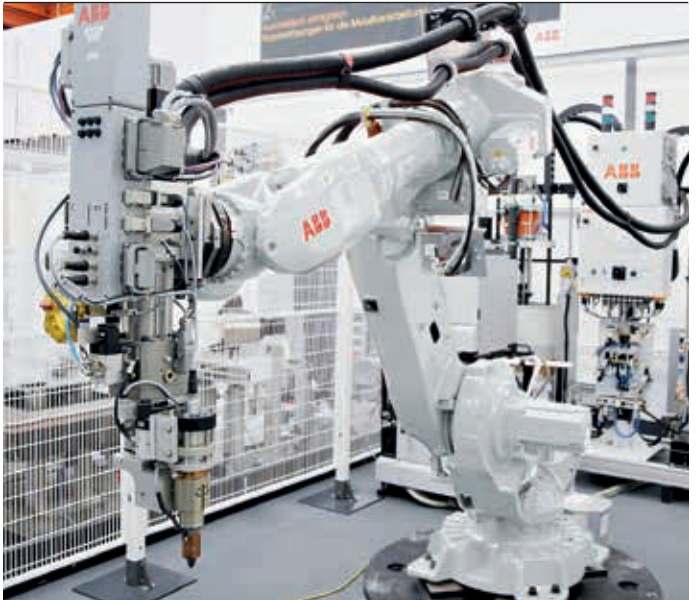


Dies ist die beste Möglichkeit, die Kapitalrendite von Robotersystemen zu maximieren, Kosten zu senken, Vorlaufzeiten zu verkürzen und hervorragende Endprodukte sicherzustellen.

ABB RobotStudio ermöglicht die Programmierung an einem Computer ohne Konstruktionsaufwand oder Störung der laufenden Produktion. Es vereinfacht die Roboterprogrammierung und erleichtert die Entwicklung von Lösungen für komplexe Produktionsumgebungen.

Unter allen computergestützten Lösungen zur Roboterprogrammierung ist RobotStudio einzigartig, denn es baut auf dem ABB Virtual Controller auf, einer exakten Kopie der realen Software, die auf den ABB-Produktionsrobotern läuft. Durch die Verwendung von echten Roboterprogrammen und Konfigurationsdateien, die denen im Produktionsbereich gleichen, wird sichergestellt, dass in der virtuellen Umgebung alles genau so abläuft wie später in der Realität.

Für Entwickler ist diese Art der Programmierung äußerst effizient und kann ohne Zeitdruck oder die Einschränkungen vorhandener Ausrüstung vorgenommen werden. Die einfachere Bedienung hilft dabei, Hindernisse bei der Integration von Robotern zu beseitigen, was sich für Kunden und Integratoren in reduzierten Kosten und kürzeren Vorlaufzeiten niederschlägt und somit praktisch zu einer sofortigen Kapitalrendite führt.



Sofort startklar

Einige der letzten Hindernisse bei der Implementierung von Robotertechnik können durch standardisierte Roboterzellen beseitigt werden. Statt eine Roboterzelle von Grund auf neu aufbauen zu müssen, bietet das FlexLean-Konzept von ABB dem Kunden eine kompakte Zelle, in der Roboter, Controller und Verkabelung auf

einander und die Schweißausrüstung. Der Kunde kann zwischen verschiedenen Produktionslösungen mit einem oder mehreren Robotern wählen. Alle internen Kabel werden bereits im Werk verlegt und angeschlossen. Auch hier sind sämtliche Zellenkomponenten auf einer gemeinsamen Plattform montiert, sodass keinerlei Engineeringaufwand vor Ort erforderlich

ist. Die Software ist zur Vereinfachung der Einrichtung und Bedienung bereits vorkonfiguriert. Als Paketlösung kann eine FlexArc-Zelle innerhalb einer Fabrik verschoben oder zwischen verschiedenen Fertigungsstandorten ausgetauscht werden.

Dies ermöglicht ein hochflexibles Anlagenlayout, das den heutigen Ansprüchen an eine schnelle Umstellung der Produktion gerecht wird.

Die Software des FlexPicker umfasst eine leistungsstarke Bewegungssteuerung mit integrierter Kameraführung und Bandverfolgung.

einer Plattform vormontiert sind. Für Automobilhersteller bietet FlexLean Zellen für die geometrische Montage und das Ausschweißen mit einer Reihe von vordefinierten Konfigurationen und einer breiten Palette an Roboterprodukten. Das Ergebnis sind Zellen, die so kosteneffizient sind, dass sie mit der manuellen Fertigung in Niedriglohnländern konkurrieren können.

Ein weiteres Produkt aus dem Angebot an standardisierten Roboterzellen von ABB ist FlexArc® → 9. Dieses Punktschweiß-Komplettpaket umfasst alle Komponenten, die für das robotergestützte Lichtbogenschweißen nötig sind: Roboter, die Robotersteuerung IRC5 zur Koordination eines oder mehrerer Roboter, Positionie-

Das Auge des Roboters

In den letzten zehn Jahren hat sich die Bildverarbeitungstechnologie enorm weiterentwickelt, und ABB hat erkannt, dass ein leistungsfähiges kamerageführtes Robotersystem dabei helfen kann, viele Herausforderungen im Bereich der Fertigung zu bewältigen.

Das ABB Integrated Vision System, das in vielen Branchen einsetzbar ist, bietet 50 leistungsstarke Bildverarbeitungswerkzeuge, Autofokus, integrierte Beleuch-



tung und Optik, schnellere Bilderfassung, Möglichkeiten zur Stromversorgung und Steuerung externer Beleuchtungsquellen sowie ausreichend Eingangs-/Ausgangskapazität für praktisch jedes Inspektionsszenario – und das alles in einem kompakten Gehäuse mit Schutzart IP67 → 10.

Die umfangreiche Bibliothek von Integrated Vision mit Befehlen zur Bildverarbeitung ist auch für Neueinsteiger einfach zu bedienen. Das 3-D-Offline-Programmierungswerkzeug RobotStudio von ABB bietet standardmäßig vordefinierte Bausteine zur einfachen Programmierung sowohl des Roboters als auch des Bildverarbeitungssystems.

Remote Services

Eine reduzierte Leistungsfähigkeit von Robotern kann erhebliche Auswirkungen auf die Produktion haben. Aus diesem Grund hat ABB Fernwartungstechnologien eingeführt und ein globales Servicenetzwerk mit 1.200 Spezialisten an über 100 Standorten in über 50 Ländern aufgebaut. Der installierte Bestand von über 230.000 ABB-Robotern bietet enorme Größenvorteile und ermöglicht die Bereitstellung erstklassiger Serviceleistungen zu überschaubaren Kosten – ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal von ABB auf dem Markt.

Bei der Fernwartung sendet die Steuerung Daten über den Roboter an ein Servicecenter, wo diese automatisch analysiert und von einem Experten überprüft werden. Dieser kann den Grund für einen Ausfall aus der Ferne feststellen und dem Kunden

rasche Unterstützung bieten. Auf diese Weise lassen sich viele Probleme ohne einen Besuch vor Ort lösen. Die automatische Analyse kann nicht nur im Falle einer Störung einen Alarm ausgeben, sondern auch bevorstehende Schwierigkeiten vorhersagen. Über das MyRobot-Onlineportal von ABB kann ein Kunde zudem jederzeit und von überall den Status seiner Roboter überprüfen und auf wichtige Wartungsinformationen zugreifen.

Das Zeitalter des Industrieroboters

Seit der ersten Einführung eines vollständig elektrischen, mikroprozessorgesteuerten Roboters durch ASEA im Jahr 1974 hat sich die Welt der Industrierobotik stark verändert – und die Geschwindigkeit der Veränderung nimmt weiter zu. ABB erwartet in diesem Jahr den Verkauf des 250.000. Roboters und ist bereit, auch weiterhin den Weg für neue Entwicklungen zu ebnen und ihr Angebot an Industrierobotern, Robotersteuerungen sowie der dazugehörigen Software und Serviceleistungen zu erweitern. In 40 Jahren hat sich die Positionsgenauigkeit von 1 mm auf 1 µ verbessert, die Bedienerschnittstellen haben sich von 4-stelligen LED-Anzeigen zu vollständigen Windows-basierten Touchscreen-Displays weiterentwickelt, und die Speicherkapazität ist von 8 KB auf mehrere Terabyte angewachsen. Gleichzeitig ist die Zuverlässigkeit deutlich gestiegen und die Kosten sind so weit gesunken, dass ein Roboter heute nicht einmal halb so viel kostet wie vor 10 Jahren. Das Zeitalter des Industrieroboters ist gekommen.

David Marshall

ABB Robotics
Milton Keynes, Großbritannien
david.marshall@gb.abb.com

Nick Chambers

ABB Robotics
Auburn Hills, MI, USA
nick.chambers@us.abb.com





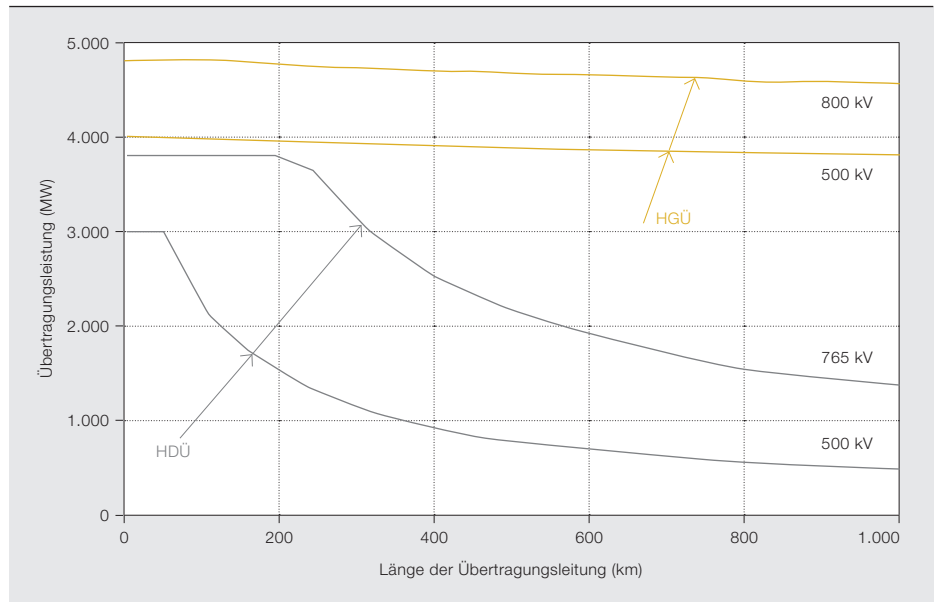
60 Jahre HGÜ

Der Weg von ABB vom Pionier zum Marktführer

ANDREAS MOGLESTUE – Wenn es um den sogenannten „Stromkrieg“ der 1880er Jahre zwischen Teslas Wechselstrom (AC) und Edisons Gleichstrom (DC) geht, wird oft angenommen, diese Frage sei ein für alle Mal geklärt. Dabei erlebt der Gleichstrom – bei höheren Spannungen, als sie sich Edison hätte vorstellen können – seit etwa 60 Jahren ein kontinuierliches Comeback. So ist die Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) mittlerweile ein unverzichtbarer Bestandteil von Übertragungsnetzen auf der ganzen Welt und erschließt immer neue Märkte. Die Geschichte von ABB ist eng mit der Geschichte der HGÜ verknüpft: Während die Vorgängerunternehmen zu den Pionieren auf diesem Gebiet gehörten, hat sich ABB nicht nur fest als Marktführer etabliert, sondern ist auch das einzige Unternehmen, das in der Lage ist, alle erforderlichen HGÜ-Komponenten wie Transformatoren, Umrichterstationen, Halbleiter, Kabel, Leitsysteme sowie das komplette Engineering bereitzustellen.

Titelbild

Die weltweit ersten HGÜ-Thyristorventile (Vordergrund) in Reihenschaltung mit den ursprünglichen Umrichtern (Hintergrund) auf Gotland (um 1970)



Die Übertragung von Strom über große Entfernungen erfordert hohe Spannungen. Da sich die ohmschen Verluste proportional zum Quadrat der Stromstärke verhalten, können die Verluste durch Verdoppelung der Spannung auf ein Viertel gesenkt werden. Das einfachste Mittel zur Erhöhung der Spannung sind Transformatoren. Zum Bedauern der Verfechter des Gleichstroms funktioniert das Transformationsprinzip jedoch nur mit Wechselstrom. Der Hauptbefürworter des Gleichstroms, Thomas Edison, gab sich jedoch nicht so leicht geschlagen. Statt sich dieser einfachen physikalischen Tatsache zu beugen, startete einen doppelten Gegenangriff. Zum einen lenkte er die Aufmerksamkeit auf die Gefahren hoher Spannungen und griff dabei mitunter auf grausige Methoden zurück (einmal ließ er einen Elefanten durch einen Stromschlag töten, und er trug zur Entwicklung des ersten elektrischen Stuhls bei). Als Alternative zur Hochspannungsübertragung propagierte Edison die lokale Stromerzeugung. Da die Grenze für eine rentable Übertragung von 110 V DC bei etwa 1,6 km lag, wäre in jedem Wohnviertel ein Kraftwerk erforderlich gewesen. Obwohl dies (besonders bei der damaligen Technik) zu einer hohen Luftverschmutzung in den Städten geführt hätte und allein der Gedanke aus moderner Perspektive

lächerlich anmutet, findet sich Edisons Idee heute im Konzept der Kleinerzeugung wieder, bei der Kunden selbst erzeugte Elektrizität (z. B. aus Solaranlagen) in das Netz einspeisen können.

Die zweite Komponente von Edisons Gegenangriff bestand darin, sich selbst an der Übertragung von Strom mit höheren Spannungen zu versuchen (trotz seines eigenen Protests gegen Hochspannung). Im Jahr 1889 installierte Edison eine 22 km lange Leitung von Williamette Falls nach Portland, Oregon (USA) mit einer Übertragungsleistung von 130 kW bei 4 kV. Diese Spannung wurde durch die

York City angeschlossen (die erst im darauffolgenden Jahr abgeschaltet wurde). Bedeutender allerdings ist die Tatsache, dass der Gleichstrom bereits zu Lebzeiten des Erfinders in Bereichen wie dem Schienenverkehr, der Aluminiumverhüttung und der Telekommunikation an Bedeutung gewann – Bereiche, in denen er noch heute eine wichtige Rolle spielt. Weitere Anwendungsbereiche, die in jüngerer Zeit hinzugekommen sind, sind die Datenverarbeitung und die Photovoltaik. Hinsichtlich der Stromübertragung und -verteilung erschien die Überlegenheit des Wechselstroms jedoch unangreifbar. Doch war sie das wirklich?

Bereits zu Edisons Lebzeiten gewann der Gleichstrom in vielen Bereichen an Bedeutung.

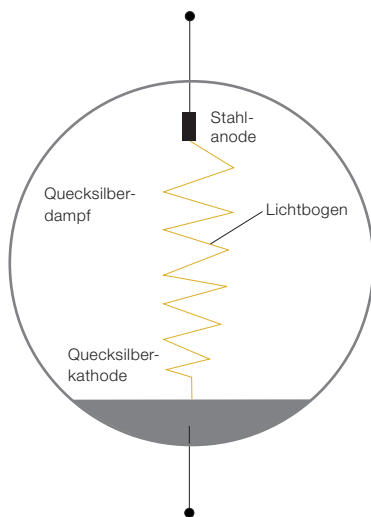
Nachteile von Wechselstrom

Trotzdem sich der Dreiphasen-Wechselstrom (Drehstrom) in der Stromübertragung und -ver-

teilung rasch durchsetzte, sind längere AC-Leitungen mit Nachteilen verbunden. Am schwersten wiegt hiervon das Phänomen der Blindleistung. Dies ist der Energiefluss, der durch das ständige Auf- und Abbauen der elektrischen und magnetischen Felder – bedingt durch die periodische Schwingung von Spannung und Strom – in der Leitung entsteht. Zwar geht diese Energie nicht direkt verloren (sie wird beim Abbau der Felder wieder freigesetzt), aber sie stellt eine zusätzliche Strom- und Spannungsbelastung dar, die sich auf die wirtschaftliche Übertragungsleistung der Leitung auswirkt. Da mit der

Reihenschaltung mehrerer Generatoren erreicht (ein Prinzip, das erstmals 1882 bei einer Ausstellung in München gezeigt wurde). Symptomatisch für den Niedergang des Gleichstroms, war auch die Leitung in Oregon von kurzer Dauer: 1890 wurde sie bei einer Überschwemmung stark beschädigt und anschließend durch Edisons Konkurrenten Westinghouse als AC-Anlage wieder aufgebaut.

Doch die Geschichte der DC-Übertragung war damit noch nicht zu Ende. Bis zum Jahr 2006 waren noch 60 Kunden an die DC-Versorgung von Edison in New



Länge der Leitung die Kapazität und Induktivität steigen, nimmt auch die Blindleistung zu, bis irgendwann ein Punkt erreicht ist, an dem eine kommerzielle Übertragung nicht mehr rentabel ist. Ironischerweise sind die physikalischen Gesetze, die die Transformation und damit die Hochspannungs-Wechselstromübertragung ermöglichen, die gleichen, die eine sinnvolle Übertragung entfernungsmäßig begrenzen → 1.

Für das Problem der Blindleistung gibt es Lösungen, z. B. sogenannte flexible Drehstrom-Übertragungssysteme (FACTS), die die Blindleistung kompensieren. Bei der DC-Übertragung hingegen tritt dieses Problem gar nicht erst auf, da die elektrischen und magnetischen Felder der Leitung gleichbleibend sind und nur einmal beim Einschalten der Leitung aufgebaut werden müssen.

Quecksilberdampfventile

Frühe Versuche zur Übertragung von Gleichstrom bei höheren Spannungen beruhten auf der Reihenschaltung von Generatoren oder rotierenden Umfor-

mern¹. Dieses Prinzip war allerdings mit mechanischen Beschränkungen verbunden und konnte wirtschaftlich nicht mit der Wechselstromübertragung mithalten.

Erst mit der Einführung des Quecksilberdampfventils² flammte das Interesse an der DC-Umwandlung wieder auf. Hierbei handelt es sich um einen geschlossenen, mit Quecksilberdampf gefüllten Glaskolben, der mit Stahlanoden und einer Quecksilberkathode bestückt ist → 2. Sobald ein Lichtbogen zwischen Anode und Kathode gezündet wird, führt der durch den Lichtbogen fließende Strom zu einer Erwärmung und Ionisation des Quecksilberdampfs. Am Übergang zwischen Lichtbogen und Quecksilber sorgen die auftreffenden Ionen dafür, dass Elektronen freigesetzt werden. Der Stahl kann Elektronen aufnehmen, aber bei der gegebenen Betriebstemperatur kaum Elektronen abgeben. Deshalb kann der Strom nur vom Stahl zum Quecksilber, aber nicht umgekehrt fließen. Das Quecksilberdampfventil hat also eine ähnliche Funktionsweise wie eine Diode und eignet sich somit zur Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom.

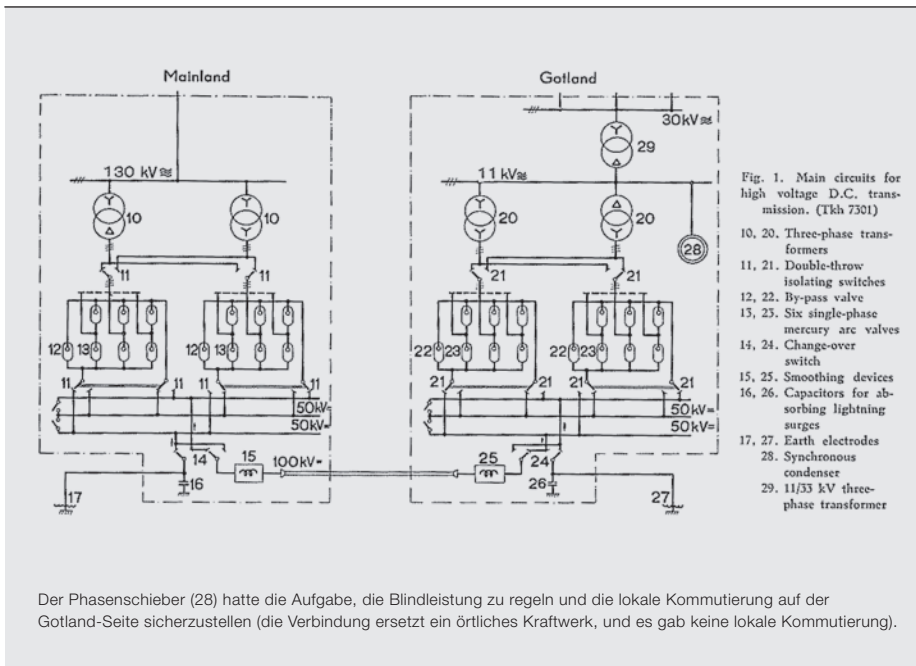
Da mit der Länge einer AC-Leitung die Kapazität und Induktivität steigen, nimmt auch die Blindleistung zu, bis eine kommerzielle Übertragung nicht mehr rentabel ist.

Fußnoten

- 1 Ein rotierender Umformer besteht aus einem Motor und einem Generator, die auf derselben Welle angeordnet sind. Mit mehreren rotierenden Umformern lassen sich Gleichspannungen erhöhen, indem die Motoren parallel und die Generatoren in Reihe geschaltet werden.
- 2 Mehr über Quecksilberdampfventile und die Rolle von ABB bei ihrer Entwicklung lesen Sie im Artikel „Vom Quecksilberdampf zum Leistungsschalter“ auf Seite 70–78 der ABB Review 2/2013.

Doch Quecksilberdampfventile können auch zur Umwandlung von Gleich- in Wechselstrom verwendet werden: Durch künstliches Zünden des Lichtbogens (mit Hilfe einer Drosselspule, die eine Spannungsspitze an einer Hilfselektrode erzeugt) kann die Leitfähigkeit zu einem beliebigen Zeitpunkt der Periode hergestellt werden.

4 Schaltbild der HGÜ-Verbindung nach Gotland mit den in Reihe geschalteten Umrichtern in beiden Stationen



ASEA Journal 1954, Seite 142

Die Gotland-Verbindung stellte ASEA vor viele Herausforderungen, zu denen auch die Überquerung der Meerenge gehörte.

Da mit ihnen beide Arten der Umwandlung vorgenommen werden konnten, ermöglichten Quecksilberdampfventile den Einsatz von Transformatoren, womit die Vorteile von Wechselstrom bei der Transformation mit den Vorteilen von Gleichstrom bei der Übertragung verbunden werden konnten.

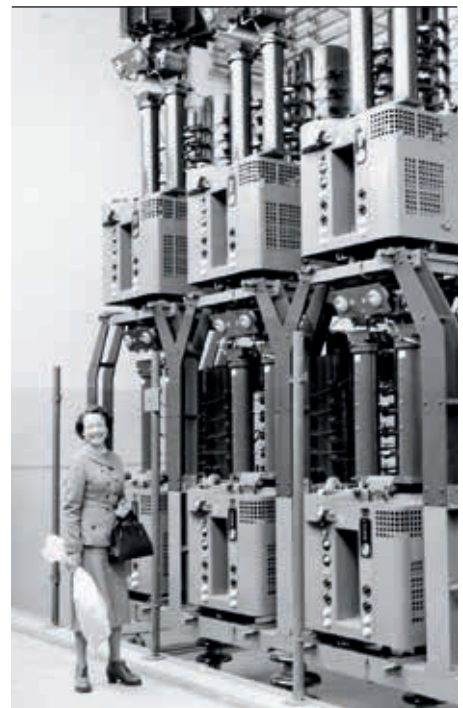
Das Quecksilberdampfventil wurde erstmals 1902 vom amerikanischen Erfinder Peter Cooper Hewitt vorgestellt. Das ABB-Vorgängerunternehmen BBC (Brown, Boveri & Cie) war führend in der Weiterentwicklung dieser Ventile und begann 1913 mit ihrer Kommerzialisierung. Die ersten Anlagen hatten jedoch nicht die Gleichstromübertragung zum Ziel, sondern wurden zur Gleichrichtung niedrigerer Spannungen (bis etwa 2.500 V) für Industrie- und Verkehrszwecke genutzt.³

Ein Problem, das mit der Erhöhung der Spannungen auftrat, war das der Rückzündung. Dazu kommt es, wenn durch eine Rückwärtsspannung in einem ungezündeten Ventil ein unerwünschter Lichtbogen in Sperrrichtung gezündet wird. Dies führt nicht nur zu einer Störung des Stromkreises, sondern kann das Ventil

Fußnote

³ BBC demonstrierte jedoch im Jahr 1939 in der Schweiz eine 25 km lange temporäre DC-Übertragungsanlage mit einer Leistung von 500 kW zwischen Wettingen und Zürich.

