

review

04|2019 de

E-Mobilität



08



24

06–43 E-Mobilität
44–79 Produktivität



Foto: TenneT

Leistungsschalter-Antriebe



Innovation durch Kooperation

Zukunft im Blick: ABB FIA FORMEL E





**Maschinen lernen
Maschinen**

05 Editorial

E-Mobilität

- 08 Zukunft im Blick : ABB FIA FORMEL E
- 14 Elektrifizierung der Niagara-Schiffe
- 18 Willkommen an Bord, Wasserstoff
- 24 Reichweite – kein Problem für E-Busse
- 30 Die Zukunft des Stromnetzes
- 38 Innovation durch Kooperation

Produktivität

- 46 Maschinen lernen Maschinen
- 52 Optimierung von Antriebssträngen
- 56 Virtuelles Prototyping
- 64 Asset-Optimierung
- 68 Leistungsschalter-Antriebe
- 74 Performance-Überwachung in SCADA

Buzzwords entschlüsselt

80 Hybrid

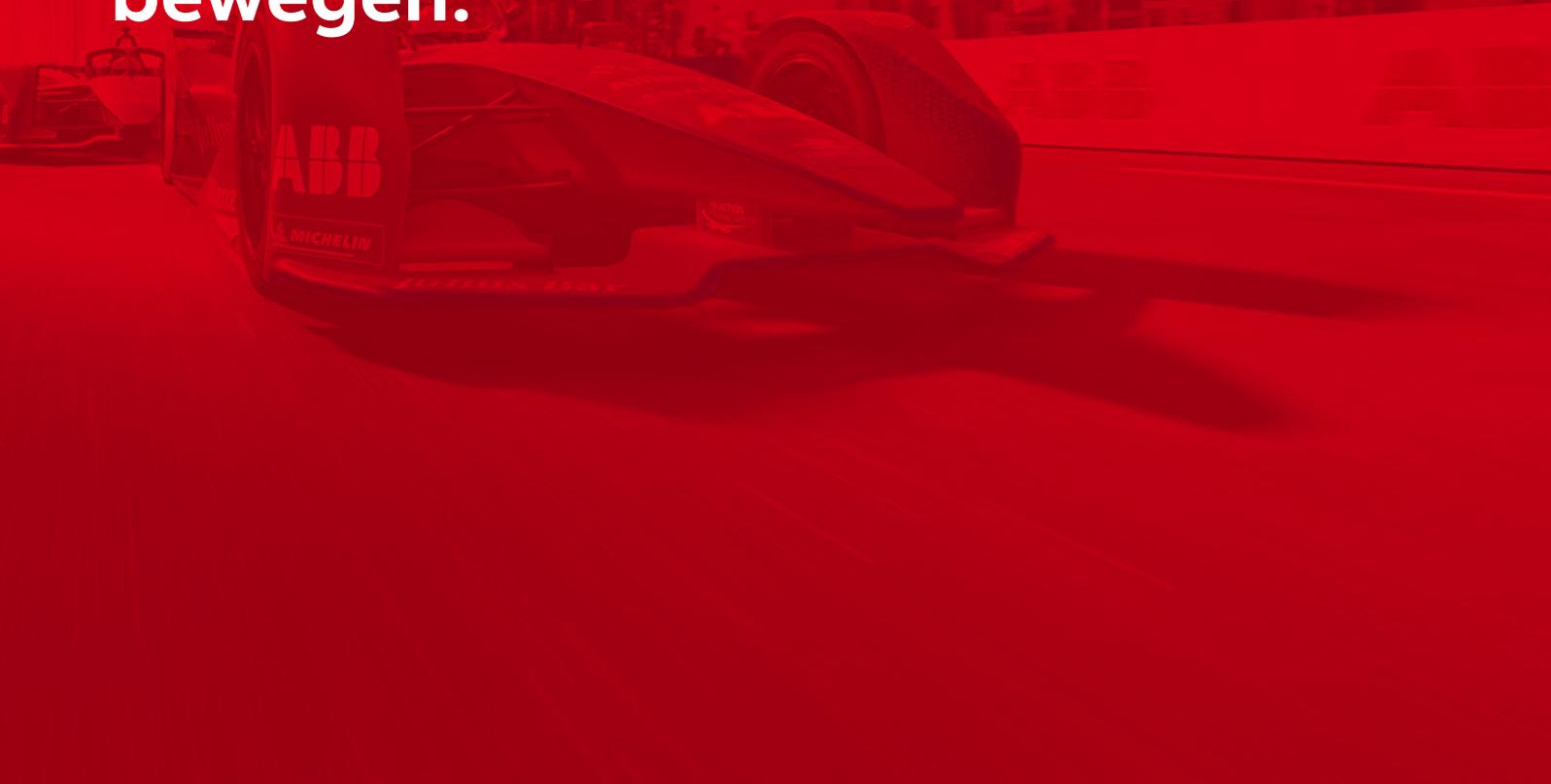
81 Abonnement

81 Impressum

82 Index 2019



ABB nutzt ihre über einhundert-jährige Erfahrung, um die Nutzung der Elektrizität zu verbessern. Da sich Elektrizität nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegt und die Herausforderungen und Möglichkeiten ihrer Nutzung von der zugrunde liegenden Physik bestimmt werden, zeigt diese Ausgabe der ABB Review Momentaufnahmen von Innovationen, die sich ebenfalls sehr, sehr schnell bewegen.



EDITORIAL

E-Mobilität



Liebe Leserin, lieber Leser,

rund ein Fünftel der vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen entfallen auf den Verkehrssektor. Damit ist er prädestiniert für die Dekarbonisierung und Elektrifizierung. Weltweit ist der Marktanteil von neuen vollelektrischen Automobilen auf 5 % gestiegen (von nahezu null noch vor wenigen Jahren). In Norwegen sind bereits über 50 % aller neu zugelassenen Autos elektrisch. Und das ist nur der Anfang.

Beim Umstieg von fossilen Kraftstoffen auf Elektrizität geht es nicht nur darum, eine Energiequelle durch eine andere zu ersetzen. Es entsteht eine vollständig neue Infrastruktur – angefangen vom Management der Energiequellen bis hin zu den Ladestationen selbst.

Dabei umfasst Elektromobilität viel mehr als nur Autos. ABB ist von Anfang an eng mit der Elektrifizierung der Eisenbahn verbunden. Auch der Bussektor erfährt durch die Elektrifizierung einen Wandel, und selbst Schiffe werden zunehmend emissionsfrei. Diese und viele weitere Aspekte werden in der vorliegenden Ausgabe der ABB Review beleuchtet.

Eine interessante Lektüre wünscht Ihnen

A handwritten signature in red ink, appearing to read 'Bazmi Husain', written in a cursive style.

Bazmi Husain
Chief Technology Officer



E-Mobilität





14

Ziel der umwälzenden Entwicklungen im Zuge der Elektromobilität ist es, neue Technologien zum Nutzen von Unternehmen, der Gesellschaft und der Umwelt einzusetzen. ABB hilft dabei, den Strom zur richtigen Zeit dorthin zu bringen, wo er benötigt wird, und – im Motorsport – Rennwagen schnell und sicher ins Ziel zu bringen.

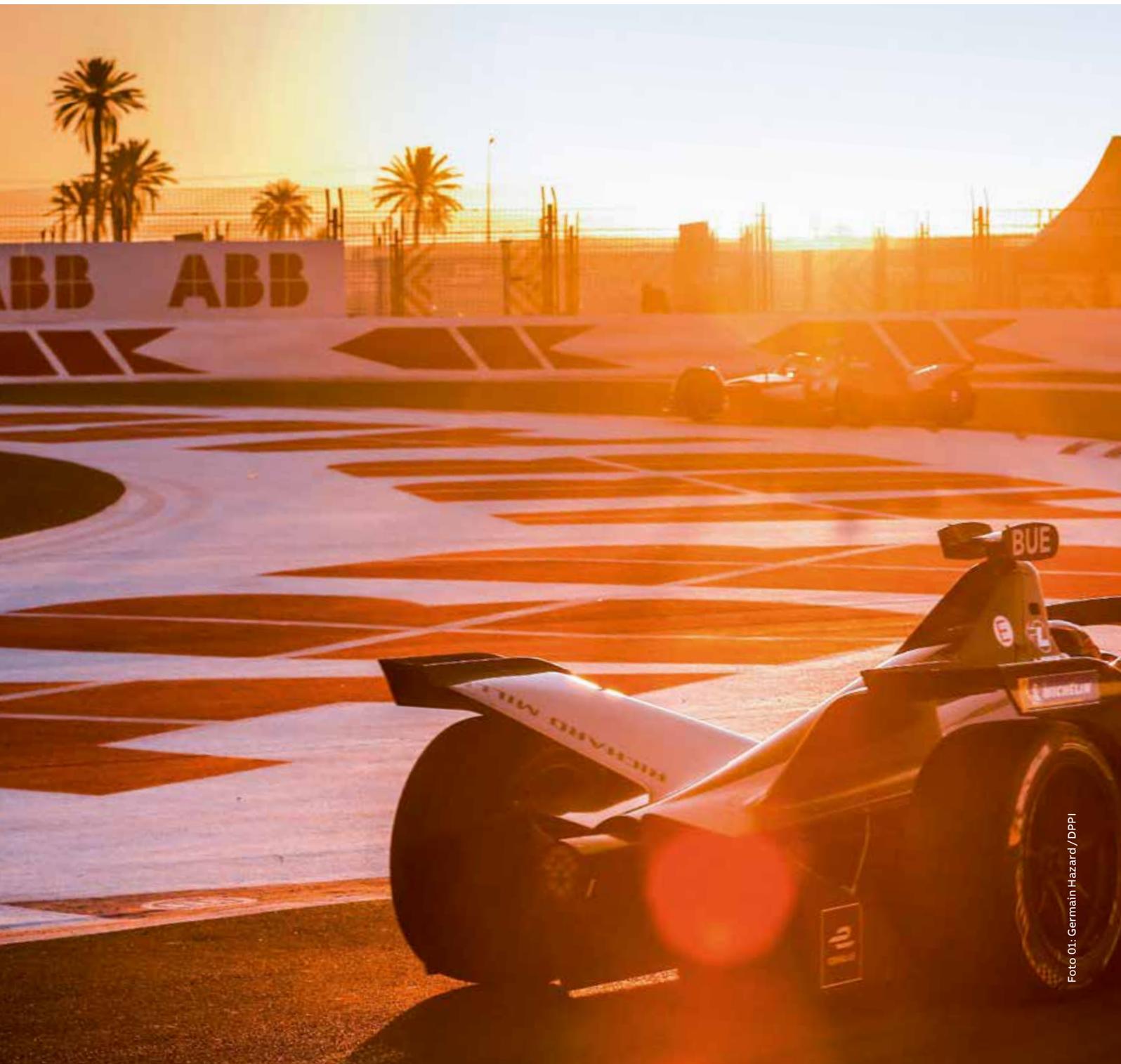
- 08 Die Zukunft im Blick mit der ABB FIA Formel E Meisterschaft
- 14 Elektrifizierung der Passagierschiffe an den Niagarafällen
- 18 Willkommen an Bord, Wasserstoff – QRV?
- 24 E-Busse – Reichweite ist eine Sache der Perspektive
- 30 Die Zukunft des Stromnetzes im Zeitalter der E-Mobilität
- 38 EV-Infrastruktur: Innovation durch Kooperation



08

E-MOBILITÄT

Die Zukunft im Blick mit der ABB FIA Formel E Meisterschaft



01



Die ABB FIA Formel E Meisterschaft – eine Motorsportserie für elektrisch angetriebene Fahrzeuge – bietet nicht nur spannenden und spektakulären Rennsport, sondern ist auch eine vielseitige Test- und Demonstrationsplattform für Elektrifizierungs- und Digitalisierungstechnologien der E-Mobilität.



Anthony Rowlinson
Asea Brown Boveri Ltd
Zürich, Schweiz

anthony.rowlinson@ch.abb.com



02

	Gen2 (Saison 5)	Gen1 (Saison 1–4)
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	280	225
Beschleunigung, 0–100 km/h (s)	2,8	3,0
Leistung im Rennmodus (kW/PS)	200/270	180/240
Max. Leistung, Angriffsmodus (kW)	250 (335)	k. A.
Batteriekapazität (kWh)	54 (volle Rennstrecke)	28 (Fahrzeugwechsel zur Rennmitte)
Batteriespannung (V)	900	700
Batteriegewicht (kg)	385	320
Minimalgewicht (kg)	900	880
Rennlänge	45 min + 1 Runde	Streckenabhängig

03

Die weltweite Revolution der E-Mobilität zeigt sich in vielen Formen – von elektrischen Experimentalflugzeugen und autonomen Fahren über schnell ladende Busflotten bis hin zur wachsenden Zahl vernetzter Elektrofahrzeuge auf öffentlichen Straßen.

Es gibt jedoch einen Bereich der E-Mobilität, der alle anderen in puncto Publikumswirksamkeit und Innovativität in den Schatten stellt: die ABB FIA Formel E Meisterschaft. In dieser Rennserie treten 22 der talentiertesten Fahrer der Welt in hochmodernen elektrischen Rennwagen gegeneinander an. Der erste Lauf zur Formel E Meisterschaft fand

2014 in Peking statt, und ABB ist seit Januar 2018 Titelpartner der Formel E →1.

Der Klang der Stille

Das wohl Bemerkenswerteste an der ABB Formel E ist der Sound – oder besser gesagt, das Fehlen jeglichen Lärms. Als erste vollelektrische internationale Rennserie wurde die Formel E aus einer Idee geboren, die mit einem der ältesten Grundsätze im Motorsport aufräumt: dass Rennsport aufgrund der hochgezüchteten Verbrennungsmotoren mit Drehzahlen von bis zu 20.000 U/min ohrenbetäubend laut sein muss.

In der ABB FIA Formel E Meisterschaft treten 22 der talentiertesten Fahrer der Welt in hochmodernen elektrischen Rennwagen gegeneinander an.

Die ABB Formel E verfolgt von Anfang an einen radikal anderen Ansatz, indem sie auf batteriebetriebene Fahrzeuge mit hocheffizienten elektrischen Antriebssträngen setzt, in denen einige der fortschrittlichsten Technologien der E-Mobilität zum Einsatz kommen. Während die Rennen auf immer

01 Das Fahrzeug des Teams Nissan e.dams beim Formel-E-Rennen in Marrakesch, Marokko, im Jahr 2019.

02 Statt lautem Motorenlärm wie in der Formel 1 ist bei der Formel E nur das leise Surren modernster elektrischer Antriebstechnologie zu hören. Das Bild zeigt eine Szene aus dem Formel-E-Rennen in Santiago de Chile im Jahr 2019.

03 Vergleich der Fahrzeuggenerationen Gen2 und Gen1.

04 Explosionsdarstellung eines Formel-E-Rennwagens.

05 Der Franzose Jean Eric Vergne mit seinem Gen2 DS E-Tense des Teams DS TECHEETAH beim Formel-E-Rennen 2019 in Hongkong.

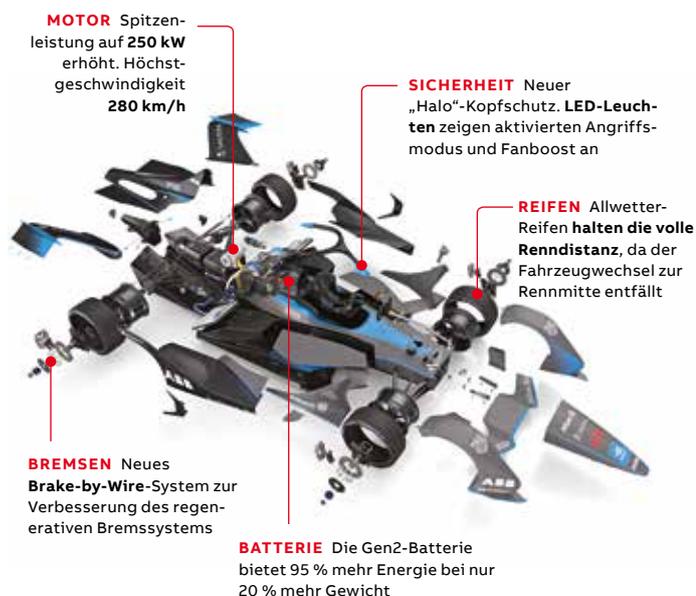
neuen innerstädtischen Rennstrecken rund um die Welt stattfinden, entwickelt sich das charismatische helle Surren der Fahrzeuge zunehmend zum vertrauten Ersatz für das Brüllen der benzinbetriebenen Motoren anderer Rennserien →2.

Kontinuierliche Entwicklung

In weniger als fünf Jahren hat sich die ABB Formel E von einem waghalsigen Unternehmen, das sowohl von eingefleischten Motorsportfans als auch von den weniger visionären Teilen der Automobilindustrie als kuriose Nischenserie abgetan wurde, zu einem solch bedeutenden Sportereignis entwickelt, dass sich mittlerweile viele große Fahrzeughersteller um eine Teilnahme bemühen, um ihr Engagement im Bereich der E-Mobilität durch sportliche Erfolge zu untermauern. Bisher sind schon bekannte Marken wie Audi, BMW, Nissan und Jaguar vertreten, und in der nächsten Saison werden Porsche und Mercedes-Benz hinzukommen.

Die ABB Formel E ist ein Schaufenster für fortschrittliche Elektrifizierungstechnologien und vernetzte Mobilität.

Ein Grund für den Erfolg der Meisterschaft liegt in der hohen Relevanz ihrer Philosophie in Zeiten zunehmenden Bewusstseins für Themen wie Nachhaltigkeit, Energieeffizienz, Luftverschmutzung und innerstädtischer Verkehr. Die ABB Formel E verbindet sportliche Attraktivität mit einem Schaufenster für fortschrittliche Elektrifizierungstechnologien, städtische Verkehrslösungen, neueste Ideen im Bereich vernetzte Mobilität, Smart-City-Visionen und Entwicklungen zur nachhaltigen Stromerzeugung in einem einzigartigen Paket.



04



05

Das „E“ in ABB Formel E

Im Mittelpunkt der Meisterschaft steht ein Feld von schnellen, vollelektrischen Rennwagen, die von 22 der talentiertesten Fahrer der Welt bewegt werden, von denen viele aus der Formel 1 kommen.

Jedes der 11 Teams mit jeweils zwei Fahrzeugen und Fahrern setzt eine eigene Variante des gleichen Basisfahrzeugs ein – ein offenes, einsitziges Formelfahrzeug, bei dem der Fahrer von einem schützenden Kohlenstofffaser-Monocoque umgeben ist, an dem auch die Radaufhängung befestigt ist, und das mit einer aerodynamischen Karosserie verkleidet ist. Soweit unterscheidet sich ein Formel-E-Auto kaum von einem herkömmlichen modernen Formelfahrzeug.

Die entscheidende Hardware eines Formel-E-Renners verbirgt sich hinter dem Fahrer. Statt eines Kraftstofftanks, eines Verbrennungsmotors und

eines halbautomatischen Mehrgang-Getriebes verfügen die 2019 eingeführten Gen2-Boliden über eine große, hocheffiziente Batterie, einen oder zwei Elektromotoren und ein 1-Gang-Getriebe →3–5. Diese Elemente machen das „E“ in Formel E aus.

—
Die entscheidende Hardware eines Formel-E-Renners verbirgt sich hinter dem Fahrer.

Bessere Batterien

Die Batterien der Fahrzeuge werden von McLaren Applied Technologies (MAT), einem Schwesterunternehmen des berühmten McLaren-Rennstalls, gebaut und geliefert. Sie sind in allen Fahrzeugen gleich und entscheidend für die Fahrzeugleistung.



06

07



08

—
06 Dank der verbesserten Leistung der Gen2-Batterie kann der Fahrzeugwechsel zur Rennmitte entfallen.

—
07 Durch die kürzlich eingeführte elektronische Steuerung für das regenerative Bremssystem wurde die Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs weiter verbessert.

—
08 Die Rennversionen des Jaguar I-PACE nutzen ABB-Ladetechnologie an der Rennstrecke.

Mit einem Gewicht von rund 385 kg sind die Gen2-Batterien nicht nur größer und schwerer als die Einheiten, die in der vorherigen Fahrzeuggeneration in der ersten bis zur vierten Saison zum Einsatz kamen, ihre Ausgangsspannung liegt mit 900 V auch 200 V über der der vorherigen Technologie. Dies ermöglicht eine maximale Leistung von 250 kW (ca. 330 PS) und Höchstgeschwindigkeiten von rund 280 km/h.

Noch bedeutender als die nackten Zahlen ist jedoch die Tatsache, dass die Formel-E-Autos durch die höhere Kapazität und Effizienz der Batterie in der Lage sind, mit einer einzigen Ladung eine volle Renndistanz zurückzulegen. In den ersten vier Saisons waren die Fahrer aufgrund technischer Beschränkungen noch gezwungen, ihr Auto nach der Hälfte des Rennens gegen ein identisches Fahrzeug mit geladener Batterie zu tauschen.

Während dieser Fahrzeugwechsel einerseits ein besonderes und für die Formel E einzigartiges Spektakel darstellte, führte es gleichzeitig immer wieder einen der Hauptgründe für die zögerliche Akzeptanz von Elektrofahrzeugen vor Augen: die Reichweitenangst. Mit dem größeren Batteriepaket der Gen2-Fahrzeuge ist dies dank einer 95%igen Steigerung der verfügbaren Energie bei einem Mehrgewicht von 20 % jedoch kein Thema mehr →6. Dies ist wohl das beste Beispiel dafür, wie sich die Rasanz des technischen Fortschritts auf dem Gebiet der Elektromobilität in der ABB Formel E widerspiegelt.

Da die verwendeten Lithiumzellen äußerst temperaturempfindlich sind, spielte das Temperaturmanagement bei der Entwicklung des Gen2-Batteriepakets eine besondere Rolle: Ist es zu kalt, ist die Effizienz nicht optimal; ist es zu heiß, leidet die Lebensdauer. Daher war eine homogene Kühlung über die einzelnen Zellen innerhalb des Pakets hinweg ein wichtiges Designziel.

Versuchsplattform für Technologien

Unter der aggressiv gestylten Karosserie der Gen2-Rennwagen finden sich noch weitere experimentelle Entwicklungen. Die ABB Formel E bietet eine ebenso ideale wie rigorose Umgebung, in der Unternehmen ihre neuen Technologien auf Herz und Nieren prüfen können. So werden z. B. Doppelmotor-Konzepte, bei denen jeweils ein Motor ein Hinterrad antreibt (und nicht wie üblich der Antrieb eines Motors zwischen beiden Rädern aufgeteilt wird), auf mögliche Vorteile in puncto Traktion und Effizienz des Antriebsstrangs geprüft. Alle Fahrzeuge verfügen über regenerative Bremssysteme, die dafür sorgen, dass während der vielen intensiven Verzögerungen auf der Rennstrecke beträchtliche Energiemengen zurückgewonnen werden. Bis zur aktuellen Saison wurde die

sogenannte „regen balance“ vom Fahrer gesteuert, doch die Einführung einer elektronischen Steuerung für Saison fünf verbessert diesen Vorgang →7. Dies ist genau die Art von fortschrittlicher Energiemanagement-Technologie, die für Autohersteller bei der Entwicklung hochwertiger Straßenmodelle eine wichtige Rolle spielt.

Erstklassige Ladetechnologie

ABB unterstützt die Jaguar I-PACE eTROPHY, eine Rennserie, die in der aktuellen Saison bei zehn Rennen der ABB Formel E im Rahmenprogramm an den Start geht, mit ihrem technischen Know-how auf dem Gebiet der Ladetechnologie.

—
Das Batteriepaket der Gen2-Fahrzeuge bietet 95 % mehr Energie bei einem Mehrgewicht von 20 %.

Der I-PACE ist der erste vollelektrische SUV von Jaguar und wurde auf der New York International Auto Show 2019 von 86 Motorjournalisten aus 24 Ländern zum Auto des Jahres gekürt, nachdem er bereits wenige Wochen zuvor den Titel „European Car of the Year“ erhalten hatte. Die Rennversionen des I-PACE werden von speziell für den Einsatz an der Rennstrecke entwickelten Varianten der DC-Ladestation Terra 53 von ABB geladen →8. Um die Anforderungen an eine Ladestation zu erfüllen, die sowohl problemlos an der Rennstrecke bewegt als auch von Veranstaltung zu Veranstaltung transportiert werden kann, beauftragte ABB ein Team von Ingenieuren damit, aus einer standardmäßigen Terra-Station eine kompaktere Einheit mit Rädern zu entwickeln, die sich einfach transportieren und bewegen lässt. Zur Mitte der Saison arbeiteten die Ladestationen problemlos mit einer Erfolgsrate von 100 %.

Die ABB Formel E erlebt momentan spannende Zeiten. Die Meisterschaft erfreut sich wachsender Beliebtheit, und weitere technische Kooperationen mit ABB sind im Gespräch. Als Plattform, auf der innovative Technologien für die E-Mobilität getestet werden können und der Welt das Potenzial von Elektrofahrzeugen vor Augen geführt werden kann, bleibt die Meisterschaft nach wie vor beispiellos. Sébastien Buemi, Fahrer des Teams Nissan e.dams, Gesamtsieger der zweiten Formel-E-Saison und ABB-Botschafter, fasst es wie folgt zusammen: „Wenn wir in der ABB Formel E fahren, fühlt es sich an, als würden wir die Zukunft gestalten.“ •

E-MOBILITÄT

Elektrifizierung der Passagierschiffe an den Niagarafällen

Die nächste Generation von vollelektrischen Passagierschiffen der bekannten Maid-of-the-Mist-Tour an den Niagarafällen fährt emissionsfrei mit ABB-Technologie. Die beiden neuen Schiffe werden ausschließlich mit Hochleistungs-Batteriepaketen betrieben und sind damit die ersten vollelektrischen Schiffe, die in den USA gebaut werden.



Priscila Faester
ABB Inc. Marine and Ports
Miramar, FL, USA

priscila.faester@
us.abb.com

Es passt gut, dass einer der jüngsten Fortschritte auf dem Gebiet der Elektrotechnik einen Bezug zu den Niagarafällen hat. Denn hier ging im Jahr 1896 das Wasserkraftwerk von George Westinghouse in Betrieb und beendete den sogenannten Stromkrieg zwischen dem Gleichstromverfechter Edison und den Wechselstromanhängern Westinghouse und Tesla [1]. Infolge dieses historischen Ereignisses wurde die nahegelegene Stadt Buffalo mit Wechselstrom elektrifiziert und verfügte bald als erste Stadt der USA über eine großflächige Straßenbeleuchtung. Noch heute gilt Buffalo als „Stadt des Lichts“. Nur wenige Jahre später ermöglichte der an den Niagarafällen erzeugte Wechselstrom die Beleuchtung großer Teile New Yorks, einschließlich des Broadways. Das Wasserkraftwerk an den Niagarafällen war eines der ersten Großkraftwerke in Nordamerika und stellte einen persönlichen Triumph für Tesla dar.



Edward Schwarz
ABB Inc. Marine and Ports
Miramar, FL, USA

edward.schwarz@
us.abb.com

Über 120 Jahre später stehen die Niagarafälle erneut im Mittelpunkt einer technischen Innovation.

Auch ABB hatte seinen Anteil an der Geschichte von Tesla und Westinghouse. Im Jahr 1891 gründete der Schweizer Charles Brown, einer der führenden Köpfe auf dem Gebiet der Wechselstromtechnik in Europa, zusammen mit Walter Boveri das ABB-Vorgängerunternehmen Brown Boveri & Cie, das General Electric

im Kampf gegen die Dominanz von Westinghouse und Tesla unterstützte. In einer weiteren Wendung der Geschichte übernahm ABB knapp einhundert Jahre später das Übertragungs- und Verteilungsgeschäft von Westinghouse. Das war im Jahr 1989.

Heute, über 120 Jahre nach den Pionierleistungen auf dem Gebiet der Elektrotechnik, stehen die Niagarafälle erneut im Mittelpunkt einer technischen Innovation: Mithilfe von emissionsfreier ABB-Technologie entsteht eine neue Generation von vollelektrischen Passagierschiffen, die die derzeitigen dieselbetriebenen Schiffe der berühmten Maid-of-the-Mist-Tour ersetzen sollen. Diese führt jeweils über 500 Besucher am Fuß der American Falls entlang in das Becken der Horseshoe Falls, dem größten der drei Wasserfälle →1. Diese Bootstour ist nicht nur eine der beliebtesten Touristenattraktionen der USA, sondern auch die älteste.