5 Die drei Ventile eines Umrichters für Gotland (mit Lamms Ehefrau Pamela)



auch dauerhaft beschädigen. Hier gelang dem anderen ABB-Vorgängerunternehmen ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget) der nächste Durchbruch. Im Jahr 1929 erhielt Uno Lamm → 3 ein Patent für die Unterdrückung von Rückzündungen mithilfe von Stufenelektroden. Dies sind Zwischenelektroden, die mit einem Spannungsteiler verbunden sind und verhindern, dass sich ein Lichtbogen in einem einzigen Zündvorgang von der Anode zur Kathode ausbreiten kann. Aufgrund dieser Errungenschaft und ihrer Folgen wird Lamm häufig als der „Vater der HGÜ“ bezeichnet.

Trotz dieses Patents war der Weg von der Grundidee bis zur zuverlässigen Umsetzung lang. Aufgrund des unvorhersehbaren Verhaltens von Lichtbögen basierte die Ventilentwicklung weitestgehend auf empirischer Forschung. Dabei konnten entsprechende Versuche mit hohen Leistungen zum Teil nur nachts durchgeführt werden, um eine Destabilisierung des Stromnetzes der Stadt Ludvika (in der sich das Entwicklungslabor befand) zu vermeiden.

Die schwedische Energiebehörde SSPB (heute Vattenfall) verfolgte die Fortschritte von ASEA mit großem Interesse. Anfang der 1940er Jahre war die Technik ausgereift genug für den Bau einer Versuchsumrichterstation. Als Standort wurde (aufgrund des nahegelegenen Kraftwerks)

ASEA begann Mitte der 1960er Jahre mit der Entwicklung von Thyristoren.

1954

ASEA JOURNAL

The first High Voltage D.C. Transmission with Static Convertors

Some Notes on the Development

U. Lamm. Manager Rectifier Dept.

U.D.C., 621.315.051.024
ASEA Reg. 4897, 730

The realisation of the high voltage D.C. transmission from the Swedish mainland to Gotland is a high point in a very extensive development work in Sweden, the beginnings of which can be traced back a long time.

The convertor valves, as the most critical part of a D.C. plant, have always formed the focus of this development work. The total scheme has, however, covered many other spheres such as convertor technique generally, the problems of earth return, cable construction and laying, interference with telecommunication circuits, corona phenomena on overhead lines, the behaviour of suspension insulators with direct voltage, etc.

The development of the valves can be said to have begun in 1929, when the first ASEA patent was applied for, dealing with the principle of grading electrodes interposed between anode and cathode of a mercury-arc valve in order to decrease the risk of arc-back at high inverse voltage. This principle of grading electrodes has been adhered to ever since. The work lay idle, however, during long periods when other tasks took priority in ASEA's rectifier department. In the thirties some rather primitive valves were tested in the laboratory, and although they had a short life, they clearly confirmed the usefulness of the grading electrodes.

It was not until 1939, however, that the material combination which was necessary for progress in the work on the valves became available. In 1942–45, experiments were carried out in the rectifier laboratory at Ludvika on complete rectifiers and inverters built up from valves having an anode structure fundamentally the same as is now used in the Gotland transmission. Owing to the limited resources of the factory's three-phase system, however, the tests could continue only for limited periods of time, mainly at night.

Sweden is a country where reliable and economical power transmission on a large scale is of great importance to industry and life in general. The bulk of the water power resources is situated in the northern part of the country, while the majority of the population is in the southern part. Within the State Power Board the possibilities of using high voltage D.C. for transmission were realised at an early stage. Although extensive and successful efforts were made to develop the three-phase A.C. system for higher capacity and voltage and better economy, the State Power Board unhesitatingly put their resources at the disposal of the engineers working on the development of high voltage D.C., and a period of close collaboration between the Board and ASEA started about 1942. One result was the building of

139

die Stadt Trollhättan gewählt. Die Bauarbeiten begannen 1943, und der Betrieb wurde 1945 aufgenommen. Hierzu wurde eine 50 km lange 90-kV-Leitung mit einer Übertragungskapazität von 6,5 MW nach Mellerud verlegt, wo eine weitere Umrichterstation erreicht wurde. Die Übertragungsleitung diente ausschließlich zu Versuchszwecken – eine Rolle, die sie bis zu Ihrer Außerbetriebnahme Ende der 1960er Jahre erfüllte.

Gotland

Im Jahr 1950 genehmigte das schwedische Parlament eine HGÜ-Verbindung zwischen der Insel Gotland und dem schwedischen Festland → 4–5. Der Bau der Leitung stellte ASEA vor viele Herausforderungen, zu denen nicht zuletzt die

Überquerung der Meerenge gehörte. Zu diesem Zweck wurde ein Unterwasserkabel entwickelt.

Am 7. März 1954 wurde die 200-A-Verbindung in Betrieb genommen – zunächst mit einer Spannung von 50 kV. Diese wurde am 26. Juli auf 100 kV verdoppelt, als das zweite Umrichterpaar in Reihe zugeschaltet wurde. Das Zeitalter der kommerziellen HGÜ hatte begonnen.

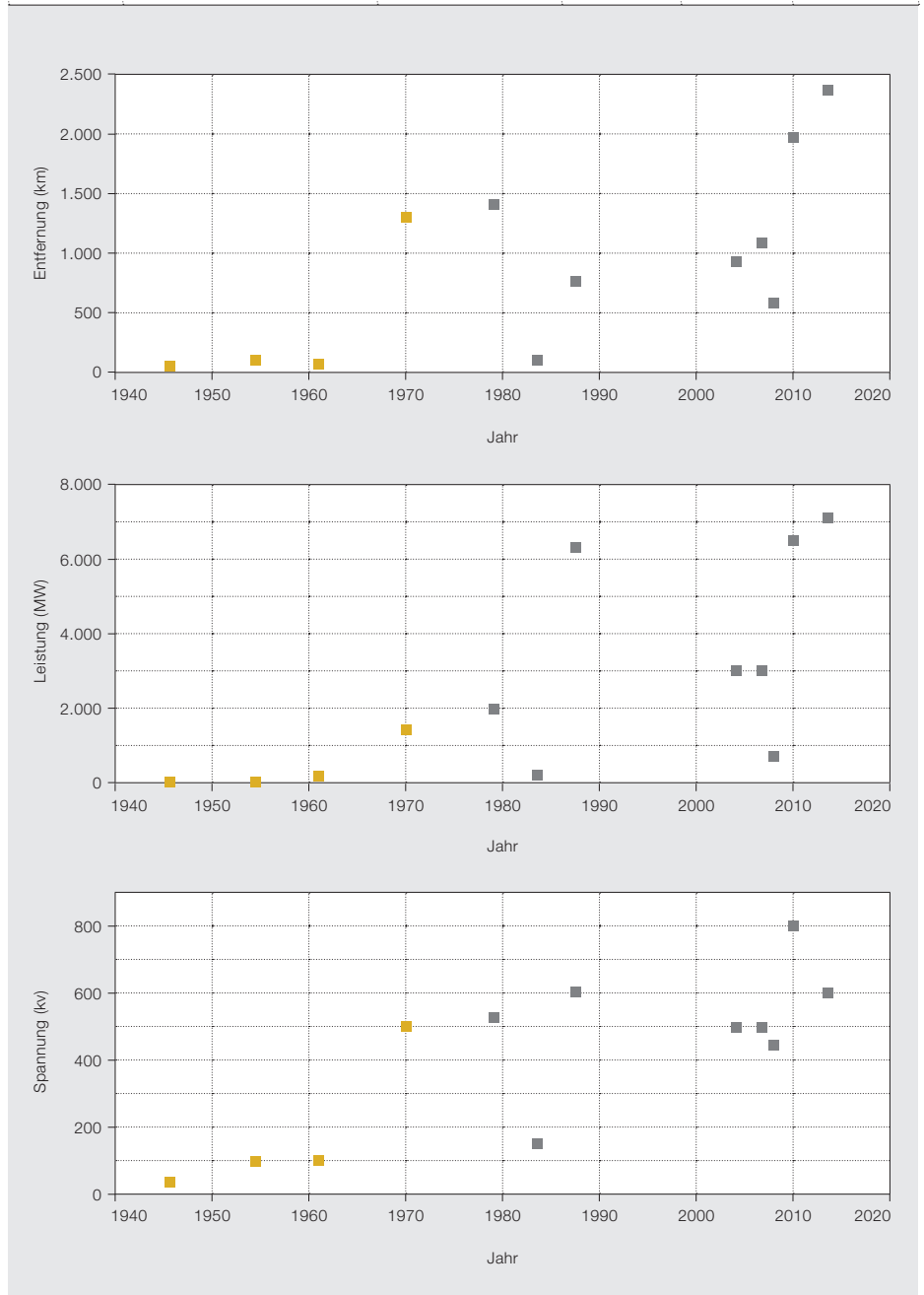
Das ASEA Journal widmete dem Ereignis einen von Lamm selbst verfassten Artikel → 6, der mit folgenden Worten beginnt:

„Die Realisierung der Hochspannungs-Gleichstromübertragung vom schwedischen Festland nach Gotland ist der

Als Alternative zur Hochspannungsübertragung propagierte Edison die lokale Stromerzeugung.

7 Eine Auswahl aus den zahlreichen HGÜ-Projekten von ABB. Das Unternehmen hat über die Hälfte der weltweit 170 Projekte realisiert.

Jahr	Projekt	Umrichter	Entfernung (km)	Leistung (MW)	Spannung (kV)
1946	Trollhättan–Mellerud (Testverbindung)	Quecksilberdampfventile	50	6,5	45
1954	Gotland 1		98	20	100
1961	Cross-Channel		64	160	100
1970	Pacific Intertie		1.300	1.440	500
1979	Cahora Bassa	Silizium	1.420	1.920	533
1983	Gotland 2		99	130	150
1987	Itaipu		780	6.300	600
2004	Dreischluchtendamm–Guandong		940	3.000	500
2007	Dreischluchtendamm–Shanghai		1.060	3.000	500
2008	NorNed		580	700	450
2010	Xiangjiaba–Shanghai		1.980	6.400	800
2013	Rio Madeira		2.375	7.100	600





Bei HVDC Light kommen Spannungszwischenkreis-Umrichter (VSCs) mit IGBTs zum Einsatz – eine Technologie, die von der industriellen Antriebstechnik abgeleitet ist.

Höhepunkt einer umfangreichen Entwicklungsarbeit in Schweden, deren Anfänge weit zurückreichen.“

„Die Stromrichterventile standen als wichtigster Teil einer DC-Anlage stets im Mittelpunkt dieser Entwicklungsarbeit. Das Gesamtprojekt umfasste jedoch viele weitere Bereiche wie die Stromrichtertechnik im Allgemeinen, die Probleme der Erdrückleitung, Kabelkonstruktion und -verlegung, Störungen von Telekommunikationssystemen, Koronaphänomene an Freileitungen, das Verhalten von Hängeisolatoren bei Gleichspannung usw.“

Der zweite Absatz würde in jede Publikation über HGÜ der letzten 60 Jahre passen, denn die für die Gotland-Verbindung festgelegten Grundprinzipien gelten noch heute. ASEA und später ABB haben sich auf allen genannten Gebieten eine umfassende Kompetenz aufgebaut. Tatsächlich ist ABB heute das einzige Unternehmen weltweit, das in der Lage ist, alle Teile eines HGÜ-Systems, angefangen von den Transformatoren, Umrichterstationen und ihren Komponenten bis hin zu den Kabeln, Leitsystemen und neuerdings auch den Leistungsschaltern, aus einer Hand anzubieten.

Das zweite kommerzielle HGÜ-Projekt von ASEA war eine 160-MW-Verbindung zwischen Großbritannien und Frankreich, die 1961 eingeweiht wurde. Weitere Projekte in Skandinavien sowie Ländern wie Italien, Japan, Kanada und Neuseeland folgten in den 1960er Jahren. Viele davon

beinhalteten eine Unterwasserverbindung mit Seekabeln. Der Höhepunkt der quecksilberdampfbasierten HGÜ war die Pacific Intertie, eine 1.300 km lange Verbindung mit einer Kapazität von 1.440 MW (ab 1982 1.600 MW) bei 500 kV zwischen Celio (Oregon) und Sylmar (Südkalifornien) in den USA, die in Zusammenarbeit mit General Electric (GE) gebaut und 1970 eingeweiht wurde.

Bis zur Einstellung der Entwicklungsarbeiten an Quecksilberdampfventilen im Jahr 1971 hatte ASEA diese Technik in Projekten mit einer Gesamtleistung von 3.400 MW eingesetzt → 7.

Thyristoren

In den 1960er Jahren tauchte eine neue Art von Ventil auf, die schließlich die Quecksilberdampftechnik ersetzen sollte → 8.

Das Prinzip des Thyristors wurde erstmals 1950 von William Shockley vorgestellt. Der Thyristor ist ein Halbleiterbauelement mit drei Anschlüssen (Anode, Kathode und Gate). Wie bei der Halbleiterdiode fließt der Strom nur in eine Richtung, da bei einer in Sperrrichtung angelegten Spannung die Ladungsträger aus der Sperrschicht abgezogen werden. Der Thyristor besitzt zusätzliche Schichten zwischen den p- und n-Bereichen, die normalerweise nicht leitfähig sind. Wird jedoch am Gate ein Zündstrom angelegt, wird dieser Bereich mit Ladungsträgern geflutet und somit leitfähig. Sobald der Strom fließt, werden von selbst Ladungsträger nachgeliefert, und der Gate-Strom

kann abgeschaltet werden. Die Leitfähigkeit bleibt so lange erhalten, bis der Hauptstrom unter einen Schwellenwert fällt. Der Thyristor ist in seiner Gesamtfunktion also vergleichbar mit einem einschaltbaren Quecksilberdampfventil. Er hat jedoch den Vorteil, dass er wesentlich kompakter ist, geringere Verluste aufweist und ohne gefährliches Quecksilber auskommt. Außerdem können mehrere Bauelemente zu Ventilen für höhere Spannungen in Reihe geschaltet werden.

ASEA begann Mitte der 1960er Jahre mit der Entwicklung von Thyristoren. 1967 wurde eine Versuchsumrichterstation an der Gotland-Verbindung errichtet. 1970 wurden Thyristorumrichter zur Erhöhung der Betriebsspannung auf 150 kV mit den vorhandenen Quecksilberdampfventilen in Reihe geschaltet → **Titelbild** (wobei das ursprüngliche Kabel beibehalten wurde, da es auch der höheren Spannung gewachsen war).⁴

Zu den in den 1970er Jahren realisierten HGÜ-Projekten gehören die Skagerak-Verbindung zwischen Norwegen und Dänemark, Inga-Shaba im Kongo, das CU-Projekt in Nord-Dakota (USA) und Nelson River 2 in Kanada.

Fußnote

- ⁴ Die Verbindung Gotland 1 war bis 1986 in Betrieb. Heute verbinden zwei HGÜ-Leitungen, Gotland 2 und 3, die 1983 bzw. 1987 in Betrieb gingen, die Insel mit dem Festland.

Bereits 1992 schlug ABB ein Netz aus HGÜ-Leitungen vor, das das vorhandene Stromnetz bei der Fernübertragung großer Leistungsflüsse entlastet.

9 Die Station Jingzhou der HGÜ-Verbindung vom Drei-Schluchten-Damm nach Guangdong



Zur Zeit der Quecksilberdampfventile war ASEA praktisch allein auf dem HGÜ-Markt, doch die umwälzende Neuerung, die durch die einfachere Arbeitsweise mit Thyristoren ausgelöst wurde, ebnete vielen neuen Mitbewerbern den Weg. BBC realisierte z. B. Mitte der 1970er Jahre zusammen mit Siemens und AEG die Verbindung Cahora Bassa zwischen Mosambik und Südafrika. ASEA reagierte auf die neue Konkurrenz und investierte in die Forschung, um ihren Führungsanspruch auf dem Gebiet der HGÜ-Thyristoren durchzusetzen.

Ein bedeutendes Projekt der 1980er Jahre war die von einem Konsortium aus ASEA und PROMON realisierte 6.300-MW-Verbindung von Itaipu in Brasilien, die zwischen 1984 und 1987 stufenweise in Betrieb genommen wurde. Etwa zur gleichen Zeit wurde mit der 2.000-MW-Verbindung zwischen Québec und Neuengland die weltweit erste HGÜ-Mehrpunktverbindung realisiert.

Im Jahr 1988 fusionierten ASEA und BBC zu ABB, und im Jahr 1995 führte das Unternehmen eine neue Generation von Umrichterstationen ein. Ein wesentliches Merkmal war der Einsatz von kondensatorcommutierten Stromrichtern (Capacitor Commutated Converter, CCC). Diese ermöglichten ein Abschalten der Ventile, ohne dass auf einen Nulldurchgang gewartet werden musste. Dies war die bedeutendste Veränderung in Bezug auf das Schalten seit 1954 und sorgte für eine verbesserte Regelbarkeit und eine

Reduktion der Blindleistung. Das erste Projekt, bei dem diese Technologie zum Einsatz kam, war die 2.200-MW-Netzkopplung zwischen Brasilien und Argentinien (Garabi) aus dem Jahr 1999.

ABB arbeitete weiter an einer Erhöhung der Spannungen und Übertragungsleistungen. Im Jahr 2004 wurde die 940 km lange HGÜ-Leitung vom Drei-Schluchten-Damm nach Guangdong (China) mit einer Kapazität von 3.000 MW bei ± 500 kV eröffnet → 9. Im Jahr 2007 kam eine 1.060 km lange Verbindung mit den gleichen Nenndaten vom Drei-Schluchten-Damm nach Shanghai hinzu. 2010 wurde die 1.980 km lange UHGÜ-Verbindung (Ultrahochspannungs-Gleichstromübertragung) Xiangjiaba–Shanghai mit 6.400 MW bei ± 800 kV in Betrieb genommen, gefolgt von der 2.375 km langen Verbindung Rio Madeira in Brasilien mit 7.100 MW.

Doch bei der HGÜ geht es nicht nur um immer höhere Leistungen und immer größere Entfernungen. Ganz in der Tradition der Gotland-Verbindung eignet sich die HGÜ auch hervorragend für Unterwasserverbindungen. Hier bietet die HGÜ bereits bei Entfernungen von einigen Dutzend Kilometern (aufgrund der höheren Kapazität geschirmter Kabel gegenüber Freileitungen) Vorteile gegenüber der Hochspannungs-Drehstromübertragung (HDÜ) → 10. So wurde 2008 eine Entfernung von 580 km zwischen Norwegen und den Niederlanden mithilfe der HGÜ unter Wasser überbrückt.

10 Verladung der Kabel für die HGÜ-Verbindung Fenno Scan auf ein Schiff. Die Verbindung wurde 1989 fertiggestellt.



11 Montage eines HVDC Light Offshore-Moduls auf einer Ölplattform in der Nordsee



HVDC Light

Im kleineren Maßstab kann die HGÜ auch zur Anbindung von Offshore-Windparks oder zur Versorgung von Öl- und Gasplattformen eingesetzt werden → 11. Für niedrigere Leistungsklassen hat ABB in den 1990er Jahren die HVDC-Light®-Technologie eingeführt. Anstelle von Thyristorventilen kommen dabei Spannungszwischenkreis-Umrichter (Voltage Source Converters, VSCs) mit IGBTs zum Einsatz – eine Technologie, die von der industriellen Antriebstechnik abgeleitet ist. Dank der besseren Regelbarkeit, der Möglichkeit zur Blindleistungsregelung und der Schwarzstartfähigkeit eignet sich HVDC Light zum Anschluss an Inselnetze ohne lokale Kommutierung, aber auch zur Entlastung bzw. Stabilisierung vorhandener AC-Netze. Die kompakte Bauweise der HVDC-Light-Komponenten erlaubt zudem die Unterbringung von Umrichterstationen in Containern, die in einem Stück angeliefert werden und so die Prüfung und Inbetriebnahme vereinfachen.

HGÜ-Netze

Die Stromnetze von morgen stehen vor vielen neuen Herausforderungen. Dazu gehört nicht zuletzt die radikale Veränderung der Erzeugungslandschaft. Traditionelle Kraftwerke wurden meist in der Nähe der Verbrauchszentren errichtet,

doch angesichts der rasch zunehmenden Nutzung erneuerbarer Energien kommt heute immer mehr Strom aus entlegenen Regionen. Dieser muss über große Entfernungen und häufig durch Gegenden mit schwachen Netzen übertragen werden, die keine zusätzlichen Lasten bewältigen können. Bereits 1992 schlug Gunnar Asplund von ABB ein Overlay-Netz aus HGÜ-Leitungen vor, das das vorhandene Stromnetz überlagert und bei der Übertragung großer Leistungsflüsse über weite Entfernungen entlastet.

Doch die Realisierung eines DC-Stromnetzes ist nicht so einfach, wie es klingt. Das größte technische Hindernis bestand bisher im Fehlen eines geeigneten Leistungsschalters. In AC-Netzen werden Leistungsschalter verwendet, um Leistungsabschnitte z.B. im Falle einer Störung schnell und sicher zu isolieren, ohne den Rest des Netzes zu beeinträchtigen. Beim Öffnen eines AC-Leistungsschalters fließt über einen Lichtbogen zwischen den Kontakten weiterhin Strom bis zum nächsten Nulldurchgang. Da es beim Gleichstrom keine Nulldurchgänge gibt, ist eine andere Lösung erforderlich, deren Fehlen lange Zeit die Entwicklung komplexerer HGÜ-Netztopologien verhindert hat. Im Jahr 2012 ist es ABB schließlich gelungen, dieses Problem mit dem DC-Hybridschalter zu lösen. Dieser nutzt eine Kombination aus Halbleitern und mechanischen Schaltern, um den Gleichstromfluss auf schnelle und sichere Weise zu unterbrechen.⁵

DC oder AC?

Wer hat nun den Stromkrieg wirklich gewonnen? Der Gleichstrom dringt zwar zunehmend in Bereiche vor, die traditionell dem Wechselstrom vorbehalten waren, er kann aber den Wechselstrom niemals vollständig ersetzen. Vielleicht sprechen wir in 120 Jahren von einem Unentschieden, und künftige Geschichtsbücher würdigen Tesla und Edison gleichermaßen.

Andreas Moglestue

ABB Review

Zürich, Schweiz

andreas.moglestue@ch.abb.com

Weiterführende Literatur

U. Lamm: „The First High Voltage D.C. Transmission with Static Convertors: Some Notes on the Development“. *ASEA Journal* 1954: 139–140

I. Lidén, E. Uhlmann, S. Svidén: „The Gotland D.C. Link: The Layout of the Plant“. *ASEA Journal* 1954: 141–154

R. Wetzel (2001): „Die Geschichte des Quecksilberdampfgleichrichters bei BBC Deutschland 1913–1963“. Doktorarbeit an der Universität Stuttgart

G. Asplund, L. Carlsson, O. Tollerz: „50 Jahre HGÜ: ABB – vom Pionier zum Weltmarktführer“. *ABB Technik* 4/2003: 6–13

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

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

G. Asplund, L. Carlsson: „HGÜ: ABB – vom Pionier zum Weltmarktführer“. *ABB Technik* 4/2008: 59–64

Fußnote

⁵ Siehe auch „Durchbruch! Der ABB HGÜ-Hybrid-schalter – ein innovativer Durchbruch auf dem Weg zu zuverlässigen HGÜ-Netzen“ auf Seite 6–13 der *ABB Review* 2/2013.

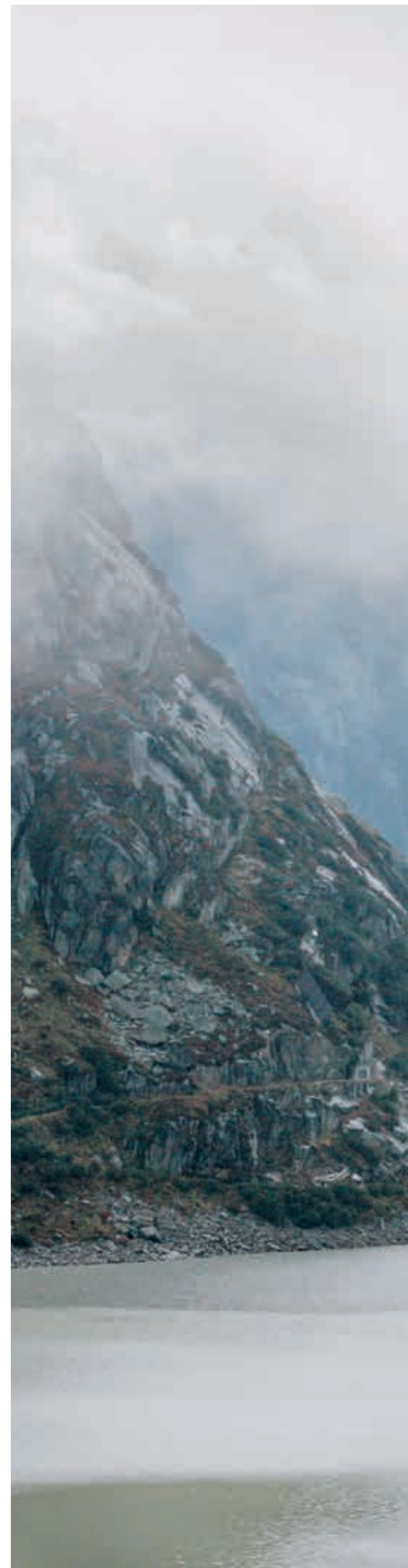
Effizienter Pumpen

Ein 100-MW-Umrichter für das Pumpspeicherwerk Grimsel 2

HANS SCHLUNEGGER – Die Wasserkraft ist eine der ältesten zur Stromerzeugung genutzten Energieformen – und eine der flexibelsten. Da Wasser in einem Becken gespeichert und bei Bedarf abgelassen werden kann, eignet sie sich ideal zur Deckung von Bedarfsschwankungen. Kombiniert man diese Art der Nutzung mit der Pumpspeicherung (d. h. überschüssige Energie wird gespeichert, indem Wasser in das Reservoir gepumpt wird), lässt sich die Funktion des Speichers erweitern. So kann ein Pumpspeicherwerk durch Aufnahme bzw. Bereitstellung der zur Stabilisierung des Netzes erforderlichen Energie auch zur Netzregelung eingesetzt werden. Um die Effizienz im Pumpbetrieb zu verbessern, hat die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) im Pumpspeicherwerk Grimsel 2 im Berner Oberland in den Schweizer Alpen kürzlich einen 100-MW-Umrichter von ABB in Betrieb genommen.