Die beiden neuen, 28 m langen Schiffe mit Kataranrumpf werden ausschließlich von Hochleistungs-Batteriepaketen betrieben und sind damit die ersten vollelektrischen Schiffe, die in den USA gebaut werden (normalerweise verfügen elektrische Schiffe und Boote über Hilfsdieselgeneratoren zur Versorgung der Bordsysteme oder zur Schuberzeugung, wenn der elektrische Antrieb nicht verfügbar ist).

Emissionsfreie Natur

Die Niagarafälle gehören zu den Wundern der Natur und sollten als solche von Besuchern ohne



01

— 01 Künstlerische Darstellung der neuen vollelektrischen Maid-of-the-Mist-Schiffe. Die Schiffe sind modular aufgebaut. Die Module wurden in einer Werft gebaut und anschließend per Lkw und Kran zum Montageort in der Nähe des Flusses transportiert. Letzteres erwies sich aufgrund der besonderen Topografie des Ortes als schwierig. Die Rümpfe der Schiffe bestehen aus der korrosions- und meerwasserbeständigen Aluminiumlegierung 5086 H116.

die störenden Geräusche, Abgase und Vibrationen herkömmlicher Schiffsmotoren genossen werden können →2. Mit den neuen Schiffen, die voraussichtlich Ende 2019 ihren Betrieb aufnehmen, gelangen die Fahrgäste nahezu geräuschlos zu den Fällen, wo sie die Erhabenheit des Naturschauspiels in frischer Luft in sich aufnehmen können, ganz so, wie es die Natur vorsieht.

— **Der 7-minütige Ladevorgang liefert genügend Energie, um die Gesamtleistung der beiden Antriebsmotoren aufrechtzuerhalten.**

Anlegen und Laden

Die Maid-of-the-Mist-Schiffe fahren alle 30 Minuten von ihrem flussabwärts gelegenen Anleger zum Fuß der Niagarafälle und transportieren 1,6 Millionen Passagiere im Jahr. Während das Schiff am Anleger liegt und die Passagiere ein- und aussteigen, werden

die Lithium-Ionen-Batterien der neuen Schiffe geladen. Der siebenminütige Ladevorgang liefert den Batterien genügend Energie, um die Gesamtleistung der beiden elektrischen Antriebsmotoren von 400 kW (563 PS) aufrechtzuerhalten. Der Verbrauch pro Fahrt liegt bei 38 kWh. Die Batterien, die am Ende des Tages noch zu 80 % geladen sind, werden über Nacht vollständig aufgeladen. Der Strom, der zum Laden der 316-kWh-Batteriepakete erforderlich ist, wird ebenfalls emissionsfrei aus Wasserkraft gewonnen.

Zurzeit wäre der Bau vollständig elektrischer hochseetüchtiger Schiffe noch schwierig. Doch die Tatsache, dass die Systeme immer kleiner und kostengünstiger werden, eröffnet viele neue Möglichkeiten, die noch vor wenigen Jahren als unmöglich galten. So ist es durchaus denkbar, dass in nicht allzu ferner Zukunft autonome, vollelektrische Hochseeschiffe über die Weltmeere fahren.

Vollelektrisch in die Zukunft

Das Bootsunternehmen, die 1846 gegründete Maid of the Mist Corporation, ist ein Familienbetrieb,

dessen Entscheidung, auf einen vollelektrischen kommerziellen Schiffsbetrieb zu setzen, für weltweite Aufmerksamkeit gesorgt hat. Die Niagara-Boote mögen zwar zu den ersten vollelektrischen Schiffen gehören, aber sie werden mit Sicherheit nicht die letzten sein. Passagierfähren, Binnenschiffe, Hafenschlepper und Baggerschiffe sind nur einige Schiffstypen, die sich besonders für einen vollelektrischen Betrieb eignen. Da Schiffe zu den größten Verursachern von Transportemissionen (3 bis 5 % des weltweiten CO₂ und über 5 % des weltweiten SO_x) gehören, kann die Elektrifizierung der Schifffahrt nicht früh genug kommen.

Zurzeit wäre der Bau vollständig elektrischer hochseetüchtiger Schiffe noch schwierig. Doch die Tatsache, dass die Systeme immer kleiner und kostengünstiger werden, eröffnet viele neue Möglichkeiten, die noch vor wenigen Jahren als unmöglich galten. So ist es durchaus denkbar, dass in nicht allzu ferner Zukunft autonome, vollelektrische Hochseeschiffe über die Weltmeere fahren.

ABB und die E-Mobilität

ABB unterstützt die E-Mobilität auch außerhalb der Schifffahrt – z. B. durch die Bereitstellung von öffentlichen und privaten Ladelösungen für Elektrofahrzeuge (bis Anfang 2019 hat ABB über 10.000 DC-Schnellladesysteme in 73 Länder verkauft).

Zukunftsorientierte Produkte wie die Hochleistungs-Ladestation Terra HP von ABB sind sowohl für derzeitige als auch für zukünftige Batterien mit höherer Kapazität ausgelegt.

—
Produkte wie die Hochleistungs-Ladestation Terra HP sind sowohl für derzeitige als auch für zukünftige Batterien ausgelegt.

Zudem leistet ABB weltweit Unterstützung bei der Realisierung elektrischer Busdienste, die die Umweltbelastung durch den Menschen reduzieren. Darüber hinaus gehört ABB zu den Gründern der für die Ladestandards CHAdeMO und CCS verantwortlichen Konsortien. Im Jahr 2010 präsentierte ABB ihr erstes DC-Schnellladesystem, 2012 das erste landesweite DC-Ladenetz und 2016 das erste E-Bus-Ladenetz in Europa.

Neue Horizonte für die Schifffahrt

Das weltweite Interesse an der Elektrifizierung der Schifffahrt wird unter anderem durch neue Bestimmungen der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (IMO), z. B. die Verordnung IMO2020 zur Senkung des maximal zulässigen Schwefelgehalts von Schiffstreibstoffen, vorangetrieben. Besonderes Interesse gilt der



—
02 Eines der derzeitigen Maid-of-the-Mist-Schiffe vor den American Falls. Die neuen vollelektrischen Schiffe werden geräusch-, emissions- und vibrationsfrei sein.

—
03 Die erste elektrische Fähre Islands in einer Darstellung von Polarkonsult, einem der Konstruktionspartner für das Schiff.



03

Brennstoffzellen-Technologie, einem Bereich, in dem auch ABB mit mehreren Forschungsprojekten aktiv ist. Dazu gehört auch das Projekt MARANDA [2], ein von der Europäischen Union finanziertes Gemeinschaftsprojekt mehrerer Unternehmen zur Entwicklung und Implementierung einer Protonenaustauschmembran-(PEM-) Brennstoffzelle mit einer Leistung von 165 kW für den Einsatz an Bord des Forschungsschiffs Aranda. Das Hauptziel des Forschungsprojekts besteht darin, die Fähigkeit der Brennstoffzelle zur Erzeugung emissionsfreier elektrischer Energie mit geringer Geräusch- und Vibrationsentwicklung nachzuweisen. ABB liefert die erforderliche Stromrichtertechnik zum Anschluss des Brennstoffzellensystems an die elektrische Energieversorgung des Schiffs.

—
Ziel des MARANDA-Projekts ist die Entwicklung einer PEM-Brennstoffzelle mit 165 kW für das Forschungsschiff Aranda.

Unabhängig davon haben ABB und Ballard Power Systems, der weltweit führende Anbieter innovativer, sauberer Brennstoffzellenlösungen, eine Absichtserklärung zur Entwicklung eines Brennstoffzellensystems der nächsten Generation für eine nachhaltige Elektromobilität in der Schifffahrt unterzeichnet [3,4].

Das Brennstoffzellensystem soll die Einführung nachhaltiger Lösungen für die Elektromobilität in der Schifffahrt beschleunigen und Reedereien dabei helfen, den steigenden Anforderungen an einen sauberen Betrieb gerecht zu werden.

Die beiden Partner wollen bestehende Brennstoffzellentechnologien mit Leistungen im Kilowattbereich

optimieren, um eine zukunftsweisende Lösung im Megawattbereich zu entwickeln, mit der größere Schiffe versorgt werden können. Trotz einer Erzeugungsleistung von 3 MW (4.000 PS) wird das neue System in ein einziges Modul passen, das nicht größer ist als ein herkömmlicher, mit fossilen Brennstoffen betriebener Schiffsmotor.

E-Mobilität für eine grünere Welt

Auch in Europa wurden bereits emissionsfreie elektrifizierte Schiffe mit ABB-Technologie ausgerüstet, darunter die erste elektrifizierte Fähre Islands →3. Das Schiff soll 75 Autos und 550 Passagiere auf einer 13 km langen, mitunter tückischen Überfahrt zu einer Insel vor der isländischen Küste transportieren. ABB liefert nicht nur den Antrieb und den Energiespeicher (ein Batteriepaket mit 3 MWh), sondern auch die Generatoren, Transformatoren und Schaltanlagen sowie das Energiemanagementsystem und das Steuerungssystem für den Energiespeicher. Mit Hilfe eines landseitigen DC-Stromanschlusses und des Onboard DC Grid™-Systems von ABB kann die Batterie in nur 30 min geladen werden. Anders als die Niagara-Schiffe verfügt die Fähre über einen Reserve-Dieselmotor, der – so wird erwartet – allerdings nur selten zum Einsatz kommen wird.

Der entschlossene Schritt der Maid of the Mist Corporation in Richtung E-Mobilität und die beschriebene umfangreiche Palette von ABB-Lösungen für die Elektrifizierung von Schiffen kennzeichnen nicht nur den Beginn einer neuen Ära im Verkehrswesen, sondern unterstreichen auch das Bestreben von ABB, die Welt auf nachhaltige Weise mit Energie zu versorgen. Die Reduzierung der Emissionen an den Niagarafällen ist nicht nur wichtig für dieses einzigartige Naturwunder, sondern zeigt der Welt auch, dass die Technologien, die eine nachhaltige Mobilität ermöglichen, schon heute zur Verfügung stehen. •

Literaturhinweise

[1] D. Siegrist: „125 Jahre und eine Jahrhundertfeier“. ABB Review 3/2016, S. 7–12.

[2] M. Kajava: „MARANDA – Aranda goes hybrid“. Verfügbar unter: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AK-K1075A7585&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

[3] „ABB and Ballard Power Systems to jointly develop zero-emission fuel cell power plant for shipping industry“. Verfügbar unter: <https://new.abb.com/news/detail/5360/abb-and-ballard-power-systems-to-jointly-develop-zero-emission-fuel-cell-power-plant-for-shipping-industry>

[4] K. Vanska et. al: „Willkommen an Bord, Wasserstoff – QRV?“. ABB Review 4/2019, S. 18–23.

E-MOBILITÄT

Willkommen an Bord, Wasserstoff – QRV*?

Während sich Wasserstoff als Kraftstoff zunehmend etabliert, sind die Experten der Schifffahrtsindustrie auf der Suche nach Alternativen zu fossilen Kraftstoffen, um den Anforderungen einer vielfältigen und sich entwickelnden Branche gerecht zu werden. Wasserstoff-Brennstoffzellen gelten als vielversprechende Möglichkeit, um die Treibhausgasemissionen von Schiffen drastisch zu reduzieren. In Kombination mit bewährter Batterietechnologie können sie die Energiedichte im emissionsfreien Schiffsbetrieb erhöhen und gleichzeitig die Einsatzdauer von Schiffen verlängern.

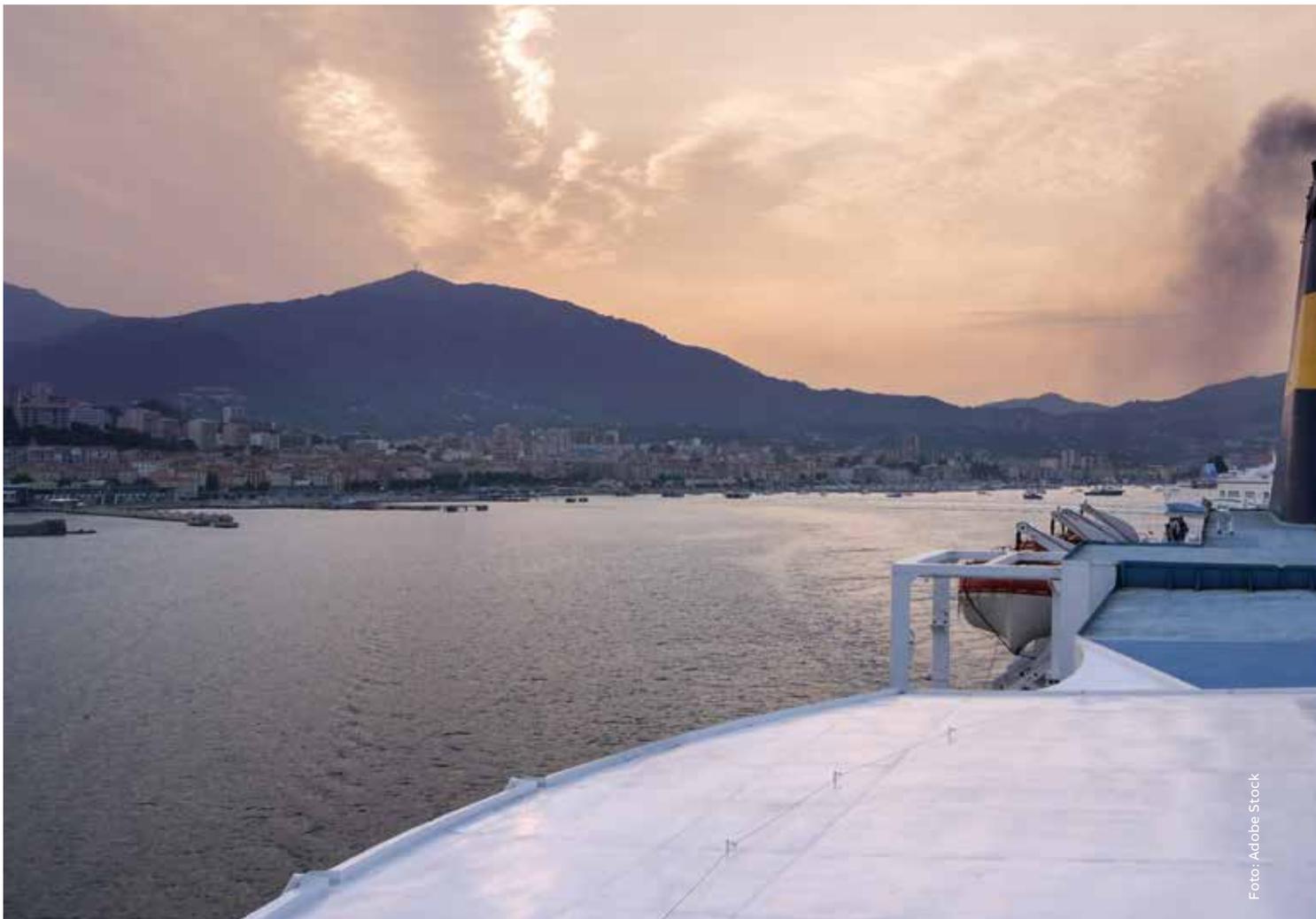


Foto: Adobe Stock

* Q-Schlüssel werden in der Seefahrt als Kurzformen für Standardnachrichten verwendet. QRV steht für „Sind Sie bereit?“, und QUK steht für „Wie ist der Zustand der See bei (Ort oder Koordinaten)?“.



—
Im April 2018 hat das Marine Environment Protection Committee (MEPC) der IMO eine Strategie zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen von Schiffen verabschiedet. Mittel- und langfristig sind neue Schiffsantriebstechnologien und kohlenstoffarme bzw. -freie Kraftstoffe erforderlich, um den Sektor zu dekarbonisieren.

—
Klaus Vanska
Sami Kanerva
ABB Marine & Ports
Helsinki, Finnland

klaus.vanska@fi.abb.com
sami.kanerva@fi.abb.com

Jostein Bogen
ABB Marine & Ports
Billingstad, Norwegen

jostein.bogen@no.abb.com

George Skinner
Ballard Power Systems
Vancouver, Kanada

Die Internationale Seeschiffahrts-Organisation (IMO) hat das Ziel vorgegeben, die jährlichen Emissionen der Schifffahrt bis zum Jahr 2050 um mindestens 50 % gegenüber dem Ausstoß von 2008 zu reduzieren [1]. Um dies zu erreichen, muss sich die Branche mit verschiedenen alternativen Kraftstoffquellen befassen. Eine oder zwei reichen nicht aus, um die Anforderungen zu erfüllen, und jeder Kraftstoff wird seine eigenen Märkte und Anwendungen haben. Die Herausforderung besteht darin, Kunden dabei zu helfen, die breite Palette von Alternativen zu erfassen und die für ihre Bedürfnisse beste Wahl zu treffen. Dabei stehen je nach Region, Marktanforderungen, Betriebs- und Handelsstrukturen usw. unterschiedliche Kraftstoffe zur Verfügung.

Dazu gehören Biodiesel, Kraftstoffe aus Biomasse einschließlich Abfall und erneuerbare Quellen wie Sonne, Wellen und Wind. So lässt sich die durch erneuerbare Energien erzeugte Elektrizität binden und zur Spaltung von Molekülen nutzen, um Wasserstoff herzustellen. Eine weitere Möglichkeit ist die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen, Ammoniak, Methan oder Methanol.

—
Wasserstoff-Brennstoffzellen können die Energiedichte im emissionsfreien Schiffsbetrieb erhöhen und die Einsatzdauer von Schiffen verlängern.

Die Herstellung dieser Kraftstoffe basiert heute zum größten Teil auf fossilen Kraftstoffen, doch sie alle können in Zukunft erneuerbar sein. Der bewährte Verbrennungsmotor kann weiterhin mit verschiedenen alternativen Kraftstoffen, z. B. Ammoniak, genutzt werden, wobei allerdings in den meisten Fällen Modifikationen des Motors erforderlich sind. Eine weitere Möglichkeit sind Brennstoffzellen. Im Bereich der erneuerbaren Energien sind die Kosten für verschiedene Kraftstoffe zwar ähnlich, doch die Unterschiede liegen in der Art und Weise ihrer Nutzung und in ihrer Verfügbarkeit.



01

Wasserstoff und Brennstoffzellen

Alle Kraftstoffalternativen sind mit eigenen Herausforderungen verbunden. So besitzt Wasserstoff z. B. eine sehr geringe Energiedichte und muss verdichtet und gekühlt werden, damit er auf praktikable Weise transportiert und gespeichert werden kann. Ammoniak ist stark ätzend und muss ebenfalls gekühlt werden, während Methanol giftig ist. Jeder Kraftstoff erfordert seine eigene Transport- und Speichertechnologie, es gibt keine universelle Lösung. Um dem kommenden Bedarf gerecht zu werden, führen mehrere Länder Wasserstoffstudien durch, die sich an der jeweiligen Situation des Landes orientieren. So haben die Vereinigten Arabischen Emirate angekündigt, Wasserstoff mithilfe von Sonnenenergie zu produzieren, während Island dazu Erdwärme nutzt. Doch alle diese Länder stehen noch vor Herausforderungen, wenn es darum geht, die Energie dorthin zu transportieren, wo sie genutzt wird.

ABB und Ballard Power Systems haben vor Kurzem eine Absichtserklärung zur Entwicklung von Brennstoffzellensystemen der nächsten Generation für die Schifffahrt unterzeichnet →1. Es wird erwartet, dass das neue Brennstoffzellensystem, das von ABB und Ballard Power Systems gemeinsam konzipiert, entwickelt und validiert wird, den branchenweiten Einsatz nachhaltiger Lösungen für die Elektromobilität in der Schifffahrt beschleunigen wird. Zusammen mit Ballard wird ABB bestehende Brennstoffzellentechnologien mit Leistungen im Kilowattbereich optimieren, um eine zukunftsweisende Lösung im Megawattbereich für größere Schiffe zu entwickeln →2. Trotz seiner Leistung wird das neue System in ein Modul passen, das nicht größer ist als ein herkömmlicher, mit fossilen Brennstoffen betriebener Schiffsmotor.

Als weltweiter Anbieter innovativer, sauberer Energielösungen verfügt Ballard Power Systems über langjährige Erfahrung im Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellensystemen in landbasierten Anwendungen. Erste Entwicklungen in diesem Bereich fanden bereits 1983 statt. Die Erfahrungen mit Wasserstoff als Kraftstoff im maritimen Bereich gehen auf die Tätigkeit des Unternehmens als Berater des kanadischen Militärs zurück.

—
Das Ziel besteht darin, ein ausfallsicheres Stromerzeugungssystem auf Brennstoffzellenbasis zu konzipieren.

„Die kanadische Marine nutzt seit 1993 Brennstoffzellen in ihren U-Booten“, sagt George Skinner, Sicherheitsexperte bei Ballard Power Systems. „Diese Tatsache allein zeigt, dass Wasserstoff gar nicht so gefährlich ist, wie man immer meint. Schließlich ist der letzte Platz, an dem man einen gefährlichen Kraftstoff haben möchte, eine Stahlröhre in mehreren Hundert Metern Wassertiefe.“

Einige Menschen werden hellhörig, wenn es um die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff geht. Dabei ist Wasserstoff nicht unbedingt gefährlicher oder sicherer als andere Kraftstoffe – nur anders →3. Laut Skinner „besitzt Wasserstoff weniger explosive Energie, er brennt schneller und kälter und verteilt sich sehr schnell. Er ist sehr leicht entzündlich, daher ist es wichtig, Leckagen zu verhindern, geeignete Warnsysteme zu installieren und stets für ausreichende Belüftung zu sorgen. Der IGF-Code

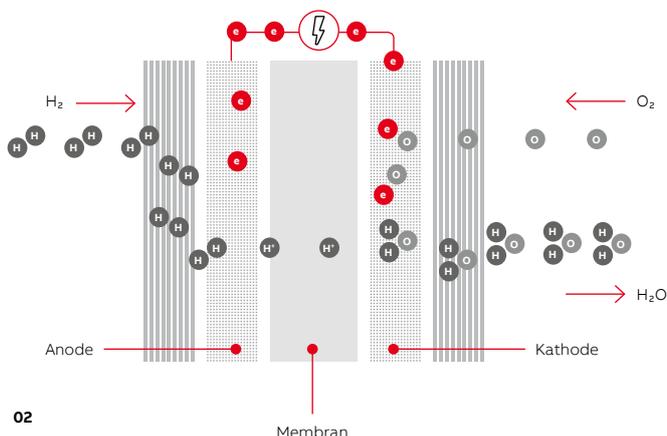
— 01 ABB und Ballard Power Systems entwickeln gemeinsam emissionsfreie Brennstoffzellen für die Schifffahrt.

— 02 Darstellung eines PEM-Brennstoffzellensystems.

(International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels [2]) enthält bereits entsprechende Vorgaben für den Umgang, und DNV GL befasst sich mit verbesserten Rohrleitungssystemen. Neue Vorschriften und Normen befinden sich ebenfalls in der Entwicklung.“

DNV GL, ein führendes weltweites Unternehmen für Qualitätssicherung und Risikomanagement, hat im Januar 2018 die ersten Bestimmungen für den Einsatz von Wasserstoff auf Schiffen veröffentlicht. Diese basieren auf Vorschriften und Normen für andere Industrien, in denen Wasserstoff schon länger zum Einsatz kommt. „Die Grundprinzipien sind die gleichen wie bei Flüssigerdgas (LNG) und anderen Kraftstoffen mit niedrigem Flammpunkt“, so Skinner. „Verfahren für den Umgang mit Flüssigerdgas sind bereits wohlbekannt, d. h. die Technologie ist erprobt. Die eigentliche Herausforderung besteht nun darin, die Infrastruktur zu entwickeln.“

Letztendlich besteht das Ziel darin, ein ausfallsicheres Stromerzeugungssystem auf Brennstoffzellenbasis zu konzipieren. Dies wurde bereits an Land gemacht, also ist es auch auf See möglich. Brennstoffzellen haben eine lange Lebensdauer und sind relativ wartungsarm. Nach Ansicht von Skinner „sind die Hauptprobleme beim Wasserstoff mit Vorstellungen aus der Vergangenheit verbunden, wie der Hindenburg-Katastrophe [bei der das deutsche Luftschiff LZ 129 „Hindenburg“ am 6. Mai 1937 in Brand geriet und explodierte] und der Wasserstoffbombe. Tatsächlich ist die Wasserstoffbombe eine Kernreaktion, es handelt sich also um eine totale Fehldarstellung. Wasserstoff ist in der Industrie, der Luft- und Raumfahrt und vielen Transportmitteln allgegenwärtig.“



02

Laut Skinner verfügt die NASA über jahrzehntelange Erfahrung in der Nutzung von Wasserstoff als Raketentreibstoff, und die Kreuzfahrtgesellschaft Viking Cruises befindet sich in Gesprächen mit der NASA, um mehr über das Laden des Treibstoffs zu erfahren. Ballard Power betreibt sein eigenes Brennstoffzellenlabor mit flüssigem Wasserstoff. „Wir bekommen seit 20 Jahren zweimal wöchentlich eine Lieferung. Das Laden vom Land aufs Schiff ist im Grunde nichts anderes. Letztendlich“, sagt er lächelnd, „ist es nur Raketentechnik.“

Brennstoffzellen in Kombination mit Batterien sind ein wichtiger Bestandteil der „Electric. Digital. Connected.“-Vision von ABB.

„Wenn man erst einmal für Wasserstoff eingerichtet ist, ist man flexibel. Ganz gleich, wie er produziert wird – durch Sonne, Gas, Wasserkraft oder Wind – Wasserstoff ist der Energieträger. Ein gutes Beispiel ist Dänemark“, so Skinner. „Dort haben sie regelmäßig überschüssige Energie aus der Windkraft, die sie zur späteren Verwendung in Wasserstoff umwandeln.“

Skinner sieht den Trend zur Nutzung von Wasserstoff als maritimer Kraftstoff als interessante Chance. „Bei den Mengen, die die Schifffahrt benötigt, werden sich auch die Energieunternehmen dafür interessieren, was das Infrastrukturproblem löst. Und sobald Wasserstoff in Häfen für Schiffe zur Verfügung steht, kann es auch für Lkw und andere Transportmittel für Waren und Menschen genutzt werden. Die Nutzung von Wasserstoff als maritimer Kraftstoff wird als Katalysator für die Wasserstoffwirtschaft dienen. In einem ersten Schritt wird sich wahrscheinlich die Kreuzfahrtbranche mit einer Hybridlösung befassen, die Brennstoffzellen zur Versorgung der Hotelfunktionen nutzt, wenn das Schiff im Hafen oder in einem geschützten Fjord liegt. Später könnte Wasserstoff zur Versorgung des gesamten Schiffs einschließlich der Antriebe genutzt werden, und das Wasser, das von Brennstoffzellen produziert wird, kann für andere Zwecke an Bord genutzt werden.“

HYBRIDship

Brennstoffzellen in Kombination mit Batterien sind ein wichtiger Bestandteil der „Electric. Digital. Connected.“-Vision von ABB für eine nachhaltige Schifffahrt. In Norwegen führen ABB und das SINTEF Ocean Labor in Trondheim Tests durch, um herauszufinden, wie Brennstoffzellen und Batterien im kurzen Fährbetrieb am besten zusammen funktionieren und wie

WASSERSTOFF ENTMYSTIFIZIERT

- Wasserstoff ist das leichteste bekannte Element. Es ist geschmacklos, geruchlos und ungiftig.
- Protonenaustauschmembran-(PEM-) Brennstoffzellen nutzen Wasserstoff als Brennstoff, um Protonen und Elektronen zu trennen, wobei die Protonen durchfließen und die Elektronen als elektrischer Strom genutzt werden.
- PEM-Brennstoffzellen arbeiten bei niedrigeren Temperaturen und sind leichter und kompakter als Festoxid-Brennstoffzellen.
- Wasserstoff verflüchtigt sich sehr schnell in der Luft, wodurch seine Brennbarkeit rasch abnimmt.
- Wasserstoffgas besitzt nicht so viel „Sprengkraft“ pro Volumen wie andere gängige Kraftstoffe.
- Aufgrund der sehr schnellen Verbrennung von Wasserstoff ist die Wirkung von Flammen und Hitze auf Menschen, Ausrüstung oder Anlagen nur sehr kurz.
- Auf Objekte in der Nähe eines Wasserstoffbrands wirkt nur eine sehr geringe Strahlungswärme.
- Wasserstoff besitzt eine hohe Selbstzündgrenze. Da die zur Entzündung von Wasserstoff erforderliche Funkenenergie jedoch deutlich geringer sein kann als bei anderen Kraftstoffen, sind Potentialausgleich und Erdung wichtig.
- Wasserstoff kann ohne Verbrennung direkt in Elektrizität und Wärme umgewandelt werden.

03

die norwegische Werft Fiskerstrand diese in andere Maschinenraumsysteme integrieren kann. Darüber hinaus liefern die Tests wichtige Erkenntnisse für zukünftige Überarbeitungen der Vorschriften für die Nutzung von Wasserstoff an Bord von Schiffen.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erarbeitung von Lösungen zur Unterstützung der Versorgungs- und Bunkerinfrastruktur für Wasserstoff.

Das 2017 unter Federführung der Fiskerstrand Holding ins Leben gerufene Projekt HYBRIDship wird unterstützt durch das gemeinsame Förderprogramm PILOT-E des norwegischen Forschungsrats, der Wirtschaftsförderungsgesellschaft Innovation Norway und der staatlichen Agentur Enova. Das Know-how von ABB auf dem Gebiet der Systemintegration, die langjährige Erfahrung von SINTEF Ocean im Bereich Schiffsantriebssysteme und die Kompetenz von SINTEF Industry auf dem Gebiet der Brennstoffzellentechnologie sind wichtige Elemente für den Erfolg des Projekts. Ziel des Projekts ist der Einsatz eines mit Brennstoffzellen nachgerüsteten emissionsfreien Passagierschiffs auf einer Inlandsroute bis zum Jahr 2020, wobei Batteriespeicher für das Erreichen des norwegischen Ziels, die Schiffsemissionen in den Fjorden bis zum Jahr 2026 auf null zu senken, mit Sicherheit eine entscheidende Rolle spielen werden →4.

Bei den Tests werden die Bedingungen simuliert, die die Fähre auf einer 10 km langen hochfrequenten Route erwarten, um sicherzustellen, dass die Antriebssysteme einschließlich der Brennstoffzellen robust genug für wiederholte Einsätze mit kurzen Leistungsschüben sind. Das Projekt stellt einen bedeutenden Schritt in Richtung der praktischen Nutzung der Wasserstoff-Brennstoffzelle als Schiffsantriebstechnologie dar. Ein wichtiges Ergebnis der Tests ist die Bestimmung einer optimalen Maschinenraumkonfiguration, die nicht nur die Installation von Wasserstoff-Brennstoffzellen, sondern auch deren optimale Zusammenarbeit mit anderen Bordsystemen ermöglicht.

Ein weiterer Schwerpunkt des gemeinsamen Entwicklungsprogramms von ABB und SINTEF ist die Erarbeitung von Lösungen zur Unterstützung der Versorgungs- und Bunkerinfrastruktur für Wasserstoff. Darüber hinaus wird erwartet, dass die Ergebnisse der Tests die Arbeit der norwegischen

—
03 Infobox: Wasserstoff entmystifiziert.

04 Das weltweit erste auf emissionsfreie Brennstoffzellen umgerüstete Passagierschiff soll bis Ende 2020 auf einer Inlandsroute im Einsatz sein.

Seeschifffahrtsbehörde zur Anpassung der Vorschriften hinsichtlich der Nutzung von Wasserstoff als maritimer Kraftstoff beschleunigen werden.

Auf dem Weg zu autonomen Schifffahrt

Neben ihrer Nachhaltigkeit eignen sich Brennstoffzellen auch gut als Basis für eine autonome Schifffahrt. Heutige Antriebssysteme können aufgrund der Wartungsanforderungen der mechanischen Komponenten nicht vollständig autonom betrieben werden. Brennstoffzellen hingegen besitzen keine beweglichen Teile und benötigen wenig bis gar keine Wartung. Damit eignen sie sich für eine autonome Gesamtlösung, denn sie können länger ohne menschliches Eingreifen vor Ort betrieben werden.

Zeitlich gesehen befinden sich alternative maritime Kraftstofflösungen in der Demonstrationsphase. Maßgeblich vorangetrieben wird die Entwicklung durch immer strenger werdende Umweltvorschriften. Einige frühe Anwender und F&E-Programme weisen hierbei den Weg, wie mehrere Fährenprojekte rund um den Globus zeigen.

Darüber hinaus besteht ein großes Interesse daran, die Realisierbarkeit der Brennstoffzellentechnologie für die Kreuzfahrbranche zu demonstrieren, wobei der erste Schritt darin bestehen wird, Hotelfunktionen – auch im Hafen – emissionsfrei zu versorgen.

—
Brennstoffzellen besitzen keine beweglichen Teile und benötigen wenig bis gar keine Wartung.

Angesichts immer strikterer Vorschriften ist davon auszugehen, dass schon bald – vielleicht schon bis zum Jahr 2025 – verschiedene alternative Kraftstofflösungen in der Schifffahrt zur Verfügung stehen werden. Sobald erneuerbare Energien dazu genutzt werden, Wasserstoff für Brennstoffzellen zu produzieren und Batteriespeicher aufzuladen, kann eine vollständig saubere Versorgungskette erreicht werden, und die Antwort auf die Frage „QUK*?“ lautet hoffentlich: „Klar und ruhig. Ende“. •

Literaturhinweise

[1] Note by the International Maritime Organization to the UNFCCC Talanoa Dialogue: „Adoption of the initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships and existing IMO activity related to reducing GHG emissions in the shipping sector“. IMO Headquarters, London, UK, Resolution MEPC.304(72). 13 April 2018.

[2] International Maritime Organization: „International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)“. Verfügbar unter: <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Pages/IGF-Code.aspx> (aufgerufen am 10. Juli 2019).



04

E-MOBILITÄT

E-Busse – Reichweite ist eine Sache der Perspektive

Da sie nach einem festgelegten Zeitplan eine bestimmte Strecke fahren, ist Reichweitenangst für Elektrobusse (E-Busse) kein Problem. Die Frage ist vielmehr: Wie schnell, wie und wo kann die Batterie aufgeladen werden? Effizientes Laden reduziert die Betriebskosten für E-Busse. Was sind die Kernelemente einer solchen E-Bus-Ladelösung?



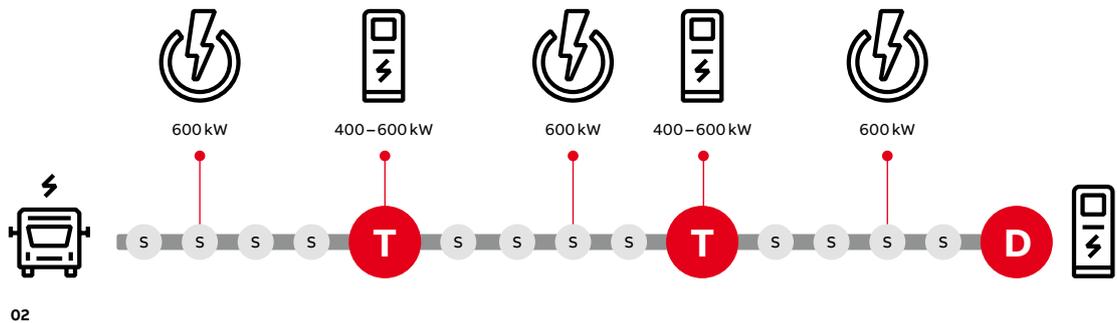


—
01 Im Jahr 2016 erhielt ABB von den Genfer Verkehrsbetrieben und dem Schweizer Bushersteller HESS den Auftrag zur Bereitstellung der elektrischen Schnelllade- und Bordtechnologie für 12 TOSA-Busse. Die elektrischen TOSA-Busse sind genauso flexibel einsetzbar wie Dieselbusse.



Alexandre McCraw
ABB Ltd.
Baden, Schweiz

alexandre.mccraw@ch.abb.com



Wie weit kann ein E-Bus fahren, bevor er seine Batterien wieder aufladen muss? Diese Frage stellt sich bei Elektroautos automatisch, besonders weil der Hauptnutzen eines Autos darin besteht, jederzeit überall hinfahren zu können. Bei einem Bus ist das anders. Er fährt zu einer bestimmten Zeit auf einer bestimmten Route zu einem bestimmten Ziel – und das tagein, tagaus nach einem vorgegebenen Fahrplan. Die richtige Frage lautet daher nicht, wie weit kann er fahren, sondern wie schnell kann er wieder aufgeladen werden, bevor er wieder losfährt. Dieser Artikel zeigt, warum sich die Gesamtbetriebskosten für eine E-Buslinie durch schnelles Laden reduzieren lassen, und erläutert die Kernelemente einer solchen Lösung.

Buskosten

Um die Gesamtbetriebskosten niedrig zu halten, darf eine E-Buslinie nur mit so vielen Fahrzeugen wie nötig betrieben werden – also eins zu eins entsprechend einer Dieselbuslösung. Das bedeutet, der Fahrplan, die Haltezeiten, die Zahl der Busse und Fahrer und die Fahrgastkapazität sind die gleichen wie bei einer Dieselbusflotte.

—
Dazu darf eine E-Buslinie nur mit so vielen Fahrzeugen wie nötig betrieben werden.

Busse sind – unabhängig von ihrer Energiequelle – teuer in der Wartung. Andererseits ist die Infrastruktur, nachdem sie einmal installiert ist, mit deutlich geringeren Wartungskosten verbunden und besitzt eine längere Lebensdauer. So können Busbetreiber die Gesamtbetriebskosten ihrer elektrischen Flotte senken, indem sie auf eine Lösung setzen, die die Vielseitigkeit der Infrastruktur maximiert und einheitliche Batteriegrößen in allen Fahrzeugen nutzt, um die Anzahl der Fahrzeuge zu optimieren.

Ladestrategien

Aktuelle Ladestrategien – sei es über Nacht im Depot oder durch Zwischenladen an den Endhaltestellen (Terminals) – sind abhängig von der Zeit, die zum Laden des Fahrzeugs benötigt wird, und den Vorgaben des Fahrplans.

Beim Laden im Depot muss die Batterie über eine ausreichende Kapazität für die gesamte Fahrstrecke verfügen. Eine große Batterie wirkt sich jedoch negativ auf die Fahrgastkapazität aus und erhöht die Kosten und das Gewicht des Fahrzeugs. So entfallen bis zu 45 % der Kosten für einen E-Bus mit Depotladestrategie auf die Batterie.

Bei der Zwischenladung an Ladestationen an den Terminals muss das Fahrzeug in einem Zeitraum geladen werden können, der kürzer ist als die vorgesehene Wendezeit. Wendezeiten werden eingeplant, um dem Fahrer eine Pause zu ermöglichen oder Verspätungen auszugleichen. Zu Spitzenzeiten, wenn die Wendezeiten kürzer sind, stehen die Betreiber häufig vor einem Dilemma: Soll man die Batterie nur teilweise wieder aufladen, um den Fahrplan einzuhalten, und dafür eine Tiefentladung riskieren oder den Fahrplan aufgeben und die Batterie vollständig laden? Bei Zwischenladestrategien kann nur dann ausreichend Ladezeit gewährleistet werden, wenn mehr Busse und Fahrer und mehr Ladestationen an den Terminals und im Depot zur Verfügung stehen. Diese zusätzlichen Ressourcen sind wiederum mit einem erhöhten Platzbedarf, einem höheren Energieverbrauch und höheren Kosten verbunden. Mit anderen Worten, wenn das Laden nicht schnell genug ist, leidet der Fahrplan und/oder die Kosten steigen.

Das Für und Wider verstehen

Die Städte Genf in der Schweiz und Nantes in Frankreich kennen die Überlegungen, die mit dem Laden von E-Bussen verbunden sind. Beide Gemeinden haben ein E-Bus-System implementiert, das die Anzahl der Fahrzeuge optimiert und die Lademöglichkeiten optimal nutzt.

—
02 Konzeptionelle Darstellung des Ladevorgangs, der außer an den Terminals (T) und im Depot (D) auch an regelmäßigen Haltestellen (S) erfolgt.

—
03 Onboard-Laden und traditionelles Laden im Vergleich.

Da die Betriebs- und Stromnetzsituation in beiden Städten unterschiedlich ist, sind auch die gewählten Systeme entsprechend unterschiedlich, um eine optimale Nutzung der örtlichen Gegebenheiten zu gewährleisten. Doch unabhängig von diesen Unterschieden gibt es einige Kernelemente, die beiden Systemen gemein sind.

So erfolgt das Laden der Batterien in beiden Städten nicht nur an den Terminals und im Depot, sondern auch an Haltestellen entlang der Fahrstrecke, während die Passagiere ein- und aussteigen →1–2. Das Schnellladen an bestimmten Haltestellen entlang der Fahrstrecke, das sogenannte Flash-Laden:

- sorgt dafür, dass ein hoher Ladezustand der Batterien aufrechterhalten wird,
- reduziert die Notwendigkeit von langen Ladezeiten,
- verhindert Tiefentladungen und verlängert so die Batterielebensdauer.

Bei hohem Verkehrsaufkommen erhält das Fahrzeug die meiste Energie bei Stopps entlang der Strecke, während es außerhalb der Spitzenzeiten zum größten Teil an der Endhaltestelle geladen wird.

Vorteile des Onboard-Ladens

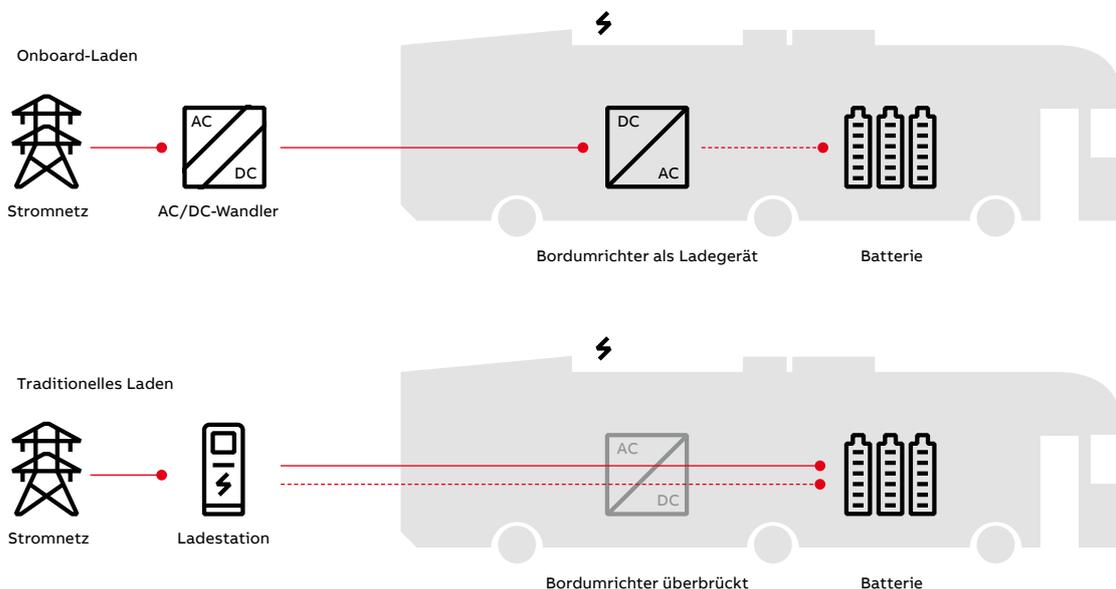
Die Ladestationen an den Terminals und entlang der Fahrstrecken in Genf und Nantes liefern 400 bis 600 kW, um ein möglichst schnelles Aufladen zu gewährleisten. Eine solche Infrastruktur ist nur effektiv in Kombination mit einer Batterie, die in der Lage ist, eine so hohe Ladeleistung aufzunehmen.

Aus diesem Grund sind die Fahrzeuge mit Lithium-Titanat-Oxid-Batterien (LTO-Batterien) ausgerüstet, die schnell laden und mit bis zu 10C arbeiten können. 10C bezieht sich auf die C-Rate, ein Standardmaß dafür, wie schnell eine Batterie geladen oder entladen werden kann. Je höher die C-Rate, desto schneller das Laden oder Entladen. Dieser Wert ist ein wichtiges Differenzierungsmerkmal für ABB: Eine große Batterie ist nur dann nützlich, wenn sie sich ohne Auswirkung auf den Fahrplan lädt und entlädt.

—
Das Laden erfolgt nicht nur an den Terminals und im Depot, sondern auch an Haltestellen entlang der Strecke.

Die Busse in Genf und Nantes nutzen zudem das sogenannte Onboard-Laden →3. Bei solchen Systemen liefert die Overhead-Schiene eine konstante DC-Spannung, die von der Ausrüstung im Fahrzeug in eine von den Motoren und Hilfsbetrieben nutzbare Form umgewandelt wird. Durch Umkehr des Leistungsflusses zwischen Batterie und Motor kann der von der Schiene eingespeiste Gleichstrom zum Laden der Batterie genutzt werden.

So wird verhindert, dass die kritische Kommunikation zwischen der Batterie und dem Bordladergerät an den Ladepunkten unterbrochen wird. Das Onboard-Laden reduziert die Schnittstellen zwischen



—
04 Das Schnellladen der Batterie über den Stromabnehmer erfolgt an Haltestellen und am Terminal.

—
05 Eine TOSA-Schnellladestation mit einer Energiespeichereinheit in Genf. Die Fahrstrecken in Nantes erfordern keine gespeicherte Energie an den Haltestellen.

—
06 Hauptelemente eines Elektrobussystems.

—
07 Schnelles und häufiges Laden ist eine hervorragende Möglichkeit, um Kosten zu minimieren und sicherzustellen, dass Fahrpläne auch auf viel befahrenen Strecken und bei schlechtem Wetter eingehalten werden.

Fahrzeug und Ladestation auf eine einfache physische Kontaktprüfung, ohne dass eine weitere Kommunikation erforderlich ist.

Ein weiteres Element, das die Busse in Genf und Nantes gemein haben, ist ein schnell einsatzbereiter Stromabnehmer, mit dem sich der Bus in weniger als 1 s mit der Ladestation verbinden kann →4–5. Durch rechtzeitiges Ausfahren des Abnehmers bei der Annäherung an den Ladepunkt und automatisches Ausrichten an der Ladehaube kann der Fahrer den Ladepunkt wie jede andere Haltestelle anfahren, was den Vorgang beschleunigt. Jede gewonnene Ladesekunde hilft dabei, die Zahl der notwendigen Flash-Ladepunkte entlang der Fahrstrecke sowie die zum Wiederaufladen am Terminal erforderliche Zeit zu reduzieren. Diese Einsparungen bieten dem Streckenbetreiber mehr Flexibilität zu Spitzenzeiten und – dank der einheitlichen Batteriegrößen – die Möglichkeit, jeden Bus auf jeder Linie einzusetzen, um einen sich verändernden Bedarf zu decken.

—
Die Busse verfügen über einen Stromabnehmer, mit dem sich der Bus in weniger als 1 s mit der Ladestation verbinden kann.

Den Fahrplan einhalten

Die Wahl der richtigen Ladephilosophie hilft dabei, die Kosten für E-Busse niedrig zu halten →6. Das Laden im Depot erfordert größere, teurere Batterien, was die Fahrgastkapazität reduziert. Zwischenladestrategien wirken sich schnell auf Wendezeiten aus und erfordern mehr Fahrzeuge und eine umfangreichere Infrastruktur, wenn die Fahrpläne eingehalten werden sollen. Die beste Möglichkeit, Fahrpläne einzuhalten und den Verpflichtungen gegenüber den Fahrgästen auch zu Spitzenzeiten, bei schlechtem Wetter usw. nachzukommen und gleichzeitig die Gesamtbetriebskosten niedrig zu halten, besteht darin, kürzer als die Wendezeit und so oft wie möglich zu laden – so, wie es in Genf und Nantes gemacht wird →7.

Wenn es um Elektrobusse geht, sollte der Fokus weniger auf der Reichweite als vielmehr auf der Einhaltung des Fahrplans liegen. Erfolgt das Wiederaufladen mit Bedacht, kann ein E-Busnetz nicht nur mit geringen Gesamtbetriebskosten, sondern – zum Nutzen aller – auch auf umweltfreundliche Weise betrieben werden. •

04



Flash-Laden an bestimmten Punkten entlang der Fahrstrecke



LTO-Batterien



Hochleistungs-Infrastruktur



Onboard-Laden



Schnell einsatzbereiter Stromabnehmer

06



05



07

E-MOBILITÄT

Die Zukunft des Stromnetzes im Zeitalter der E-Mobilität

Bis zum Jahr 2040 muss Europa eine Reihe von praktischen Maßnahmen umsetzen, um den Spitzenbedarf, der mit einer flächendeckenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen (EVs) einhergeht, zu bewältigen. Vor diesem Hintergrund hat ABB eine umfassende Analyse des zu erwartenden Strombedarfs in einigen der wirtschaftsstärksten Ländern Europas durchgeführt. Die Empfehlungen des Unternehmens hinsichtlich der Stromerzeugung und -verteilung und die mit der Entwicklung eines saubereren und ressourcenschonenderen Verkehrssektors verbundenen Herausforderungen werden in diesem Artikel vorgestellt.

—
Thierry Lassus
ABB Sécheron SA
Power Grids – Segment
Transportation
Genf, Schweiz

thierry.lassus@
ch.abb.com

Alexandre Oudalov
Adrian Timbus
Power Grids Business
Zürich, Schweiz

alexandre.oudalov@
ch.abb.com
adrian.timbus@
ch.abb.com

Seit unseren Ur-Urgroßvätern hat das Verkehrswesen keinen vergleichbaren Wandel erlebt wie heute. Während noch vor etwa 120 Jahren ein Umstieg von Pferd und Wagen auf motorisierte Fahrzeuge kaum denkbar war, gab es im Jahr 1908 in New York bereits genauso viele Automobile wie Pferde (etwa 100.000).

Doch bei dieser Entwicklung ging es nicht nur darum, eine Antriebskraft gegen eine andere zu tauschen. Es war vor allem eine völlig neue Infrastruktur erforderlich.

—
Die Luftverschmutzung verursacht pro Jahr Kosten von über 100 Mrd. EUR durch Krankheit und krankheitsbedingte Ausfälle.

Damit Autos und Lastwagen praktisch genutzt werden konnten, musste zuerst die Asphaltproduktion angekurbelt werden. Straßen mussten befestigt werden, ein System von Straßenschildern, Fahrbahnmarkierungen und Verkehrsregeln musste geschaffen werden, die Benzinherstellung musste verbessert werden, und auch die Gesellschaft musste sich umstellen: aus Stallburschen wurden Tankwarte, aus Stellmachern Ingenieure, und aus Schmieden,

Geschirrmachern, Hufschmieden und Sattlern wurden Mechaniker und Fließbandarbeiter.

Heute befindet sich die Gesellschaft in der frühen Phase eines ähnlich grundlegenden Paradigmenwechsels, der den Umstieg von Verbrennungsmotoren, die von fossilen Kraftstoffen angetrieben werden, auf die Elektromobilität einläutet. Während immer mehr Menschen, Unternehmen und öffentliche Verkehrsbetriebe auf die E-Mobilität als primäre Verkehrstechnologie setzen, steigt auch die Notwendigkeit zur Investition in Infrastrukturen und Technologien, die diesen Wandel unterstützen und ermöglichen. Eine entscheidende Frage hierbei ist, wie der Strom zum Laden der Millionen Elektrofahrzeuge bereitgestellt werden kann, die demnächst auf den Straßen unterwegs sein werden →1.

Triebfedern für den Wandel

Drei bedeutende Trends treiben die Entwicklung in Richtung E-Mobilität voran. Der erste ist die Notwendigkeit zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Im Kampf gegen den Klimawandel sieht das Übereinkommen von Paris, das 2015 von 174 Ländern unterzeichnet wurde, eine Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2° C gegenüber dem vorindustriellen Niveau vor. Der Verkehrssektor, der heute z. B. in Frankreich für 28 % der CO₂-Emissionen verantwortlich ist, muss seinen Ausstoß bis



01

— 01 Eine Schnellladestation für E-Fahrzeuge. Entscheidend für den Umstieg auf die E-Mobilität werden diejenigen Technologien sein, die es ermöglichen, genügend Strom zum Laden der Millionen Elektrofahrzeuge bereitzustellen, die demnächst auf den Straßen unterwegs sein werden.

zum Jahr 2028 um 29 % gegenüber den Werten von 2015 reduzieren.

Die zweite bedeutende Triebfeder für die E-Mobilität ist die Notwendigkeit zur Reduzierung von anderen Emissionen und Schadstoffen, die der menschlichen Gesundheit und der Wirtschaft schaden. Die Belastung der Luft durch Stickoxide und Feinstaub ist zum größten Teil auf den Verkehrssektor zurückzuführen. Laut der Europäischen Umweltagentur sterben in der EU jährlich 391.000 Menschen durch Feinstaub [1]. Auch die wirtschaftlichen Folgen der Luftverschmutzung sind erheblich. So entstehen pro Jahr Kosten in Höhe von über 100 Mrd. EUR allein durch Krankheit und krankheitsbedingte Ausfälle – von verminderten Erträgen in der Landwirtschaft, Schäden an Gebäuden, Brücken usw. durch Schadstoffeinwirkung ganz zu schweigen.

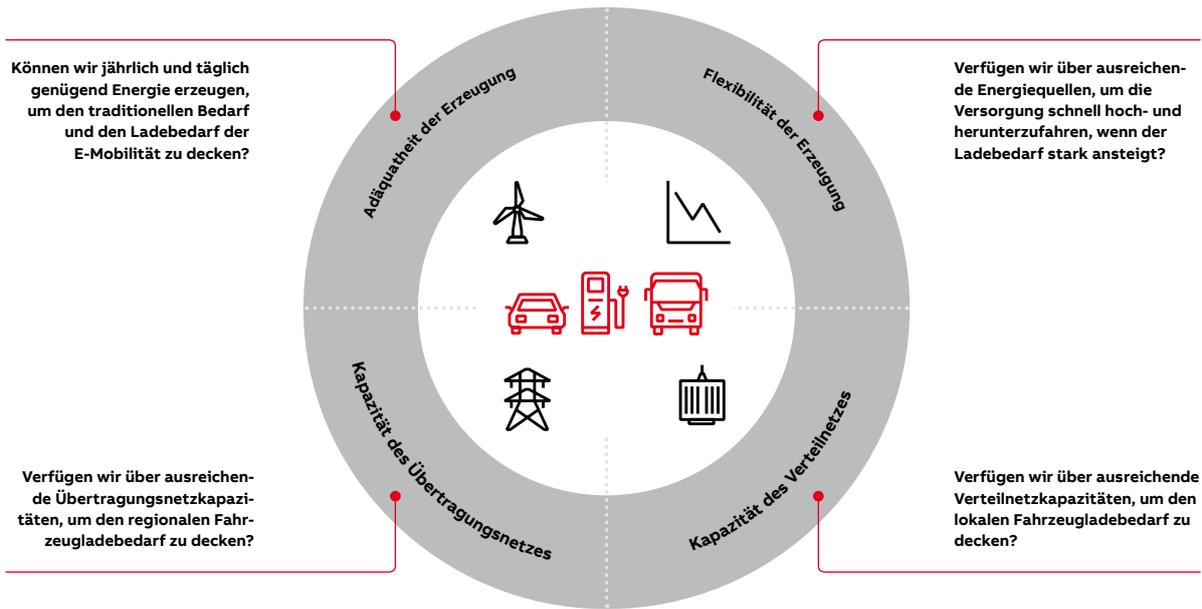
Die dritte treibende Kraft ist die Notwendigkeit zur Steigerung der Attraktivität und Lebensqualität von Städten und Regionen. Neben der Luftverschmutzung und Lärmbelastung sorgt die zunehmende Überfüllung der Innenstädte für Zeit- und Produktivitätsverluste. Ein verbesserter Mix aus öffentlich-privatem Verkehr, autonomen Elektrofahrzeugen und einem zunehmend synchronisiertem und optimiertem Verkehrsmanagement auf der Basis von Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Technologien

würde diese Belastungen reduzieren und Städten dabei helfen, Unternehmen, Start-ups und kreative Menschen anzuziehen, die effiziente Verkehrsinfrastrukturen und eine gesunde Umwelt schätzen.