Titelbild

Die Kraftwerke Oberhasli AG besitzt neun Kraftwerke im Berner Oberland mit einer installierten Leistung von 1.125 MW und einer Jahresproduktion von 2.200 GWh. Die Speicherseen haben einen jährlichen Zufluss von 700 Mio. m³ und eine Speicherkapazität von 200 Mio. m³.





Mit 100 MVA ist dies der leistungsstärkste Frequenzumrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis, der bisher geliefert wurde.

Die Pumpspeicherung wird zur Glättung von Lastspitzen (Peak Shaving) eingesetzt, d. h. in Zeiten geringen Bedarfs wird überschüssige Energie zum Pumpen genutzt, um die so gespeicherte Energie in Spitzenlastzeiten wieder in Strom zu verwandeln. Indem sie die extremen Spitzen und Täler in der Bedarfskurve mildert, hilft die Pumpspeicherung dabei, die Abhängigkeit von anderen (häufig umweltbelastenden) Energiequellen zur Deckung der Bedarfsspitzen zu reduzieren.

Neben der Überbrückung dieser klassischen Lücke zwischen Tag und Nacht kann die Pumpspeicherung zur Integration erneuerbarer Energien beitragen. Während immer mehr Strom aus Wind- und Sonnenenergie ins Netz eingespeist wird, kann die Unberechenbarkeit und Unbeständigkeit dieser Quellen mithilfe von Pumpspeicherwerken kompensiert werden, sodass die Verbraucher auch dann Energie aus erneuerbaren Quellen nutzen können, wenn die Sonne nicht scheint und kein Wind weht.

Über ihre Rolle als Massenspeicher hinaus können Pumpspeicherwerke auch zur Netzregelung beitragen, indem sie die relativ kleinen Mengen an Leistung aufnehmen oder bereitstellen, die zu einem präziseren Ausgleich von Angebot und Nachfrage erforderlich sind. Damit dies auf effiziente Weise geschieht, muss die Leistungsaufnahme bzw. -abgabe mit hoher Präzision geregelt werden.

Grimsel 2

Das Pumpspeicherwerk Grimsel 2 der KWO in der Schweiz → 1–2 verfügt über vier Synchrongeneratoren → 3. Bis vor Kurzem war die Fähigkeit des Kraftwerks zur Leistungsregelung vom Anfahren und Abschalten der einzelnen Maschinensätze abhängig. Wenn eine mittlere Leistungsaufnahme erforderlich war, konnte die Differenz nur dadurch ausgeglichen werden, dass eine zusätzliche Einheit im Generatorbetrieb gefahren wurde. Gleichzeitig zu pumpen und Strom zu erzeugen, bedeutet nicht nur eine ineffiziente Nutzung der Energie, sondern auch eine Vergeudung der wertvollsten Ressource des Kraftwerks – des Wassers.

Um die Leistungsaufnahme des Kraftwerks effizienter regeln zu können, entschied sich die KWO, einen der Generatoren von Grimsel 2 mit einem leistungselektronischen Frequenzumrichter auszurüsten. Im Jahr 2010 erhielt ABB den Auftrag hierfür, und 2013 wurde die Anlage in Betrieb genommen.

Gleichzeitig zu pumpen und Strom zu erzeugen, ist nicht nur ineffizient, sondern auch eine Vergeudung der wertvollsten Ressource des Kraftwerks – des Wassers.

Der Umrichter

Mit 100 MVA handelt es sich um den leistungsstärksten Frequenzumrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis, der bisher geliefert wurde → 4. Er besteht aus zwei Teilen gleicher Leistung (je 50 MW) mit je einem Transformator am Ein- und Ausgang → 5. Die gewählte Konfiguration besteht aus zwei in Reihe geschalteten Stromrichter-Blöcken auf der Netz- und Motorseite. Die Stromrichter-Blöcke wie-

1 Pumpspeicherwerk Grimsel 2

Leistung im Turbinenbetrieb	4 × 80 MW
Leistung im Pumpbetrieb	4 × 90 MW
Mittlere Förderhöhe	400 m
Wasserdurchfluss	4 × 22 m³/s
Synchrondrehzahl	750 U/min
Bauzeit	1973-80

2 Die Stauseen von Grimsel 2 auf einen Blick

	Name	Höhe über Meeresspiegel gefüllt (m)	Volumen gefüllt (106 m³)	Oberfläche (km²)	Größte Tiefe (m)
Oberes Reservoir	Oberaarsee	2.303	58	1,47	90
Unteres Reservoir	Grimselsee	1.908	101	2,63	100

3 Die vier Synchrongeneratoren des Kraftwerks Grimsel 2



derum bestehen aus einer Parallelschaltung von zwei Doppelphasenmodulen mit IGBTs (Integrated Gate-Commutated Thyristor). Insgesamt sind in der Umrichteranlage 24 Doppelphasenmodule verbaut.

Die Einheit kann in einem Leistungsbe-
reich von 60 bis 100 MW stufenlos be-
trieben werden (die minimale Leistung ist
durch die Kavitationsgrenze des Pumpen-
laufrads) gegeben.

Startvorgang

Im Turbinenbetrieb und im unregelmäßigen Pumpbetrieb wird die Maschinengruppe mit der Turbine angefahren → 6. Der Blocktransformator wird durch den Generator aufmagnetisiert und nach Erreichen der Synchronisierungsbedingungen auf der 220-kV-Ebene zugeschaltet. Im geregelten Pumpbetrieb müssten der Blocktransformator und die beiden netzseitigen Stromrichtertransformatoren direkt eingeschaltet werden, was zu sehr hohen Einschaltstromspitzen führen würde. Um dies zu vermeiden, wird der Gleichspannungs-Zwischenkreis des Umrichters vom Magnetisierungs-Transformator über die Dioden des motorseitigen Stromrichters aufgeladen. Anschließend werden die Transformatoren durch den netzseitigen Stromrichter auf-

magnetisiert und schließlich synchronisiert. Der ganze Vorgang dauert nur etwa 10 Sekunden. Anschließend wird die Maschine durch den Umrichter bei gefüllter Pumpe gegen den geschlossenen Kugelschieber → 6d auf 600 U/min beschleunigt. Nach dem Öffnen des Kugelschiebers wird die Drehzahl auf die für die aktuelle Förderhöhe erforderliche minimale Leistung geregelt. Dies entspricht einer Drehzahl von ungefähr 690 U/min.

Leistungsregelung

Der Sollwert der Wirkleistung wird entweder von Hand oder der übergeordneten Kraftwerksregelung eingestellt. Diese regelt die Leistung aller Kraftwerke der KWO nach dem vorgegebenen Fahrplan. Der Sollwert der Netzregelung wird zum Fahrplan-Sollwert addiert. Leistungs- und Drehzahlregelung des Umrichters bilden eine Regelkaskade. Die Wirkleistung wird begrenzt durch die aktuelle Förderhöhe und die maximale Leistung des Umrichters.

Die Blindleistung wird über einen Spannungsregelkreis geregelt. Der Sollwert wird entweder von Hand oder der übergeordneten Spannungsregelung des 220-kV-Netzes eingestellt. Die Wirkleistung hat Vorrang vor der Blindleistung.

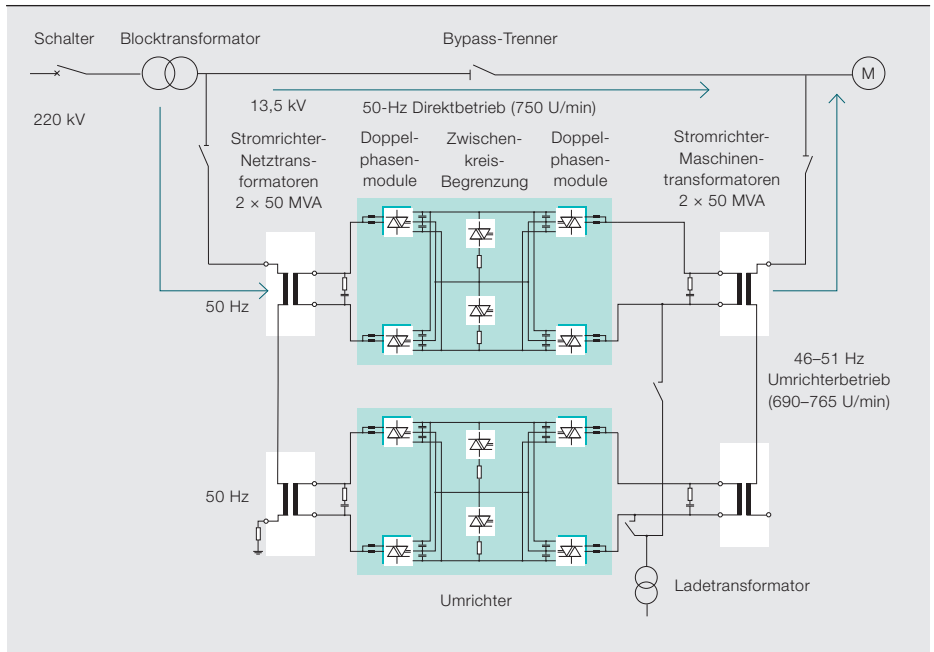
4 Der 100-MW-Umrichter



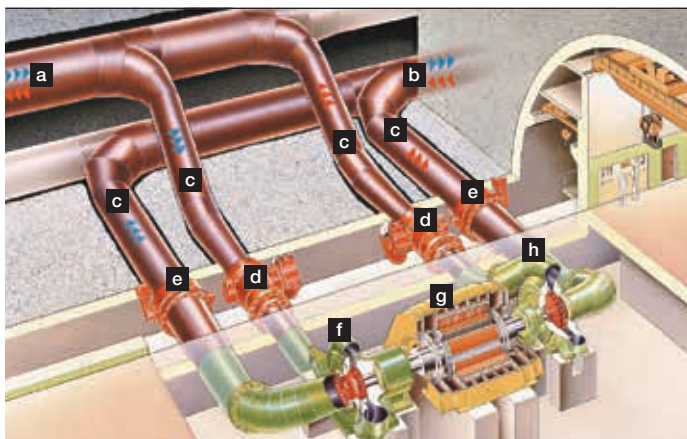
Bis Ende März
2014 hat der Um-
richter 3.500 Stun-
den im geregelten
Pumpbetrieb und
850 Stunden im
Phasenschieber-
betrieb gearbeitet.

Neue Pumpspeicherwerke mit Pumpturbinen werden fast ausnahmslos mit drehzahlvariablen Antrieben und doppelt gespeisten Asynchronmotoren ausgerüstet.

5 Schaltbild des Umrichters

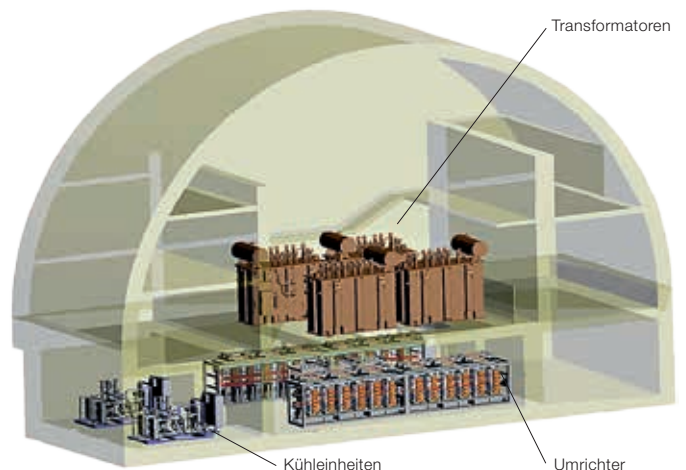


6 Die Turbine mit ihren Verbindungen



- | | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| a Druckschacht zum/vom Oberaarsee | d Kugelschieber | <p>▶▶ Turbinenbetrieb</p> <p>◀◀ Pumpbetrieb</p> |
| b Druckschacht zum/vom Grimselsee | e Drosselklappe | |
| c Verteilungen | f Turbine | |
| | g Pumpe | |
| | h Generator/Motor | |

7 Die Maschinenkaverne mit dem Standort der Transformatoren und des Umrichters



Betriebsarten

Folgende Betriebsarten können gefahren werden:

- Turbinenbetrieb
- Pumpbetrieb ohne Umrichter (konstante Drehzahl)
- Pumpbetrieb mit Umrichter (variable Drehzahl)
- Phasenschieberbetrieb des Umrichters

Ein Turbinenbetrieb mit Umrichter wurde nicht in Erwägung gezogen, da eine Drehzahlanpassung der Francis-Turbine an die relativ kleine Schwankung der Förderhöhe die Verluste des Umrichters nicht kompensieren würde.

Projektablauf

Der Zeitplan zur Lieferung und Montage der Umrichteranlage richtete sich nach den gleichzeitig stattfindenden Erneuerungsarbeiten. Diese umfassen: Revision der hydraulischen Maschinen, Kugelschieber und Drosselklappen, Erneuerung der Leittechnik, Ersatz von Turbinenregler und Erregereinrichtung sowie Ersatz der 220-kV-Schaltanlage.

Die Umrichteranlage konnte in der bestehenden Kaverne platziert werden → 7-8. Die vier Transformatoren wurden auf der Höhe des Maschinensaalbodens installiert und die Stromrichtereinheiten im Untergeschoss, wo sich auch die mit

dem bestehenden Kühlwassernetz verbundene Kühlanlage befindet.

Betriebserfahrungen

Die Anlage ist seit Mai 2013 in Betrieb und hat bis Ende März 2014 3.500 Stunden im geregelten Pumpbetrieb und 850 Stunden im Phasenschieberbetrieb gearbeitet → 9.

Ausblick

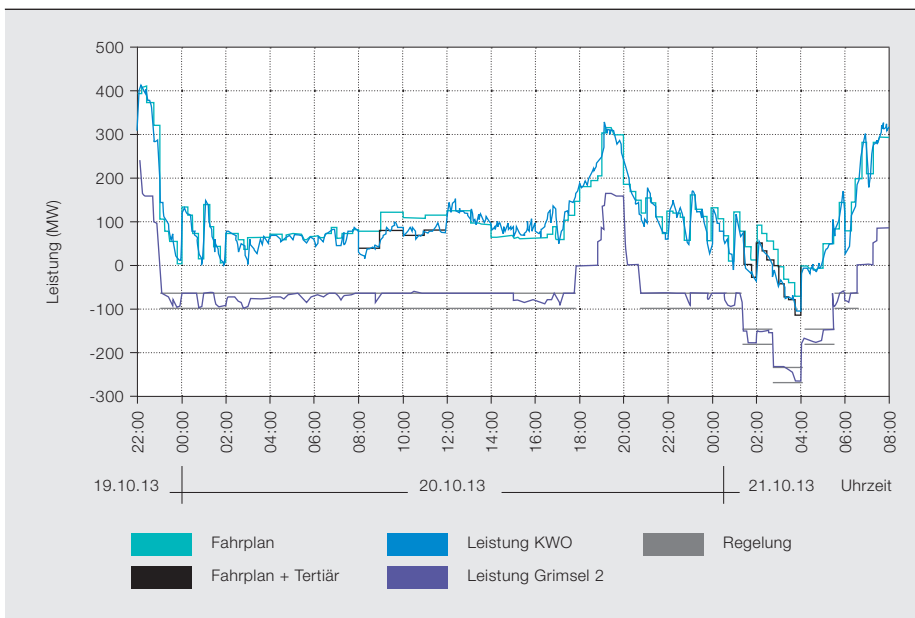
Neue Pumpspeicherwerke mit Pumpturbinen werden fast ausnahmslos mit drehzahlvariablen Antrieben ausgerüstet. Dem Stand der Technik entsprechend werden doppelt gespeiste Asynchronmotoren eingesetzt. Diese Bauart weist jedoch einige Nachteile auf: Der komplex aufge-

8 Der Umrichter konnte im Untergeschoss der Maschinenkaverne untergebracht werden.



Trotz Fortschritten mit anderen Speichertechnologien bleibt die Pumpspeicherung die einzige ausgereifte und erschwingliche Art der Energiespeicherung, die sich zur Netzregelung eignet.

9 Der Umrichter ermöglicht eine genaue Regelung der Anlagenleistung.



baute Rotor stößt an konstruktive Grenzen und schränkt die in Bezug auf die Pumpturbine optimale Drehzahl nach oben ein. Zudem ist der Anfahrvorgang wesentlich komplizierter und muss teilweise sogar mit entleerter Pumpturbine erfolgen. Auch die Anforderungen der Netzanschlussregeln (Grid Code) sind schwieriger zu erfüllen. In Zukunft dürften deshalb vermehrt Synchronmaschinen mit Vollumrichter zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund bietet die Ausrüstung eines bestehenden Pumpspeicherwerkes mit einem Vollumrichter eine ideale Gelegenheit, diese zukunftsweisende Technik in reellem Maßstab zu erproben. Die bisherigen Erfahrungen mit der Anlage im Pumpspeicherwerk Grimsel 2 sind sehr

vielversprechend. Trotz Fortschritten mit anderen Speichertechnologien bleibt die Pumpspeicherung die einzige ausgereifte und erschwingliche Art der Energiespeicherung, die sich zur Netzregelung eignet und wird somit eine wichtige Rolle in der Erzeugungslandschaft von morgen spielen. Der neue Umrichter am Grimselsee ist ein Beitrag zur Schweizer Energiestrategie 2050, deren Ziel die langfristige Sicherstellung der Schweizer Energieversorgung bei gleichzeitigem Ausbau der erneuerbaren Energien ist.

Der vorliegende Artikel basiert auf dem Beitrag „100 MW-Vollumrichter im Pumpspeicherwerk Grimsel 2“, der im Electrosuisse Bulletin 3/2014 veröffentlicht wurde.

Hans Schlunegger

Kraftwerke Oberhasli AG
Innertkirchen, Schweiz
hans.schlunegger@kwo.ch

Für ABB-bezogene Anfragen wenden Sie sich bitte an Fritz Wittwer (fritz.wittwer@ch.abb.com) oder Steve Aubert (steve.aubert@ch.abb.com).

Weiterführende Literatur

G. Sydnor, R. Bhatia, H. Krattiger, J. Mylius, D. Schafer: „Fifteen years of operation at NASA's National Transonic Facility with the world's largest adjustable speed drive“. NASA-Archiv

J. Hell, M. Egretzberger, R. Schürhuber, A. Lechner, Y. Vaillant: „Full size converter solutions for pumped storage plants, a promising new technology“. Hydro2012, Bilbao, Spanien, 2012

H. Schlunegger, A. Thöni: „100 MW Full-Size Converter in the Grimsel 2 Pumped Storage Plant“. Hydro 2013



Das Kraftpaket

Optimiertes Motor-
design setzt neue
Maßstäbe in puncto
Leistungsdichte

THOMAS EK, KARITA FORSS, TIMO HOLOPAINEN, JANNE IKONEN, OLLI LAHTINEN – ABB hat eine neue Generation von Elektromotoren auf Basis der erfolgreichen rippengekühlten Hochleistungsmotoren vom Typ HXR auf den Markt gebracht. Die neuen Motoren mit der Bezeichnung „rippengekühlte Hochspannungsmotoren Typ NXR“ erreichen ein neues Maß an Leistungsdichte und zeichnen sich durch eine verbesserte innere und äußere Kühlung, eine optimierte Wicklungsherstellung, ein innovatives Gehäuse sowie eine beispiellose Anpassungsfähigkeit und Wartungsfreundlichkeit aus. Das Design bietet eine verbesserte Lösung für eine Vielzahl von Anwendungen, in denen normalerweise vollständig geschlossene, oberflächengekühlte Motoren eingesetzt werden. Dank der höheren Leistungsdichte kann so häufig die gleiche Leistung mit einem Motor mit geringerer Baugröße erreicht werden. Zunächst werden die Motoren in den Baugrößen 355 und 400 angeboten.



Die Motoren setzen neue Maßstäbe in der Industrie und vervollständigen gleichzeitig die bestehende Baureihe.

Alle rotierenden elektrischen Maschinen erzeugen aufgrund der entstehenden elektrischen und mechanischen Verluste Wärme. Diese Verluste sind besonders hoch beim Anlassen und steigen mit zunehmender Last. Daher ist eine Kühlung notwendig, die die Wärme kontinuierlich auf ein Kühlmedium, z. B. die Umgebungsluft, überträgt. Tatsächlich ist die Kühlung für Motoren so bedeutend, dass verschiedene Kühlmethoden für rotierende Maschinen offiziell in einer IEC-Norm definiert sind.

Seitens der Industrie gab es stets die Forderung nach kompakteren und leistungstärkeren Motoren. Dies stellt die Motorenhersteller vor die Herausforderung, ein Motordesign zu entwickeln, das mechanisch kleiner und leistungstärker ist, aber gleichzeitig kühl bleibt. Doch das ist nicht alles: Der Motor sollte auch vibrationsarm, wartungsfreundlich und so flexibel gestaltet sein, dass er einfach in Betrieb zu nehmen ist.

Die hier beschriebenen neuen ABB-Motoren sind das Ergebnis einer langen Forschungs- und Entwicklungsarbeit, bei der verschiedene Parameter optimiert wurden, um sicherzustellen, dass die Moto-

ren neue Maßstäbe in der Industrie setzen und gleichzeitig die bestehende Baureihe vervollständigen. Sie liefern nicht nur mehr Leistung pro Kilogramm als bis-

Die Innovation, die am meisten zur Verbesserung des Wirkungsgrads beigetragen hat, ist das Kühlsystem.

herige Designs, sondern bieten auch längere Wartungsintervalle und eine höhere Flexibilität.

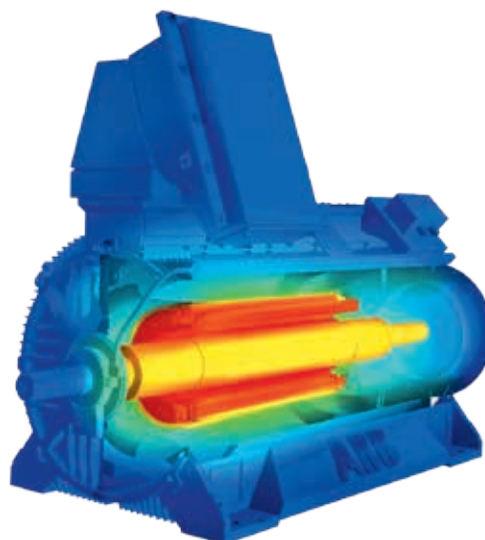
Innovative Kühlung

Die Innovation, die am meisten zur Verbesserung des Wirkungsgrads des Motors beigetragen hat, ist das Kühl-

Titelbild

Durch Optimierung von Kühlung, Wicklungen und Guss kann mehr Motorleistung in ein kleineres Volumen gepackt werden. Auch Wartung und Inbetriebnahme werden vereinfacht.

Auch die Wicklung wurde durch Neu-dimensionierung und effektivere Nutzung des aktiven Materials verbessert. Das Ergebnis ist eine kompaktere Wicklung mit höherer Leistung.



system. Da sich der thermische Wirkungsgrad nur schwer vorhersagen lässt, analysierte das Entwicklungsteam vorhandene Motoren, erstellte Strömungssimulationsmodelle (CFD-Modelle), führte Simulationen in Zusammenarbeit mit

Die Endschilde des Motors sind besonders stabil und leicht und besitzen eine innere Oberfläche, die die Zirkulation der Kühlluft begünstigt. Außerdem wurde das Zusammenspiel zwischen den Kühlkanälen und den äußeren Kühlflächen

optimiert, sodass sie sich nicht gegenseitig beeinträchtigen. Während die meisten Motoren vier Luftkanäle besitzen, kommt der neue Motor mit drei Kanälen aus.

Das innovative Kühlsystem von ABB erhöht die Luftströmung durch den Motor und leitet die Luft lüftergestützt durch Kanäle im Stator und Rotor.

Optimierte Kühlrippen

Eine Maßnahme zur Verbesserung der

externen Partnern durch und entwickelte analytische Berechnungsmethoden für das endgültige Design. Ferner mussten die CFD-Modelle durch reale Messungen verifiziert und korrekt interpretiert werden, um die Modelle und Berechnungen in funktionsfähige Motoren umzusetzen. Bei diesem Schritt spielten das Wissen und die Erfahrung des ABB-Teams und seiner Partner eine entscheidende Rolle.

Das innovative Kühlsystem von ABB erhöht die Luftströmung durch den Motor und leitet die Luft lüftergestützt durch Kanäle im Stator und Rotor → 1. Ein interner Lüfter ist zwar auch Bestandteil anderer Motoren von ABB, er wurde aber bisher nie so effizient genutzt.

äußeren Kühlung war die Optimierung der Kühlrippen in Anzahl, Länge, Abstand und Winkel. Außerdem wurden alle störenden Hindernisse beseitigt → 2. Die Bolzen und Schrauben zur Befestigung der Endschilde wurden z. B. so konzipiert, dass der Luftstrom nicht behindert wird. Eine Kabelführung sorgt dafür, dass Hilfskabel gut verstaут sind, während das Design der Rippen eine einfache Reinigung ermöglicht. Die Befestigungspunkte sind so positioniert, dass Zubehör an der Seite des Motors montiert werden kann, ohne den Luftstrom zu beeinträchtigen. Ferner ist der Außenring des Endschilds zur effektiveren Lenkung des Luftstroms um 30° abgeschrägt.



Die Rippen wurden in Anzahl, Länge, Abstand und Winkel optimiert, und alle störenden Hindernisse wurden beseitigt.

Die zur Optimierung der Kühlung durchgeführte Forschungsarbeit ist auch bei der Modellierung von Nutzen, die für die kundenspezifische Anpassung einzelner Motoren erforderlich ist. Eine vollständige CFD-Modellierung kann Stunden oder gar Tage dauern, doch Parameter von der CFD-Modellierung und den durchgeführten Messungen können zur raschen Berechnung der Temperaturveränderungen für ein bestimmtes Motordesign genutzt werden. Mithilfe präziserer Temperaturvorhersagen kann der Motor genau auf seine Anforderungen zugeschnitten werden, was wiederum eine bessere Performance gewährleistet.

Reduzierte Vibrationen

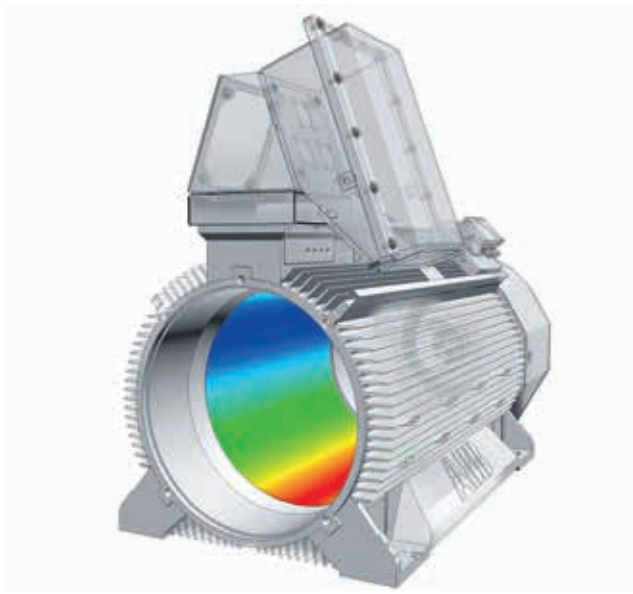
Da die neuen, leistungsstärkeren Motoren länger sind als ihre Vorgänger, waren zusätzliche Arbeiten notwendig, um sicherzustellen, dass die größere Länge nicht zu stärkeren Vibrationen führt. Auch hier wurden mehrere Designs am Computer erstellt, doch die virtuelle Prototypenerstellung – in diesem Fall mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) – lieferte keine zufriedenstellende Vorhersage zu den Eigenschaften des neuen Designs. Also wurden reale Modelle von Komponenten wie Rotor, Stator und Endschilden gefertigt und gemessen. Anschließend wurden die FEM-Modelle anhand der Messdaten für jede Komponente validiert. In einem iterativen Verfahren wurden schließlich die wirksamsten Designs ermittelt. Das endgültige Design verhindert alle bedeu-

tenden Resonanzen, die durch mechanische und elektrische Anregung verursacht werden können → 3.

Eine höhere Steifigkeit hilft, Vibrationen zu reduzieren. Eine Möglichkeit, die Steifigkeit zu erhöhen, besteht darin, die Abmessungen der Befestigungsbohrungen in Längs- und Querrichtung zu vergrößern. Noch entscheidender für die Steifigkeit war jedoch die Optimierung des mechanischen Designs.

Das Ziel dieser Optimierung bestand darin, den Materialeinsatz zu reduzieren, aber trotzdem den Vibrationsanforderungen der wichtigsten Industriestandards gerecht zu werden. In der Vergangenheit wurde einfach mehr Metall verwendet, um die gewünschte Steifigkeit zu erreichen – eine Lösung, die heute nicht mehr akzeptabel ist. Festigkeit und Steifigkeit müssen durch intelligente Formgebung des Materials und nicht durch zusätzliche Masse erreicht werden. Doch das Design der verschiedenen Elemente eines Motors ist keine exakte Wissenschaft. Das Panel zwischen den beiden Füßen erfüllt z.B. zwei Zwecke: Es enthält einen der drei Luftkanäle und hilft dabei, die horizontalen Kräfte vom Stator in die Füße zu leiten. Die optimale Größe für die Luftöffnungen an beiden Enden auf der Innenseite des Luftkanals oder die optimale Stärke des Gusseisens zu berechnen, ist nicht einfach – besonders, wenn die verwendete Materialmenge und das Gewicht des Motors reduziert werden sollen. Zusam-

Die zur Optimierung der Kühlung durchgeführte Forschungsarbeit ist auch bei der kundenspezifischen Anpassung einzelner Motoren von Nutzen.



men mit Lieferanten hat das Entwicklungsteam ein Gießverfahren erarbeitet, das die Designanforderungen erfüllt und den Materialeinsatz optimiert.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Modellierung des neuen Motors berücksichtigt wurde, war die Funktion des Motors auf verschiedenen Fundamenten, denn eine häufige Ursache für Probleme mit Vibrationen ist die Wechselwirkung zwischen dem Motor und dem Fundament, auf dem er steht. So ist es ein erheblicher Unterschied, ob ein Motor auf einem Betonsockel oder auf einem Stahlrahmen montiert ist. Der neue ABB-Motor kann auf einer Vielzahl verschiedener Fundamente eingesetzt werden.

Verbesserte Wicklungsherstellung

Auch die Wicklung wurde durch Neu-dimensionierung und effektivere Nutzung des aktiven Materials verbessert. Ein kompakteres Wicklungsdesign bedeutet eine höhere Leistungsabgabe. Neue Werkzeuge wurden entwickelt, die eine bessere Kontrolle beim Formen der Wickelköpfe während der Herstellung ermöglichen. Dadurch konnten die Qualität und Wiederholbarkeit verbessert werden, sodass jede Wicklung nun noch perfekter ist, als es vorher möglich war.

Das neue Verfahren zur Wicklungsherstellung zeigt bereits Auswirkungen auf die Produktionsmethoden für andere ABB-Motorbaureihen.

Eine verbesserte Kühlung verlängert die Lebensdauer und die Wartungsintervalle des Motors, weil die Lager seltener geschmiert werden müssen.

Höhere Montageflexibilität

Eine der offensichtlichsten Innovationen ist die Möglichkeit zur Montage des Hauptklemmenkastens auf beiden Seiten bzw. an beiden Enden des Motors. Bei der Baugröße 400 kann er zusätzlich in der Mitte montiert werden. Um die Position des Kastens zu verändern, muss dieser lediglich gegen die Abdeckung an der gewünschten Position getauscht werden → 4.

Die Montage des Hilfsklemmenkastens ist ebenfalls äußerst flexibel. Dieser kann auf beiden Seiten des Motors und an verschiedenen Stellen entlang der Längsseite montiert werden.



Das endgültige Design verhindert alle bedeutenden Resonanzen, die durch mechanische und elektrische Anregung verursacht werden können.

Ändert sich das Layout der Fabrik, muss nicht gleich ein neuer Motor angeschafft werden, nur weil der Stromanschluss nun auf der anderen Seite liegt. Besonders in Industrien, in denen Motoren auf beiden Seiten einer Produktionslinie eingesetzt werden (z. B. in der Metall- und Papierindustrie), können die Reserveanforderungen so mit einem statt mit zwei Ersatzmotoren erfüllt werden. Die erforderlichen Veränderungen am Motor müssen nicht bei ABB durchgeführt werden, sondern können von ABB-Servicemitarbeitern vor Ort vorgenommen werden.

Das Grunddesign des Motors bietet eine Vielzahl integrierter Optionen, die dabei helfen, Vorlaufzeiten zu verkürzen. So sind die Endschilde z. B. für die Aufnahme von Zubehör wie Altfettkammern und Instrumentierung vorbereitet, was eine schnellere und einfachere kundenspezifische Anpassung ermöglicht.

Wartungsfreundlichkeit

Eine verbesserte Kühlung verlängert die Lebensdauer und die Wartungsintervalle des Motors, weil die Lager aufgrund der niedrigeren Temperaturen seltener geschmiert werden müssen.

Um sicherzustellen, dass Probleme frühzeitig behandelt werden, kann der neue Motor zusätzlich mit dem ABB-Zustandsüberwachungssystem ABB MACHsense-P oder dem Fernüberwachungssystem ABB MACHsense-R ausgerüstet werden. Dazu

verfügt der Motor über Vorrichtungen zur Installation von Überwachungsgeräten.

Darüber hinaus können die Wickelköpfe ohne Entfernen der Lagerschilde inspiziert werden. Eine Untersuchung der Lager selbst ist ebenfalls bei montierten Lagerschilden mit einem Endoskop möglich.

All dies trägt zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Senkung der Kosten bei.

Mehr Leistung und Know-how pro Kilogramm

Dank seiner innovativen Merkmale kann der neue Motor vom Typ NXR häufig die gleiche Ausgangsleistung bieten wie ein Motor, der eine oder sogar zwei Baugrößen größer ist. In extremen Fällen ist sogar eine Gewichtsreduzierung von 40 % möglich.

Die neuen Motoren verbinden die über 100-jährige Erfahrung von ABB auf diesem Gebiet mit neuesten Design- und Fertigungsverfahren. Doch die hier beschriebenen Entwicklungen kommen nicht nur dieser Motorenbaureihe zugute. Die neue Wicklung wird bei ABB bereits an anderer Stelle genutzt, und die neuen Entwicklungen im Bereich der Kühlung werden mit Sicherheit Einfluss auf andere Kühlkonzepte haben. Auch die Berechnungswerkzeuge, die aus der virtuellen Prototypenstellung abgeleitet und durch Messungen an realen Prototypen bestätigt wurden, werden innerhalb von ABB Anwendung finden.

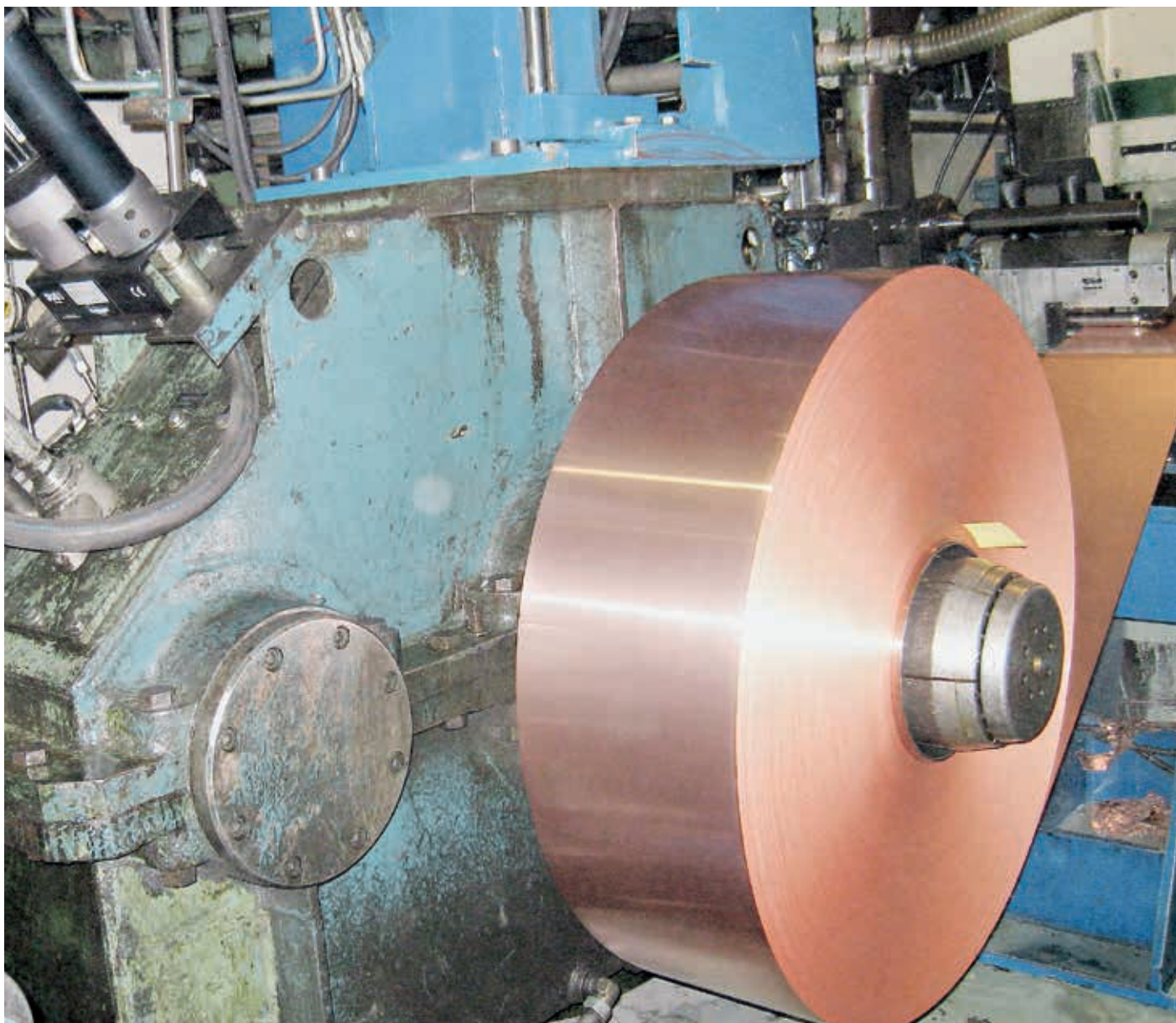
Die neue Motorbaureihe, die zurzeit auf die Baugrößen 355 und 400 ausgerichtet ist, soll bald um weitere Baugrößen und zusätzliche Merkmale erweitert werden.

Thomas Ek

ABB Motors and Generators
Västerås, Schweden
thomas.ek@se.abb.com

Karita Forss

Timo Holopainen
Janne Ikonen
Olli Lahtinen
ABB Motors and Generators
Helsinki, Finnland
karita.forss@fi.abb.com
timo.holopainen@fi.abb.com
janne.ikonen@fi.abb.com
olli.lahtinen@fi.abb.com

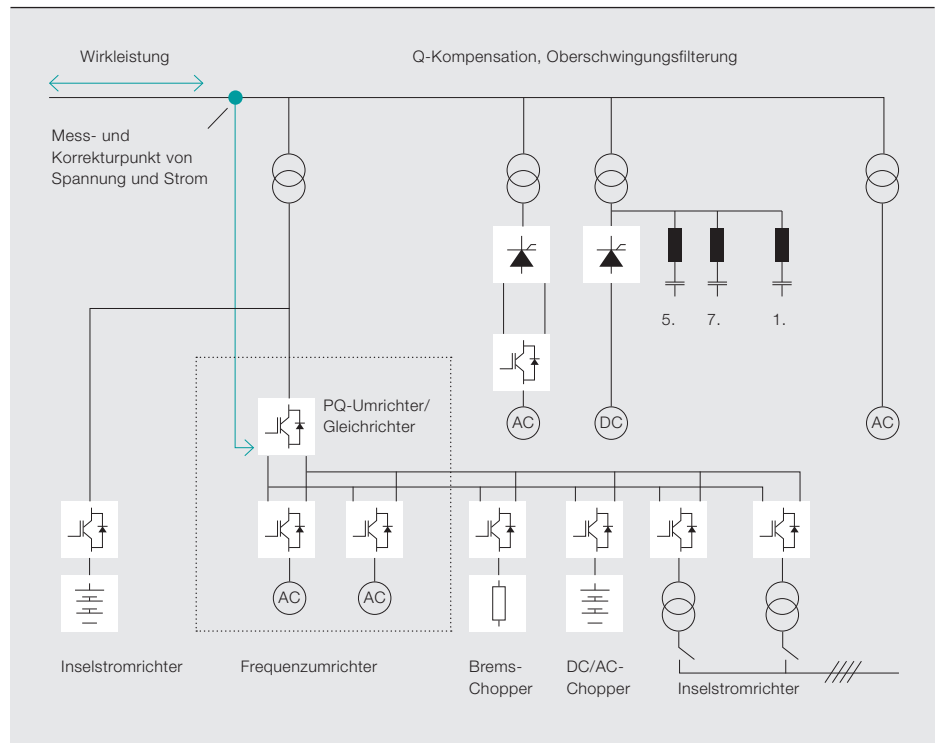


Multitalent

Die Leistungselektronik des ACS800 kann mehr als nur Motoren antreiben

REIJO KOMSI – Industrieantriebe treiben im wahrsten Sinne des Wortes die Räder der Wirtschaft an. Darum sind elektrische Antriebe und die Technik, die sie steuert, äußerst wichtige Produkte für die Industrie. Dort, wo mehrere Antriebe in einem einzigen Prozess eingesetzt werden – z. B. in einer Papiermaschine – und die einzelnen Antriebsmotoren miteinander gekoppelt werden müssen, bietet sich der Einsatz eines sogenannten Multidrive an, der alle Motoren regelt. Der ACS800 Multidrive von ABB ist so ein Gerät. Dazu enthält der ACS800 hochentwickelte Software und Leistungselektronik, die den Leistungsfluss zum Antrieb regelt. Mit der geeigneten Anwendungssoftware ist das Leistungselektronikmodul jedoch in der Lage, mehr zu leisten. So kann es z. B. zur Korrektur der Versorgungsqualität beitragen und eine absichtliche Inselbildung unterstützen.

1 Schaltbild eines standardmäßigen ACS800 Multidrive. Inselstromrichter, Brems-Chopper, DC/DC-Chopper und Energiespeicher können ebenfalls konfiguriert werden.



Der Multidrive-Ansatz findet in weiten Teilen der Industrie erfolgreich Anwendung. Statt viele Antriebe getrennt zu betreiben, können Produkte wie der ACS800 von ABB mehrere Antriebe regeln und deren Kopplung ermöglichen. Dies spielt besonders in Prozessen wie der Papierherstellung eine wichtige Rolle, wo viele Antriebe eng miteinander gekoppelt sein müssen, um über den gesamten Produktionsprozess hinweg eine hohe Produktqualität zu gewährleisten. Diese und auch weniger eng gekoppelte Anwendungen profitieren außerdem von den weiteren Vorteilen des ACS800 Multidrive wie einem geringeren Platzbedarf, Einsparungen bei den Verkabelungs-, Installations- und Wartungskosten, einer geringeren Anzahl von Komponenten und einer höheren Zuverlässigkeit – sowie der Implementierung von allgemeinen Sicherheits- und Regelungsfunktionen, die durch die gemeinsame Einspeisung des ACS800 Multidrive ermöglicht werden.

Der ACS800 Multidrive umfasst eine Gleichrichtereinheit und zwei oder mehr Frequenzumrichter, die mit einem gemeinsamen Gleichspannungs-Zwischenkreis (DC-Zwischenkreis) verbunden sind → 1. Die fortschrittlichste Gleichrichtereinheit ist eine IGBT-Einspeiseeinheit (ISU), die aus einem aktiven Leistungsteil ähnlich

dem des Frequenzumrichters besteht. Diese unterstützt einen bidirektionalen Wirkleistungsfluss und ermöglicht z.B. die Rückspeisung regenerativer Bremsenergie in das Netz. Außerdem ist die harmonische Verzerrung eines aktiven Gleichrichters deutlich geringer als bei einem Dioden- oder Thyristorgleichrichter. Der Grundbaustein des Gleichrichters – sechs IGBTs (Integrated Gate Bipolar Transistor) und sechs Freilaufdioden – kann durch Implementierung entsprechender Software auch für andere Zwecke genutzt werden. Zwei hiervon sollten im Folgenden beschrieben werden: die Korrektur der Versorgungsqualität (Power Quality, PQ) und die absichtliche Inselbildung.

Korrektur der Versorgungsqualität

Die PQ-Korrekturfunktionen ermöglichen die Kompensation von Blindleistung und die aktive Filterung von Oberschwingungen. Vier der wichtigsten Oberschwingungsströme – der fünfte, siebte, elfte und dreizehnte – können gefiltert werden → 2.

Die PQ-Korrektur ist möglich, wenn die Einheit gleichzeitig Wirkleistung für die Motorantriebe bereitstellt. Die Spannungs- und Strommessung sowie der Korrekturpunkt können auf der Niederspannungs- (NS-) oder auf der Mittelspannungsseite (MS-Seite) liegen. Letzteres ist allerdings vorteilhafter, da die Blindleistung des Transformators bzw. der Transformatoren berücksichtigt wird. Spannung und Strom werden mithilfe

Der Grundbaustein des Gleichrichters kann durch Implementierung entsprechender Software auch für andere Zwecke genutzt werden.

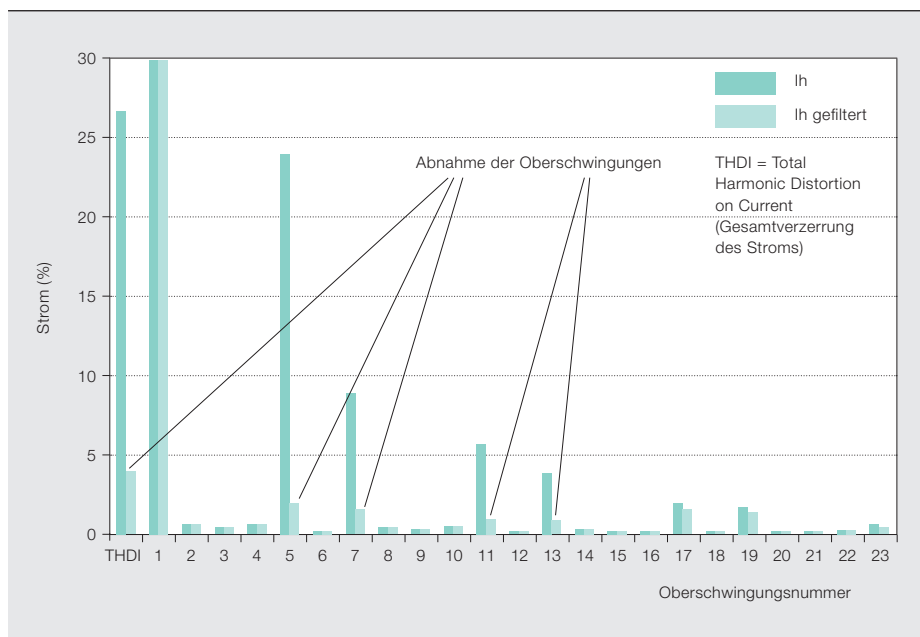
einer speziellen Messplatine gemessen. Die Analyse, Sollwerterzeugung und Regelung erfolgt dann intern, ohne dass eine Kommunikation mit der externen Automatisierung erforderlich ist → 1.

Titelbild

Der ACS800 von ABB ermöglicht die ausgeklügelte Regelung von Industriemotoren wie dem hier abgebildeten. Die Leistungselektronik des ACS800 kann aber auch für andere Aufgaben genutzt werden.

Die PQ-Korrekturfunktionen ermöglichen die Kompensation von Blindleistung und die aktive Filterung von Oberschwingungen.

2 Reduzierte Oberschwingungen



Die PQ-Korrektur kann auch parallel mit passiven Filtern als eine Art hybrider Kompensator genutzt werden. So sind die erforderlichen Gesamtinvestitionen geringer, aber das Leistungsvermögen ist ebenso gut wie bei einer vollständigen aktiven Korrektur.

Durch die Kompensation von Blindleistung und Oberschwingungsströmen können die MS-Ströme erheblich – in einem Referenzfall sogar um 45 % – reduziert werden. Dies bedeutet eine geringere Belastung in MS-Übertragungsleitungen und -Transformatoren, einen höheren $\cos\phi$ -Wert, geringere harmonische Verzerrungen und eine höhere Kapazität der MS-Leitungen. Die Reduktion der Blindleistung macht sich direkt in Form von Einsparungen auf der Stromrechnung bemerkbar. Außerdem führt eine geringere Blindleistung zu geringeren Spannungsschwankungen und somit zu einem niedrigeren Flicker-Index.