EV-Märkte und das Netz: gemeinsam wachsen
Angesichts der starken ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Kräfte, die die Nachfrage nach einem EV-basierten, regenerativ gespeistem Verkehrssystem antreiben, hat ABB verschiedene Szenarien für den zu erwartenden Strombedarf in Deutschland in den Jahren 2020, 2030 und 2040 analysiert – ein Zeitraum, der wahrscheinlich durch die zunehmende Verbreitung der E-Mobilität gekennzeichnet sein wird. Ähnliche Analysen wurden auch für Frankreich und das Vereinigte Königreich durchgeführt.

— **ABB hat den zu erwartenden Strombedarf in Deutschland in den Jahren 2020, 2030 und 2040 analysiert.**

Die Analyse von ABB deutet darauf hin, dass – auch wenn die vorhandenen Stromerzeugungssysteme größtenteils in der Lage sind, die Ladeanforderungen der Elektrofahrzeuge zu bewältigen – es Fälle geben



02

02 Kapazitätsaspekte, die es zu berücksichtigen gilt, um Störungen zu minimieren und eine geregelte Umsetzung der E-Mobilität zu gewährleisten.

03 Infobox: Engagement für Elektromobilität.

wird, in denen die Nachfrage das verfügbare Angebot übersteigt oder die vorhandenen Übertragungs- und Verteilnetze überfordert →2. Dies wird vor allem zu Spitzenbedarfszeiten an Tagen mit begrenzter Erzeugung aus regenerativen Quellen der Fall sein.

Um eine kontinuierliche und zuverlässige Versorgung zu gewährleisten, sind in vielen Fällen grenzüberschreitende und regionale Modernisierungen und Erweiterungen des Netzes erforderlich, um den Austausch regenerativ erzeugter Energie zwischen Regionen mit komplementären Strukturen zu erleichtern.

Zudem gibt es mehrere vorhandene Lösungen, die die möglichen negativen Auswirkungen einer flächendeckenden Verbreitung der E-Mobilität auf die Stromnetze begrenzen können. Dazu gehören Lösungen, die das Laden von Elektrofahrzeugen auf Schwachlastzeiten oder Zeiten mit einem Überangebot an regenerativ erzeugter Energie verlagern. So sind aktuelle Ladesysteme für Elektrobusse bereits in der Lage, das Laden über Nacht im Depot so zu regeln, dass nicht alle Busse gleichzeitig geladen werden [2] →3, 4.

Ähnliche Verfahren könnten auch auf Ladesysteme für andere Fahrzeuge angewendet werden. Durch eine entsprechende Zeitplanung könnte die Gefahr von Überlastungen durch sich verändernde Tarifzeiträume reduziert werden. Allerdings könnte es notwendig sein, einen finanziellen Anreiz für private Nutzer zu schaffen, damit diese ihr Fahrzeug später in der Nacht laden – z. B. durch Senkung der Stromkosten zu Schwachlastzeiten.

Auch Energiespeichersysteme werden in unseren Stromsystemen eine zunehmende Rolle spielen, da der Druck zur Entwicklung von Methoden für die Speicherung der regenerativ erzeugten Energie weiter steigt. Auf der lokalen Verteilnetzebene können kleine Speichersysteme dabei helfen, die Leistungsübertragung vom Netz über einen längeren Zeitraum zu verteilen und somit zu einer signifikanten Reduzierung der unmittelbaren Netzbelastung beitragen. Eine Vielzahl neuer Speichertechnologien unterschiedlicher Größenordnung befindet sich zurzeit in der Entwicklung bzw. auf dem Weg zur Markteinführung.

Die Batterien von Elektrofahrzeugen können als Komponenten eines dezentralen Energiespeichersystems fungieren.

Darüber hinaus werden Lösungen untersucht, bei denen die Batterien von Elektrofahrzeugen als Komponenten eines dezentralen Energiespeichersystems fungieren. Da private Fahrzeuge 95 % der Zeit geparkt sind und nicht genutzt werden, scheint es nur logisch, sie als Reserveenergiequellen zu nutzen, die in Spitzenbedarfszeiten zur Unterstützung des Stromnetzes aktiviert werden können. Dieser Ansatz – der eine bidirektionale Ladeschnittstelle erfordert – könnte dabei helfen, die Gesamtbetriebskosten von Elektrofahrzeugen zu senken, indem er Besitzern die Möglichkeit bietet, zu selbst gewählten Zeiten Strom vom Fahrzeug an das Netz zu verkaufen.

ENGAGEMENT FÜR ELEKTROMOBILITÄT – ZU LANDE, ZU WASSER UND IN DER LUFT

Der erste Elektrobus in Genf. Der Bus nutzt Flash-Ladestationen entlang der Fahrstrecke, um seine Batterien nachzuladen und so die Ladezeit an den Terminals zu verkürzen.

ABB arbeitet aktiv daran, die mit der Elektrifizierung der Mobilität verbundenen Herausforderungen zu bewältigen. Dazu investiert das Unternehmen verstärkt in die kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz von Fahrzeug- und Bordtechnologien und die Bereitstellung innovativer Ladelösungen. Ein weiterer Bereich ist die Identifizierung und Entwicklung neuer Serviceleistungen in Verbindung mit der Digitalisierung von Verkehrssystemen.

Hochgeschwindigkeitszüge

In vielen Verkehrsmitteln steckt Technologie von ABB. So war der französische Hochgeschwindigkeitszug TGV dank Systemen von ABB in der Lage, im Jahr 2007 eine Rekordgeschwindigkeit von 575 km/h zu erreichen. Im Jahr 2012 implementierte das Unternehmen in Philadelphia das weltweit erste Bremsenergie-Rückgewinnungssystem für Züge mit streckenseitigen Batteriespeichern. Und im Jahr 2016 elektrifizierte ABB den Gotthard-Basistunnel, den längsten Eisenbahntunnel der Welt.

Schnellladen für Busse, Autos und Schiffe

Im Bereich des öffentlichen und privaten Straßenverkehrs hilft Technologie von ABB dabei, den CO₂-Ausstoß zu reduzieren. So hat das Unternehmen in enger Zusammenarbeit mit örtlichen Behörden den ersten Elektrobus der Stadt Genf auf Basis der TOSA-Schnellladetechnologie (Trolleybus Optimisation Système Alimentation) entwickelt [1]. Dieser lädt seine Batterien an sogenannten Flash-Ladestationen entlang der Fahrstrecke nach, was die Ladezeit an den Endhaltestellen verkürzt. Im Jahr 2014

wurde die Technologie auf der Smartgrid-Messe in Paris mit einem „smart Award“ ausgezeichnet.

Seitdem hat ABB eine der ersten Ultra-Schnellladestationen (150 kW) für Elektrofahrzeuge in den USA installiert, den weltweit ersten 24-m-Elektrobus auf Basis der Flash-Ladetechnologie realisiert und als erstes Unternehmen überhaupt eine 350-kW-Ladestation in Betrieb genommen [2]. Außerdem rüstete ABB die erste vollelektrische Fähre aus, die nun zwischen Dänemark und Schweden verkehrt und in weniger als 10 min am Anleger geladen werden kann.

Im Jahr 2016 automatisierte ABB in Kooperation mit Volvo Buses zwei Schnelladesysteme für Elektrobusse in der belgischen Stadt Namur. Die Systeme basieren auf einem Zwischenladekonzept, bei dem der Bus an den Endhaltestellen jeweils wenige Minuten geladen wird, anstatt zum Aufladen ins Depot zurückzukehren. So können die Busse mit einem kleineren und leichteren Batteriepaket ausgerüstet werden, was die Fahrgastkapazität erhöht. Da die Busse zum Laden nicht ins Depot zurückkehren müssen, können sie mehr Routen fahren. Insgesamt hat ABB bereits 10.500 DC-Schnellladestationen in 73 Länder verkauft [3].

Elektrisches Fliegen

Wer hätte noch vor wenigen Jahren gedacht, dass es möglich sein würde, die Welt in einem solarbetriebenen Flugzeug zu umrunden? Genau das ist zwei visionären Abenteurern und einem Team von ABB-Ingenieuren und Wissenschaftlern mit dem Projekt Solar Impulse gelungen. •

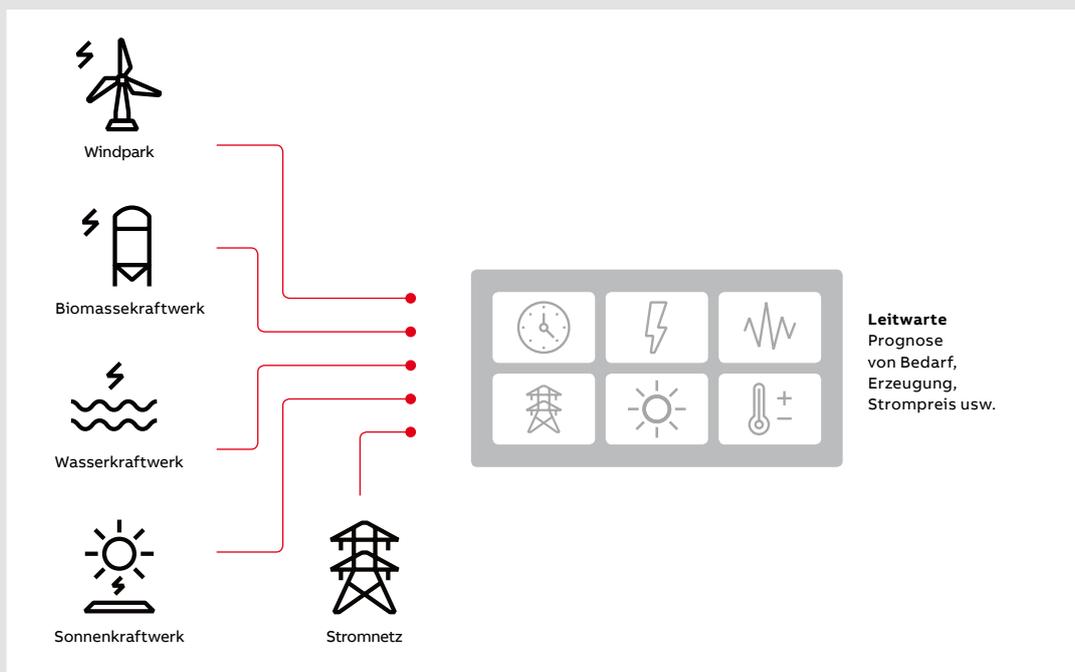
Literaturhinweise

[1] A. McCraw: „E-Busse – Reichweite ist eine Sache der Perspektive“. ABB Review 4/2019, S. 24–28.

[2] <http://www.abb.com/cawp/seitp202/45ecf5b55b-2ab-524c125829d002c21a9.aspx>

[3] <https://new.abb.com/news/detail/24231/abb-to-supply-high-power-charging-for-new-era-of-e-mobility-in-scandinavia>





WIE DAS NETZ DIE ANFORDERUNGEN DER ELEKTROMOBILITÄT BEWÄLTIGEN KANN

— Virtuelle Kraftwerke (VK) bieten neue Möglichkeiten zur Steuerung und Optimierung der Energieversorgung über verschiedene Anlagen hinweg.

Mit zunehmender Bedeutung der Elektromobilität ist es wichtig, dass ihre Umsetzung im Einklang mit technischen Verbesserungen der Stromnetze erfolgt, die sich aufgrund der zunehmenden Integration erneuerbarer Energiequellen ebenfalls rasch verändern. Hier sind drei Beispiele für mögliche Maßnahmen.

Sequentielles Laden für E-Bus-Depots

Angesichts der großen Energiemenge, die zum Laden der E-Busse von morgen erforderlich ist, wird ein Großteil der Ladevorgänge voraussichtlich in Zeiten geringer Nachfrage erfolgen. Verkehrsbetriebe können ihre Investitionen optimieren, indem sie eine Ladestation für mehrere Busse nutzen. Für solche Szenarien hat ABB Ladestationen mit einer Kapazität von bis zu 150 kW entwickelt, die bis zu drei Busse automatisch nacheinander laden können. Dieses sogenannte sequentielle Laden kann fernprogrammiert werden. Die Ladeleistung wird über die ganze Nacht verteilt und eine volle Ladung für den nächsten Tag garantiert.

Energiespeicher zur Verteilung des Bedarfs

Bei der Realisierung einer E-Buslinie in Genf hat ABB die Flash-Ladestationen an ausgewählten Haltestellen mit Batterien

ausgestattet. Diese werden zwischen zwei Busladevorgängen mit einer Leistung von etwa 50 kW aufgeladen, können sich aber in etwa 20 s mit 600 kW entladen. Dadurch wird der Spitzenbedarf im lokalen Verteilnetz auf weniger als ein Zehntel des ansonsten erreichten Niveaus reduziert. Das gleiche Konzept kann unter anderem auch auf Schnellladestationen für Elektrofahrzeuge angewendet werden. Zudem können solche Systeme zur Sicherung der Energiequalität, Spannungsstützung und Bereitstellung von Leistungsreserven beitragen.

Zentrales Management von Ladestationen

Virtuelle Kraftwerke (VK) können Ladestationen, Verbraucher, Erzeugungsanlagen und Energiespeichersysteme miteinander verknüpfen und bieten Betreibern neue Möglichkeiten zur Steuerung und Optimierung der Energieversorgung über verschiedene Anlagen hinweg. Mithilfe eines solchen VK ist es den Stadtwerken Trier gelungen, das Laden von Elektrofahrzeugen mit 100 % erneuerbarer Energie zu garantieren. Darüber hinaus ermöglicht die Plattform die Bereitstellung von Netzdiensten wie Spannungsanpassungen und Leistungsreserven. •

—
04 Infobox: Wie das Stromnetz die Anforderungen der Elektromobilität bewältigen kann.

05 Mögliche zukünftige Versorgungengpässe an Tagen mit geringer Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen in Deutschland.

Hat ein Elektrofahrzeug das Ende seiner Nutzungsdauer erreicht, könnten seine Batterien einer sekundären Nutzung als Energiespeicher in stationären Anwendungen zugeführt werden, um den Bedarf auf Schwachlastzeiten zu verlagern.

Ein weiteres Verfahren, mit dem das Laden von Elektrofahrzeugen besser verteilt werden kann, beruht auf dem zentralen Management von Ladestationen im Rahmen eines virtuellen Kraftwerks (VK). Das Ziel eines VK ist es, den Betrieb verschiedener Anlagen zu zentralisieren und zu optimieren. Ein solches VK kann Ladestationen, Verbraucher, Erzeugungsanlagen und Energiespeichersysteme miteinander verknüpfen, um den Verbrauch über verschiedene Anlagen hinweg zu priorisieren und optimieren. Dank einer solchen Plattform sind die Stadtwerke Trier in der Lage, sicherzustellen, dass Elektrofahrzeuge ausschließlich mit regenerativem Strom geladen werden.

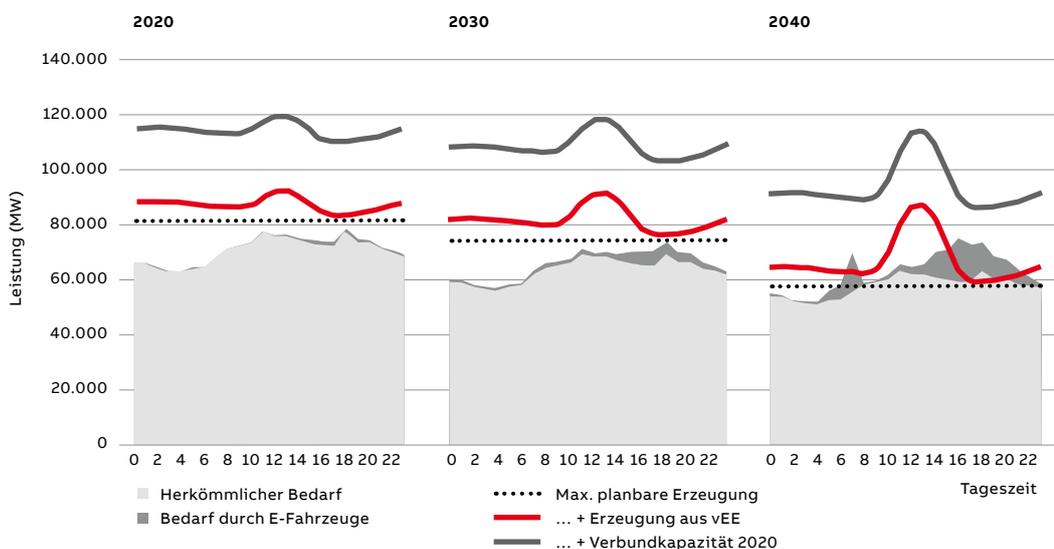
Grundlegende Empfehlungen

Generell sollte es möglich sein, die heutige Erzeugungs-, Übertragungs- und Verteilungsinfrastruktur so anzupassen und zu kräftigen, dass zukünftige Anforderungen ohne übermäßige Kosten oder Störungen erfüllt werden können.

Was die Erzeugung angeht, sollte bei zukünftigen Entwicklungen besonderes Augenmerk auf die Flexibilität gelegt werden →5. Anders als kombinierte Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerke und Kohlekraftwerke können offene Gasturbinenkraftwerke kurzfristig und verschleißarm an- und abgefahren werden. Dank ihrer Flexibilität eignen sie sich besonders für Situationen, in denen Grundlastkraftwerke und erneuerbare Energien unterstützt werden müssen, um den Spitzenbedarf zu decken.

—
Ein virtuelles Kraftwerk kann den Verbrauch über verschiedene Anlagen hinweg optimieren und priorisieren.

Der Ausbau der Übertragungsnetze wird in den kommenden Jahren fortgesetzt, hauptsächlich um der wachsenden Bedeutung erneuerbarer Energien Rechnung zu tragen. Die Digitalisierung der Stromnetze →6,7 spielt bereits jetzt eine wichtige Rolle bei der Energiewende und wird in Zukunft eine noch wichtigere Rolle spielen.

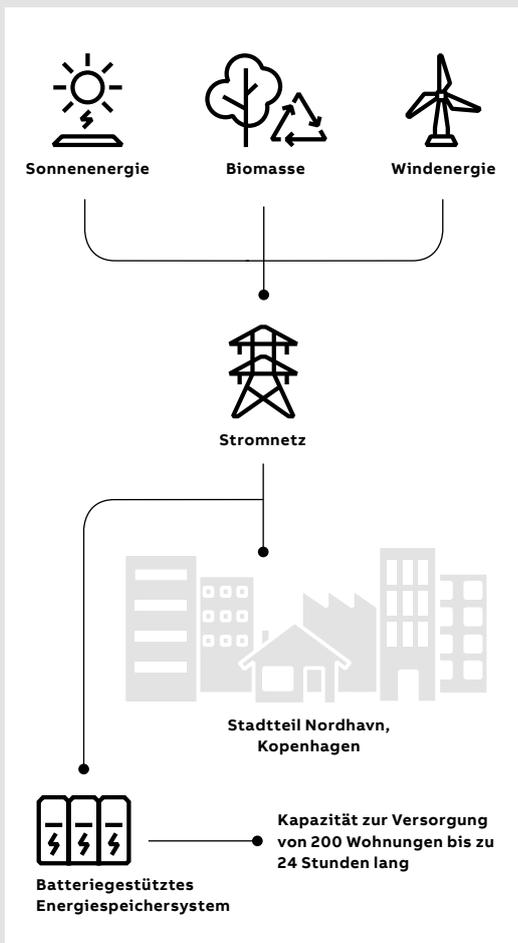




06a

—

EIN ZWEITES LEBEN FÜR BATTERIEN – UND MEHR STABILITÄT FÜR DIE NETZE VON MORGEN



06b

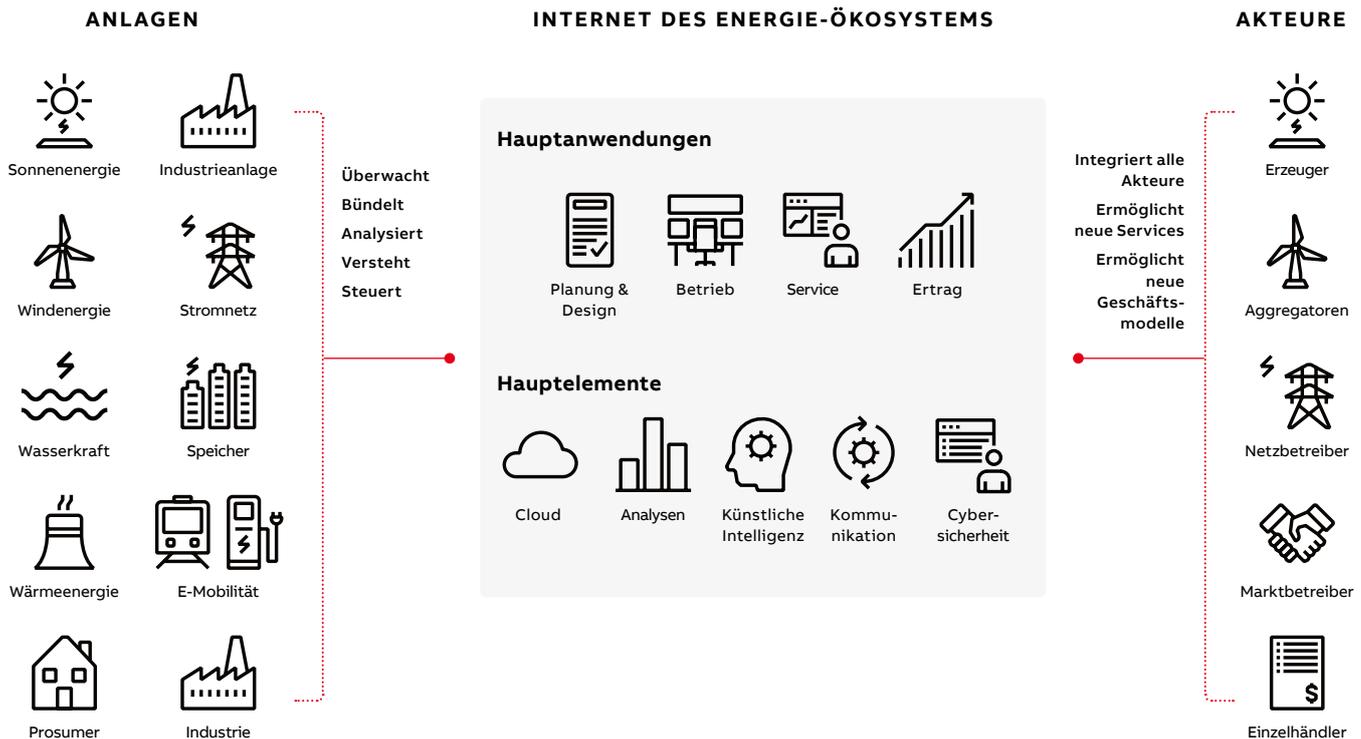
—
06a Eine batteriegestützte Energiespeicherlösung von ABB in Dänemark.

—
06b Im Rahmen des Projekts EnergyLab Nordhavn in Kopenhagen nutzt ein batteriegestütztes Energiespeichersystem von ABB stationäre Batterien, um das örtliche Netz in Spitzenbedarfszeiten mit regenerativ erzeugtem Strom zu unterstützen. In Zukunft können für solche Lösungen Batterien von ausgedienten Elektrofahrzeugen eingesetzt werden.

Bis autonomes Fahren und Carsharing zum Alltag gehören, werden die meisten privaten Elektrofahrzeuge wahrscheinlich größtenteils genauso genutzt wie ihre konventionell betriebenen Pendanten – mit anderen Worten, sie stehen 95 % der Zeit auf Parkplätzen und in Garagen. Auch Busse, Lkw und andere Kommunal- und Nutzfahrzeuge bleiben trotz ihres härteren Einsatzes außerhalb der Dienstzeit meist ungenutzt. Sind diese Fahrzeuge batteriebetrieben, könnten sie als Reservestromquellen zur Unterstützung des Netzes eingesetzt werden →6a. Dies ermöglicht nicht nur eine Reduzierung der Gesamtbetriebskosten für die Fahrzeuge, sondern auch der Netzbetriebskosten, da weniger Spitzenlastkraftwerke benötigt werden.

Zu guter Letzt können Batterien von ausgedienten Elektrofahrzeugen in stationären Anwendungen weitergenutzt werden →6b, die ebenfalls zur Stabilisierung des Netzes und Sicherung der Versorgungsqualität beitragen können.

Natürlich können solche Batterien mithilfe von lokal oder ortsfrem erzeugtem Strom aus Wind, Sonne oder anderen umweltneutralen Quellen geladen werden. Auf diese Weise könnten Fahrzeugbatterien einen nahezu unerschöpflichen Speicher für regenerativ erzeugten Strom bereitstellen. •



07

06 Infobox: Ein zweites Leben für Batterien.

07 Die Digitalisierung der Stromnetze wird eine zunehmend wichtige Rolle bei der Entwicklung eines „Internets der Energie“ spielen.

Der Ausbau und die Stärkung des vorhandenen Übertragungsnetzes ermöglicht die Integration von Netzen und neuen regenerativen Quellen und sorgt für eine größere Flexibilität zur Unterstützung neuer Bedarfsstrukturen.

Lokale Verteilnetze – insbesondere für kommerzielle Anlagen – sollten schrittweise modernisiert werden, um dem zunehmenden Bedarf durch Elektrofahrzeuge gerecht zu werden. Dies gilt besonders für Standorte, an denen das Laden vieler Elektrofahrzeuge zu erwarten ist.

Bei einem weltweiten Elektrofahrzeuganteil von 100 % steigt der Gesamtstrombedarf bis zum Jahr 2040 um 5–20 %.

Neu aufkommende Energiespeicherlösungen können strategisch eingesetzt werden, um den lokalen und regionalen Bedarf zu decken und gleichzeitig die Erzeugungs-, Übertragungs- und Verteilungssysteme zu entlasten. Entscheidungsträger sollten weiterhin innovative technische Lösungen vorantreiben, die die Auswirkungen von Ladestationen auf die Stromnetze begrenzen.

Der Blick nach vorn

Ein allmählicher Umstieg auf die E-Mobilität wird weder zu einer plötzlichen noch zu einer dramatischen Überlastung unserer vorhandenen Stromnetze führen. So ist in Deutschland – abhängig von Faktoren wie Bevölkerungsentwicklung, Anzahl der Fahrzeugeigentümer, durchschnittliche Fahrstrecken und Kilometerleistung pro Fahrzeug – ein Anstieg des Strombedarfs durch Elektrofahrzeuge von 0,3 % bis zum Jahr 2020 und von 10–12 % bis zum Jahr 2040 zu erwarten. Bei einem weltweiten Elektrofahrzeuganteil von 100 % liegt der erwartete Anstieg des Gesamtstrombedarfs bis zum Jahr 2040 in verschiedenen Ländern bei 5–20 %.

Unterm Strich stellt der Bau der Infrastruktur, die erforderlich ist, um die Millionen Elektrofahrzeuge zu laden, die in den nächsten Jahrzehnten gebaut und verkauft werden, eine beträchtliche, aber keine unlösbare Herausforderung dar. Mit der richtigen Planung und Vorbereitung sollte es möglich sein, diese Infrastruktur zu angemessenen Kosten, mit minimaler Störung und auf eine Art und Weise bereitzustellen, die eine schnelle und geordnete Umsetzung der E-Mobilität unterstützt. •

Literaturhinweise

[1] <https://www.eea.europa.eu/highlights/air-pollution-still-too-high>

[2] F. Mühlön: „EV-Infrastruktur: Innovation durch Kooperation“. ABB Review 4/2019, S. 38–43

E-MOBILITÄT

EV-Infrastruktur: Innovation durch Kooperation

Der sich rasch entwickelnde Markt für Elektrofahrzeuge (EV) treibt die Innovation auf dem Gebiet der EV-Technologie und der dazugehörigen Infrastruktur voran. Dank eigener Forschung und Entwicklung (F&E) und der engen Zusammenarbeit mit kompetenten Partnern gehört ABB zu den führenden Unternehmen auf diesem Gebiet.



Frank Muehlon
ABB E-Mobility
Infrastructure Solutions
Heidelberg, Deutschland

frank.muehlon@
de.abb.com

Der Markt für Elektrofahrzeuge (Electric Vehicles, EV) gewinnt zunehmend an Schwung. Einige Experten gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2040 rund 559 Millionen Elektrofahrzeuge zugelassen und 33 % aller Fahrzeuge weltweit elektrisch angetrieben werden [1]. Doch schon heute sind bedeutende Fortschritte auf dem Weg zu dieser nachhaltigen Verkehrslandschaft zu verzeichnen. Dies zeigt sich unter anderem an der steigenden Nachfrage nach öffentlichen und privaten EV-Ladelösungen. So hat ABB bis 2019 allein 10.500 DC-Schnellladestationen in 73 Ländern verkauft. Darüber hinaus unterstützt ABB Akteure rund um den Globus bei der Realisierung elektrischer Busdienste, die dabei helfen, die menschlichen Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren →1.

Ihre lange Geschichte und starke F&E-Kultur helfen ABB dabei, Technologien für die E-Mobilität voranzutreiben.

Der Schlüssel zur Umsetzung ihrer Vision einer nachhaltigen, emissionsfreien Zukunft – bei gleichzeitiger Deckung der steigenden Nachfrage aus dem EV-Sektor – liegt für ABB in der kontinuierlichen Entwicklung innovativer Lösungen. Dank ihrer langen Geschichte als Technologieunter-

nehmen und starken F&E-Kultur ist ABB bestens positioniert, um zukunftsweisende Technologien im Bereich der E-Mobilität voranzutreiben. So gehört ABB zu den Initiatoren der Ladestandards CHAdeMO und CCS für Elektrofahrzeuge. Im Jahr 2010 präsentierte ABB ihre erste DC-Schnellladestation, 2012 die ersten landesweiten DC-Ladenetze und 2016 die ersten Ladenetze für E-Busse.

Nachhaltiger Verkehr der Zukunft

Nach Ansicht von ABB gibt es drei wesentliche Herausforderungen im Hinblick auf ein nachhaltiges Verkehrswesen.

Erstens sind größere Investitionen in den Sektor erforderlich – nicht nur zur Verbesserung der Batterietechnik in puncto Reichweite und Kosteneffizienz, sondern auch in eine umfassende Ladeinfrastruktur zur Deckung des wachsenden Bedarfs. Auf vielen Märkten zeichnet die derzeitige Situation ein deutlich anderes Bild. So wurden in den USA im Jahr 2017 zwar 200.000 Elektrofahrzeuge verkauft, aber es fand kein entsprechender Ausbau der Ladeinfrastruktur statt. Dieses Missverhältnis führt zu mangelndem Vertrauen und Reichweitenangst bei den Verbrauchern – zwei der größten Hürden für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen. Um dem entgegenzuwirken, arbeitet ABB mit Electrify America, einem Tochterunternehmen der Volkswagen Group of America und



01

— Immer mehr Städte rund um den Globus ersetzen ihre dieselbetriebenen Busse durch Elektrobusse, die mit Ladeinfrastruktur von ABB aufgeladen werden können. In Singapur hat ABB dabei geholfen, den weltweit ersten vollelektrischen, autonomen 12-m-Linienbus zu realisieren.

Eigentümer und Betreiber von EV-Ladeinfrastrukturen in den USA und Kanada an der Realisierung des bislang größten landesweiten Netzes von Schnellladestationen zusammen.

— **Das weltweite Energie-Ökosystem muss sich weiterentwickeln, um eine emissionsfreie Zukunft zu ermöglichen.**

Zweitens gilt es, der Standardisierung und Operabilität mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Der Automobilindustrie genügt ein Blick auf den elektrischen öffentlichen Personenverkehr, um zu erkennen, dass mit einer sinkenden Zahl von Ladestandards die Akzeptanz deutlich steigt. Um einen positiven Wandel für die Zukunft zu erreichen, muss dies auch für Pkw umgesetzt werden. Hier ist eine enge Zusammenarbeit zwischen allen

beteiligten Parteien erforderlich.

Drittens muss die Welt einsehen, dass sich ihr Energie-Ökosystem weiterentwickeln muss, um eine emissionsfreie Zukunft zu ermöglichen. Ein entscheidender Aspekt dieses zukünftigen Ökosystems ist die Bereitstellung einer zuverlässigen Energieinfrastruktur mit geringen Wartungskosten, die es Städten ermöglicht, Bedarfsspitzen problemlos zu bewältigen. Hierbei spielen sichere, flexible und intelligente Stromnetze eine entscheidende Rolle. So können z. B. durch Integration von Energieressourcen, der Installation von intelligenter, mit dem privaten Fahrzeugladesystem verbundener Haustechnik und der Nutzung von Fahrzeugbatterien mit erweiterten Fähigkeiten Haushalte in autarke Netze verwandelt werden. Überschüssige Energie, die in den Batterien von Elektrofahrzeugen gespeichert ist, könnte bei Bedarf an das öffentliche Netz zurückverkauft werden, sodass private und gewerbliche Verbraucher aktiv an der Energiewende beteiligt werden. In diesem Zusammenhang entwickelt ABB zurzeit



02

ein bidirektionales DC-Ladesystem für Haushalte und arbeitet eng mit Energie-Aggregatoren an der Realisierung zuverlässiger Infrastrukturlösungen zusammen.

Zukunftssichere Hochleistungs-Ladelösungen

Zurzeit wird das Tempo, mit dem sich der Wandel vollzieht, sowohl auf dem gewerblichen als auch dem privaten Markt von der Nachfrage nach schnelleren und leistungsstärkeren Ladelösungen bestimmt. Dabei steht die Branche jedoch vor einer zentralen Herausforderung: die Kapazität aktueller EV-Batterien. Momentan ist die DC-Ladung noch zu leistungsstark für die meisten Pkw, was sich aber mit der Einführung des ersten für diese Leistung ausgelegten Pkw, dem ab 2020 erhältlichen Porsche Taycan, ändern könnte.

Obwohl derzeitige EV-Batterien noch nicht über die notwendige Kapazität verfügen, um die von einem Hochleistungs-Ladegerät bereitgestellte Energie zu speichern, eignen sich Produkte wie die Ladestation Terra HP (für „High-Power“) von ABB für heutige ebenso wie für zukünftige Bat-

terien mit höherer Kapazität - und stellen somit eine zukunftssichere Lösung dar, die die Entwicklung der nächsten Generation von Elektrofahrzeugen unterstützt. Mit ihrer Ladeleistung von bis zu 350 kW ist die Terra HP in der Lage, die Reichweite eines Elektrofahrzeugs binnen acht Minuten – also nicht viel länger als der Tankvorgang eines herkömmlichen Autos mit Verbrennungsmotor – um 200 km zu vergrößern.

Die Terra HP ist in der Lage, die Reichweite eines Elektrofahrzeugs binnen acht Minuten um 200 km zu vergrößern.

Bei Bussen und Lkw ist die maximale Ladeleistung derzeit auf 600 kW beschränkt. Allerdings sieht ABB auch hier Entwicklungspotenzial in Richtung 1 MW Ladeleistung. Kürzlich hat das Unternehmen rund 10 Millionen US-Dollar in ein neues F&E-Zentrum investiert, das im September 2019 eröffnet



03

—
02 Formel E-Rennwagen
des Teams Nissan
e.dams beim Rennen in
Marrakesch, Marokko,
im Jahr 2019.

—
03 Terra DC-Ladestation
von ABB.

wurde. Damit stärkt ABB auch ihre Aktivitäten im rasch wachsenden Elektrobuss-Segment, um die Entwicklung wegweisender Lösungen in diesem Bereich voranzutreiben.

Die Kraft der Kooperation

Mit dem technischen Fortschritt einher geht die Notwendigkeit zur stärkeren Zusammenarbeit, die einen wichtigen Schlüssel für Innovation auf dem Gebiet der Elektrofahrzeuge darstellt. Die Zusammenarbeit mit anderen bedeutenden Akteuren ermöglicht es ABB, die Grenzen der Technik zu verschieben und neue Lösungen zu entwickeln. Angesichts der rapiden Entwicklung auf dem EV-Sektor ist die Notwendigkeit zur Kooperation größer denn je. So arbeitet ABB mit Erstausrüstern (OEMs) und Betreibern von Ladestationen zusammen, um sicherzustellen, dass die Technik die aktuellen Anforderungen nicht nur erfüllt, sondern übertrifft, um zukünftiges Wachstum zu ermöglichen. In Singapur hat ABB kürzlich zusammen mit der Technischen Universität Nanyang (NTU), Singapurs Landverkehrsbehörde LTA und Volvo Buses den weltweit ersten vollelektrischen, autonomen

12-Meter-Linienbus in Betrieb genommen →1. Das Vorzeigeprojekt soll zum einen zeigen, dass es möglich ist, einen planmäßigen Linienverkehr mit emissionsfreien Fahrzeugen zu realisieren, und zum anderen deutlich machen, welche bedeutenden Fortschritte im öffentlichen Personenverkehr erzielt werden können, wenn man die beiden zukunftsweisenden Technologien Elektrofahrzeuge und autonomes Fahren miteinander kombiniert.

Innovation vorantreiben

ABB ist ständig dabei, das Machbare auszuloten und die Grenzen der E-Mobilität zu erweitern. Nicht umsonst ist ABB Titelpartner der ABB FIA Formel E Meisterschaft, einer Motorsportserie ausschließlich für elektrisch angetriebene Fahrzeuge, die eine vielseitige Test- und Demonstrationsplattform für Elektrifizierungs- und Digitalisierungstechnologien der E-Mobilität darstellt und deren Potenzial einem breiteren Publikum präsentiert. Das schnelle Laden der Batterien von Formel-E-Fahrzeugen ist ein gutes Beispiel für den praktischen Einsatz einer solchen Innovation.

—
Bei einer Gewichtszunahme
von 20 % konnte die Kapazität
um 95 % erhöht werden.

Die Formel-E-Rennwagen der neuesten Generation erreichen eine Höchstgeschwindigkeit von 280 km/h und beschleunigen in 2,8 s von 0 auf 100 km/h, was größtenteils einer erheblichen Verbesserung der Batterieeffizienz zu verdanken ist →2. Die Batterie der neuen Gen2-Rennwagen ist zwar schwerer als die der Vorgängermodelle, die in den ersten vier Saisons der Meisterschaft eingesetzt wurden, doch sie bietet fast die doppelte Kapazität. Bei einem zusätzlichen Gewicht von 65 kg (385 statt 320 kg) ist die Kapazität von vorher 28 kWh auf 54 kWh gestiegen – das entspricht einer 95%igen Steigerung der Kapazität bei einer Gewichtszunahme von 20 %. Dank dieses Fortschritts sind die Gen2-Fahrzeuge nun in der Lage, eine volle Renndistanz von 45 min mit einer einzigen Ladung zu absolvieren.

Diese technische Entwicklung spiegelt sich auch in den Serienfahrzeugen wieder. In der Jaguar I-PACE eTROPHY treten z. B. Rennversionen des elektrischen SUV von Jaguar gegeneinander an, wie er auch an Kunden verkauft wird und an gängigen Ladestationen geladen werden kann. Der Schritt vom normalen Straßenverkehr in den Rennsport erforderte einiges „Querdenken“ seitens der ABB-Technologieexperten, die eine Lösung entwickelten, mit der die Batterien von bis zu 20 Rennwagen in den Pausen zwischen Training, Qualifying und Rennen binnen kurzer Zeit geladen werden können – und zwar über die Saison hinweg in zehn verschiedenen Städten auf vier Kontinenten.

Die naheliegendste Lösung war hier ein DC-Ladesystem. Doch mit einer Höhe von 2,2 m waren diese für die öffentliche Nutzung vorgesehenen Ladestationen zu groß für die Frachträume der Flugzeuge, die die Rennwagen und die Ausrüstung der Rennserie um die Welt transportieren. In enger Zusammenarbeit wurde eine Lösung entwickelt, die die Funktionalität eines DC-Schnellladesystems in einem nur 1,5 m hohen Gehäuse auf Rädern unterbringt →3–5.

Dies ist ein gutes Beispiel dafür, wie die großen Herausforderungen, die die E-Mobilität mit sich bringt, durch innovatives Engineering und Kollaboration bewältigt werden können.

—

Die großen Herausforderungen der E-Mobilität können durch innovatives Engineering und Kollaboration bewältigt werden.

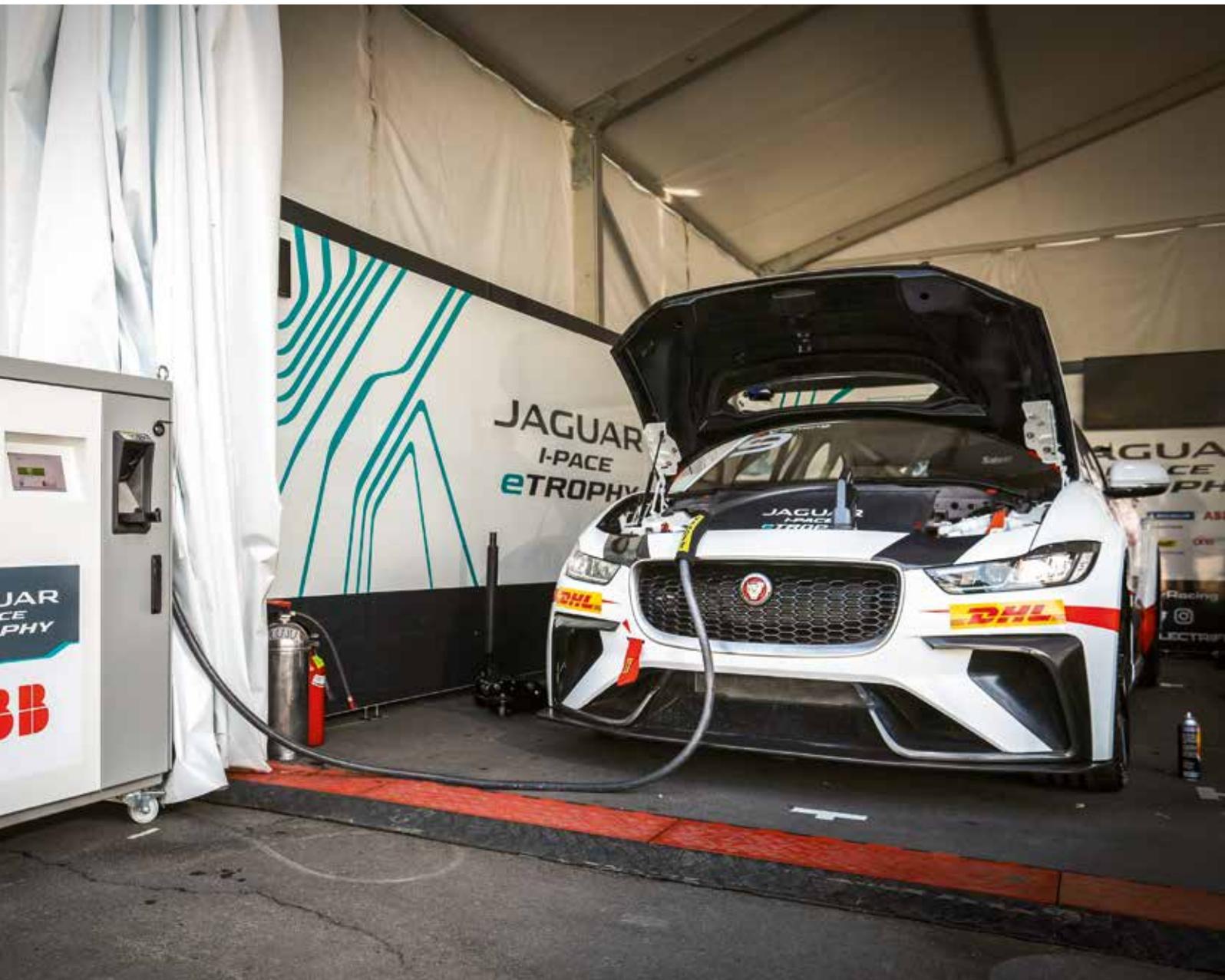
Die Zukunft der E-Mobilitätstechnologie

Der Markt für E-Mobilität bietet vielfältige Möglichkeiten für verschiedene Akteure, angefangen von den Entwicklern der nächsten Generation von Elektrofahrzeugen und der dazugehörigen Komponenten bis hin zu Ladetechnologie-Anbietern, Betreibern von Ladestationen, Stromversorgern und Unternehmen aus dem Bereich der erneuerbaren Energien. Hier zeichnet sich eine zunehmende Diversifizierung der Portfolios von Unternehmen – darunter einige der größten Energieversorger und OEMs – ab, die es ihnen erlaubt, auf neue Teile der Wertschöpfungskette, insbesondere den Betrieb von Ladestationen, einzuwirken. In Europa ist ABB z. B. Haupttechnologiepartner und Lieferant von IONITY, einem Joint-Venture der BMW Group, der Daimler AG, der Ford Motor Company und des Volkswagen Konzerns mit den Marken Audi und Porsche, das mit dem Ziel gegründet wurde, bis zum Jahr 2020 ein Netz mit rund 400 Schnellladestationen in 24 europäischen Ländern aufzubauen und zu betreiben.



04

Wie Electrify America in Nordamerika, für das ABB ebenfalls als Technologiepartner tätig ist, ist IONITY in Europa führend im Bereich High-Power Charging. Angesichts ihrer schieren Größe und technischen Möglichkeiten sind die einzelnen Mitglieder von IONITY weniger Kunden als vielmehr Kooperationspartner, die den Ausbau der E-Mobilität vorantreiben. Letztendlich sind es dieser kollaborative Ansatz und kontinuierliche Investitionen in neue Technologien, die die Zukunft der E-Mobilität in den kommenden



—
04 ABB Terra DC-Ladestationen im Einsatz.

—
05 Ladestationen von ABB laden die elektrischen Jaguar I-PACE-Rennwagen binnen kurzer Zeit auf.

—
Literaturhinweis

[1] <https://www.businessgreen.com/bg/news-analysis/3033315/iea-electric-vehicles-to-triple-by-2020-and-soar-to-125-million-by-2030>



05



Produktiv



Foto: Tennet



ität



52

Die Digitalisierung liefert eine neue Generation von Werkzeugen, die dabei helfen, die Produktivität und Zuverlässigkeit elektrischer Systeme zu erhöhen. Dies wiederum ermöglicht eine bessere Steuerung der industriellen Prozesse, die auf ihnen basieren. So können nicht nur Einblicke in das, was aktuell passiert, sondern auch das, was als nächstes passieren kann, gewonnen werden.

- 46 KI lernt, Prozessdynamik abzubilden
- 52 Optimierung elektrischer Antriebsstränge durch digitale Überwachung
- 56 Virtuelles Prototyping von Sensorsystemen
- 64 Asset-Optimierung für die Energiewirtschaft
- 68 Cosimulationsbasierte Entwicklung von Leistungsschalter-Antrieben
- 74 Performance-Überwachung von Leistungstransformatoren in SCADA



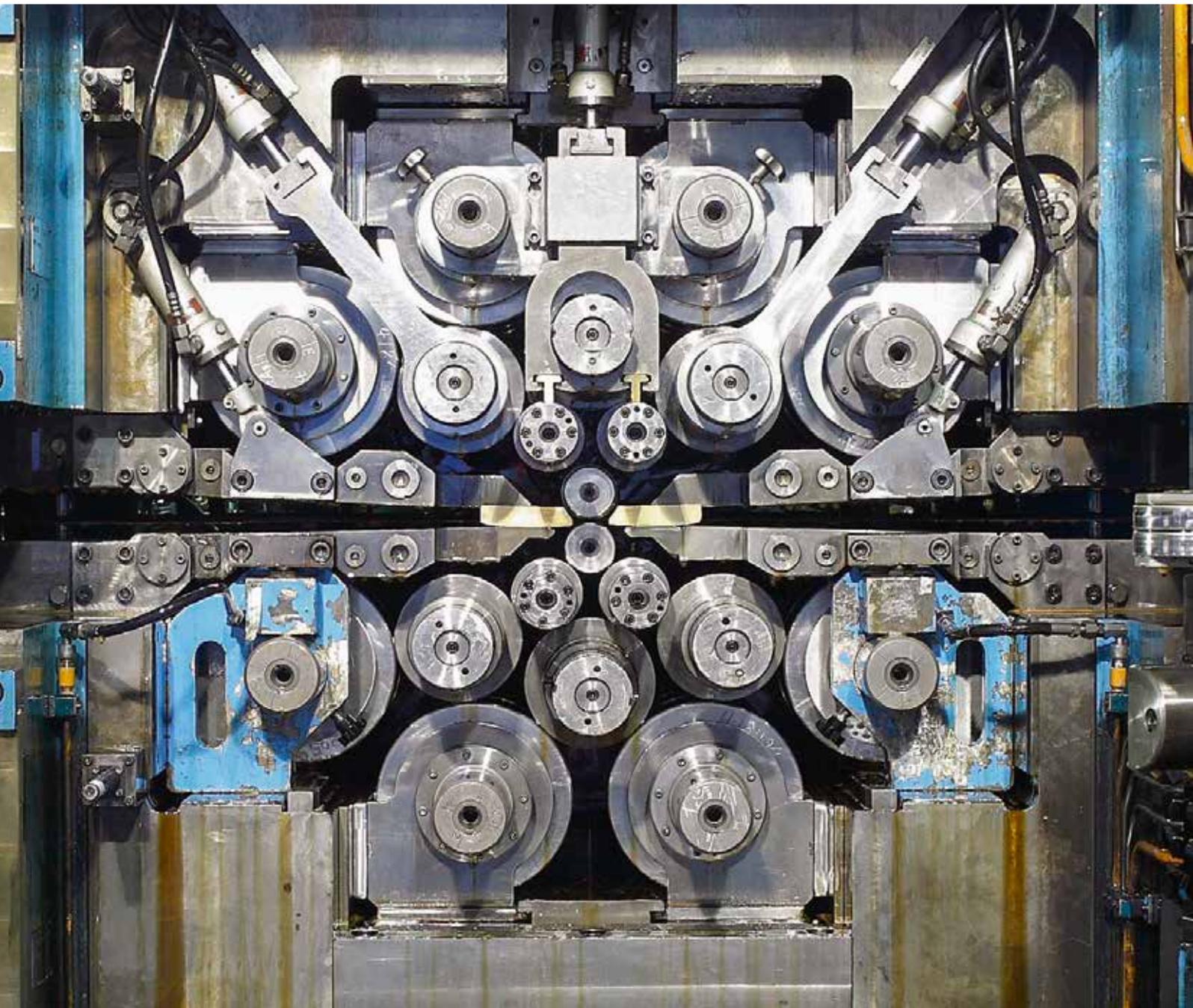
64

PRODUKTIVITÄT

KI lernt, Prozessdynamik abzubilden

Industrielle Automatisierungssysteme nutzen digitale Zwillinge, um Prozesseingaben und -ausgaben miteinander in Beziehung zu setzen. Bis vor Kurzem war ein extremer Engineeringaufwand erforderlich, um stets aktuelle digitale Zwillinge bereitzustellen, doch dank jüngster Fortschritte auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz (KI) ändert sich dies nun.

01



Automatisierungssysteme in Industrieanlagen haben die Aufgabe, einen sicheren und stabilen Betrieb zu gewährleisten, die Produktqualität sicherzustellen und für einen flexiblen und effizienten Prozessablauf zu sorgen. Digitale Zwillinge sind leistungsstarke Werkzeuge, die dabei helfen, dies zu erreichen.

Fachleuten im Bereich der Prozessführung ist das Konzept der digitalen Zwillinge nicht fremd, da selbst für eine einfache Stabilitätsanalyse ein mathematisches Modell – konventionell in Form einer Transferfunktion – erforderlich ist, um die Beziehung zwischen der Eingabe und der Ausgabe eines Systems darzustellen.

Andere automatische Regelungskonzepte wie Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit sind ebenfalls auf die Möglichkeit einer modellbasierten Analyse angewiesen. Daher dürfte der Gedanke an die Verfügbarkeit stets aktueller digitaler Darstellungen solcher Eingangs-Ausgangs-Beziehungen alle Regelungstechniker, insbesondere solche, die sich mit Systemen befassen, deren Leistungsfähigkeit oder gar Konfiguration Veränderungen und Unsicherheiten unterworfen ist, erfreuen. Bis vor Kurzem war dies noch reine Fantasie oder bestenfalls etwas, das nur mit extremem Engineeringaufwand möglich war, doch dank jüngster Fortschritte auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz (KI) ändert sich dies nun →1.

Digitaler Zwilling vs. mathematisches Modell

Mathematische Modellierungsverfahren in der Prozessführung lassen sich in zwei Hauptkategorien einteilen: Solche, die auf physikalischen Erkenntnissen und Fachwissen basieren, und datengestützte Methoden. Die Einteilung ist jedoch nicht zwangsläufig absolut. Die meisten Modelle auf der Basis physikalischer Beziehungen enthalten Parametrisierungsmöglichkeiten, die auf der Grundlage von Prozessdaten gewählt werden (Gray-Box-Modelle). Für datengestützte Verfahren (Black-Box-Modelle) ist es nicht unüblich, Modellordnungen oder -formen (z. B. erste Ordnung plus Zeitverzögerung) auf der Basis bisheriger Erfahrungen oder Fachwissen zu wählen.

Unabhängig vom Modellierungsverfahren ist es gängige Praxis, dass erfahrene Ingenieure Anlagentests durchführen oder historische Daten analysieren, um diese Modelle für bestimmte Anwendungen zu konfigurieren. Diese können von der Erstellung eines einfachen Softsensors (z. B. zur Schätzung der Kappa-Zahl bei der Zellstoffherstellung) bis hin zur modellprädiktiven Regelung (z. B. eines Kombikraftwerks mit integrierter Vergasung) reichen. Leider sind alle industriellen Anlagen ständigen Veränderungen unterworfen: Katalysatoren in katalytischen Reaktoren werden vergiftet, Verdichter und Turbinen

werden verschmutzt, und Wärmetauscher verstopfen. Solche Phänomene führen zu Abweichungen von den Modellvorhersagen.

Ein digitaler Zwilling hingegen ist ein mathematisches Prozessmodell, das aktuell gehalten werden kann, ohne dass eine Armee von Fachleuten die Daten prüfen muss, um die Bestandteile des Modells manuell anzupassen und abzustimmen.

Herkömmliche digitale Zwillinge und Skalierbarkeit

Bei herkömmlichen Modellen müssen zukünftige Systemveränderungen – z. B. Koksablagerungen in einem Turbolader – im Voraus bekannt sein und modelliert werden. Doch mit zunehmender Komplexität des Systems wird es immer schwieriger, die relevanten mathematischen Formeln festzuhalten und die dazugehörigen zu schätzenden Zustände und Parameter zu bestimmen. Dazu sind qualifizierte und erfahrene Ingenieure erforderlich, und irgendwann überschreiten die Kosten die Grenze der wirtschaftlichen Machbarkeit.

—
Ein digitaler Zwilling ist ein mathematisches Prozessmodell, das aktuell gehalten werden kann.

Kunst und Wissenschaft der Black-Box-Systemidentifikation

„Systemidentifikation“ bezieht sich auf das Problem der Modellschätzung bei dynamischen Systemen auf der Basis des beobachteten Eingangs-Ausgangs-Verhaltens [1]. Die aus diesem Studienbereich kommenden Black-Box-Modellidentifikationsverfahren werden häufig in industriellen Anwendungen eingesetzt. Die Black-Box-Modellierung stellt eine skalierbare Alternative zu Gray-Box-Modellierungsverfahren dar, insbesondere weil die Anforderungen weniger im Fachwissen und Know-how als in der Komplexität der mathematischen Konstrukte und Algorithmen und den größeren Mengen von Messdaten liegen.