Absichtliche Inselbildung

Die andere hier beschriebene Regelungssoftware ermöglicht die Nutzung des ACS800-Leistungsteils als Inselstromrichter, d.h. zur Erzeugung einer robusten, sinusförmigen, dreiphasigen Spannung, ähnlich einem rotierenden Generator, für den Prozess. Absichtliche Inselbildung ist die bewusste Teilung des Stromnetzes bei Störungen zur Schaffung von „Versorgungsinseln“, die die durchgängige Versorgung eines kritischen Prozesses aufrechterhalten.

Die dafür erforderliche Energie kann von jeder beliebigen Gleichstromquelle, z.B. einem gleichgerichteten Wechselstromnetz, einer Windturbine, einem Dieselgenerator, einer Solarzelle, Brennstoffzelle oder Batteriebank, stammen. Der Batteriespeicher kann direkt auf den DC-Zwischenkreis oder über einen DC/DC-Chopper geschaltet werden. Der gemeinsame DC-Zwischenkreis vereinfacht die Verteilung der Leistung auf die Prozessantriebe. Das gleiche Konzept kann in Smart-Grid-Anwendungen genutzt werden, wenn keine Übertragungsleitungen zur Verfügung stehen aber ein Bedarf an Strom zur Versorgung von „Inselnetzen“ besteht. In Smart-Grid-Anwendungen spielt der batteriebasierte Energiespeicher eine wichtige Rolle zum Ausgleich der dezentralen Erzeugung und dem Verbrauch des Inselnetzes → 3.

Normalerweise wird Notstrom (aus Batterien) benötigt, um einen Fehler im Versorgungsnetz zu überbrücken oder Zeit zum Anfahren von Reserve-Dieselgeneratoren zu gewinnen. Die Dimensionierung des Energiespeichers hängt dabei von der jeweiligen Topologie, dem tatsächlichen Leistungsbedarf und der Reservezeit ab.

Der Energiespeicher kann bei sehr dynamischen industriellen Prozessen außerdem zum Ausgleich der Wirkleistungsaufnahme aus dem Netz genutzt werden. Die Nutzung eines Energiespeichers in einem dynamischen Prozess bietet den Vorteil, dass aufgrund der geringeren Spitzenleis-

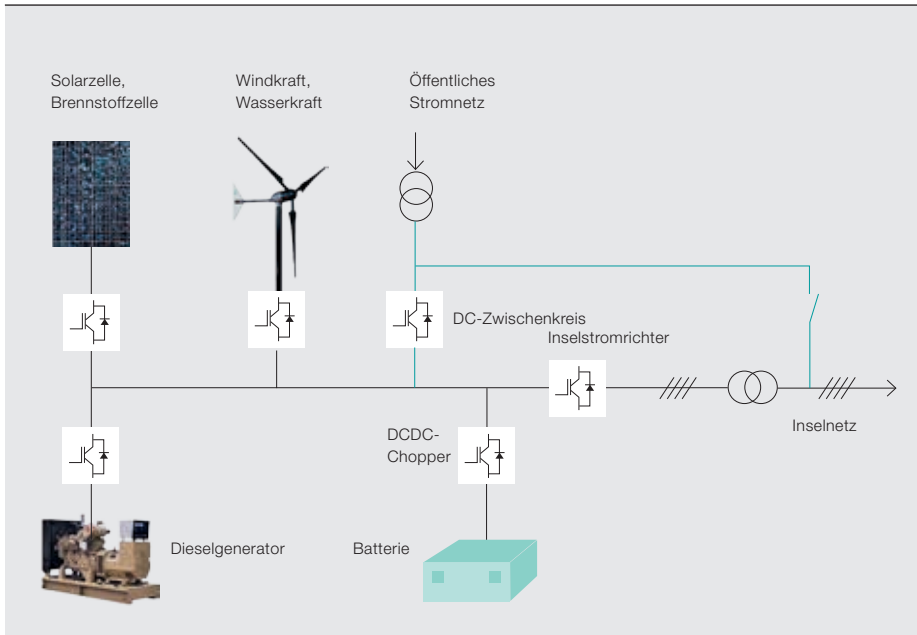
tung eine kleinere Gleichrichtereinheit verwendet werden kann.

Ein Hauptkriterium bei der Beurteilung der Leistungsqualität des Inselstromrichters ist das Fehlerstromvermögen. Als zentraler Bestandteil des Inselnetzes muss der Stromrichter das zur Klärung des Fehlers und zum Schutz der Ausrüstung und des Personals erforderliche Fehlerstromvermögen aufweisen.

Der Inselstromrichter kann parallel mit anderen Inselstromrichtern und parallel zum öffentlichen Stromnetz betrieben werden. Die Zahl der parallelen Stromrichter ist dabei nicht begrenzt. Technisch gesehen können beliebig viele Stromrichter zur Versorgung eines gemeinsamen Inselnetzes verbunden werden. Ab einem gewissen Punkt jedoch ist der Einsatz eines rotierenden Generators günstiger als die Implementierung einer großen Zahl paralleler Stromrichter.

Weitere Anwendungen auf der Basis von DTC

Die Regelung der beiden oben genannten Anwendungen basiert auf der Softwareplattform des ACS800. In beiden Fällen kommt das Modulationsprinzip der direkten Drehmomentregelung (Direct Torque Control, DTC) zum Einsatz. DTC ist eine von ABB entwickelte Regelungsmethode für Wechselstrommotoren, bei der alle Schaltvorgänge für jeden Regelzyklus direkt auf dem elektromagnetischen Zustand des Motors basieren, d.h.



Leistungselektronische Stromrichter können zum Aufbau eines intelligenten und zuverlässigen Inselnetzes genutzt werden.

es gibt keinen separaten spannungs- und frequenzgeregelten Pulsweitenmodulator. Die ersten erfolgreichen kommerziellen DTC-Produkte wurden von ABB in den 1980er Jahren für Traktionsanwendungen entwickelt. DTC basiert vornehmlich auf digitaler Signalverarbeitung und spezieller Elektronik und ermöglicht die Entwicklung spezieller Stromrichteranwendungen auf der Grundlage der ACS800-Motorregelung. Diese Entwicklungsarbeit wird von einem eigenen Softwareteam bei ABB durchgeführt.

Größenvorteile

Alle genannten Anwendungen profitieren von Gemeinsamkeit. Zwar hat jede Anwendung ihre spezifische Software, doch die IGBT-Stromrichterhardware bleibt die gleiche. Dies bringt Größenvorteile hinsichtlich Preisen, Mengen, Zuverlässigkeit, Ersatzteilen und globalem Kundendienst mit sich.

Größe

Die modulare Bauweise der ACS800-Produktreihe ist äußerst vorteilhaft und flexibel beim Bau von komplizierten Stromrichteranwendungen. Die kleinste sinnvolle Modulgröße für PQ- und Inselbildungsanwendungen hat eine Nennleistung von 150 kVA und die Baugröße R7i, die größte Modulgröße hat 500 kVA. Durch Parallelschaltung der größeren Module kann ein einziger Stromrichter mit einer Nennleistung von rund 5 MVA realisiert werden.

Der bisher größte realisierte PQ-Stromrichter ist ein flüssigkeitsgekühlter ACS800 Multidrive mit 4,5 MVA, der in einem Prüffeld in Helsinki große Drehstromantriebe mit Wirkleistung versorgt. Darüber hinaus kompensiert er die Blindleistung des gesamten Prüffelds und filtert die wichtigsten Oberschwingungsströme. Beim Betrieb von Hochleistungs-Sechspuls-gleichrichtern mit dem PQ-Stromrichter im Prüffeld wurde eine Reduzierung des MS-Stroms von 45 % gemessen. Diese Reduzierung der Blindleistung führt zu direkten Einsparungen bei den Stromkosten von mehreren Tausend Euro im Monat.

Die größten bisher in Betrieb befindlichen Inseinheiten sind zwei (aus Redundanzgründen) parallele flüssigkeitsgekühlte Stromrichter mit 2,2 MVA, die auf einem norwegischen Schiff installiert sind. Das Schiff verfügt außerdem über zwei flüssigkeitsgekühlte Inselstromrichter mit 0,9 MVA, die Bestandteil von Multidrive-Systemen sind.

Die genannten Anwendungen zeigen, wie ACS800-Hardware in Verbindung mit spezieller Software dabei helfen kann, Energie zu sparen, die Versorgungsqualität zu verbessern und eine zuverlässige Stromversorgung bei Störungen sicherzustellen. Weitere Anwendungen sind nur eine Frage der richtigen Software. Angesichts der Möglichkeiten, die die Technologie bietet, ist zu erwarten, dass die Zahl und Vielfalt neuer Anwendungen in nächster Zeit zunehmen wird.

Reijo Komsí

ABB Discrete Automation and Motion,
Drives and Controls
Helsinki, Finland
reijo.komsi@fi.abb.com



Heiße Sache

Ein neuer Infrarotsensor misst die Temperatur in Generatorleistungsschaltern

STEPHAN WILDERMUTH, ULF AHREND, MORITZ HOCHLEHNERT, MARCO ULRICH – Der Generatorleistungsschalter (GLS) spielt eine wichtige Rolle für den störungsfreien Betrieb eines modernen Kraftwerks. Er befindet sich normalerweise zwischen einem Generator und dem dazugehörigen Transformator und schützt diese vor Schäden. Dabei muss er sehr hohe Ströme – typischerweise mehrere Dutzend Kiloampere – bewältigen. Bei solch hohen Strömen führt selbst eine geringe Erhöhung des Widerstands im stromführenden Pfad zu einem starken Temperaturanstieg im Schalter – was dramatische Folgen haben kann. Daher ist eine Temperaturüberwachung von entscheidender Bedeutung. Da dies im Hochspannungsbereich eine große Herausforderung darstellen kann, startete ABB ein Entwicklungsprogramm für ein neues Temperatursensorsystem für GLS.



GLS kommen zum Beispiel in fossil befeuerten, Kern-, Gasturbinen-, Kombi-, Wasser- und Pumpspeicherkraftwerken zum Einsatz, wo sie eine anspruchsvolle Aufgabe erfüllen. Im normalen Kraftwerksbetrieb muss der GLS den vollen Nennstrom des Generators führen, der ohne Kühlung der Stromschiene leicht 23 kA und mit aktiver Kühlung über 30 kA erreichen kann – und das bei Spannungen von bis zu 32 kV → 1.

Bei derart hohen Strömen bewirkt selbst eine geringe Erhöhung des elektrischen Widerstands im stromführenden Pfad einen starken Temperaturanstieg. Eine solche Widerstandserhöhung kann durch eine Fehlausrichtung der Kontaktbereiche, Staub im GLS oder schadhafte Kontaktflächen hervorgerufen werden. Die daraus entstehende Erwärmung kann zu Schäden an internen versilberten Kontaktbereichen wie den Anschlüssen des Stromschienenkanals, dem Leitungstrennschalter und dem Kontaktsystem der Schaltkammer führen. Da die Wärmeabfuhr vom Hauptleiter zum Teil durch Wärmestrahlung erfolgt, ist der Leiter normalerweise mit einer stark wärmeabstrahlenden Farbe versehen, was aber bei deutlich erhöhten Temperaturen (die normalen Betriebstemperaturen liegen bei 70 bis 90 °C) nicht ausreicht.

Übermäßige Temperaturen können zu einem Verlust des Ausschaltvermögens oder sogar zu einem Überschlag führen, wenn Komponenten zu schmelzen beginnen.

GMS600

Das GMS600 von ABB ist ein GLS-Überwachungssystem, das die Notwendigkeit von Instandhaltungsmaßnahmen anzeigt und frühzeitige Warnungen ausgibt, um unerwartete Ausfallzeiten zu verhindern → 2. Das GMS600 errechnet die verbleibende Zeit bis zur Überholung auf der Grundlage kumulierter Stromunterbrechungen, der Gesamtzahl der mechanischen Betätigungen, der Zeit seit der letzten Überholung, der Überwachung des Leistungsschalter-Hauptantriebs, der SF₆-Dichte usw. Ein Aspekt, der bisher fehlte, war die Temperaturüberwachung. Dies lag daran, dass kein kommerziell erhältliches Temperatursensorsystem alle technischen, kommerziellen und funktionellen Anforderungen an eine genaue und zuverlässige Temperaturüberwachung von GLS im laufenden Betrieb erfüllte.

Das Fehlen eines solchen kommerziellen Systems ist nicht verwunderlich, denn die Temperaturüberwachung von Hochspannungskomponenten kann äußerst anspruchsvoll sein. So muss der Tempe-

ratursensor nicht nur schwierigen elektromagnetischen Bedingungen, sondern auch starken Temperaturgefällen standhalten, wie sie z. B. im Wüstenklima auftreten. Also musste ein neues Temperatursensorsystem entwickelt werden.

Sensorentwicklung und -design

Eine detaillierte technische Analyse ergab, dass ein Temperaturmesskonzept auf Grundlage der Erkennung von Infrarotstrahlung (IR-Strahlung) den besten

Bei solch hohen Strömen führt selbst eine geringe Erhöhung des Widerstands im stromführenden Pfad zu einem starken Temperaturanstieg.

Ansatz darstellte. Das Ziel bestand darin, ein kommerziell erhältliches IR-Sensorelement so in ein Gehäuse einzubetten, dass es in der anspruchsvollen GLS-Umgebung zuverlässig arbeitet.

Titelbild

Eine genaue und zuverlässige Überwachung der Temperatur in GLS (im Bild ein NEC8 von ABB) ist entscheidend, denn die kleinste Erhöhung des Widerstands kann aufgrund der hohen Ströme zu einem raschen Temperaturanstieg führen. Doch wie kann die Temperatur in einer solch anspruchsvollen Umgebung überwacht werden?

Das Ziel bestand darin, ein kommerziell erhältliches IR-Sensorelement so anzupassen, dass es in der anspruchsvollen GLS-Umgebung zuverlässig arbeitet.



Die zentrale Komponente des IR-Temperatursensors ist das IR-Detektorelement. Aufgrund ihres guten Preis-Leistungs-Verhältnisses entschied man sich für den Einsatz von ungekühlten, Si-basierten Thermosäulen-Detektoren. Die einzige Möglichkeit, eine einwandfreie Leistung des Sensors unter den schwierigen Bedingungen in einem GLS – räumliche und zeitliche Temperaturgefälle und starke elektromagnetische Felder mit schnellen Transienten – sicherzustellen, bestand darin, den IR-Detektor und die Elektronik entsprechend in ein Gehäuse einzubetten.

Neben der anwendungsspezifischen integrierten Schaltung (ASIC) des Detektors wurde eine zusätzliche Elektronik entwickelt, um das digitale SMBus-Ausgangssignal in das Modbus-Protokoll umzuwandeln. Auch diese Elektronik muss starken elektromagnetischen Störungen in der GLS-Umgebung standhalten.

Das Sensorpackage muss somit drei Hauptanforderungen erfüllen:

- Unterdrücken starker räumlicher Temperaturgefälle am IR-Sensorelement
- Unterdrücken starker zeitlicher Temperaturgefälle am IR-Sensorelement
- Unterdrücken von elektromagnetischen Störungen

Zur Erfüllung der ersten Anforderung wurde das Gehäuse des IR-Sensorelements mit einem Werkstoff mit einer hohen thermischen Leitfähigkeit umgeben → 3. Dies sorgt dafür, dass Temperaturunterschiede sofort ausgeglichen werden und das ther-

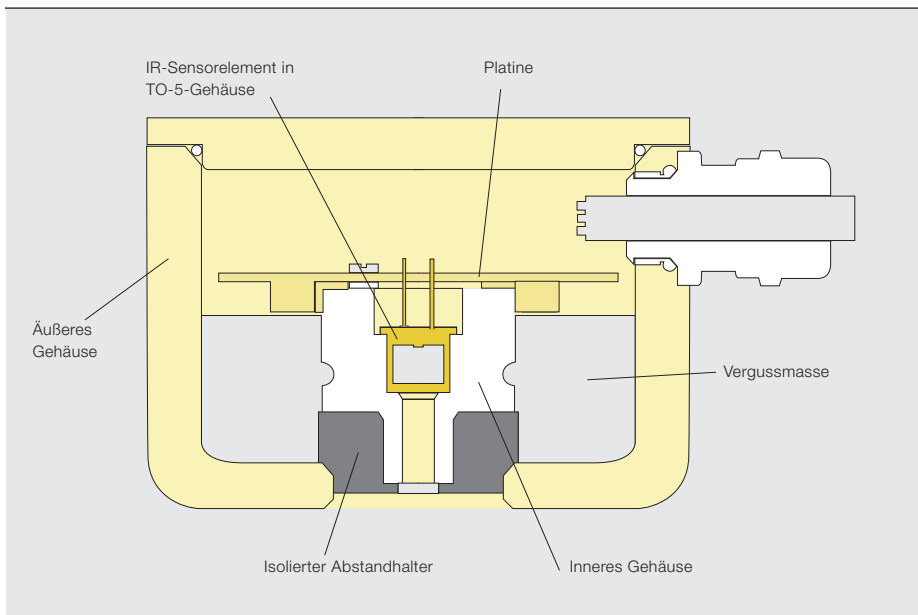
Das Gehäuse des IR-Sensorelements wurde mit einem Werkstoff mit einer hohen thermischen Leitfähigkeit umgeben.

mische Feld um den Sensor homogen bleibt.

Die zweite Anforderung kann durch die Wahl eines Designs erfüllt werden, das zu einer großen thermischen Zeitkonstante (im Bereich von mehreren Minuten) führt. Die Zeitkonstante des Sensorpackages lässt sich vergrößern, indem man für den Sensor und das innere Gehäuse eine große thermische Masse wählt und die thermische Leitfähigkeit der Vergussmasse reduziert, um das Eindringen von Wärme in den Sensor zu verzögern.

Das Sensorpackage besitzt daher ein zweiteiliges Gehäusekonzept, bei dem die inneren und äußeren Teile thermisch schwach gekoppelt sind → 3. Dadurch werden automatisch auch elektromagnetische Störungen verringert: Das äußere

3 Schematischer Querschnitt durch das Sensorpackage mit den funktionalen Hauptkomponenten



Das äußere Gehäuse wirkt als faradayscher Käfig, während die Vergussmasse als elektrischer Isolator und als Wärmesperre fungiert.

Gehäuse wirkt als faradayscher Käfig, während die Vergussmasse als elektrischer Isolator und als Wärmesperre fungiert. Zusätzlich ist das äußere Gehäuse durch das GLS-Gehäuse geerdet, und das innere Gehäuse ist mit einem lokalen Erdpotenzial verbunden.

Die Abmessungen des Packages wurden durch transiente thermische FEM-Simulationen mit einem vereinfachten thermischen Modell bestimmt → 4. Das Designziel bestand darin, eine thermische Zeit-

temperaturänderung von 25 °C auf 70 °C ausgesetzt. Die Anstiegsrate von 5 °C/min war durch die Wärmeleistung der verwendeten Klimakammer begrenzt. Für die Dauer des Versuchs war der IR-Temperatursensor auf einen Schwarzkörperstrahler mit einer konstanten Temperatur von 80 °C gerichtet. Eine sehr gute Sensorleistung (mit einem Messfehler von weniger als 2 °C) wurde festgestellt, wenn die thermische Kopplung zum inneren Gehäuse durch eine Wärmeleitpaste oder einen Wärmeleitkleber gewährleistet war.

Starke zeitliche Temperaturgefälle können durch ein Design vermieden werden, das zu einer thermischen Zeitkonstante von mehreren Minuten führt.

konstante von über 10 min zu erreichen. Diese Zeitdauer wurde durch die Simulation vorhergesagt und später durch experimentelle Versuche verifiziert.

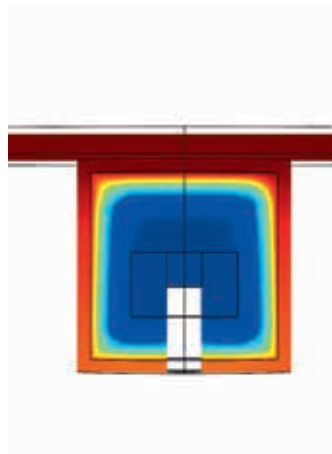
Prototypenherstellung und Test

Zur Überprüfung des thermischen Designs und Verifizierung der guten thermischen Kopplung des IR-Sensorelements an seine Umgebung wurden Temperaturwechselversuche durchgeführt. Dabei wurde der IR-Temperatursensor einer Umgebungs-

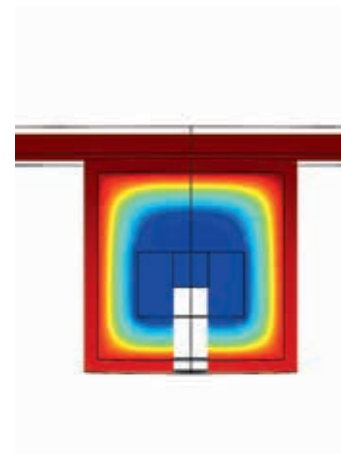
Um die Leistungsfähigkeit des IR-Temperaturensors zu verifizieren, wurden 21 Sensorprototypen gebaut und in der Klimakammer verschiedenen simulierten Umgebungs-szenarien ausgesetzt. Geprüft wurde die Messgenauigkeit des Sensors in einem Temperaturbereich des Schwarzkörperstrahlers von 30 °C bis 120 °C bei einer konstanten Umgebungs-(Sensor-)Temperatur von 25 °C. Das Sensorsignal wies ein lineares Verhalten auf, und der Linearitätsfehler lag über den gesamten Objekttemperaturbereich bei unter 3 °C. Die Streuung (Standardabweichung) zwischen den einzelnen Prototypen lag bei 0,8 °C und 1,2 °C bei einer Objekttemperatur von 75 °C bzw. 120 °C.

Die einzige Möglichkeit, eine einwandfreie Leistung des Sensors sicherzustellen, bestand darin, den IR-Detektor und die Elektronik entsprechend in ein Gehäuse einzubetten.

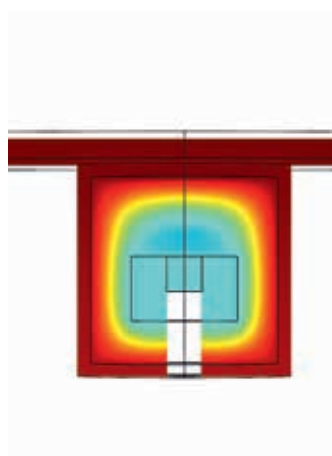
4 Die FEM-Simulation der Erwärmung des Sensorpackages liefert eine erste Einschätzung der thermischen Zeitkonstante und wurde zur Bestimmung der Abmessungen verwendet.



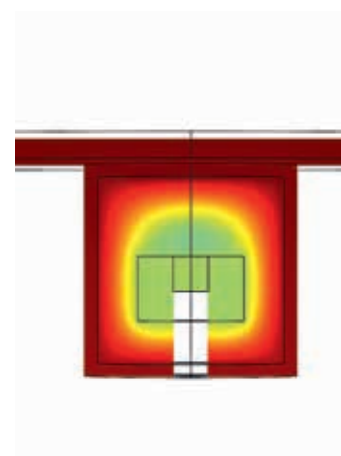
4a nach 73 s



4b nach 200 s



4c nach 400 s



4d nach 600 s

Eine wichtige Aufgabe des IR-Temperaturüberwachungssystems ist das Erkennen einer Überlastung des GLS, wenn der Hauptleiter eine Temperatur von 120 °C erreicht. Um dieses Szenario nachzubilden, wurde das Sensorsignal in einem Objekttemperaturbereich von 80 °C bis 120 °C untersucht → 5. Der IR-Sensor erfasste diese Temperaturänderung genau, und die Messabweichung lag innerhalb des geforderten Genauigkeitsintervalls von ± 3 °C.

Um den Einfluss von Veränderungen der Umgebungstemperatur zu untersuchen, wurden die IR-Tempersensoren drei aufeinander folgenden Temperaturzyklen von -5 °C bis 60 °C mit einer Änderungsrate von 0,1 °C/min ausgesetzt. Damit sollte ein typisches Tag-Nacht-Szenario simuliert werden.

Auch hier lag die typische Messabweichung des Sensors bei unter 3 °C. Bei Feuchteprüfungen betrug die Abweichung bis 90 % relative Luftfeuchtigkeit bei einer Umgebungstemperatur von 60 °C zudem weniger als 2,5 °C.