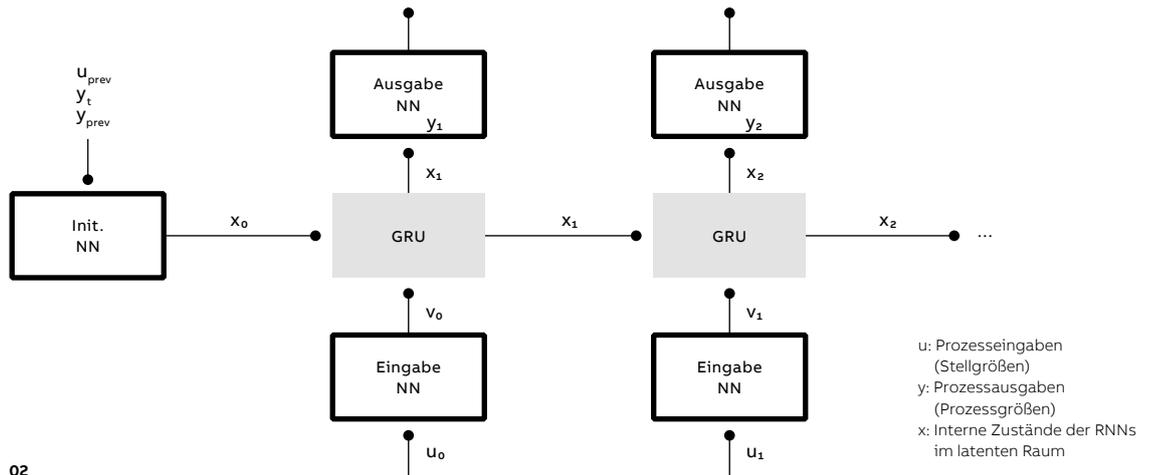
Einige Herausforderungen bleiben jedoch bestehen. Derzeitige gängige Praxis ist es, mithilfe von Sprungversuchen mit offenem Regelkreis (open loop) und einer Variable (single-variable) die Daten zu erzeugen, die für die Modellidentifikation mithilfe etablierter Black-Box-Identifikationsverfahren erforderlich sind. Diese Vorgehensweise ist nicht nur zeitaufwändig, sondern eventuell auch nicht machbar, wenn die beteiligten Regelkreise nicht sicher in den manuellen Betrieb überführt werden können.

—
01 Jüngste Fortschritte in der KI eröffnen völlig neue Möglichkeiten für die industrielle Prozessautomatisierung. Das Bild zeigt ein Mehrrollenwalzwerk, wie es in der Metallverarbeitung eingesetzt wird.

—
Mehmet Mercangoez
Andrea Cortinovis
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil,
Schweiz

mehmet.mercangoez@
ch.abb.com
andrea.cortinovis@
ch.abb.com

Luis Dominguez
Ehemaliger ABB-
Mitarbeiter



02

Außerdem können Sprung- oder Impulsantwortmodelle zwar einen Teil des nichtlinearen dynamischen Ausgangsverhaltens – z. B. Zeitverzögerungen – abbilden, doch sie müssen auf lineare Weise überlagert werden, um ein Mehrgrößenverhalten (Multiple-Input, Multiple-Output, MIMO) darzustellen, und können nur lineare Eingangs- und Ausgangs-Beziehungen im statischen Zustand abbilden.

Ferner sind diese rudimentären Modelle nicht in der Lage, instabiles Open-Loop-Verhalten darzustellen. Fortschrittlichere Methoden wie die Subspace-Identifikation können verwendet werden, um wirkliche MIMO-Modelle zu realisieren, wobei diese aber inhärent linear und nicht in der Lage sind, Verzögerungen oder Sättigungsbedingungen effizient darzustellen. Man kann zwar mehrere Modelle zu nutzen, um das dynamische Systemverhalten darzustellen und Nichtlinearitäten abzubilden, doch dies ist keine triviale Aufgabe, die zusätzlichen Engineeringaufwand erfordert.

Das KI-Paket: Manifold-Learning trifft rekurrente neuronale Netze

ABB hat beschlossen, einen neuen Ansatz zur Erstellung von digitalen Zwillingen für die Prozessindustrien zu untersuchen. Die Hauptziele dabei sind:

- Minimierung bzw. Beseitigung von Eingriffen durch Experten oder manuellem Engineering
- Möglichkeit zur Erstellung der Modelle ohne jegliche Open-Loop-Versuche in der Anlage und vorzugsweise aus historischen Betriebsdaten
- Erreichen bzw. Übertreffen der bisherigen Vorhersagegenauigkeit

Dabei stößt der zweite Punkt an fundamentale wissenschaftliche Grenzen, da kein Algorithmus und keine Berechnung in der Lage ist, die erforderlichen Informationen zu extrahieren, wenn diese in den Daten nicht enthalten sind. Wenn ein bestimmter Betriebszustand vom System nie erreicht wurde, fehlt die notwendige

Information, und das Vorhersagevermögen der abgeleiteten Modelle bleibt eingeschränkt.

Um die angeführten Ziele zu erreichen, wurden jüngste Entwicklungen auf dem Gebiet der KI, genauer des maschinellen Lernens, herangezogen.

—
ABB hat beschlossen, einen neuen Ansatz zur Erstellung von digitalen Zwillingen zu untersuchen.

Die Verwendung von neuronalen Netzen zur Modellierung nichtlinearer Systeme ist in der Prozessführung keine neue Idee. Bereits in den 1990er Jahren wurde die Verwendung mehrschichtiger vorwärtsgerichteter Netze (Feedforward-Netze) mit verdeckten Schichten zur näherungsweise Bestimmung von Anlagenantworten und deren Ableitungen untersucht [2]. Die Ergebnisse dieser frühen Studien verdeutlichten die damit verbundenen rechen-technischen Schwierigkeiten. Außerdem waren Feedforward-Netze zur damaligen Zeit vom Design her nicht optimal für die Modellierung dynamischer Systeme, und wichtige Entwicklungen auf dem Gebiet der rekurrenten neuronalen Netze (RNNs) oder des langen Kurzzeitgedächtnisses (Long Short-Term Memory, LSTM), die die Dynamik besser abbilden, hatten noch nicht stattgefunden. Heute befassen sich viele Forschungsartikel mit der Nutzung von RNNs zur Modellierung dynamischer Systeme zur Lösung von Regelungsproblemen.

Eine weitere Entwicklung, das sogenannte Manifold-Learning, lieferte einen weiteren Teil der Lösung. Generell finden Hauptkomponentenanalysen (Principle Component Analysis, PCA) und Dimensionsreduktionsverfahren beim Engineering von Prozesssystemen häufig Anwendung.

— 02 Grundkonzept des KI-Algorithmus zur Vorhersage des zukünftigen Verhaltens einer Prozessanlage anhand zukünftiger Werte von Anlageneingaben.

— 03 Validierungsergebnisse für Vorhersagen (N Schritte in die Zukunft) aus der Fallstudie zur Papiermaschine. Punkte kennzeichnen Messaktualisierungen. Nicht korrigierte Vorhersagen, bei denen Messungen und ihre Historien erneut aktualisiert werden, liegen zwischen den Punkten. Die Y-Achsen sind normiert.

Dies gilt besonders für Anwendungen zur Zustandsüberwachung und Fehlererkennung.

— **Der Grundgedanke des ABB-Ansatzes besteht darin, die Prozessdynamik in einem niederdimensionalen, durch VAEs codierten Raum zu erlernen.**

Der Grundgedanke besteht darin, dass Prozessanlagen von Natur aus vieldimensional sind, aber zahlreiche Messungen aufgrund ihrer zugrunde liegenden Physik zusammenhängen. Auch hier waren die vorherrschenden Methoden linear und bei der Abbildung von nichtlinearem Verhalten nur begrenzt erfolgreich. Obwohl Erweiterungen der linearen Methoden entwickelt und mit einigem Erfolg eingesetzt wurden, haben jüngste Entwicklungen auf dem Gebiet der künstlichen neuronalen Netze und deren Nutzung zur Erstellung von Variational Autoencodern (VAEs) zu einer weitaus bedeutenderen Verbesserung der Leistungsfähigkeit dieser Ansätze geführt. Ein VAE ist ein unbeaufsichtigtes Lernkonstrukt einer Codier- und Decodierstruktur, die in der Lage ist, Daten in einen Raum geringerer Ordnung und wieder

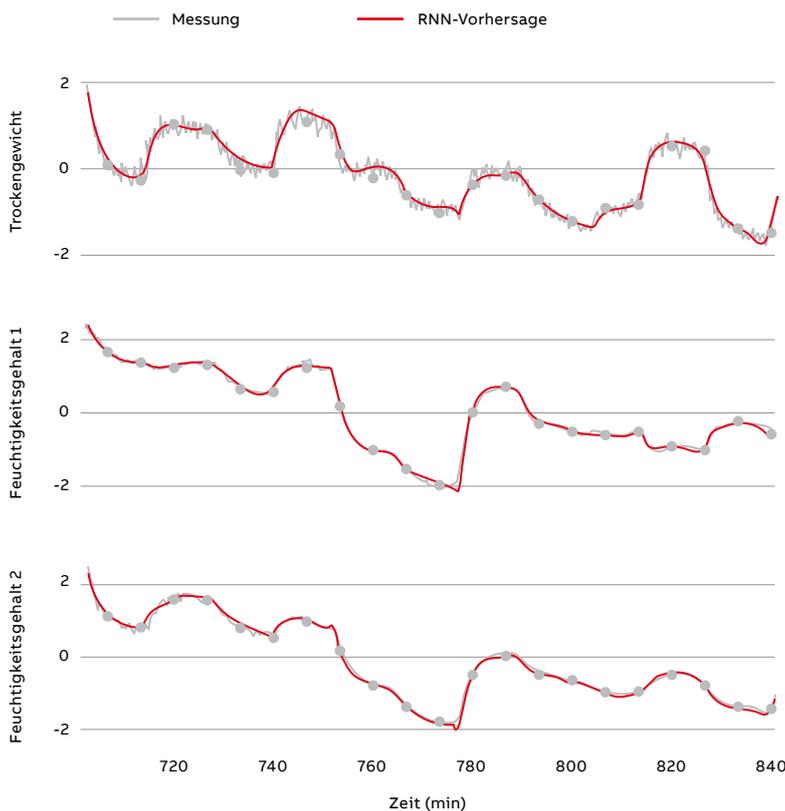
zurück in die ursprüngliche Dimension zu übertragen – und das bei minimalem Informationsverlust.

Der Grundgedanke des ABB-Ansatzes zur Erstellung von digitalen Zwillingen besteht darin, die Prozessdynamik in einem niederdimensionalen, durch VAEs codierten Raum zu erlernen. Praktisch werden die VAEs als neuronale Feedforward-Netze implementiert. Im Gegensatz zu ähnlichen in der Literatur beschriebenen Konzepten sieht die Lösung von ABB eine zusätzliche Schicht vor, die die Zustände der sogenannten GRUs (Gated Recurrent Units) initialisiert. Diese sind das Hauptelement der RNNs zur Abbildung der Systemdynamik. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Eingabeschichten in $\rightarrow 2$ nur der Vollständigkeit halber dargestellt sind. Bei typischen Regelungsproblemen sind die Eingaben bereits auf ein Minimum reduziert, physikalisch unabhängig und unkorreliert. Daher ist eine Abbildung von Eingaben auf einen latenten Raum niedrigerer Dimension nicht erforderlich.

Praktische Erprobung

Um die Leistungsfähigkeit und Robustheit des vorgeschlagenen Ansatzes zu testen, wurde ein komplexes System für die Längsregelung (MD-Regelung) einer Papiermaschine gewählt [3,4]. Bei Papiermaschinen bestehen starke Wechselwirkungen zwischen mehreren Messrahmen (Sensoren) und mehreren Gruppen von Aktuatoren, die die Eigenschaften des produzierten Papiers beeinflussen. Zusätzlich kann es aufgrund unterschiedlicher Reaktionszeiten und Transportverzögerungen zwischen Aktuatoren und Messungen entlang der Messstrecke zu unterschiedlichem Schrumpfen der Bahnen kommen, was zu unterschiedlichen Breiten führt. Generell sollte die MD-Regelung Regeleingriffe vornehmen, die schnelle Veränderungen im Flächengewicht und in der Feuchtigkeit beim Übergang von einer Papiersorte zur nächsten (Sortenwechsel) beseitigen, wobei die langen Transportverzögerungen berücksichtigt und vorhergesagt werden.

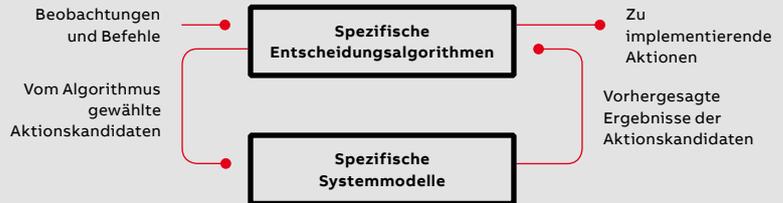
Das Modell wurde anhand von Anlagendaten validiert. Diese umfassten drei Eingangsgrößen: Stoffstrom (ST01), Dampfdruck 1 (PR02) und Dampfdruck 2 (PR03); drei Ausgangsgrößen: Trockengewicht (DW), Feuchtigkeitsgehalt 1 (MT1) und Feuchtigkeitsgehalt 2 (MT2) sowie drei Störgrößen: Interner Luftstrom oder Aschegehalt (RA01), Tonfluss (CY01) und Maschinengeschwindigkeit (MS). Das Ziel der Fallstudie ist die Sollwertverfolgung an den drei genannten Ausgängen, wobei davon ausgegangen wird, dass die Störungen gemessen werden. Die Hauptherausforderungen der Studie liegen in der Komplexität des Systems, die sich aus der großen Zahl von Zuständen, der Behandlung verschiedener Verzögerungen und dem Messrauschen ergibt, das zu den Ausgangssignalen hinzukommt.



WIE FUNKTIONIERT AUTONOME ENTSCHEIDUNGSFINDUNG?

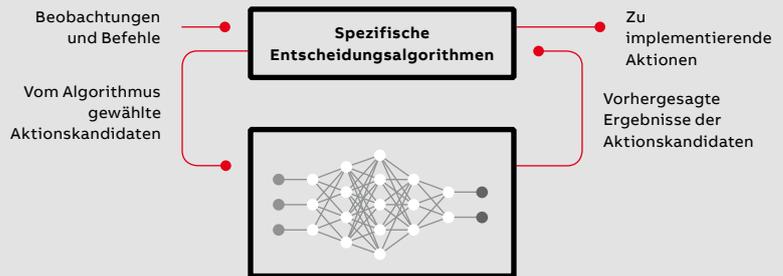
Traditionelles autonomes Entscheidungsfindungssystem

Traditionelle autonome Entscheidungsfindungssysteme sind „handgemacht“ und basieren auf spezifischen mathematischen Modellen, die die physikalische Realität darstellen. Ausgehend von Beobachtungen oder Befehlen werden Entscheidungen getroffen, indem mögliche Aktionen betrachtet werden und mithilfe des mathematischen Modells die Resultate dieser Aktionen über einen bestimmten Vorhersagehorizont bestimmt werden. Der Algorithmus implementiert die Aktion, die das beste Resultat entsprechend den Befehlen liefert.



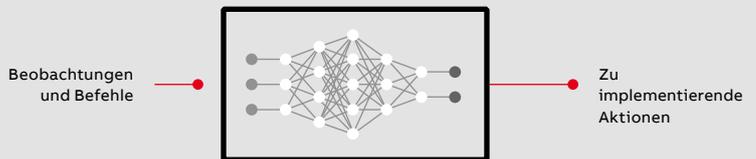
KI-generiertes Modell

Die in diesem Artikel präsentierte Modellierungsmethode ersetzt die spezifischen Systemmodelle durch Systemmodelle, die von einer KI-Anwendung erstellt wurden. Diese KI-generierten Modelle sind trotzdem kompatibel mit traditionellen Entscheidungsfindungsalgorithmen und können zur Generierung von Vorhersagen auf der Basis möglicher Aktionen genutzt werden. Diese können wiederum dabei helfen, die Aktionen zu optimieren, um das gewünschte Verhalten und Resultat zu erreichen.



Ein vielversprechender zukünftiger Ansatz

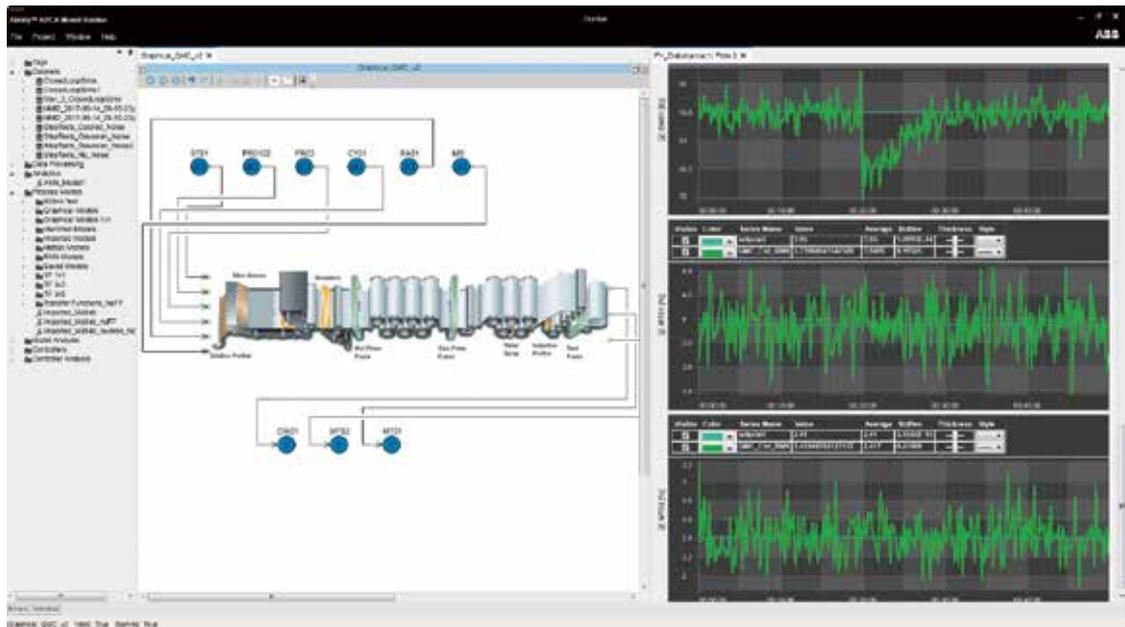
Die beiden anderen Konzepte basieren auf der Berechnung der Aktionen in Echtzeit als Antwort auf Beobachtungen und sich verändernde Befehle. Die Erstellung der spezifischen Modelle bzw. das Training der KI-basierten Modelle muss offline in einem separaten Schritt erfolgen. Ein vielversprechender Ansatz sieht vor, ebenfalls KI einzusetzen, um die besten Aktionen entsprechend den Beobachtungen und Befehlen zu erlernen und die KI direkt über die Aktionen entscheiden zu lassen. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass er ungeahnte Strategien ermöglicht, die nicht durch die



spezifischen Konstrukte der Vergangenheit begrenzt sind. Das hier vorgeschlagene Lernverfahren kann zur Erstellung digitaler Zwillinge genutzt werden, die solchen KI-Algorithmen als „Spielwiese“ zum Aufbau ihrer Strategien für simulierte Realitäten dienen.

04 Autonome Entscheidungsfindung.

05 Implementierung der MD-Regelung einer Papiermaschine mithilfe des VAE- und RNN-basierten Modellierungsansatzes in der ABB Ability APCA Suite. Die APCA Suite unterstützt zudem grafische First-Principle-Modellierung, lineare und nichtlineare Regression, PCA, künstliche neuronale Netze (KNN) und Support Vector Machines (SVM).



05

Die Trainingsdaten für den Test wurden mithilfe eines realitätsnahen Papiermaschinensimulators erzeugt, indem verschiedene Veränderungen der Ausgangssollwerte vorgenommen und die Eingangs-/Ausgangssignale aufgezeichnet wurden. Die Veränderungen der Ausgangssollwerte erfolgen unmittelbar nacheinander, d. h. es ist keine Vorverarbeitung erforderlich, um den statischen Betrieb herauszufiltern. An jedem Ausgang wird zusätzliches autokorreliertes Rauschen hinzugefügt, um die Anordnung realistischer zu gestalten. Für die Validierung wurden unabhängige Datensätze erzeugt, die beim Training nie verwendet wurden.

Das RNN-Modell wird in Keras erstellt, das Backend in Tensorflow. Das GRU-Training erfolgt nach dem BPTT-Verfahren (Back-Propagation Through Time), was mit einem relativ hohen Rechenaufwand verbunden ist.

Die Vorhersagen können zur Entscheidungsunterstützung, zur modellbasierten Regelung oder – in Zukunft – für einen autonomen Betrieb genutzt werden.

Sowohl →3 als auch die quantitativen Kennzahlen zeigen, dass das RNN mit den unbekanntem Validierungsdaten gut funktioniert und somit in der Lage ist, die Dynamik des Systems einschließlich seiner Verzögerungen zu erlernen. Die generierten Vorhersagen können dann zur Entscheidungsunterstützung, zur Regelung mithilfe modellbasierter Verfahren oder – in Zukunft – für einen autonomen Betrieb genutzt werden →4.

Wo steht ABB

Die hier vorgestellten Arbeiten sind nur ein erster Schritt zur Erstellung fortschrittlicher digitaler Zwillinge für die Prozessindustrien. Einige Bestandteile sind bereits etabliert, wie z. B. die Möglichkeit zur Erstellung präziser nichtlinearer dynamischer Mehrgrößenmodelle aus Closed-Loop-Betriebsdaten [5]. Die Auslöser für ein automatisches Nachtrainieren und die autonome Parametrisierung der zugrunde liegenden Strukturen in den entsprechenden neuronalen Netzen sind Gegenstand laufender Arbeiten. Die Auswahl der Architekturen – wie die Anzahl der Schichten in den VAEs oder die Anzahl von GRUs – erfolgt zurzeit manuell und erfordert eher entsprechendes Wissen über die Deep-Learning-Umgebungen als Engineeringwissen. Dieser Abhängigkeit kann mit Hyperparameteroptimierung begegnet werden.

Eine wertvolle Ressource ist die ABB Ability™ APCA Suite. Diese beinhaltet eine Reihe von Tools, die die Implementierung von modellbasierten Reglern und Analysen vereinfachen [6].

Mit der APCA Suite können Analysemodelle aus Gesetzmäßigkeiten der Physik (First Principles) oder Prozessdaten hergeleitet und im APCA Laufzeit-System implementiert werden. Das hier beschriebene Modellierungssystem mit den VAEs und RNNs ist nun Bestandteil der APCA Suite und kann zum Nutzen von ABB-Kunden eingesetzt werden →5.

Das Ziel von ABB ist es, diese Funktionen weiter zu verbessern und ihren Kunden spürbare Verbesserungen in der Sicherheit, Verfügbarkeit, Qualität, Effizienz und Flexibilität ihrer Prozesse zu ermöglichen. ●

Literaturhinweise

[1] L. Ljung (2010): „Perspectives on system identification“. Annual Reviews in Control 34(1), S. 1–12.

[2] K. Hornik et al. (1990): „Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks“. Neural networks 3(5), S. 551–560.

[3] S.-C. Chen et al.: „Use a Machine's full capability“. Pulp & Paper International (PPI), Process Control, March 2009, S. 39–42.

[4] S.-C. Chen et al.: „Multivariable CD control applications“. IPW, Process and Quality Control, October 2008, S. 16–20.

[5] N. Lanzetti et al.: „Recurrent Neural Network based MPC for Process Industries“. European Control Conference. Neapel, Italien, 2019.

[6] L. Dominguez, E. Galleste: „Modellbasierte Prozessregelung und Analyse in der Industrieautomatisierung“. ABB Review, 02/2018, S. 38–45.

PRODUKTIVITÄT

Optimierung elektrischer Antriebsstränge durch digitale Überwachung

Elektrische Antriebsstränge gehören zu den kritischen Komponenten in der Industrie, d. h. sie müssen dauerhaft verfügbar sein. Mit ABB Ability™ Condition Monitoring für den Antriebsstrang hilft ABB Kunden dabei, die Verfügbarkeit des gesamten Antriebsstrangs zu erhöhen. ABB Review sprach mit Sönke Kock, um mehr darüber zu erfahren.

AR ABB Review (AR): Sönke, was ist Ihre Rolle bei ABB?

SK Sönke Kock (SK): Ich bin Digital Leader für die Global Business Line Drives. Digitale Innovation ist ein wichtiges Thema im Bereich Antriebe.

AR Fangen wir am Anfang an: Was sind elektrische Antriebsstränge und warum sind sie wichtig?

SK In nahezu allen Industrien, Infrastrukturen und Gebäuden müssen Förderbänder, Pumpen, Mischer oder Lüfter angetrieben, Werkstoffe bewegt und verarbeitet oder tausend andere Aufgaben bewältigt

werden. Dies geschieht zum großen Teil mithilfe von elektrischen Antriebssträngen, d. h. einer Verbindung aus Frequenzumrichtern, Motoren, Lagern, Kupplungen, Getrieben und Pumpen in verschiedenen Konfigurationen. Diese Antriebsstränge sind nicht nur entscheidend für industrielle Prozesse, sondern auch für unser tägliches Leben. Aufzüge würden steckenbleiben, der Druck in den Wasserleitungen würde nachlassen und Fließbänder in Fabriken würden stillstehen. Um solche Unannehmlichkeiten, Ausfälle oder potenziell gefährliche Situationen zu verhindern, sollte man den Zustand der elektrischen und mechanischen Ausrüstung genau im Auge behalten.



AR Und das wird zurzeit getan?

SK Nicht ganz. Traditionell ist die Antriebsstrangüberwachung so kostspielig, dass sie nur für besonders kritische Anwendungen eingesetzt wird. Dies liegt daran, dass zur Realisierung eines umfassenden Überwachungssystems eine aufwändige Installation erforderlich ist, die zum Teil teurer ist als die Komponenten des Antriebsstrangs selbst! Hinzu kommt, dass die Überwachungsausrüstung und -software von externen Spezialisten installiert und gewartet werden muss. Man kann sich vorstellen, wie sich das summiert. Aus diesem Grund beschränkt sich die Industrie häufig auf jährliche oder halbjährliche Vibrationsmessungen als Service und meidet die Installation von festen Überwachungssystemen. Das macht die Zustandsüberwachung zwar deutlich günstiger, doch es bleiben lange Zeiträume zwischen den Messungen, in denen etwas schiefgehen kann. Und es bleibt ein Sicherheitsrisiko, da sich das Wartungspersonal den rotierenden Maschinen nähern muss.

AR Und wie löst ABB das Dilemma?

SK Mit dem Service ABB Ability Condition Monitoring für den Antriebsstrang →1.

AR Und wie funktioniert das?

SK Die Verfügbarkeit kostengünstiger, IoT-basierter – also auf dem Internet der Dinge basierender – drahtloser Sensoren und Datenübertragung ermöglicht eine permanente Überwachung zu einem Bruchteil der Kosten traditioneller Zustandsüberwachungssysteme. ABB Ability Condition Monitoring für den Antriebsstrang ist ein Cloud-Service, der diese Daten bei minimalen Installationskosten permanent online zur Verfügung stellt. Die Lösung basiert auf ABB Ability, dem einheitlichen, branchenübergreifenden digitalen Angebot von ABB, das sich vom einzelnen Gerät über den Netzwerkrand bis hin zur Cloud erstreckt. ABB Ability ermöglicht einen schnellen globalen Service, eine proaktive Wartung sowie eine



Sönke Kock
ABB Motion
Ladenburg, Deutschland

Vielzahl weiterer Vorteile. Der Kunde hat einen besseren Einblick in seine Anlagen, was wiederum einen sicheren, zuverlässigen und effizienten Betrieb ermöglicht und die Verfügbarkeit und Produktivität steigert.

AR Was beinhaltet die Zustandsüberwachungslösung?

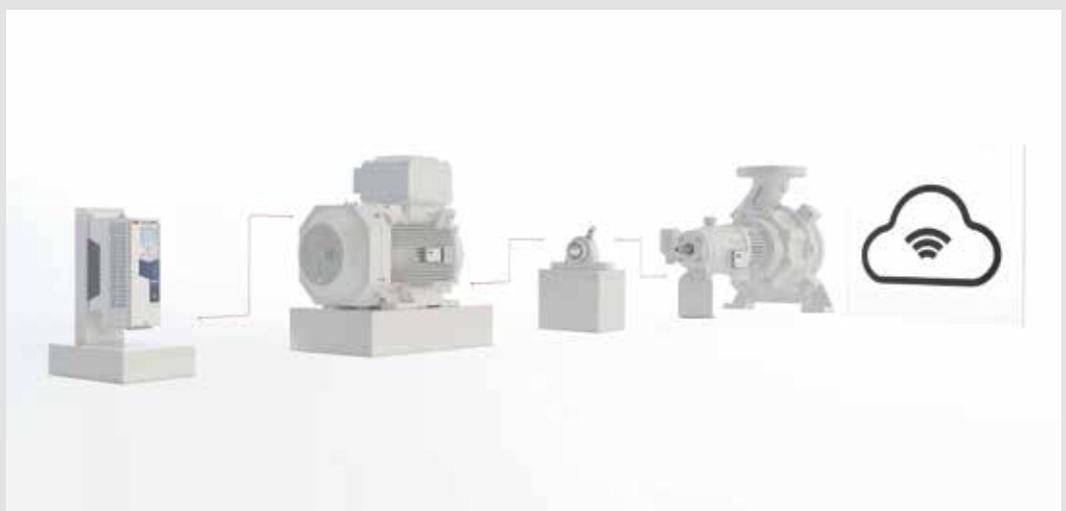
SK Der Zustandsüberwachungsservice deckt zurzeit Frequenzrichter, Motoren, Lager und Pumpen ab →2. Condition Monitoring für Frequenzrichter ist z. B. ein Service, der Echtzeit-Informationen über Ereignisse in den angeschlossenen Frequenzrichtern bereitstellt. Zu den überwachten Parametern gehören die Verfügbarkeit der Umrichter, Umweltbedingungen und Fehler. Mit dem Service können mögliche Probleme frühzeitig erkannt und notwendige Wartungsmaßnahmen eingeleitet werden.

AR Und intelligente Sensoren spielen ebenfalls eine Rolle?

SK Ja, wir können Motoren mit dem ABB Ability Smart Sensor ausrüsten, der herkömmliche Motoren in intelligente, drahtlos verbundene Geräte verwandelt →3. Der Smart Sensor kann z. B. an Niederspannungsmotoren angebracht werden und ermöglicht die Fernüberwachung über eine App und das Internet-

—
01 ABB Ability Condition Monitoring für den Antriebsstrang bietet Anlagenbetreibern die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Effizienz ihrer Antriebskomponenten zu verbessern.

—
02 ABB verbindet Frequenzrichter, Motoren, Lager und Pumpen für eine fortschrittliche Überwachung und Analyse.





03a



03b

Portal. Dieses System liefert vorausschauende Einblicke, die die Verfügbarkeit erhöhen und gleichzeitig den Energieverbrauch senken können.

AR Werden die Smart Sensors noch woanders eingesetzt?

SK Ja, z. B. an Stehlagern zur Bereitstellung von Zustandsinformationen. Lager sind kritische Komponenten des gesamten Systems und können Frühindikatoren für Probleme sein – da lohnt es sich, sie genau im Auge zu behalten. Außerdem werden Daten von Smart Sensors analysiert, um die Temperatur, Kavitation und den Lagerzustand von Pumpen zu überwachen, um ein Verstopfen oder Störungen zu verhindern.

AR Welche weiteren Vorteile bietet ABB Ability Condition Monitoring für den Antriebsstrang dem Kunden?

SK Ein äußerst wertvoller Aspekt des digitalen Antriebsstrangs ist, dass er dem Nutzer einen kostengünstigen Einstieg in die digitale Überwachung ermöglicht. Die niedrige Eintrittsschwelle veranlasst Kunden dazu, es auszuprobieren – und für gewöhnlich sind sie dann überzeugt. Weitere Vorteile sind eine schnelle Installation und Inbetriebnahme, da Motoren, Lager und Pumpen nicht separat verkabelt werden müssen. Das ist ein großes Plus, denn wenn bei der Inbetriebnahme oder im Betrieb Probleme auftreten, ist die Verkabelung häufig die Ursache. Einfache Nutzung und Integration, Herstellerunabhängigkeit, Skalierbarkeit und Flexibilität sind weitere Vorteile.

AR Kann die Lösung eine umfassendere Überwachung ermöglichen?

SK Ja, anders als bisherige Lösungen, die nur Punktdaten zum Zustand einzelner Komponenten lieferten, ist nun eine permanente Überwachung sämtlicher Komponenten möglich. Diese umfassende Überwachung bietet Vorteile wie geringere Kosten, eine höhere Verfügbarkeit und einen effizienteren Betrieb.

AR Bedeutet das, dass der Kunde für eine umfassende Überwachung von Anfang an ein vollständiges Überwachungssystem installieren muss?

SK Ganz und gar nicht! Unsere Lösung skaliert. Jede einzelne Komponente eines Antriebsstrangs – Motor, Lager oder Pumpe – kann mit Messtechnik ausgerüstet und in das Überwachungssystem eingebunden werden. Anschließend können weitere Komponenten wie Steckbausteine hinzugefügt werden. Die Daten werden in einem mobilen, einfach zu konfigurierenden und skalierbaren, cloudbasierten System gesammelt, das über Apps und Web-Portale zugänglich ist →4. Das bedeutet, dass eine fertige Lösung nur für einen Teil des Antriebsstrangs – z. B. nur den Motor – oder für den gesamten Antrieb verwendet werden kann. Dank der schnellen und flexiblen Einrichtung kann der Kunde verschiedene Konfigurationen ausprobieren und sich für die Zustandsüberwachungslösung entscheiden, die am besten seinen Bedürfnissen entspricht.

AR Wird ABB Ability Condition Monitoring für den Antriebsstrang bereits von Unternehmen eingesetzt?

SK Tatsächlich nutzen bereits Unternehmen rund um den Globus das System für eine optimierte Überwachung ihrer Anlagen. Das schwedische Wasser- und Abfallwirtschaftsunternehmen Uppsala Vatten och Avfall nutzt es z. B., um seinem Bedienpersonal Informationen zu Echtzeitindikatoren wie Zuverlässigkeit, Nutzung, Energieverbrauch und Last der Pumpsysteme bereitzustellen. Bei Glencore Nickelwerk in Norwegen ist es in einem Meerwasser-Pumpsystem zur Verteilung von Kühlwasser in der Fabrik im Einsatz. Die Integration der ABB-Lösung bietet dem Bergbauunternehmen die Möglichkeit, mehr Informationen über den thermischen Zustand der Antriebe zu erfassen und die Daten mit denen anderer Überwachungslösungen zu vergleichen.

AR Gibt es noch weitere Beispiele?

SK Ja, rund um den Globus. Das riesige Stahlwerk von SSAB in Finnland nutzt ABB Ability Remote Assistance, einen Service, der zum ABB Ability Digital Powertrain-Angebot gehört, um die Zuverlässigkeit wichtiger Antriebe in der Kokerei zu erhöhen. Das Fernüberwachungssystem hat bereits eine schnellere Fehlererkennung in einem drehzahlgeregelten Antrieb am Standort ermöglicht. Außerdem hat das weltweite Agrarunternehmen Olam International den ABB Ability Smart Sensor für Motoren in mehreren Werken – einer Kakaofabrik in Singapur, einem Molkereibetrieb in Malaysia und einer Zuckerfabrik in Indonesien – installiert.

—
03 Der ABB Ability Smart Sensor.

03a Der Smart Sensor verwandelt herkömmliche Motoren in intelligente, drahtlos verbundene Geräte und ermöglicht eine frühzeitige Warnung vor möglichen Problemen. Das Bild zeigt den Sensor an einem Stehlager

03b Die Montage und Demontage des Sensors ist unkompliziert.

—
04 Ein Überwachungsportal zeigt wichtige Betriebsparameter einzelner Komponenten in einem einheitlichen System.

—
05 Das Agrarunternehmen Olam International nutzt Smart Sensors von ABB, um die Stillstandszeiten seiner Motoren zu reduzieren.



04



05

Die Sensoren ermöglichen eine Fernüberwachung und somit eine vorausschauende Wartung der Motoren →5. Stillstandszeiten konnten deutlich reduziert und die Lebensdauer des Systems verlängert werden. Der Kunde ist sehr zufrieden und hat uns mitgeteilt, dass der digitale Fernüberwachungsansatz von ABB viel besser ist als die bisherige Methode, da Stillstände verhindert werden können und sich die Gesamtzuverlässigkeit erhöht.

Ein weiteres bedeutendes Beispiel findet sich im Aero Gravity, dem größten Freifallsimulator der Welt in Italien. Um höchsten Sicherheitsstandards zu genügen, nutzt Aero Gravity den cloudbasierten ABB Ability Condition Monitoring Service für die Antriebe. Dieser erfasst kontinuierlich Daten zu wichtigen Antriebsparametern. Ein Anzeigesystem liefert einen Überblick und hilft dabei, Bereiche zu identifizieren, die besondere Aufmerksamkeit erfordern. Technikern stehen verschiedene fortschrittliche Online-Tools zur Verfügung, um mögliche Probleme zu diagnostizieren und analysieren.

AR Wie sieht es mit der Schulung von Personal aus? Ist das System einfach zu bedienen?

SK Ein besonderer Vorteil der Antriebsstranganalyse ist, dass die Zustandsdaten aller Komponenten auf dem Dashboard des Nutzerportals mit einer intuitiven Ampeldarstellung angezeigt werden. Grün bedeutet, dass die Komponente in Ordnung ist; Gelb bedeutet, dass die Komponente beobachtet werden sollte; und Rot kennzeichnet ein bedeutendes Problem. So können Wartungstechniker und Bedienpersonal einen Überblick über die Antriebsstränge behalten. Natürlich können sie zur genaueren Prüfung jederzeit auf detailliertere Daten wie Vibrationen, Drehzahlen, Temperaturen oder den Energieverbrauch zugreifen.

AR Steckt hinter dem digitalen Antriebsstrang noch mehr als intelligente Wartung?

SK Absolut. Stellen Sie sich vor, Sie sind verantwortlich für eine große Pumpstation. Die vollständige Transparenz des Betriebspunkts und der Belastung aller Komponenten ermöglicht es Ihnen, die Betriebspunkte für die einzelnen Pumpen so zu wählen, dass die Lebensdauer der Pumpen maximiert und der Energieverbrauch der Anlage minimiert wird. Es geht also nicht nur um vorhersehbare Ausfälle, sondern auch um einen intelligenten und nachhaltigen Betrieb.

AR Was sind die nächsten Schritte?

SK Wir haben den ABB Ability Digital Powertrain auf der Hannover Messe 2019 vorgestellt und waren mit den Arbeiten, die eine bedeutende Produkteinführung mit sich bringt, beschäftigt. Es sind aber bereits Erweiterungen und Verbesserungen in Arbeit. Vielleicht komme ich demnächst wieder, um davon zu berichten!

AR Vielen Dank für das Interview, Sönke.

PRODUKTIVITÄT

Virtuelles Prototyping von Sensorsystemen

Bei Systemen mit unterschiedlichen Sensortechnologien hilft virtuelles Prototyping dabei, den Designprozess zu optimieren und die Zeit bis zur Markteinführung zu verkürzen. Beispiele aus dem Bereich der Hochspannungsmessung, dem Störlichtbogenschutz und dem elektronischen Überlastschutz veranschaulichen die vielen Vorteile dieses cosimulationsbasierten Verfahrens.

—
01 Moderne Industrieanlagen können Systeme enthalten, in denen unterschiedliche Sensortechnologien zusammenarbeiten müssen. Das virtuelle Prototyping solcher Systeme beschleunigt die Produktentwicklung und liefert Designs, die weniger fehleranfällig und präziser sind.

Moderne industrielle Systeme umfassen häufig eine Vielzahl von heterogenen Komponenten, die auf unterschiedliche Weise (Software, optisch, elektrisch, thermisch oder mechanisch) und in unterschiedlichen zeitlichen Maßstäben arbeiten. Für ein optimales Design solcher Systeme sind Methodiken wünschenswert, mit denen die Wechselwirkungen zwischen diesen Komponenten simuliert werden können, ohne dass dafür physische Prototypen erstellt werden müssen. Solche Verfahren werden häufig als „virtuelles Prototyping“ oder „Systemsimulation“ bezeichnet →1.

—
Yannick Maret
Matija Varga
Stefano Maranò
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil,
Schweiz

yannick.maret@ch.abb.com
matija.varga@ch.abb.com
stefano.maranò@ch.abb.com

Francisco Mendoza
ABB Corporate Research
Ladenburg, Deutschland

francisco.mendoza@de.abb.com

Joris Pascal
Ehemaliger ABB-Mitarbeiter

—
Eines der Hauptziele des virtuellen Prototypings ist es, die Zahl der erforderlichen physischen Prototypen zu reduzieren.

Der hier beschriebene Simulationsansatz wird auch „Netzwerksimulation“ genannt. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen Designeinheiten nach vordefinierten Regeln – ähnlich den Kirchhoffschen Gesetzen bei elektrischen Systemen – simuliert. Diese Methode steht im Gegensatz zur Finite-Elemente-Simulation, bei der auch die kleinsten Elemente eines Problems simuliert werden.





Eines der Hauptziele des virtuellen Prototypings ist es, die Zahl der physischen Prototypen, die zur Entwicklung einer neuen Technologie erforderlich ist, zu reduzieren und somit die Zeit bis zur Markteinführung zu verkürzen →2.

Motivation zum virtuellen Prototyping

Dass die Zahl der heterogenen Komponenten in industriellen Sensorsystemen zunimmt, zeigt sich deutlich an den Veränderungen, die momentan im Bereich der Hochspannungs-Messsysteme stattfinden. Hier werden z. B. konventionelle Messwandler zunehmend durch nichtkonventionelle Messwandler (Non-Conventional Instrument Transformers, NCITs) ersetzt.

Konventionelle Messwandler sind Strom- oder Spannungswandler, die genaue Messungen im Stromnetz ermöglichen. Da jedoch die im Netz übertragene Leistung zunimmt, besteht die Gefahr, dass der Eisenkern eines Messwandlers in die magnetische Sättigung geht, was den Dynamikbereich begrenzt. Darüber hinaus sind konventionelle Messwandler anfällig für: Überhitzung

aufgrund von Wirbelströmen; träges transientes Verhalten, das die Reaktion auf kritische Ereignisse wie Kurzschlüsse oder Überspannungen verlangsamt; Brände, Explosionen oder Leckagen, wenn es sich um papier- oder ölisierte Messwandler handelt. Weitere Einschränkungen konventioneller Messwandler betreffen deren Größe, Gewicht und Kosten. Um diesen Einschränkungen zu begegnen, nutzen NCITs alternative Sensorprinzipien wie elektrooptischen Verfahren, Luftspulen usw.

Die Entwicklung eines neuen NCIT erfordert Kenntnisse der Physik (optische Komponenten, mechanische Bauteile), Elektronik (Signalaufbereitung, Kommunikation) und Mathematik (Signalverarbeitung).

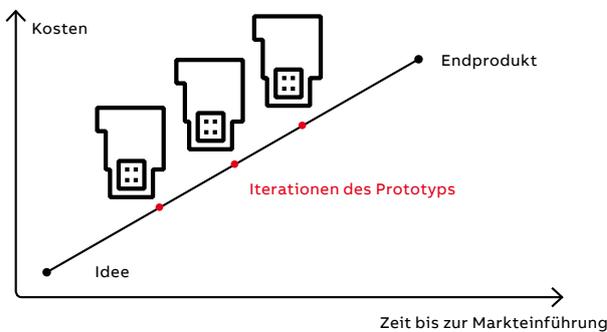
Virtuelles Prototyping ermöglicht eine neue Designmethodik, die die Gesamtheit eines komplexen Systems umfasst.

Der Grund für diese multidisziplinäre Abhängigkeit liegt in der Architektur des NCIT, dessen einzelne Elemente nicht mehr einfach passiv miteinander verbunden sind, sondern in einem geschlossenen Regelkreis miteinander interagieren müssen. Virtuelles Prototyping ermöglicht eine neue Designmethodik, die die Gesamtheit eines komplexen Systems umfasst. Der daraus resultierende virtuelle Prototyp bietet dem Entwicklungsteam die Möglichkeit, statt einzelner Einheiten das komplette Design als Ganzes auf effiziente Weise zu verifizieren, zu testen und zu verbessern.

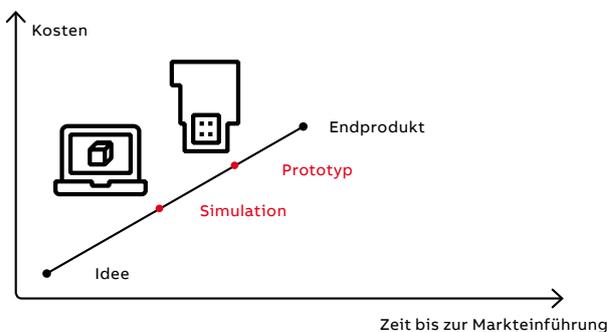
Vorteile bei der Sensorentwicklung

Das virtuelle Prototyping hilft bei der optimalen und objektiven Partitionierung eines Designs. Mit anderen Worten, das Designteam wird bei der Entscheidung unterstützt, welche Aufgaben in Hardware und welche in Software implementiert werden sollen und ob Signale analog oder digital verarbeitet werden sollen.

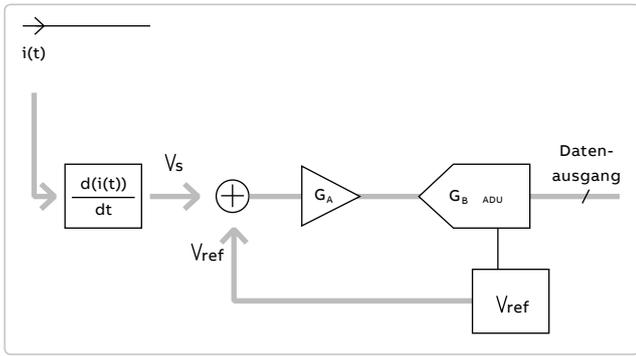
Neben der Partitionierung hilft das virtuelle Prototyping auch bei der korrekten Zuordnung von Systemspezifikationen zu einzelnen Modulen, indem es die Möglichkeit bietet, die Fehlerfortpflanzung zwischen den Modulen und die Genauigkeit des gesamten Sensorsystems zu untersuchen. Auch Designfehler können leichter und schneller erkannt werden als beim traditionellen Prototyping. Darüber hinaus kann schnell evaluiert werden, wie sich eine Designänderung in einem einzigen Modul – z. B. eine Maßnahme zur Kostenoptimierung – auf das gesamte System auswirkt.



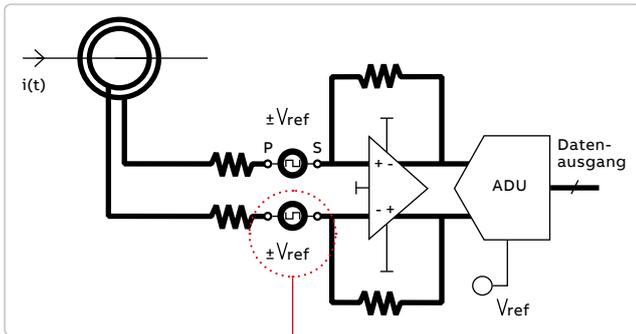
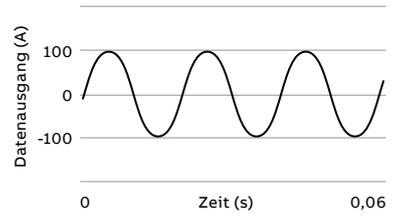
02a



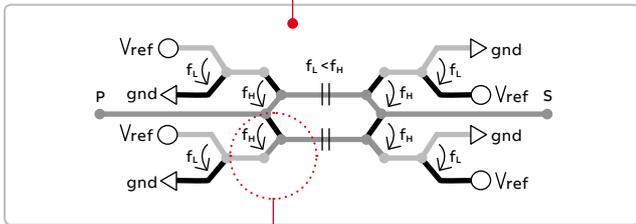
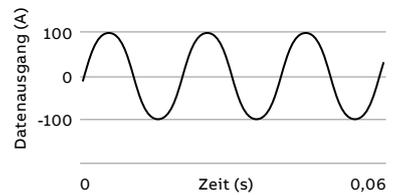
02b



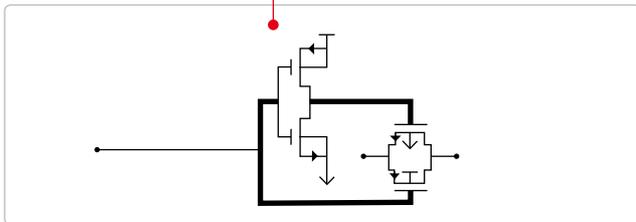
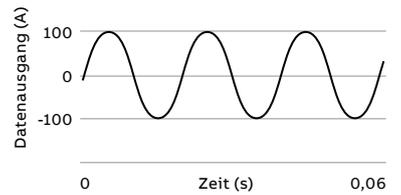
Behavioral VHDL-AMS



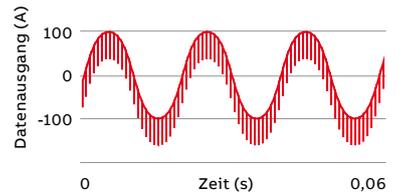
Sensor: physikalisches Modell
ADU, Verstärker: Behavioral VHDL-AMS
Schalter: Structural VHDL-AMS



Schalter: IC-Hersteller Spice-Modell
VHDL-AMS/Spice



Transistormodell VHDL-AMS



Abstraktionsebene

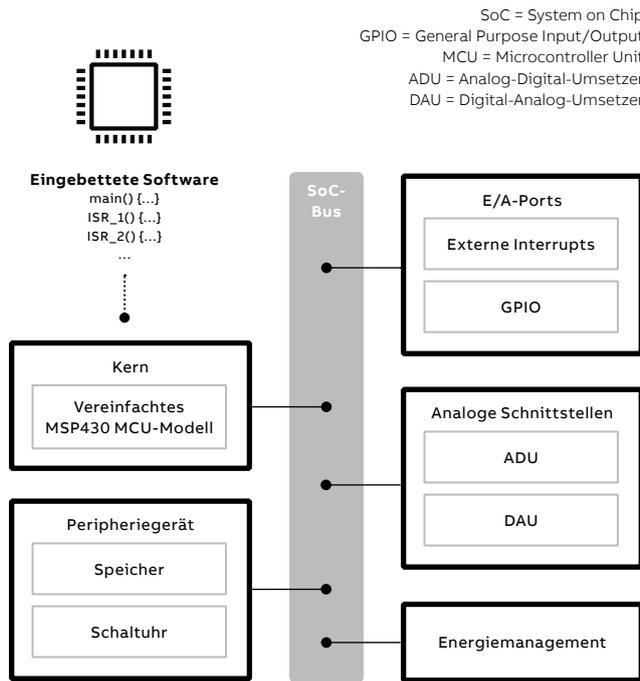
03 ADU = Analog-Digital-Umsetzer

02 Virtuelles Prototyping ermöglicht eine drastische Reduzierung der Kosten, der Markteinführungszeit und der Anzahl notwendiger physischer Prototypen.

02a Traditionelle Entwicklung.

02b Entwicklung mit virtuellem Prototyping.

03 Unterschiedliche Detaillierungsgrade für ein selbstkalibrierendes Frontend für einen NCIT auf Basis einer Rogowski-Spule.



04

Virtuelles Prototyping beschleunigt zudem zukünftige Entwicklungsprojekte durch die Wiederverwendung von Modellen. Idealerweise sollten entwickelte Komponenten in Bibliotheken abgelegt werden, auf die zukünftige Designer oder automatische Designtools zugreifen können.

Eine weitere Anwendung des virtuellen Prototypings ist die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Produktfamilien. So kann z. B. das Modell eines Stromsensors in einem virtuellen Prototyp eines Leistungsschalters wiederverwendet werden, der wiederum zur Modellierung einer Kundenanwendung wiederverwendet wird.

In Bezug auf Kundenanwendungen ermöglicht das virtuelle Prototyping ein besseres Verständnis der Kundenbedürfnisse, das weit über die einfache Erfüllung der in den Normen festgelegten Anforderungen hinausgeht – z. B. wenn Kunden regelmäßig die Spezifikationen des Sensorsystems überschreiten. Durch Einbindung dieser neuen Nutzungsbedingungen in den virtuellen Prototyp ist ABB in der Lage, die Auswirkungen eines solchen Missbrauchs nachzuvollziehen – und zu quantifizieren, um den Kunden entsprechend zu informieren. Solche besonderen Anforderungen können dann bei der nächsten Sensorentwicklung berücksichtigt werden.

Virtuelles Prototyping: Methodiken

Es existieren verschiedene Methodiken für das virtuelle Prototyping. Ein Tool, das ABB für die Sensorentwicklung nutzt, basiert auf der Hardware-Beschreibungssprache VHDL-AMS (IEEE Standard 1076). Die Erweiterung AMS steht hierbei für „Analog and Mixed Signals“. Wie der Name sagt, unterstützt AMS die Modellierung von analogen und Mischsignal-Systemen und wird von Simulatoren verwendet, die sowohl Signale mit zeitkontinuierlichen als auch mit zeitdiskreten Informationen unterstützen. Der Simulator ist ereignisgesteuert, d. h. die Berechnung eines neuen Arbeitspunkts wird nur durch eine Veränderung des Signalwerts ausgelöst. Das Verfahren ist äußerst effizient hinsichtlich der Simulationszeit für kombinierte Simulationen analoger und digitaler Signale. Darüber hinaus nutzt ABB SystemC, eine Klassenbibliothek (IEEE Standard 1666) auf C++-Basis zur Modellierung und Simulation von digitalen Hard- und Softwarekomponenten in eingebetteten Systemen. Zur Erstellung von virtuellen Prototypen unter Berücksichtigung digitaler Hardware- und Softwarekomponenten werden SystemC- und VHDL-AMS-Modelle cosimuliert.

—
Zukünftige Projekte können durch die Wiederverwendung von Modellen beschleunigt werden.

VHDL-AMS unterstützt die Verwendung von Top-down- und Bottom-up-Verfahren ebenso wie eine Kombination aus beiden. Diese Flexibilität ermöglicht es einem Projektteam, einen Teil des Designs mit Modellen auf einer hohen Abstraktionsebene (High-Level-Modelle) zu beginnen und den Detaillierungsgrad mit fortschreitender Projektentwicklung sukzessive zu verfeinern (Top-down-Ansatz).

Liegen bereits detaillierte Modelle anderer Komponenten vor, können diese parallel dazu entweder so, wie sie sind, genutzt werden oder auf eine höhere Modellierungsebene vereinfacht werden, um die Simulationszeit zu verkürzen (Bottom-up-Ansatz).

VHDL-AMS unterstützt mehrere Komponentenbeschreibungen und somit mehrere Abstraktionsebenen für ein Modell. →3 zeigt unterschiedliche Detaillierungsgrade für ein selbstkalibrierendes Frontend für einen NCIT auf Basis einer Rogowski-Spule. Die Selbstkalibrierung wird durch

—
04 Simulationsmodell eines Mikrocontrollers in SystemC.

—
05 Mithilfe von VHDL-AMS wurde eine Hausinstallation mit Kabeln, Verbrauchern und einem Störlichtbogen modelliert. Durch Veränderung der Modellparameter kann eine umfangreiche Datensammlung mit Strom- und Spannungssignalen erzeugt werden. Dies mit realen Messungen zu erreichen, wäre – wenn es überhaupt möglich ist – äußerst kostspielig und zeitaufwändig.