Darüber hinaus wurden die IR-Tempersensoren auf weitere Störfaktoren geprüft, wie sie in einer GLS-Umgebung auftreten. Dazu gehörten umfangreiche Schwingungsprüfungen zur Simulation der mechanischen Stöße während der GLS-Schaltvorgänge. Die elektromagnetische Störfestigkeit wurde nach IEC 61000-4 und IEC 61000-6 geprüft, die sich mit der Unempfindlichkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder und elektrostatische Entladungen sowie schnellen transienten elektrischen Störgrößen (Prüfschärfegrad 3 erforderlich) befassen. Sämtliche Prüfungen wurden erfolgreich

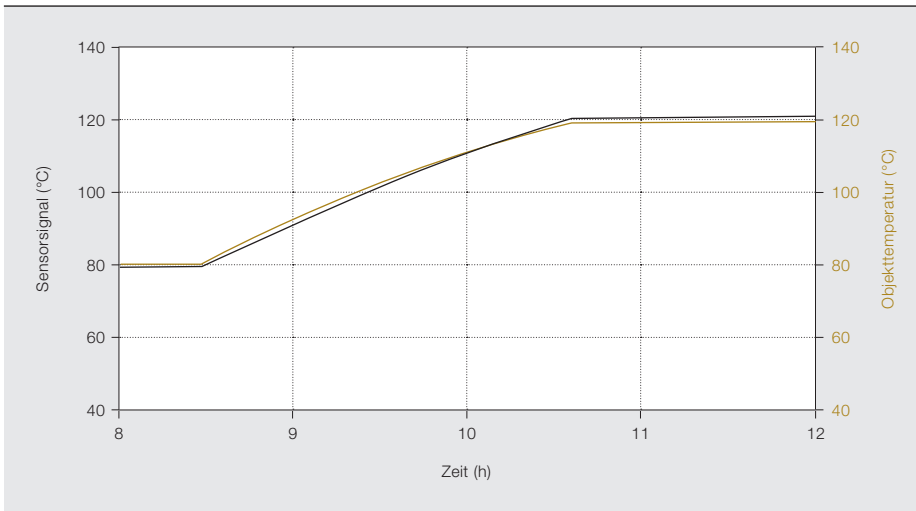
absolviert, und das Sensorsystem somit für den Betrieb in einem GLS qualifiziert.

Produktisierungsphase

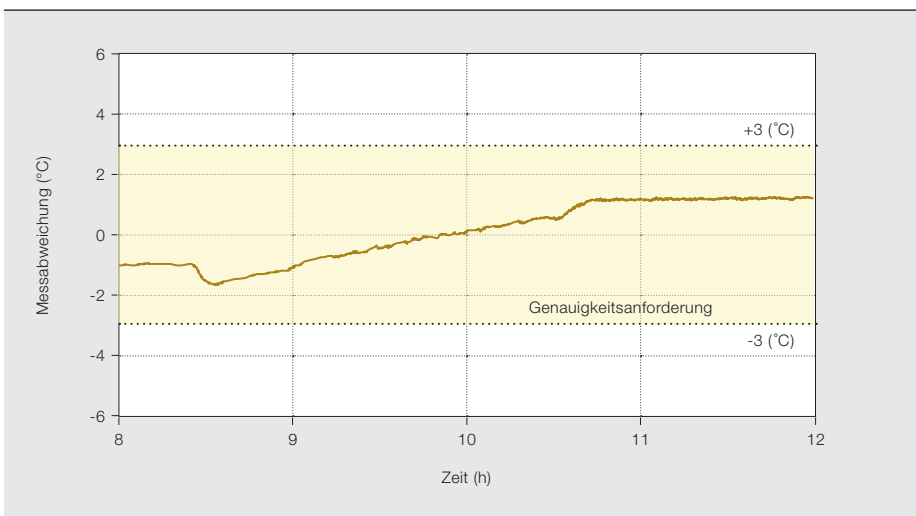
Durch die frühzeitige Beteiligung eines potenziellen Herstellers war das Demonstrationssystem bereits sehr ausgereift, sodass für die vollständige Produktisierung nur noch wenige Änderungen erforderlich waren.

Die Produktisierung erfolgte parallel zu den Anpassungsarbeiten am Sensor selbst. Dazu gehörten die Montage des Sensors, das Design des Kabelbaums, die mechanische Integration der Sensoren in das GLS-Gehäuse, die Kabelführung sowie eine Aktualisierung der GMS600-Überwachungssoftware zur Protokollierung, Speicherung und Darstellung der Temperaturdaten für neun Sensoren (drei pro Phase). Die Beschaffungskette wurde in

5 Signal des IR-Temperatursensors bei der Simulation einer GLS-Überhitzung in der Klimakammer



5a IR-Temperatursensorsignal bei einer Objekttemperatur von 80 °C bis 120 °C über mehrere Stunden



5b Die Messabweichung bleibt während des gesamten Temperaturanstiegs innerhalb des geforderten Genauigkeitsintervalls von ± 3 °C.

Zur Überprüfung des thermischen Designs und Verifizierung der guten thermischen Kopplung des IR-Sensorelements an seine Umgebung wurden Temperaturwechselsversuche durchgeführt.

Zusammenarbeit mit dem Hersteller implementiert, der die Sensoren und Kabel auf einem Montagegestell vormontiert, um die Installation in den GLS zu beschleunigen.

Erweiterter Service

Mithilfe intelligenter Servicekonzepte wie der vorausschauenden Instandhaltung lassen sich erhebliche Verbesserungen der Kosteneffizienz erzielen. Doch effiziente, adaptive und nachhaltige Strategien zur vorausschauenden Instandhaltung und Betriebsmittellebensdauer sind stark abhängig von aussagekräftigen Sensorsignalen aus dem realen industriellen Einsatz.

Das hier beschriebene, robuste und kostengünstige Temperatursensorsystem ermöglicht eine zuverlässige Temperaturüberwachung von GLS im laufenden

Betrieb. In Kombination mit anderen Sensorinformationen (z.B. Schwingungen oder Kontaktabbbrand) kann daraus ein aussagekräftiges Bild vom Funktionszustand eines Betriebsmittels abgeleitet und eine geeignete vorausschauende Instandhaltungsstrategie formuliert werden. Dies ist besonders wichtig für GLS, bei denen eine Überhitzung des Hauptleiters zu einer Abschaltung des Kraftwerks und somit zu hohen Kosten oder sogar katastrophalen Schäden an der Ausrüstung führen kann.

Der Zugang zu Zustandsdaten dieser Art ermöglicht außerdem die Entwicklung neuer Servicekonzepte und Geschäftsmodelle und liefert wertvolle Rückmeldungen für die Konstruktion neuer Geräte. Und zu guter Letzt können aus der statistischen Analyse einer ganzen Flotte von Geräten Informationen gewonnen wer-

den, die ein einzelnes Gerät nicht liefern kann. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur Wertschöpfung, die ABB ihren Kunden durch ihr Serviceportfolio bieten kann.

Stephan Wildermuth

Ulf Ahrend

Marco Ulrich

ABB Corporate Research

Ladenburg, Deutschland

stephan.wildermuth@de.abb.com

ulf.ahrend@de.abb.com

marco.ulrich@de.abb.com

Moritz Hochlehnert

ABB Power Products, High Voltage Products

Zürich, Schweiz

moritz.hochlehnert@ch.abb.com



A photograph showing a long row of industrial-grade UPS (Uninterruptible Power Supply) units. The units are light grey with black doors and are mounted on a raised floor. They are arranged in a perspective view, receding into the distance. The background is a plain, light-colored wall.

Auf höherer Ebene

Eine USV für die Mittelspannungsebene sorgt für einen kompletten Leistungsschutz

SOPHIE BENSON-WARNER – ABB hat eine Reihe von unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) für den Mittelspannungsbereich (MS) mit Nennleistungen von bis zu 6 MVA entwickelt. Die Implementierung einer USV auf der MS-Ebene bietet viele praktische Vorteile und wird von Kunden mit sensiblen oder kritischen Verbrauchern in der Industrie und in großen Rechenzentren praktiziert. Die PCS100 MV UPS Produktreihe ergänzt vorhandene USV und Produkte von ABB zur Spannungsaufbereitung für den Niederspannungsbereich (NS).

Titelbild

Die Implementierung von USV auf der MS-Ebene bietet viele Vorteile für industrielle Verbraucher und Rechenzentren.



Unsere moderne Gesellschaft ist mittlerweile abhängig von der Verfügbarkeit riesiger Datenmengen. Nahezu jede Organisation – Gesundheitsbehörden, Banken, Ministerien, Einzelhandelsgeschäfte, Unternehmen usw. – muss in der Lage sein, enorme Mengen von Informationen sicher zu speichern. Auch ein Großteil der industriellen und häuslichen Tätigkeiten ist vollständig abhängig von einer Vielzahl elektrischer Geräte. Erschwerend hinzu kommt eine wachsende Zahl von regenerativen Erzeugungsquellen im Stromnetz, die vermehrt zu Problemen mit der Netzqualität in Form von Spannungsspitzen, Spannungserhöhungen, Spannungsabsenkungen, Rauschen und Oberschwingungen führen, die eine Gefahr für alle Verbraucher darstellen.

Die Abhängigkeit von einer grundsoliden Versorgung mit hochwertigem Strom hat in den letzten Jahren zu einem massiven Wachstum des Geschäfts mit USV und Produkten zur Spannungsaufbereitung geführt. Traditionell werden diese Pro-

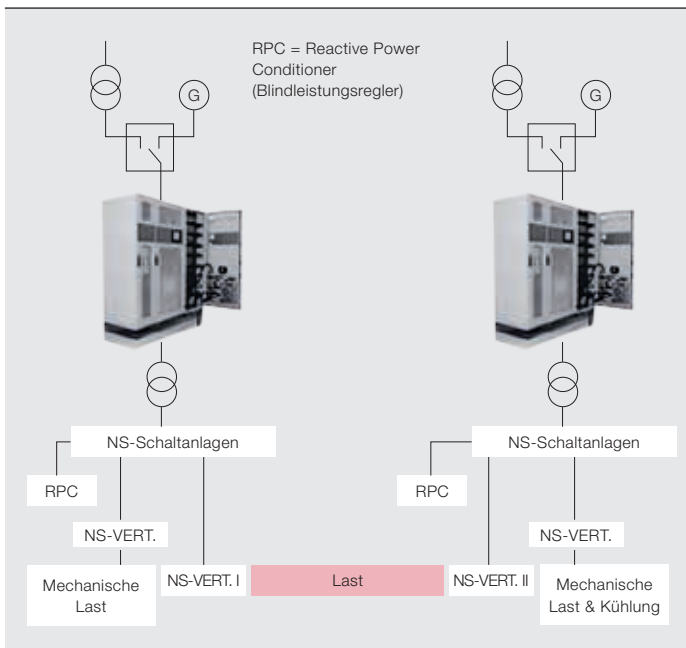
dukte auf der NS-Ebene implementiert, doch dies ist häufig mit Schwierigkeiten verbunden, wenn der verfügbare Platz begrenzt ist. Sollen viele Geräte geschützt werden, kann zudem allein die Zahl der erforderlichen USV Probleme beim Management, bei der Überwachung, Instandhaltung und Verfügbarkeit bereiten. Die Lösung liegt in der Installation der USV auf der MS-Ebene.

Bei einer Installation auf der MS-Ebene kann die USV in weniger beengten Räumen entfernt von den zu schützenden Geräten untergebracht werden.

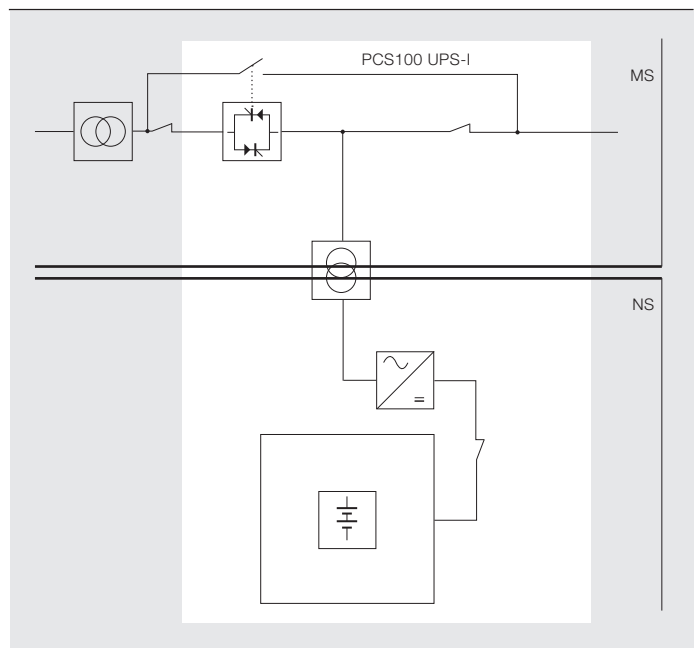
Bei einer Installation auf der MS-Ebene kann die USV in weniger beengten Räumen entfernt von den zu schützenden Geräten, z. B. in MS-Elektorräumen oder Unterstationen, untergebracht werden, um Platz für wichtige Infrastruktur wie Server oder Fertigungswerkzeuge zu schaffen.

Die ABB PCS100 MV UPS richtet sich genau an dieses Marktsegment. Sie wurde speziell darauf ausgelegt, eine saubere, zuverlässige und effiziente Stromversorgung sicherzustellen sowie die Kosten

2 Eine MS-USV kann zum Schutz der Gesamtlast oder nur der mechanischen Lasten eines Rechenzentrums konfiguriert werden.



3 Netzinteraktive Topologie: Leistungselektronik und Energiespeicher auf NS-Ebene, Transformatorkopplung mit MS-Ebene



für Kunden mit sensiblen oder kritischen Lasten in der Industrie und der Rechenzentrumsbranche zu senken.

Die PCS100 MV UPS kann zum Schutz der gesamten Versorgung oder nur ausgewählter sensibler Verbraucher installiert werden → 1. In einem Rechenzentrum könnten dazu die mechanischen Lasten gehören → 2. Die Installation des USV-Schutzes auf der MS-Ebene ist die energieeffizienteste Konfiguration, da die niedrigeren Ströme bei dieser Spannung zu geringeren Verlusten führen.

Nach Einführung der ersten Produkte für 6,6 kV und 6 MVA werden größere Systeme der 15-kV-Klasse (einschließlich Optionen für 11 kV und 13,2 kV) mit noch höheren Nennleistungen folgen.

Die Technik der PCS100 MV UPS

Die verwendete netzinteraktive Topologie ist eine natürliche Wahl für die MS-Ebene, da die Verluste äußerst gering sind. So können Wirkungsgrade von deutlich über 99,5 % erreicht werden. Außerdem ist ein Systemdesign möglich, bei dem der Leistungsumrichter und Energiespeicher auf der NS-Ebene verbleiben und durch einen Transformator mit der MS-Ebene gekoppelt sind → 3. Ebenfalls auf der MS-Ebene befindet sich ein thyristorbasierter Netztrennschalter, der im Falle eines Stromausfalls oder Spannungseinbruchs eine Rückspeisung ins Netz verhindert.

Geringere Kosten

Bei der Wahl von Betriebsmitteln spielen die Anfangskosten zwar stets eine bedeutende Rolle, doch das wichtigste Kostenkriterium für den Kunden sind normalerweise die Gesamtbetriebskosten. Die unübertroffene Effizienz der PCS100 MV UPS, ihre geringen Wartungskosten und ihr geringer Platzbedarf sorgen für eine Minimierung der Betriebskosten. Die Tatsache, dass sich Energiespeicher und Umrichter auf der NS-Ebene befinden, trägt außerdem entscheidend zur Vereinfachung der Wartung und Reduzierung der Systemkosten bei. Ferner bietet die PCS100 MV UPS viele Nachrüstmöglichkeiten. Diese ermöglichen maßgeschneiderte Lösungen für Anlagen, die zurzeit ungeschützt sind oder in denen herkömmliche USV-Anlagen ersetzt werden müssen.

Speicheroptionen

Da der Energiespeicher auf der NS-Ebene verbleibt, steht eine Vielzahl verschiedener Energiespeicheroptionen zur Verfügung. Die gängigsten sind Ultrakondensatoren, Lithium-Ionen-Batterien und versiegelte Blei-Säure-Batterien mit hoher Entladerate. Es ist davon auszugehen, dass Ultrakondensatoren aufgrund ihrer langen Lebensdauer und kompakten Größe in industriellen Anwendungen verbreitet Einsatz finden werden. Für Anwendungen, die eine längere Autonomie erfordern, bieten Lithium-Ionen-Batterien (ähnlich denen, die in Elektrofahrzeugen

Die PCS100 MV UPS kann zum Schutz der gesamten Versorgung oder nur ausgewählter sensibler Verbraucher installiert werden.

eingesetzt werden) im Vergleich zu den kostengünstigsten Blei-Säure-Lösungen einen geringeren Platzbedarf und eine längere Lebensdauer. Lithium-Ionen-Batterien besitzen zudem hervorragende Lebenszykluseigenschaften, was die Implementierung von Funktionen zur Unterstützung von Smart-Grids – z.B. Lastabwurf – ermöglicht.

Sophie Benson-Warner

ABB Discrete Automation and Motion,
LV Power Converter Products
Napier, Neuseeland
sophie.benson-warner@nz.abb.com

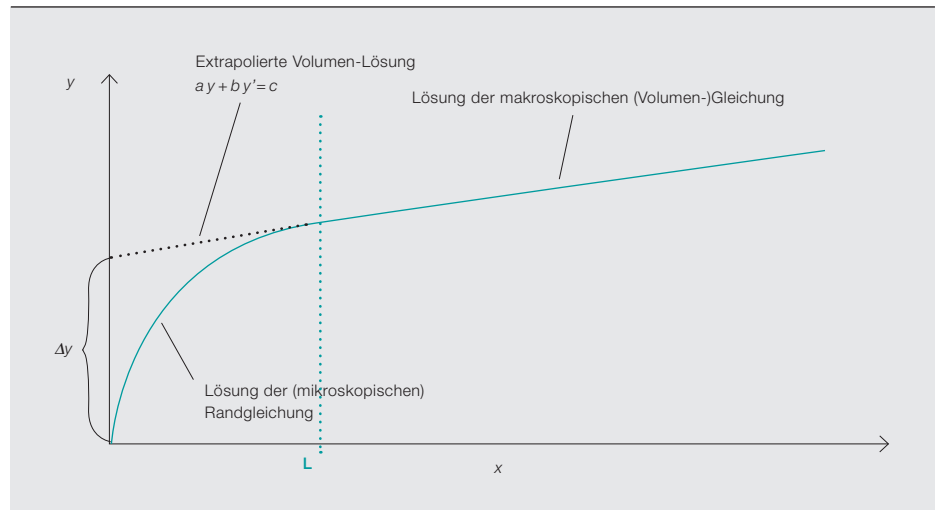


Wissen am Rande

Wissen über Randbedingungen ist entscheidend für zuverlässige Simulationen

KAI HENCKEN, THOMAS CHRISTEN – Partielle Differentialgleichungen (PDGs) sind die Sprache, in der Physiker viele natürliche Phänomene wie den Elektromagnetismus, die Akustik, Fluidströmungen oder die Wärmeleitung beschreiben. Die PDGs, die die Physik innerhalb eines bestimmten räumlichen Bereichs beschreiben – sogenannte „Volumen-Gleichungen“ – sind die Schlüsselemente für numerische Simulationen von ABB-Produkten [1]. Nun können die am Rande des Volumens vieler Systeme zu berücksichtigenden physikalischen Vorgänge

noch wesentlich komplizierter sein als im Volumen. Hinzu kommt, dass die Randbereiche, obwohl sie nur einen kleinen Teil des Gesamtsystems ausmachen, häufig das Ergebnis einer Simulation bestimmen. Folglich kann die korrekte Definition der Randbedingungen eine entscheidende Rolle für das Erreichen aussagekräftiger numerischer Simulationen spielen. Die physikalische Modellierung der Randbedingungen ist keine leichte Aufgabe und erfordert einen vertieften Einblick in die zugrunde liegende Physik.



PDGs beschreiben das Verhalten von physikalischen Eigenschaften oder Größen in Raum und Zeit. Typische Beispiele sind die Wärme Gleichung für die Temperatur, die Laplace-Gleichung für das elektrische Potenzial und die fluiddynamischen Gleichungen für Massendichte, Strömungsgeschwindigkeit und Energiedichte.

Das Auftreten von (mathematischen) räumlichen Ableitungen in diesen PDGs hängt mit der Kopplung eines bestimmten Punkts im Raum mit seiner Umgebung zusammen – häufig aufgrund eines Transportphänomens. Um mathematisch wohldefinierte, d.h. eindeutige Lösungen der PDGs zu erhalten, müssen Randbedingungen (und Anfangsbedingungen) spezifiziert werden. Dies ist vergleichbar mit der Notwendigkeit einer Anfangsbedingung zur Lösung eines zeitabhängigen Vorgangs. Analog können die Bedingungen zu Beginn einer Simulation als Randbedingung für die Zeitachse interpretiert werden. Die allgemeine mathematische Form spezifischer Randbedingungen hängt

in erster Linie von zwei strukturellen Eigenschaften der Volumen-Gleichungen ab.

Die erste Eigenschaft ist die Ordnung der PDG. Diese gibt die höchste räumliche Ableitung an, die in der Volumen-Gleichung vorkommt. So ist die Wärme Gleichung zweiter Ordnung, da eine Ableitung der Form $\partial^2 T / \partial x^2$ auftritt. Die Randbedingungen werden allgemein eine Beziehung zwischen den physikalischen Größen und ihren (räumlichen) Ableitungen mit einer Ordnung sein, die um eins kleiner ist als die Ordnung der PDG selbst, da Ableitungen höherer Ordnung mithilfe der Volumen-PDG ersetzt werden können. So kann in der stationären Wärme Gleichung $\partial^2 T / \partial x^2 = 0$ die Randbedingung neben T und seiner Ableitung grundsätzlich beliebige räumliche Ableitungen enthalten; Ausdrücke der Form „ $\partial^2 T / \partial x^2$ “ oder höher können jedoch durch $\partial^2 T / \partial x^2 = 0$ ersetzt werden.

Die zweite Eigenschaft bezieht sich auf die Art und Weise, wie sich Information im Volumen ausbreitet, d.h. wie eine Störung oder Veränderung einer physikalischen Größe an einem Punkt den Wert an einem entfernten Punkt zum gleichen oder einem späteren Zeitpunkt beeinflusst.

Das einfachste (und triviale) Beispiel ist eine PDG der Ordnung null. Räumliche Ableitungen und Ausbreitung sind nicht

vorhanden, und Randbedingungen sind überflüssig. In diesem Fall ist die Gleichung eher ein (verteiltes) System aus gewöhnlichen Differentialgleichungen (GDG) als eine PDG. Ein physikalisches Beispiel hierfür ist die in einem dielektrischen Medium induzierte elektrische Polarisation, die durch einen Relaxationsvorgang der lokalen Polarisationsdichte beschrieben werden kann.

Es gibt noch andere Fälle, in denen an speziellen Rändern keine Randbedingung notwendig ist, auch wenn räumliche Ableitungen im Volumen auftreten. So wird der Zustand einer Überschallströmung an einem Austritt vollständig durch den Zustand im Volumen bestimmt. Da die Strömung schneller als der Schall ist, was in diesem Fall der Informationsgeschwindigkeit entspricht, kann keine Information vom Rand in das Volumen zurückfließen; folglich wird dieser Rand

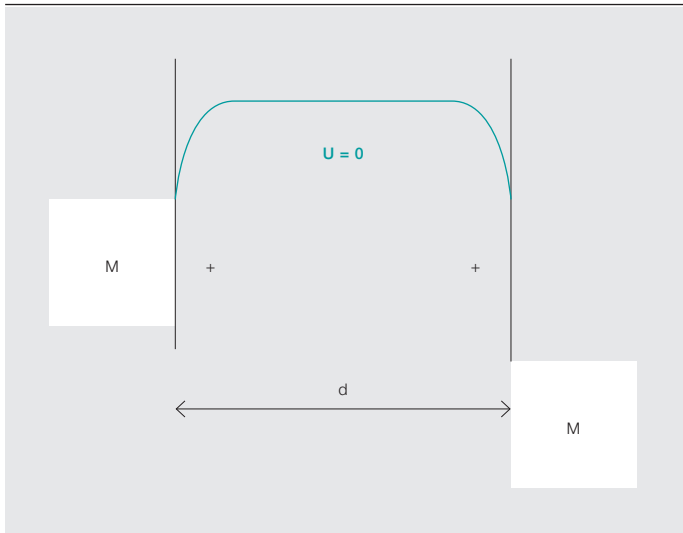
Für aussagekräftige numerische Simulationen müssen Volumen-Modelle durch geeignete Randbedingungen ergänzt werden.

den Zustand im Volumen nicht beeinflussen.

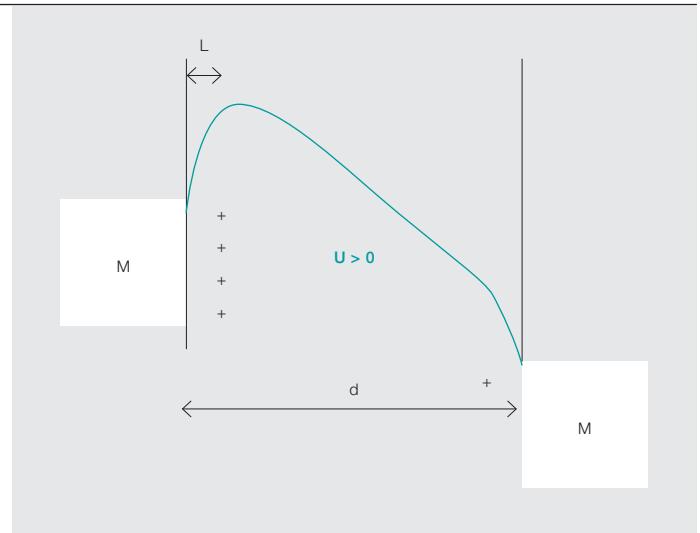
Meistens sind Randbedingungen jedoch erforderlich und werden nach dem Ausbreitungsverhalten der PDGs in diffusiv, instantan, konvektiv oder wellenartig ein-

Titelbild

ABB-Produkte und -Geräte beinhalten viele innere Randbereiche, Oberflächen und Schnittstellen, die sich auf ihre Leistungsfähigkeit auswirken und in Simulationen durch Randbedingungen beschrieben werden müssen.



2a Isolator ohne intrinsische, aber mit injizierten Ladungsträgern (hier positive Löcher) von den beiden anliegenden Elektrodenkontakten. (Blau: Gleichgewichtspotenzial).



2b Das Anlegen einer Spannung verändert das elektrische Potenzial aus Sicht der Ladungsträger und bewirkt ein Maximum in der Nähe der injizierenden Elektrode.

Die Randbedingungen müssen so formuliert werden, dass das Modell „wohldefiniert“ ist, d. h. eine physikalisch sinnvolle Lösung existiert.

geteilt. Eine instantane Ausbreitung entspricht stationären Lösungen, die sich sofort („unendlich schnell“) an Änderungen der Randbedingungen anpassen. Ein Beispiel hierfür ist der instantane Aufbau eines elektrischen Felds (z. B. im Vakuum) beim Einschalten einer elektrischen Spannung in Systemen, die durch die Laplace-Gleichung für das elektrische Potenzial beschrieben werden. Zeitabhängige Vorgänge können in der Praxis häufig vernachlässigt werden, weil sich das elektrische Feld mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet.

Die Randbedingungen müssen so formuliert werden, dass das Modell „wohldefiniert“ ist, d. h. eine physikalisch sinnvolle Lösung existiert.

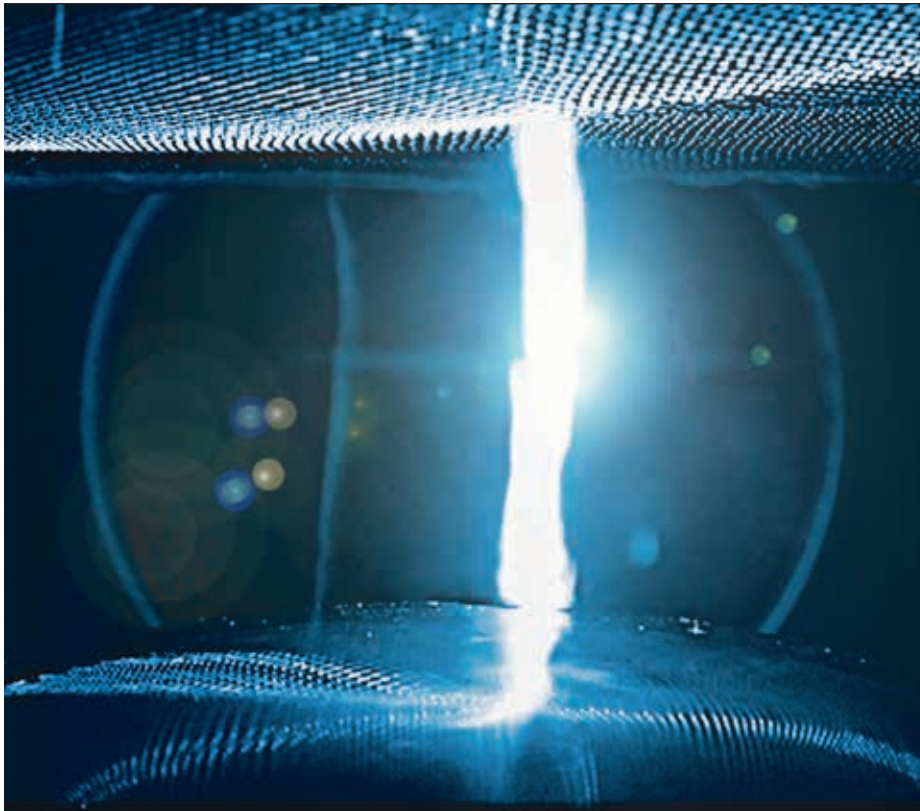
Randbedingungs-Physik geht über die Volumen-Physik hinaus

Die Volumen-Gleichungen geben die funktionale Form der Randbedingungen zwar vor und schränken diese ein, doch die Werte der darin auftretenden Koeffizienten bzw. Parameter müssen durch die zugrunde liegende Physik bestimmt werden. Dies kann u. U. ziemlich anspruchsvoll sein, da Randbedingungen einen detaillierteren Einblick in das physikalische System erfordern als die Volumen-PDGs. Letztere werden durch Mittelung von Größen (wie Wärmeenergie, Teilchenanzahlen, -geschwindigkeiten, ...) über kleine Volumen-Elemente hergeleitet, in denen diese gemittelten Größen als homogen angesehen werden können. In Randbereichen verändern sich gewisse

Eigenschaften jedoch abrupt, was eine Betrachtung auf einem kürzeren, z. B. mikroskopischen, Maßstab erforderlich macht. Folglich müssen bei der Modellierung der Randbedingung physikalische Prozesse betrachtet werden, die sich durch einen höheren Detaillierungsgrad und eine größere Vielfalt von Phänomenen auszeichnen.

Ein für ABB-Technologien, wie etwa elektrische Schalter, wichtiges Beispiel sind Volumen-Gleichungen für ein (eventuell ionisiertes) Gas, das sich im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht befindet, d. h. bei dem die Teilchengeschwindigkeiten einer Maxwell-Verteilung folgen und das daher eine wohldefinierte Temperatur besitzt. Nähert man sich dem Rand, weicht im Allgemeinen die Geschwindigkeitsverteilung aufgrund von Oberflächeneffekten von der im Volumen ab, und ein thermodynamisches Gleichgewicht ist nicht mehr gegeben → 1. Mit anderen Worten, die makroskopischen Gleichungen für die physikalische Größe $y(x, t)$ entlang der x-Achse in → 1 gelten für Entfernungen, die größer als eine bestimmte mikroskopische Länge L sind, aber nicht kleiner. Dabei kann angenommen werden, dass die Ausdehnung dieses Randbereichs wesentlich kleiner ist als der in der numerischen Simulation aufgelöste Maßstab. Die Extrapolation der Volumen-Lösung auf den Rand deckt sich nicht notwendigerweise mit der mikroskopischen Lösung. Die Randbedingung muss die von der Volumen-Gleichung vorgegebene mathematische Relation erfüllen, die

3 Ein zwischen zwei Elektroden brennender Lichtbogen. Der Fußpunkt des Lichtbogens stellt einen interessanten und komplexen Randbereich dar.



in diesem Fall durch eine allgemeine Relation der Form

$$ay + by' = c$$

gegeben ist. Die Koeffizienten a , b und c sind dadurch bestimmt, dass die Volumen-Lösung diejenige ist, die man durch exakte Lösungen der Randphysik (auf mikroskopischer Skala) erhielte. Wenn

einem Rohr, wobei von einer endlichen Geschwindigkeit auf der gesamten Strecke zur Wand ausgegangen wird, obwohl sie mikroskopisch, d. h. in einer sehr dünnen viskosen Randschicht, zur Wand hin rasch auf null sinkt.

Gleichstromleitung in Isolatoren

In Wechselstromkabeln wird die 50-Hz-Feldverteilung normalerweise durch Lösen

einer Laplace-Gleichung für das elektrische Potenzial in den dielektrischen Werkstoffen mit entsprechenden Randbedingungen an den leitenden Teilen berechnet. Die relevante Materialeigen-

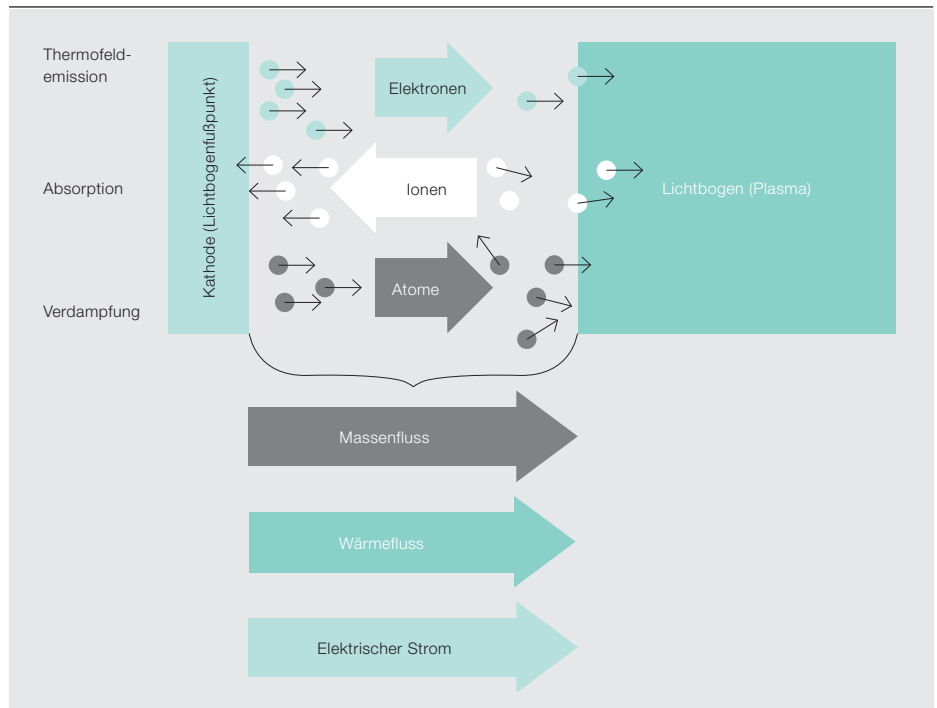
schaft ist die Dielektrizitätskonstante, und jegliche Ansammlung von Ladungen in den dielektrischen Werkstoffen kann vernachlässigt werden.

Feldberechnungen in Gleichstrom-Isolierungen hingegen sind deutlich komplexer, da sich Raumladungen im Material aufbauen können. Durch diesen manchmal sehr langsamen Vorgang kann sich die Feldverteilung mit der Zeit erheblich verändern. Ein anschauliches Beispiel der

Die zugrunde liegende Physik, die berücksichtigt werden muss, ist am Rand wesentlich vielfältiger als im Volumen.

etwa die grundlegende mikroskopische Physik verlangt, dass die Lösung am Rand ($x=0$) $y=0$ ist, dann auf mikroskopischer Länge erst stark anwächst und sich erst danach auf makroskopischer Skala langsamer verändert, wird wie in → 1 skizziert die makroskopische Randbedingung der Lösung einen endlichen Wert aufzwingen, was wie Diskontinuität erscheint. Ein wichtiges Beispiel hierfür ist eine Gleitrandbedingung für die (makroskopische) Gasströmungsgeschwindigkeit in

4 Am Lichtbogenfußpunkt treten eine Reihe physikalischer Phänomene auf, deren gegenseitige Abhängigkeit nur auf mikroskopischer Ebene deutlich wird.



Die Ladungsinjektion aus Elektroden kann bei der Auslegung von HGÜ-Kabeln und -Zubehör von großer Bedeutung sein.

gekoppelten Wechselwirkung zwischen dem Rand und dem Volumen ist die Bildung eines raumladungsbegrenzten Stroms („Space-Charge-Limited Current“, SCLS). Man stelle sich einen mit Metall Elektroden kontaktierten Werkstoff vor, der anfänglich frei von Ladungsträgern ist → 2. Auch ohne eine angelegte Spannung diffundieren Ladungsträger (sagen wir, zur Vereinfachung, positive „Löcher“) von den Elektroden in den Isolator.

Dort bilden sie eine dünne Ladungsschicht, die zu einer erhöhten, nahezu flachen Potenzialverteilung im Innern des Isolators führt. Das elektrische Feld, das im Wesentlichen der negativen Steigung des Potenzials entspricht, ist somit überall zwischen den Platten praktisch gleich null, außer in der Nähe der Kontakte → 2a. Das Anlegen einer hohen Spannung über

den Elektroden bewirkt eine Neigung des Potenzials und führt zu einem Maximum in der Nähe einer Elektrode → 2b.

Normalerweise ist die Entfernung zu klein, um in der makroskopischen Simulation aufgelöst zu werden, und wird vernachlässigt. Doch das Maximum hat bedeutende Folgen. Das elektrische Feld ist am Maximum gleich null, da es per Definition der Ableitung des Potenzials entspricht. Diese Stelle wird als „virtuelle Elektrode“ bezeichnet, und Elektrodenkontakte, die diese Eigenschaft eines verschwindenden Felds unter diesen Bedingungen aufweisen, werden „ohmsche Kontakte“ genannt. Da der elektrische Strom – der proportional zum Produkt des elektrischen Felds, der Ladungsträgerdichte und ihrer Beweglichkeit ist – endlich bleibt, bedeutet ein verschwindendes elektrisches Feld zusammen mit einem Strom, der nicht gleich null ist, dass die Ladungsträgerdichte an der virtuellen Elektrode divergiert (d. h. unendlich groß wird). In Wirklichkeit bleibt die Dichte aufgrund der Wirkung der Diffusion, die bei diesem einfachen Bild vernachlässigt wurde, natürlich endlich. Die Elektrode injiziert einen hohen Strom, was zu einer so großen Ladungsträgerdichte am Kontakt führt, dass das elektrische Feld unterdrückt wird. Dies kann zu einer Feldverstärkung an einer anderen Stelle oder,

Bei Leistungsschaltern spielen Randeffekte eine große Rolle – z. B. Metallverdampfung in Vakuumschaltern und Düsenabbrand in gasisolierten Leistungsschaltern.

nach einer genügend schnellen Umpolung, auch am ohmschen Kontakt führen.

Die Injektion und Ansammlung von Ladungsträgern kann eine große Rolle bei der Auslegung von Isolierungen für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) spielen. Hier wird die elektrische Feldverteilung nicht nur durch die intrinsische Volumen-Leitfähigkeit des Materials bestimmt, sondern auch durch die Kontakte und den Randbereich zwischen ihnen beeinflusst, sodass spezielle Maßnahmen erforderlich sind, um eine robuste HGÜ-Isolierung zu gewährleisten [2].

Lichtbogenfußpunkte in Vakuum-Leistungsschaltern

In Vakuum-Leistungsschaltern (VLS) erfolgt die Unterbrechung von Strömen durch das Bilden und Löschen eines Lichtbogens [3] → 3. Da das „Volumen-Material“ hier ein Vakuum ist und das Metallplasma im VLS ausschließlich von den Elektroden stammt, ist die Bedeutung entsprechender Randbedingungen offensichtlich. Außerdem stellt das Beispiel ein komplexes, multiphysikalisches Randproblem dar, da eine Reihe verschiedener physikalischer Phänomene beteiligt sind, die im Volumen unabhängig behandelt werden können, aber auf der darunter liegenden Ebene miteinander verknüpft sind.

Lichtbogenfußpunkte sind die Bereiche, an denen der Lichtbogen mit den Metallelektroden verbunden ist. Dort bildet sich eine elektrische Schicht. Diese nicht neutrale Elektrodenfallschicht führt zu einer Spannung zwischen dem Volumen des Plasmas und der Elektrode, d. h. die Elektrodenspannung fällt ab, ähnlich wie in → 2a. Dieser Spannungsabfall führt zu einem starken elektrischen Feld an der Oberfläche. Dies ist nötig, damit ein starker elektrischer Strom aus dem Metall ins Plasma fließen kann. Dies geschieht, indem Elektronen zum Verlassen der Kathode oder zum Eindringen in die

Anode gezwungen werden oder Ionen dazu veranlasst werden, sich an die Oberfläche zu bewegen → 4. Diese Ionenbewegung und -rekombination ist der vorherrschende Aufheizmechanismus für das Metall. Die Oberfläche der Elektrode am Fußpunkt des Lichtbogens wird so heiß, dass das Metall verdampft. Tatsächlich ist der Vakuumlichtbogen ein Metaldampflichtbogen, der sich ausschließlich von dem Material „ernährt“, das von den Lichtbogenfußpunkten emittiert wird. Das Verhältnis zwischen der Erwärmung der Oberfläche durch das Plasma und der Kühlung durch das Verdampfen des Metalls bestimmt die Elektroden Temperatur und damit das Leistungsvermögen des Schalters.

Jeder dieser Vorgänge für sich ist komplex, doch da dieselben Teilchen (Elektronen, Ionen und Atome) Träger verschiedener Eigenschaften (Masse, Wärme und elektrischer Strom) sind, stehen auch die Randbedingungen in einer Wechselbeziehung zu einander, was berücksichtigt werden muss, wenn eine konsistente Simulation erreicht werden soll.

Ein weiteres Beispiel für die Bedeutung von Randeffekten findet sich im Materialabtrag (Ablation), der durch Lichtbogenstrahlung in gasisolierten Leistungsschaltern hervorgerufen wird und für den Druckaufbau beim Schaltvorgang eine Rolle spielt [1]. Weitere Beispiele finden sich in Sensoren, ölisierten Hochspannungsgeräten usw.

Zuverlässige Simulationen

Für aussagekräftige numerische Simulationen müssen die leider oft stiefmütterlich behandelten Randbedingungen der Volumen-Modelle realistisch modelliert werden. Randbereiche haben oft eine erhebliche Auswirkung auf das Ergebnis, auch wenn sie nur einen kleinen Teil des gesamten Systems ausmachen. Hinzu kommt, dass die Komplexität der zugrundeliegenden physikalischen Vorgänge,

die berücksichtigt werden müssen, in Randbereichen wesentlich höher ist als im Volumen, dessen Gleichungen in der Regel auf einfachen, wohlbekannten Erhaltungsgesetzen basieren.

Bei der Validierung von Simulationsergebnissen ist es aus zwei Gründen ratsam, die verwendeten Randbedingungen genau zu prüfen: Erstens ist es aufgrund ihrer starken Auswirkungen auf die Lösung manchmal leicht, durch Anpassung der Randbedingungen aufgrund von Vorurteilen erwartete Ergebnisse zu erzielen. Zweitens ist die hinter den Randbedingungen steckende Physik häufig sehr komplex und kann tückisch sein. Die Wahl einer realistischen Randbedingung ist keine einfache Aufgabe und erfordert einen tiefen Einblick in die zugrunde liegende Physik. Doch die Mühe ist es wert und zahlt sich durch zuverlässigere Simulationsergebnisse aus. Nicht zuletzt kann das Verständnis der „Physik am Rande“ eine wichtige Quelle für technische Innovationen darstellen.

Kai Hencken

Thomas Christen

ABB Corporate Research

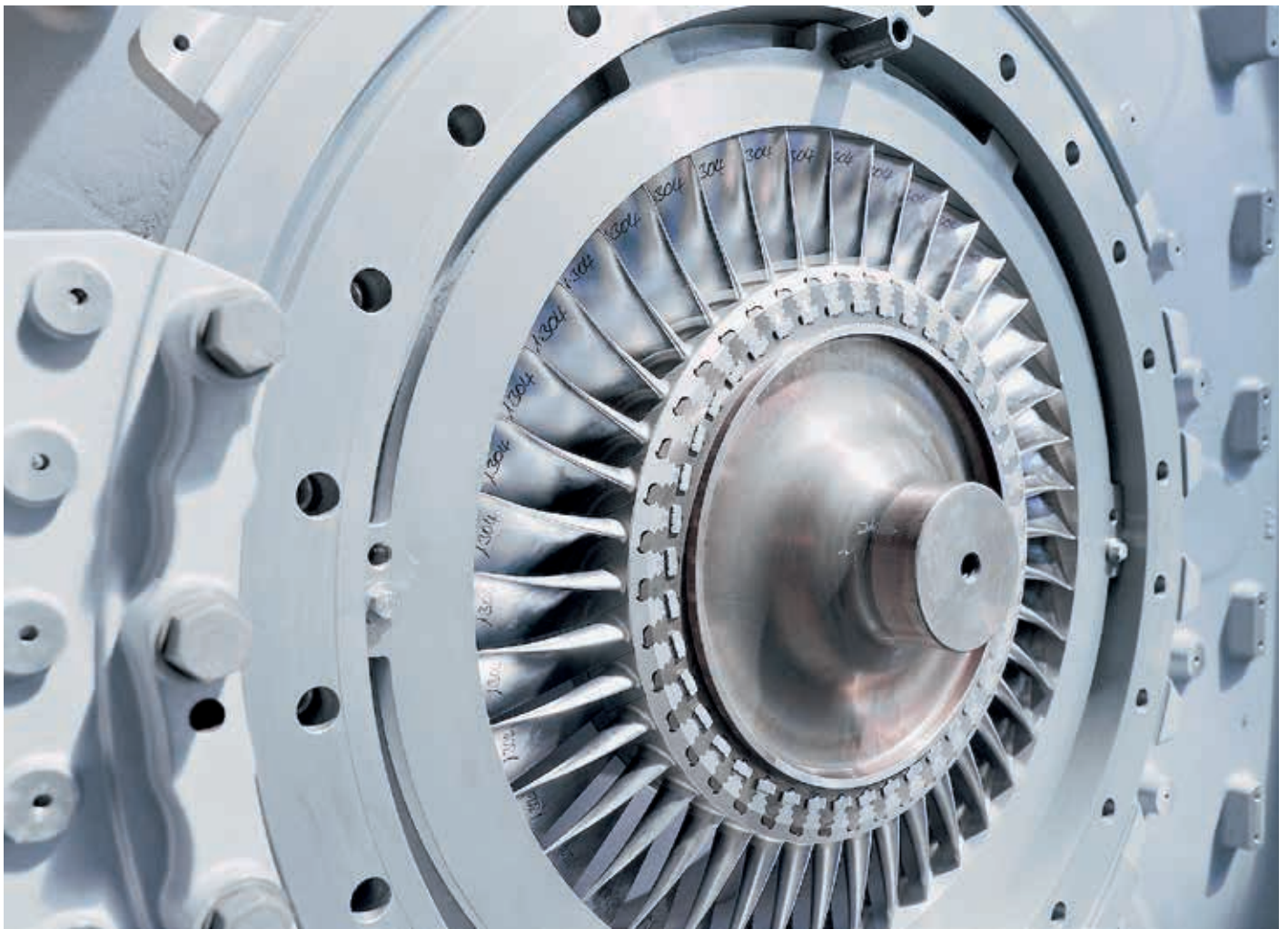
Baden-Dättwil, Schweiz

kai.hencken@ch.abb.com

thomas.christen@ch.abb.com

Literaturhinweise

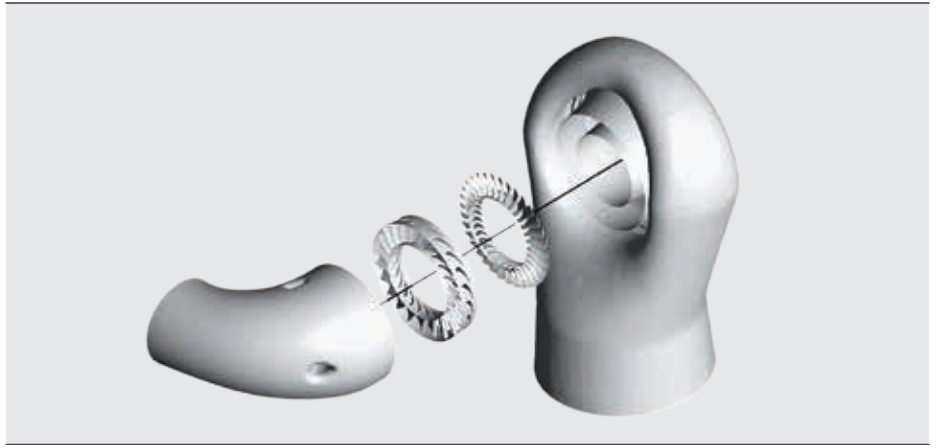
- [1] ABB Review 3/2013 „Simulation“, S. 1–84.
- [2] T. Christen: „Characterization and Robustness of HVDC Insulation“. IEEE Conference on Solid Dielectrics. Bologna, 2013: S. 238–241
- [3] I. Kleberg, W. Shang: „Lichtbögen verstehen: Simulation von Hochstrom-Vakuumlichtbögen“. ABB Technik 1/2004: S. 22–24



Grenzen verschieben

Turbinensimulation
für Turbolader der
nächsten Generation

KWOK-KAI SO, BENT PHILLIPSEN, MAGNUS FISCHER – Die numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD) ist ein unverzichtbares Werkzeug in der Konstruktion und Entwicklung von Turbomaschinen. Insbesondere die aerodynamische Analyse und Optimierung von axialsymmetrischen Rotoren und Statoren auf der Grundlage von CFD-Berechnungen gehört zu den Standardverfahren im Entwicklungsprozess. Messungen an Turbolader-Turbinen auf dem Prüfstand haben gezeigt, dass eine Störung der symmetrischen Strömung am Ein- und Auslass der Turbine einen bedeutenden Einfluss auf die Turbinenleistung haben kann. CFD-Simulationen der kompletten Turbine vom Einlass- bis zum Auslassflansch haben dies bestätigt und die Entwicklung einer weniger anfälligen Turbinengeometrie ermöglicht. So konnten die Grenzen für die Anwendung von CFD-Verfahren bei der Auslegung von Turbinen weiter verschoben werden.



2 Multiplikation der Leistung

ABB ist weltweit führend in der Herstellung und Instandhaltung von Turboladern für Diesel- und Gasmotoren von 500 kW bis über 80 MW. Die Technologie und Innovationskraft von ABB helfen Kunden dabei, das Leistungsvermögen ihrer Betriebsmittel auch unter rauesten Bedingungen zu steigern und Emissionen zu senken. Weltweit sind rund 200.000 ABB-Turbolader in Schiffen, Kraftwerken, Generatorsätzen, Diesellokomotiven und großen Spezialfahrzeugen im Einsatz. ABB besitzt mehr als 100 Servicestationen in über 50 Ländern, die Original-Teile und einen Original-Service garantieren.

Ein typischer Turbolader besteht aus zwei Hauptsystemen → 3: der Turbinenstufe (orange in der Abbildung), die vom Abgas des Dieselmotors angetrieben wird, und der Verdichterstufe (blau), die dem Motor verdichtete Verbrennungsluft zuführt. Mit einem Turbolader liefert ein Dieselmotor die vierfache Leistung eines Saugmotors. Mit anderen Worten, der Turbolader multipliziert die Leistung. Darüber hinaus spielt die Turboladertechnik eine bedeutende Rolle bei der Senkung der Kraftstoffkosten und des NO_x -Ausstoßes von Diesel- und Gasmotoren.

Ein Turbolader für moderne Großmotoren besitzt typischerweise eine axiale Turbinenstufe mit einem Düsenring und einem Rotor. Das Gaseintrittsgehäuse vor dem Düsenring des Turboladers lenkt den Abgasstrom in die axiale Turbinenstufe. Das Gas dehnt sich in der Turbinenstufe aus und treibt damit den Rotor an. Hinter dem Rotor fungiert das Gasaustrittsgehäuse als Diffusor – ein Element, das für das Leistungsvermögen der Turbinenstufe von entscheidender Bedeutung ist → 1–2. Der Weg des Gases durch den Turbolader muss so gestaltet werden, dass eine maximale Leistungsausbeute durch die Turbine gewährleistet ist. Hierbei spielen CFD-Verfahren eine entscheidende Rolle.

Herausforderungen bei der Turbinensimulation

Die herkömmliche CFD-Simulation einer axialen Turbinenstufe wird normalerweise an zwei Komponenten durchgeführt: dem Düsenring und dem Rotor. Für gewöhnlich wird nur die Strömung in je einem Schaufelkanal des Düsenrings und des Rotors simuliert, wobei vereinfachend von

Der Weg des Gases durch den Turbolader muss so gestaltet werden, dass eine maximale Leistungsausbeute durch die Turbine gewährleistet ist.

periodischen Strömungsbedingungen ausgegangen wird. Die Simulation und Auslegung des Gasein- und Gasaustrittsgehäuses findet normalerweise danach in einem separaten Prozess statt. Der Vorteil dieses sequentiellen Designansatzes ist der relativ geringe Berechnungsaufwand, der für die Strömungssimulation eines Kanals des Düsenrings und des Rotors erforderlich ist. Der Ansatz funktioniert gut für eine rein axiale Zu- und Abströ-

mung des Gases. Die separate Simulation der Ein- und Austrittsgehäuse – d. h. ohne die Turbinenstufe – ist jedoch unvollständig, da die Wechselwirkung zwischen der Turbinenstufe und den Gehäusen unberücksichtigt bleibt.

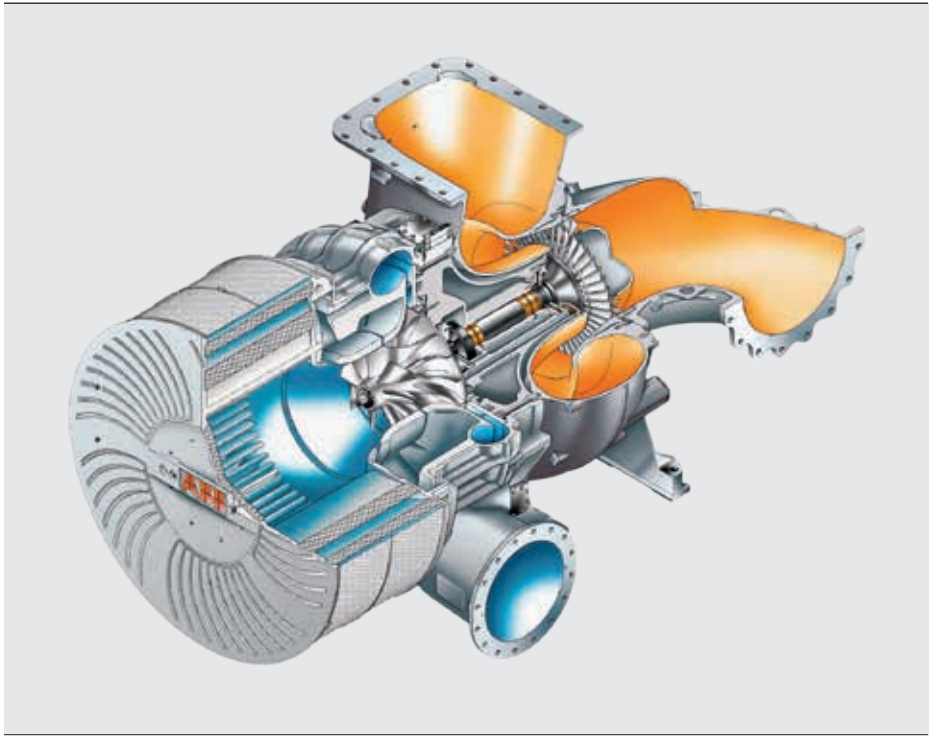
Die Simulation einer Turbinenstufe ist schwieriger, wenn Ein- und Austrittsgehäuse aufgrund von räumlichen Gegebenheiten starke Umlenkungen aufweisen. In diesem Fall ist die Annahme von axialen Ein- und Ausströmbedingungen nicht mehr gültig. Diese Umlenkung der Strömung kann eine bedeutende Auswirkung auf das Leistungsvermögen des Diffusors und der Turbine haben. So kann es zu unerwünschter Strömungsablösung und Rückströmung im Bereich des Diffusors kommen. Dies hat direkt einen Abfall des Turbinenwirkungsgrads zur Folge. Bisher waren zur Auslegung eines geeigneten Diffusors mehrere Designiterationen und umfangreiche Probeläufe erforderlich.

Mithilfe von Mehrkomponenten-CFD-Simulationen kann die Strömung in der Turbinenstufe in Kombination mit ver-

Titelbild

Wie können CFD-Verfahren genutzt werden, um das Design der Turbinen in Turboladern weiter zu verbessern?

Die besondere Herausforderung der Mehrkomponenten-CFD-Simulation besteht im höheren Rechenaufwand. Dieser entsteht durch das 360° umfassende Rechengebiet.



schiedenen Gasein- und Gasaustrittsgehäusen untersucht werden, ohne dass die einzelnen Designvarianten auf dem Prüfstand getestet werden müssen. Mit diesen Simulationen ist es ebenfalls möglich, die durch das radiale Gaseintrittsgehäuse verursachte Inhomogenität im Zustrom zu untersuchen. Deren nachteiliger Effekt auf das Strömungsverhalten in der Turbinenstufe und insbesondere dem Diffusor kann mit dieser Art Simulation direkt am CFD-Modell untersucht werden. Die besondere Herausforderung der Mehrkomponenten-CFD-Simulation besteht im höheren Rechenaufwand. Dieser entsteht durch das 360° umfassende Rechengebiet, da die Annahme einer rein axialen Zu- und Abströmung nicht mehr gültig ist. Wie bei Mehrkomponenten-CFD-Simulationen üblich, sind geeignete numerische Modelle mit aufeinander abgestimmten Gittern für die einzelnen Komponenten und eine zuverlässige Definition der Randbedingungen erforderlich.

Trotz dieser Herausforderungen liefern Mehrkomponenten-CFD-Simulationen Einblicke in die Strömung durch die einzelnen Komponenten der Turbinenstufe. Besonders die Wechselwirkung der Strömung zwischen Rotorausgang und Diffusor kann so im Detail untersucht werden. Da die CFD-Simulation der gesamten Turbinenstufe vom Einlass- bis zum Auslassflansch der Konfiguration der Standard-

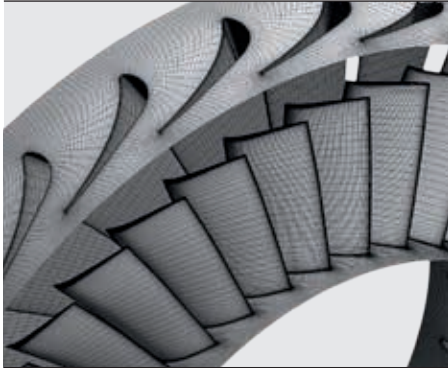
Prüfstandmessung entspricht, können die berechneten CFD-Ergebnisse direkt durch Messungen überprüft werden.

Bei Simulationen des gesamten Systems von Flansch zu Flansch zur Untersuchung des Einflusses von nicht axialen Ein- und Ausströmbedingungen muss jedoch ein Kompromiss zwischen dem erforderlichen Rechenaufwand und der Genauigkeit der Lösung gefunden werden.

High-Fidelity-CFD

Bei der Mehrkomponenten-CFD-Simulation müssen die für die numerische Berechnung erforderlichen CFD-Gitter und Methoden entsprechend definiert sein. Dies geschieht mithilfe eines speziellen Gittergenerators für den Schaufelkanal im Düsenring und im Rotor → 4, während für das Gaseintritts- und Gasaustrittsgehäuse ein universeller Gittergenerator zum Einsatz kommt. Dieses Programm eignet sich aufgrund seiner Flexibilität für die verschiedenen gekrümmten Profile.

Zur Modellierung der stationären Strömung dienen die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen. Die Turbulenz der Gasströmung wird mithilfe des $k-\omega$ -basierten Shear-Stress-Transport-Modells abgebildet. Mit diesem Modell ist es möglich, den Beginn und den Umfang einer Strömungsablösung vorherzusagen.

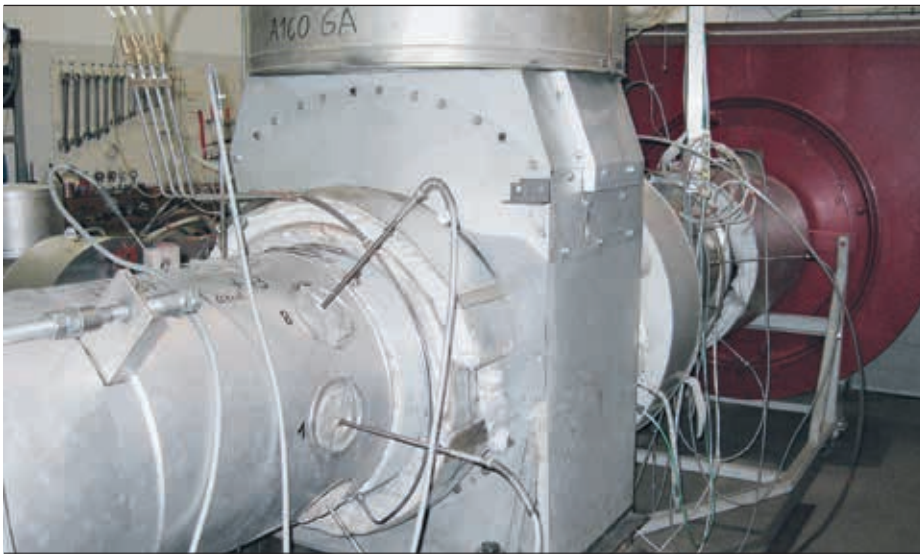


4a Leitschaufeln im Düsenring



4b Laufschaufeln im Rotor

5 Turbinenstufe auf dem Prüfstand



Die CFD-Simulation wird so angelegt, dass die Lösung von kleinskaligen transienten Effekten nicht notwendig ist.

Das stehende Berechnungsgitter des Düsenrings und das rotierende Gitter des Turbinenrads sind in der Simulation durch eine sogenannte „Frozen-Rotor“-Schnittstelle gekoppelt. Dabei handelt es sich um eine vereinfachte Berechnung einer stationären CFD-Lösung für stehende und rotierende Komponenten.

Das oben genannte CFD-Modell basiert auf einer weit verbreiteten industriellen CFD-Plattform, deren Genauigkeit bereits verifiziert wurde. Das Rechengebiet umfasst typischerweise rund 20 Millionen Gitterzellen und -knoten. Diese großen CFD-Simulationen werden auf einem Hochleistungs-Rechencluster (HPC-Cluster) von ABB ausgeführt. Damit ist die Simulation verschiedener Geometrievarianten bei unterschiedlichen Betriebs- und Testbedingungen innerhalb weniger Wochen möglich.

Physikalische Validierung

Die Erstellung und Berechnung des Simulationsmodells ist nur die halbe Miete. Die Simulationsergebnisse müssen auch durch physikalische Beobachtungen – typischerweise Testmessungen – validiert, d.h. bestätigt werden. Damit wird sichergestellt, dass die CFD-Simulation die auftretenden physikalischen Phänomene ausreichend genau beschreibt.

Auf dem Prüfstand → 5 kann eine ganze Reihe von Kenngrößen der Turbinenstufe bestimmt werden. Die statischen und totalen Größen von Druck und Temperatur werden an verschiedenen Positionen in der Turbinenstufe und den Gehäusen gemessen. Außerdem werden globale Kenngrößen wie der Massenstrom, die Turbinenarbeit, die Turbinenleistung und der Wirkungsgrad der Turbinenstufe bestimmt. Dies liefert nicht nur eine hervorragende Grundlage für die genaue Definition der Randbedingungen im CFD-Modell, sondern auch für die Validierung der CFD-Simulationsergebnisse.

Da die CFD-Simulation der Konfiguration der Standard-Prüfstandmessung entspricht, können die Ergebnisse direkt durch Messungen überprüft werden.

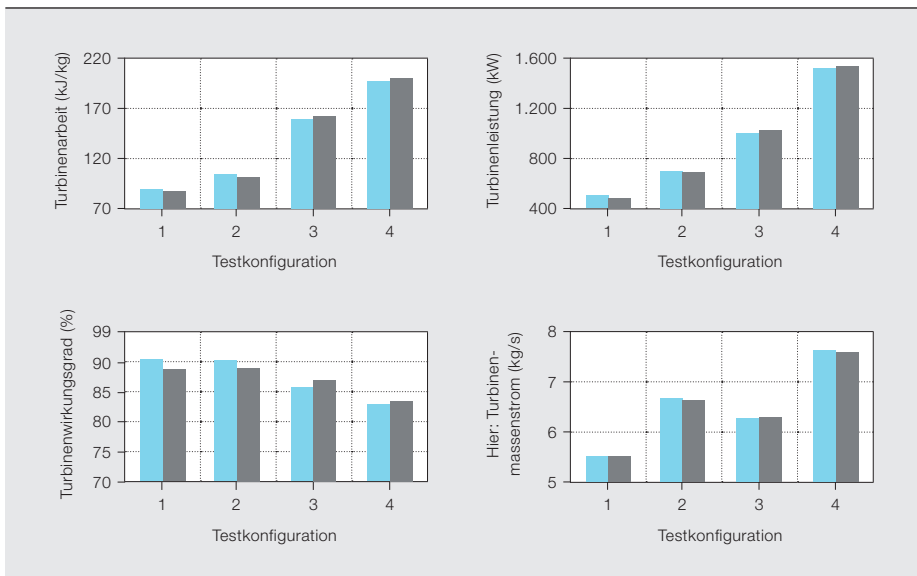
Ergebnisse aus der CFD-Simulation

Mithilfe des CFD-Modells wurden verschiedene Szenarien simuliert. Diese beinhalteten unterschiedliche Designs und Kombinationen von Düsenring, Turbinenrotor, Gasein- und Gasaustrittsgehäuse sowie unterschiedliche Betriebsbedingungen und Kalt- bzw. Heißgas-Prüfbedingungen.

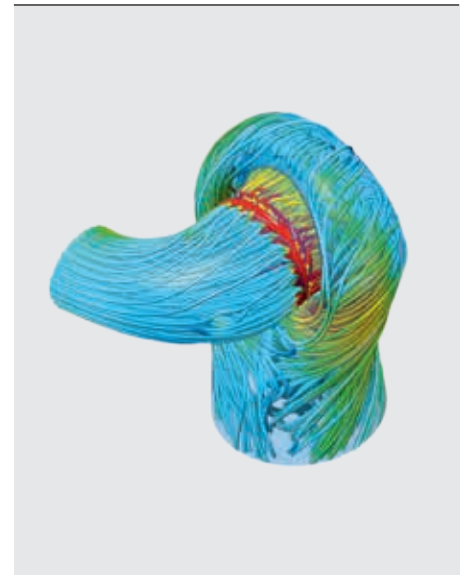
Allgemein zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Testmessungen und den simulierten Kenngrößen der Turbinenstufe → 6. Da die CFD-Simulationen durch Testmessungen für verschiedene Konfigurationen validiert werden, ergibt sich ein guter Einblick in die Strömungsbedingungen vom Einlass- bis zum Auslassflansch → 7.

So können z.B. ein radiales Gaseintrittsgehäuse und die 90°-Umlenkung im Diffusor des Gasaustrittsgehäuses simuliert werden. Bei dieser Konfiguration ist die Gefahr einer unerwünschten Strömungsablösung und einer Rückströmung im Diffusorbereich groß.

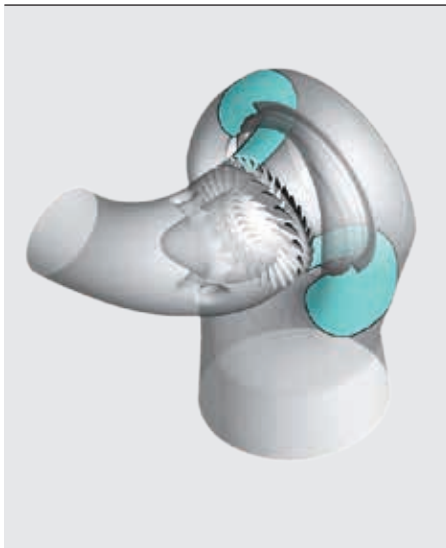
6 Vergleich ausgewählter Kenngrößen aus Testmessungen (blau) und CFD-Simulationen (grau)



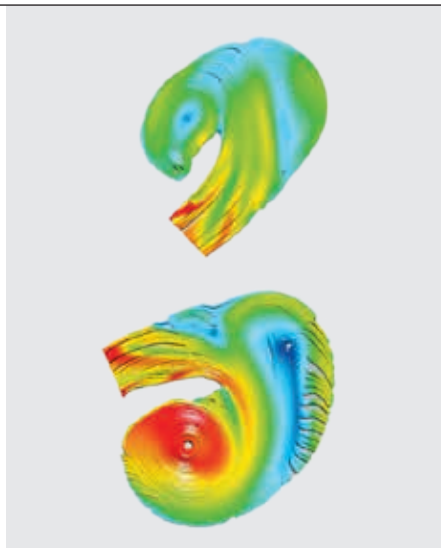
7 Stromlinien von Flansch zu Flansch. Linienfarbe = Geschwindigkeit



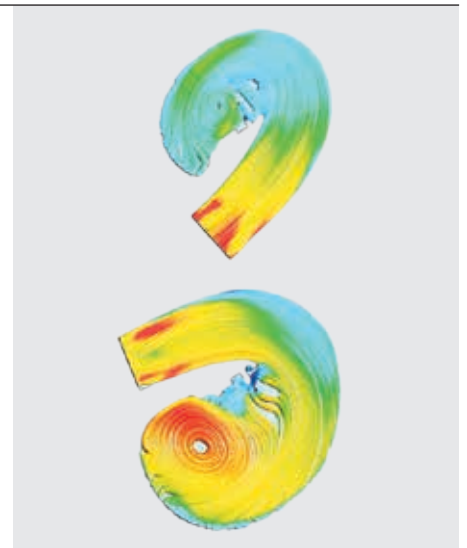
8 Stromlinien bei verschiedenen Designs des Gasaustrittsgehäuses



8a Lage der dargestellten Ebenen



8b Unerwünschte Strömungsablösung und Rückströmung im Diffusor



8c Gewünschte Expansion im Diffusor

Wie die Prüfstandsmessungen gezeigt haben, verschlechtert sich das Leistungsvermögen der Turbinenstufe unter bestimmten Betriebsbedingungen aufgrund einer nicht axialen Zuströmung. Der Abfall des Turbinenwirkungsgrads kann durch die CFD-Simulationen erfasst werden. Des Weiteren können die Strömungsbedingungen im Diffusor durch die CFD-Simulationsergebnisse genauer analysiert werden → 8. Um dies zu verdeutlichen, ist die für eine Strömungsablösung und Rückströmung anfällige Ebene im Diffusor in → 8a gekennzeichnet. Durch die Simulation von Gasaustrittsgehäusen mit unterschiedlichem Diffusordesign können diejenigen Varianten identifiziert werden, die eine Strömungsablösung im Diffusor verhindern → 8a–8c. Auf diese Weise kann

die Turbinenleistung auch unter den durch das radiale Gasein- und Gasaustrittsgehäuse bedingten Einschränkungen und den damit verbundenen ungünstigen Ein- und Ausströmbedingungen erhalten werden.

Ausblick: über Grenzen hinaus

Bei ABB werden CFD-Verfahren genutzt, um das Wissen in unterschiedlichen Bereichen der Turboladertechnik voranzutreiben. Dies sind z. B. die gekoppelte Simulation von Wärmeübertragung und thermischer Analyse zur Auslegung von Kühlsystemen sowie akustische Simulationen zur Geräuschkürzung. Gleichzeitig wird die Entwicklungsumgebung bei ABB – CFD-Simulationstool, Prüfstände und HPC-Cluster – kontinuierlich verbes-

sert. Dies schafft die Grundlage für die Entwicklung der nächsten Generation von Turboladern.

Kwok-Kai So

Bent Phillipsen

Magnus Fischer

ABB Process Automation, Turbocharging

Baden, Schweiz

kwok-kai.so@ch.abb.com

bent.phillipsen@ch.abb.com

magnus.fischer@ch.abb.com

Editorial Board

Claes Ryttoft

Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

Eero Jaaskela

Head of Group Account Management

Andreas Moglestue

Chief Editor, *ABB Review*

Herausgeber

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

ABB Technology Ltd.

ABB Review

Affolternstrasse 44

CH-8050 Zürich

Schweiz

abb.review@ch.abb.com

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

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

Herausgeber und Copyright © 2014
ABB Technology Ltd.
Zürich, Schweiz

Satz und Druck

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
AT-6850 Dornbirn, Österreich

Layout

DAVILLA AG
Zürich, Schweiz

Übersetzung

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

Haftungsausschluss

Die in dieser Publikation enthaltenen Informationen geben die Sicht der Autoren wieder und dienen ausschließlich zu Informationszwecken. Die wiedergegebenen Informationen können nicht Grundlage für eine praktische Nutzung derselben sein, da in jedem Fall eine professionelle Beratung zu empfehlen ist. Wir weisen darauf hin, dass eine technische oder professionelle Beratung vorliegend nicht beabsichtigt ist. Die Unternehmen der ABB-Gruppe übernehmen weder ausdrücklich noch stillschweigend eine Haftung oder Garantie für die Inhalte oder die Richtigkeit der in dieser Publikation enthaltenen Informationen.



ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbreview



Vorschau 3|14

Bergbau

Unser kleiner blauer Planet ist reich an Elementen und Mineralien. Für viele davon hat der Mensch geniale Verwendungen gefunden. Die Einstellungen zum Bergbau sind jedoch gemischt und häufig kontrovers. Dabei sind die meisten Werkstoffe mit kommerzieller Bedeutung, einschließlich derjenigen, aus denen die Gegenstände um uns herum bestehen, irgendwann auf irgendeine Weise aus der Erdkruste gefördert oder mithilfe von Geräten gefertigt worden, die selbst aus solchen Stoffen hergestellt wurden. Bergbau ist ein zentraler, aber häufig unterschätzter Aspekt der menschlichen Existenz.

Die Präsenz von ABB in der Bergbauindustrie umfasst eine Vielzahl von Bereichen. Diese reichen von der Stromversorgung über mechanische Systeme wie Hebezeuge und Lüfter bis hin zu den elektrischen Antrieben, die diese steuern. Messgeräte, Leitsysteme und zahlreiche weitere Aspekte gehören ebenfalls dazu.

Heft 3/2014 der *ABB Review* widmet sich dem Beitrag von ABB in diesem interessanten Bereich.

ABB Review auf dem Tablet

Die *ABB Review* ist nun auch als Tablet-Version verfügbar. Besuchen Sie uns unter <http://www.abb.com/abbreview>

Bleiben Sie auf dem Laufenden ...

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





Zeiten ändern sich.
Qualität bleibt.



Kennen Sie unsere neue *ABB Review* App?
Verfügbar in vier Sprachen bietet sie interaktive Funktionalitäten
für Tablets und Smartphones wie vollständig durchsuchbare
Inhalte, Slideshows, Filme und Animationen.
<http://www.abb.com/abbreview>



Power and productivity
for a better world™