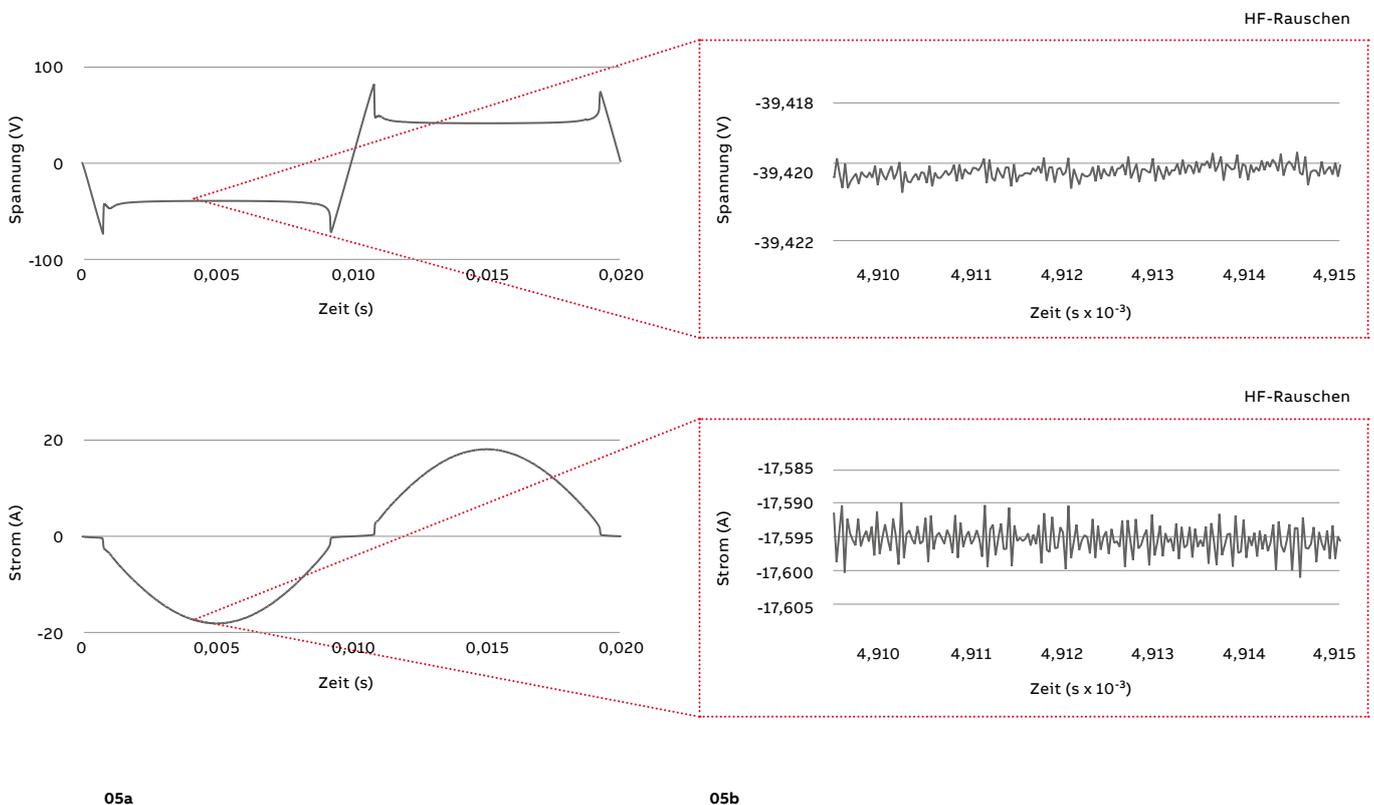
05a Simulierte Lichtbogenspannung.

05b Simulierter Lichtbogenstrom.

Einspeisung eines hochfrequenten Rechtecksignals mit einer stabilen Amplitude in die Elektronik erreicht. Die Software errechnet daraufhin entsprechende Kalibrierungskoeffizienten und nutzt diese zur Korrektur des gemessenen Niederfrequenzsignals. Das Selbstkalibrierungsprinzip wurde zunächst durch Simulation mit einem hohen Abstraktionsgrad erprobt. Der erste Prototyp funktionierte korrekt, wies aber ein hochfrequentes Rauschen im gemessenen Signal auf. Dieses Phänomen konnte in der Simulation durch Erhöhung des Detaillierungsgrads der Transistoren in den zur Erzeugung des Rechtecksignals verwendeten analogen Schaltern reproduziert werden. Anschließend nutzte ABB den virtuellen Prototyp, um geeignete Gegenmaßnahmen (hier durch analoges Filtern) zu bestimmen und zu validieren.

—
Projektteams können mit High-Level-Modellen beginnen und den Detaillierungsgrad sukzessive verfeinern.

SystemC wird verwendet, um Simulationsmodelle von digitalen Komponenten wie Mikrocontrollern, Analog-Digital-Wandlern, Speichereinheiten, Transceivern usw. zu erstellen →4. Durch den hohen Abstraktionsgrad, mit dem die Modelle beschrieben werden, ist die Erstellung und Wiederverwendung von Komponenten deutlich weniger aufwändig als mit Hardware-Beschreibungssprachen wie VHDL. Solche Komponenten können zu virtuellen Prototypen zusammengefügt werden, die das Verhalten realer Hardwareplattformen nachbilden und in der Lage sind, native Softwareanwendungen auszuführen. So können Softwareentwickler mit dem Programmieren und Debugging beginnen, lange bevor Hardwareprototypen zur Verfügung stehen.



Ein virtueller Prototyp des Systems kann erstellt werden, sobald High-Level-Modelle aller wichtigen Komponenten zur Verfügung stehen. Dies sollte idealerweise zu einem frühen Zeitpunkt im Projekt der Fall sein, denn es liefert einen klaren Überblick über das zu entwickelnde Produkt und unterstützt die Generierung von Ideen sowie wichtige Architekturentscheidungen.

Simulation einer Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung

Stör- oder Fehlerlichtbögen stellen eine Brandgefahr in Hausinstallationen dar. Eine Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung (Arc-fault Detection Device, AFDD), die aus einem elektromechanischen Schalter, Sensoren und einem Mikrocontroller besteht, unterbricht bei Erkennung eines Lichtbogeneignisses den Stromkreis und reduziert



06a



06b

somit die Brandgefahr. AFDDs sind zwar in der Lage, eine gefährliche Lichtbogenbildung von Signalen von Haushaltsgeräten (Bohrmaschinen, Pumpen, Datenübertragung über Stromleitungen usw.) zu unterscheiden, doch die Vermeidung von Fehlauflösungen durch bestimmte minderwertige Haushaltsgeräte kann eine Herausforderung darstellen.

—
Softwareentwickler können mit dem Programmieren beginnen, lange bevor Hardwareprototypen zur Verfügung stehen.

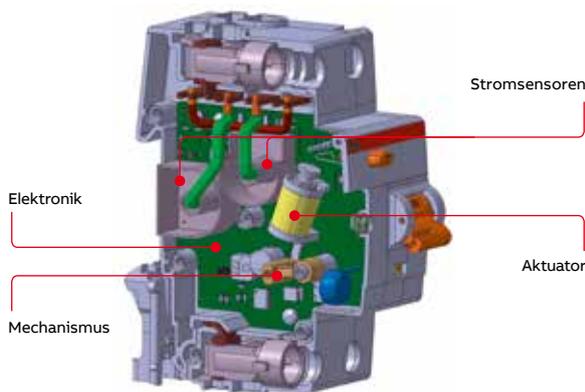
Um die verschiedenen Strom- und Spannungssignale zu simulieren, die ein AFDD unter normalen und außergewöhnlichen Bedingungen erfahren kann, hat ABB ein VHDL-AMS-Modell einer elektrischen Hausinstallation mit Kabeln, verschiedenen Verbrauchern und einem Störlichtbogen entwickelt. Dabei können verschiedene elektrische Topologien, Lasttypen und Fehlerorte über Parameter eingestellt werden →5.

Das High-Level-Modell des Sensorabschnitts basiert auf einer gemessenen Transferfunktion, die als rationaler Laplace-Ausdruck approximiert ist. Der Lichtbogen-Erkennungsalgorithmus des Mikrocontrollers ist für die Simulation als Matlab-Skript abstrahiert.

Durch Kombination des virtuellen AFDD-Prototyps mit dem des Haushaltsgeräts werden verschiedene Testszenarien und die Verfolgung des AFDD-Status in Abhängigkeit von der Zeit ermöglicht. Außerdem kann im Detail untersucht werden, warum es zu einer Auslösung kam oder nicht. Dank des Detaillierungsgrads und der individuellen Anpassbarkeit dieser virtuellen Testumgebung können neue Sensorprinzipien, Elektroniken und Algorithmen untersucht und neue Standardanforderungen überprüft werden, ohne dass dafür physische Prototypen oder Laborexperimente erforderlich sind. Wurde ein Prinzip erfolgreich mit dem virtuellen Prototyp getestet, können die abschließenden Validierungen an einem physischen Prototyp durchgeführt werden.



06c



06d

—
06 AFDDs und EOL-Relais sind zwei ABB-Produkte, bei deren Entwicklung mehrere Disziplinen in Spiel kommen.

06a Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung (AFDD).

06b Elektronisches Überlastrelais (EOL).

06c Für AFDDs und EOL-Relais relevante Disziplinen.

06d Der Blick in einen AFDD zeigt die verschiedenen Komponenten.

Simulation eines elektronischen Überlastrelais

Ein elektronisches Überlast- oder EOL-Relais (Electronic Overload) nutzt einen Stromwandler, um den Strom in einem Motor zu messen. Überlastströme lösen nach einer bestimmten Zeit ein Relais aus. Damit bieten EOL-Relais einen zuverlässigen und präzisen Motorschutz gegen Überlast und Phasenausfall.

Zunächst wurde ein virtueller Prototyp des EOL-Relais mit digitalen Komponenten (vergleichbar mit →4) zur Durchführung von SIL-Tests (Software-in-the-Loop) verwendet. Dies half dabei, die Funktionalität eines neu entwickelten Sensoralgorithmus zu validieren. Die Simulationszeit für jeden Testfall betrug nur wenige Minuten, was die iterative Anpassung und Verbesserung des Algorithmus erleichterte.

In einer späteren Entwicklungsphase wurde ein vollständiger virtueller Prototyp dazu genutzt, die gesamte Messkette des Geräts zu testen. Dieses etwas aufwändigere Verfahren erforderte die Simulation von Stromwandlern, analoger Elektronik und eingebetteten Software-Subsystemen →6.

—
Die Simulationen lieferten wertvolle Erkenntnisse und halfen dabei, Fehler früher zu erkennen.

Anschließend wurden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, um zu untersuchen, wie sich typische Komponentenabweichungen (z. B. in Widerständen, Kondensatoren, Reglerausgangsspannungen, Offset-Spannungen von Operationsverstärkern usw.) auf die Genauigkeit bei der Berechnung der Auslösezeit auswirken. Hier lieferten die Simulationsergebnisse wertvolle Erkenntnisse und halfen dabei, Designfehler früher zu erkennen und zu beheben, als es normalerweise der Fall wäre. Nun können Tests bei verschiedenen Arbeitspunkten und Temperaturen in wenigen Stunden durchgeführt und so mehrere Tage Testarbeit im Labor eingespart werden.

Mit dem Aufkommen immer besserer Modellierungswerkzeuge und immer umfangreicherer und detaillierterer Bibliotheken wird das virtuelle Prototyping in der Lage sein, das Verhalten realer Geräte noch genauer abzubilden und dadurch auch in vielen anderen Produktbereichen Anwendung finden. Vorangetrieben wird diese Entwicklung durch immer kürzere Produktlebenszyklen und die dafür notwendige schnellere Entwicklung und Produktisierung. •

Danksagung

Wir danken Professor Jürgen Becker vom FZI (Forschungszentrum Informatik) in Karlsruhe, Dr. Alain Vachoux und Juan Sebastián Rodríguez Estupiñán von der EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) sowie Dr. Jean-Baptiste Kammerer und Simon Paulus von der UNISTRA (Universität Straßburg) für die Zusammenarbeit an diesem Projekt.

PRODUKTIVITÄT

Asset-Optimierung für die Energiewirtschaft

Laut einer jüngsten Marktstudie der ARC Advisory Group ist ABB der weltweit führende Anbieter von Enterprise Asset Management (EAM) Software für Unternehmen im Bereich Energieerzeugung, -übertragung und -verteilung.



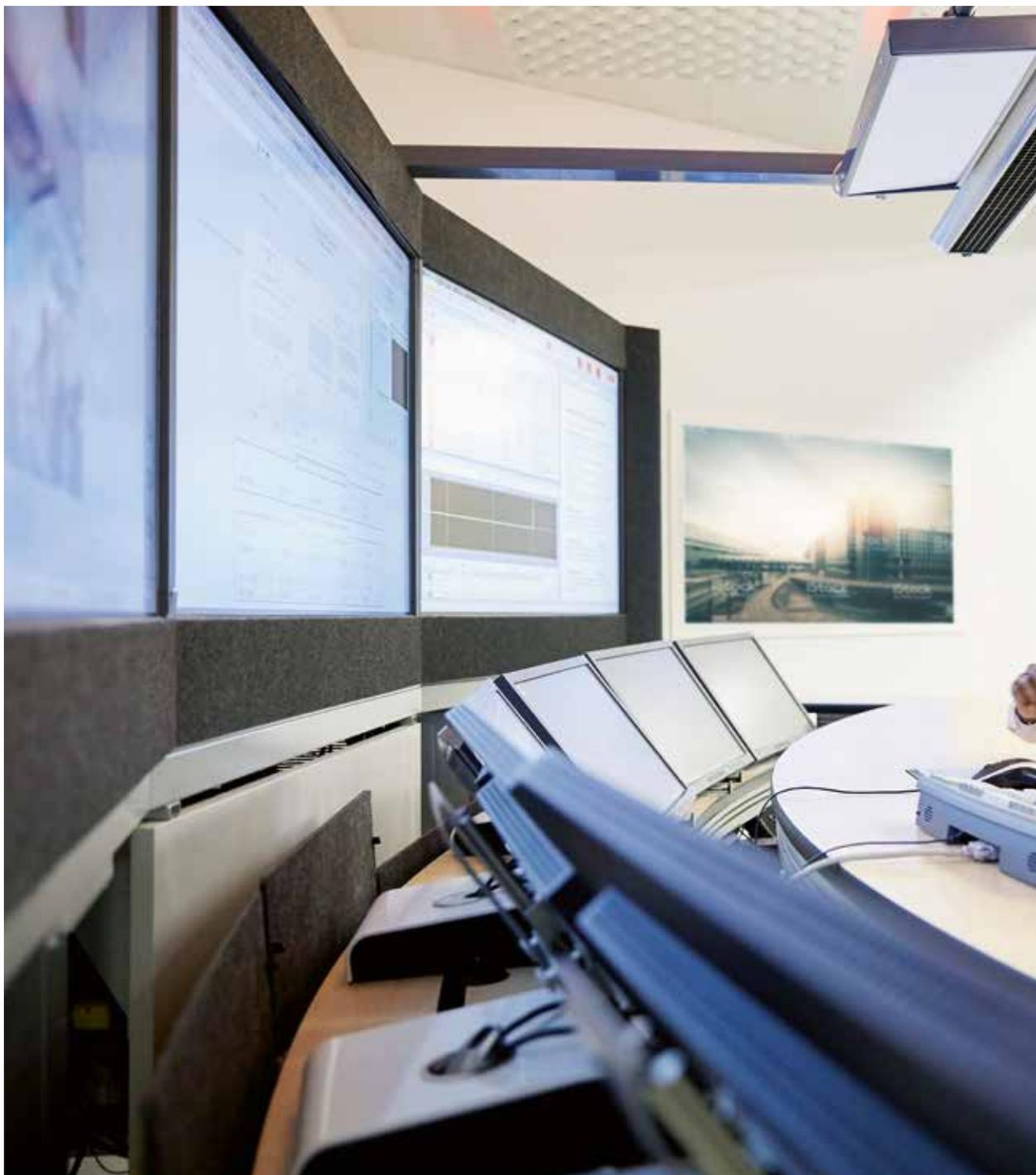
Matt Zafuto
Enterprise Software
Grid Automation
Broomfield, CO, USA

matthew.zafuto@
us.abb.com



John Finney
Grid Automation
Zürich, Schweiz

john.finney@ch.abb.com



Unterstützt durch die zunehmende Leistungsfähigkeit maschineller Lernalgorithmen vereint die neue ABB Ability™ Ellipse®-Software die Funktionalität der führenden Lösungen des Unternehmens für Enterprise Asset Management (EAM), Workforce Management (WFM) und Asset Performance Management (APM) und ist damit bestens geeignet, die vorausschauende und vorbeugende Instandhaltung zu revolutionieren.



Die Komplexität der Stromnetze nimmt rapide zu. Dies zeigt sich unter anderem in der steigenden Zahl von intelligenten Stromzählern und Schaltern und dem wachsenden Anteil dezentraler Energiequellen wie Sonne und Wind. Und in absehbarer Zukunft werden immer mehr Elektrofahrzeuge und Gebäude hinzukommen, die nicht nur als Energiekunden, sondern auch als Energiespeicher und sogar als Energieerzeuger fungieren.

Mit dieser wachsenden Komplexität geht eine massive Zunahme an verfügbaren Daten einher, was sowohl Herausforderungen als auch Chancen mit sich bringt. Eine Herausforderung besteht darin, dass traditionelle Ansätze zum Asset Management nicht mehr ausreichen.

—
 Damit steht eine schlanke Lösung für das Management, die Instandhaltung und die Überwachung von Anlagen zur Verfügung.

Eine Chance besteht darin, dass durch effektive Nutzung der Daten ein genaueres und ganzheitliches digitales Bild der Realität geschaffen werden kann, mit dessen Hilfe die Herausforderungen durch Digitalisierung und Automatisierung bewältigt werden können.

Vor diesem Hintergrund hat ABB die Ability™ Ellipse®-Software eingeführt. Die umfassende Lösung bietet Energieversorgungsunternehmen (EVUs) die Möglichkeit, die Nutzung ihrer Anlagen zu optimieren, Wartungskosten zu senken und Komponenten- und Systemausfälle zu reduzieren.

Wir verstehen die Herausforderungen, mit denen sich EVUs konfrontiert sehen, wenn es darum geht, eine höhere Performance in einem zunehmend komplexen Netz zu erreichen“, sagt Massimo Danieli, Leiter des ABB-Geschäftsbereichs Grid Automation. „Mit ABB Ability Ellipse steht

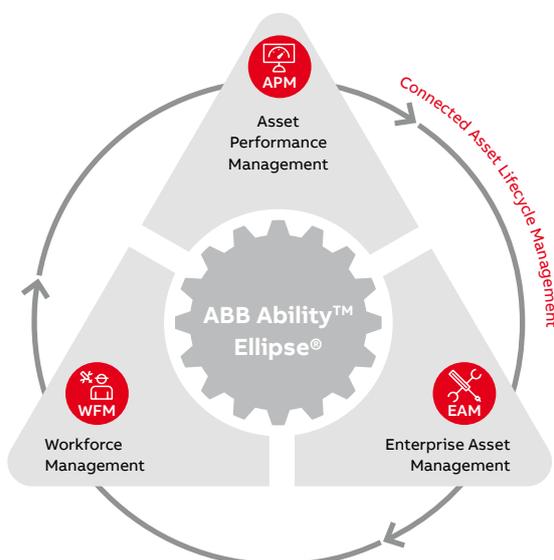
EVUs nun eine einzige, schlanke Lösung für das Management, die Instandhaltung und die Überwachung von Anlagen zur Verfügung, die ein stärkeres, intelligenteres und umweltfreundlicheres Netz ermöglicht.“

Leistungsstarke maschinelle Lernalgorithmen

Unterstützt werden diese Funktionalitäten durch die zunehmende Implementierung maschineller Lernalgorithmen, die still und heimlich dabei sind, das Asset Performance Management Assessment und das risikobasierte Asset Management zu revolutionieren. Maschinelle Lernalgorithmen nutzen die von Online-Sensoren erzeugten enormen Datenmengen, die durch das Internet der Dinge (IoT) entstandenen verbesserten Kommunikationsmöglichkeiten und die Leistungsfähigkeit der Microsoft Azure-Technologie, um diese Daten aufzunehmen, zu lernen, zu generalisieren und mit geringer bzw. ohne menschliche Einwirkung Schlüsse daraus zu ziehen. Diese integrierten maschinellen Lernmodelle stehen nun in der ABB Ability Ellipse-Plattform zur Verfügung, die anlagenintensiven Industrien Lösungen zur Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen und zur Anlagenerneuerung bietet.

In der ABB Ability™ Ellipse®-Plattform stehen nun integrierte maschinelle Lernmodelle zur Verfügung.

Angesichts des ganzheitlichen Charakters der von maschinellen Lernsystemen erfassten Informationen eröffnen sich neue Möglichkeiten, um Hindernisse zwischen bereichsspezifischen Silos



zu beseitigen und Betriebsabläufe und Strategien zu rationalisieren. „Die größte Gefahr für EVUs auf dem Weg zur digitalen Transformation besteht im Unvermögen, Anwendungen und Daten zu vereinen“, sagt Kevin Prouty, Vizepräsident von IDC Energy Insights. „Einer der naheliegendsten Ausgangspunkte für EVUs ist es, sich mit dem Silo-Ansatz beim Asset Management und Workforce Management in ihren Unternehmen zu befassen. Da das Asset Performance Management für die Transformation des modernen Stromnetzes eine zentrale Rolle spielt, ist es wichtig, dass EVUs beim Management ihrer Anlagen und Mitarbeiter eine kohärente Strategie verfolgen.“

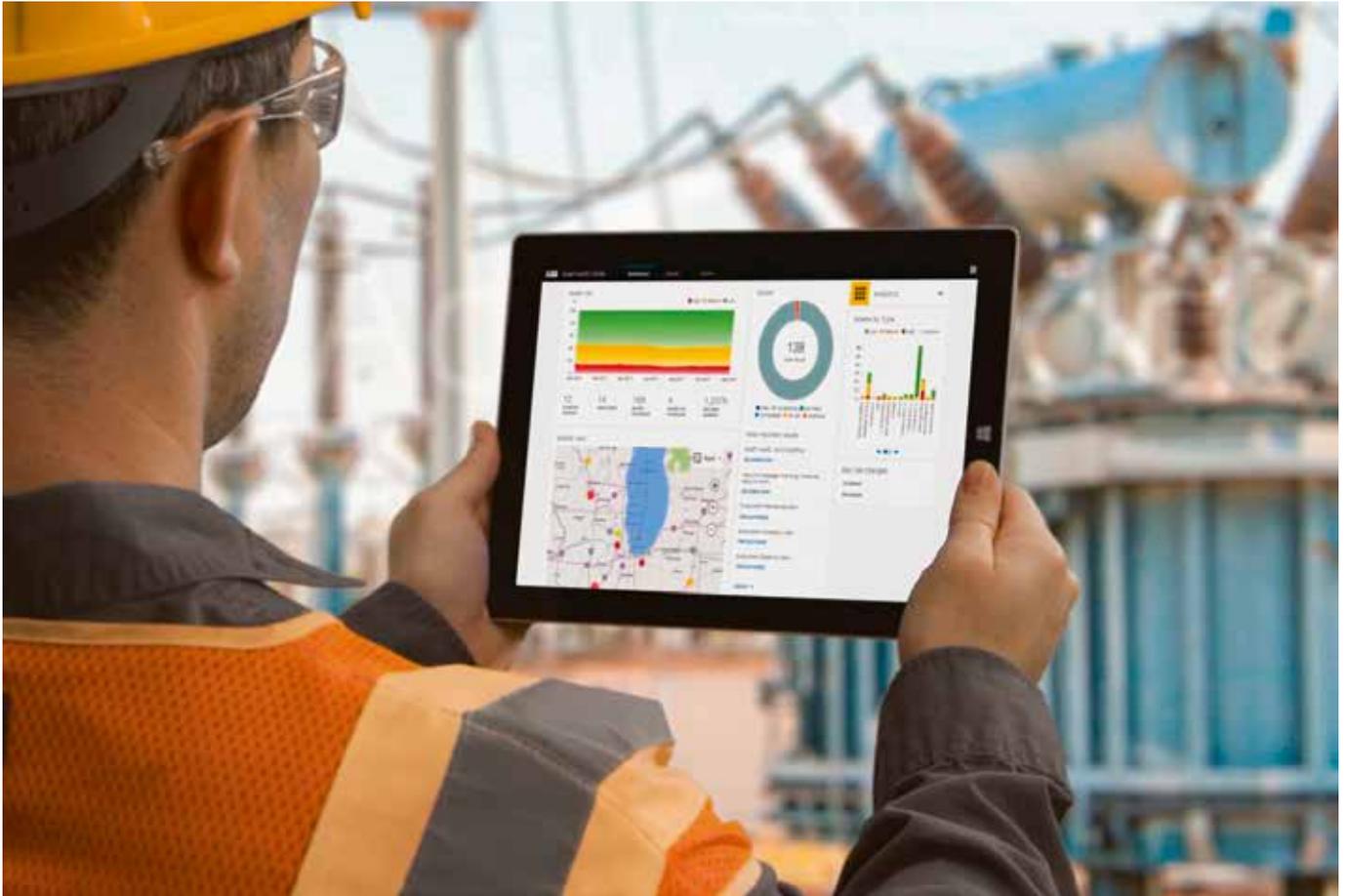
Genau dabei hilft die ABB Ability Ellipse-Lösung. Weltweit sind etwa 1,3 Millionen ABB-Assets in Produktionsumgebungen im Einsatz und werden täglich in Kundenumgebungen analysiert. In einem realen Testszenario bei einem bestehenden Kunden war der maschinelle Lernalgorithmus von Ellipse in der Lage, den bevorstehenden Ausfall großer Leistungstransformatoren auf der Grundlage elektrischer Teilladungsdaten so rechtzeitig vorherzusagen, dass ein katastrophales Versagen verhindert werden konnte. Bislang war die Ausfallvorhersage von Transformatoren eher Glückssache. Der geschilderte Fall ist nur eines von mehreren Beispielen, bei denen es möglich war, sich anbahnende Transformatorausfälle zu erfassen und das Problem zu behandeln, bevor es zu einem Stromausfall kam.

In einer weiteren interessanten Pilotanwendung wurden maschinelle Lernverfahren auf das Asset Performance Management Assessment von Schaltern und Motoren von Eisenbahnweichen angewandt. Da heutige Alarme vornehmlich während oder nach einem Ausfall ausgelöst werden, ist die Eisenbahnindustrie daran interessiert, die Vorhersage einer verminderten Funktionsfähigkeit von Anlagen zu verbessern. Unterstützt durch maschinelles Lernen können fortschrittliche Mustererkennungsverfahren dabei helfen, Anlagen zu identifizieren, die außerhalb „normaler“ Parameter arbeiten, und somit den Betreiber frühzeitig warnen, damit dieser entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen einleiten kann.

Wie beide Beispiele zeigen, bieten Vorhersagen der Anlagenperformance auf der Grundlage maschineller Lernverfahren enorme Verbesserungsmöglichkeiten hinsichtlich Sicherheit, Kosten, Performance Management und Risikominderung.

Nummer eins

Aufgrund der bedeutenden Rolle, die ABB in diesen Schlüsselbereichen spielt, wurde das Unternehmen in einer jüngsten Marktstudie der ARC Advisory Group zum führenden Anbieter von Enterprise



02

01 Mit ABB Ability Ellipse steht EVUs eine einzige, schlanke Lösung für das Management, die Instandhaltung und die Überwachung von Anlagen zur Verfügung, die ein stärkeres, intelligenteres und umweltfreundlicheres Netz ermöglicht.

02 ABB Ability Ellipse verbindet prädiktive Analysen und Asset-Management-Systeme mit den mobilen Mitarbeitern im Außendienst. Das System ist als „Vor-Ort“- oder SaaS-Lösung (Software as a Service) für EVUs und andere anlagenintensive Branchen wie erneuerbare Energien, Transport oder Bergbau verfügbar.

Asset Management (EAM) Software für Unternehmen im Bereich Energieerzeugung, -übertragung und -verteilung gekürt. Die ARC Advisory Group ist ein führendes Marktforschungs- und Beratungsunternehmen für die Bereiche Industrie, Infrastruktur und Stadtplanung. Die Ergebnisse sind Bestandteil einer umfassenden Markt- und Technologiestudie von ARC mit dem Titel „Enterprise Asset Management Global Market Analysis 2017–2022.“

Laut ARC-Studie ist ABB zudem weltweit führender EAM-Anbieter für lineare Anlagen wie Stromleitungen, Umspannwerke und Masten, führender EAM-Anbieter für die Bergbauindustrie und führender Anbieter von EAM- und Field Service Management Software in Asien.

„Der ABB-Geschäftsbereich Power Grids ist führend auf dem Gebiet der digitalen Lösungen für die Energiebranche“, sagt Ralph Rio, Vizepräsident der ARC Advisory Group. „2018 setzte sich ABB aufgrund ihrer fundierten Branchenkenntnis und umfassenden Erfahrung mit EVUs rund um den Globus an die Spitze der ARC Advisory EAM-Rangliste im Bereich der elektrischen Energieerzeugung, -übertragung und -verteilung“, berichtet Rio weiter und ergänzt: „Laut unseren Untersuchungen ist der

weltweite EAM-Markt im Jahr 2017 um eindrucksvolle 11 % gewachsen, und wir gehen davon aus, dass dieses starke Wachstum noch weiter anhält – gute Aussichten für ABB, denn die Energiewirtschaft ist der größte EAM-Markt weltweit.“

Die Lösung ist bestens geeignet, die vorausschauende und vorbeugende Instandhaltung zu revolutionieren.

Alles in allem ist die ABB Ability Ellipse-Lösung durch Bündelung der Funktionalität der erstklassigen ABB-Lösungen für Enterprise Asset Management (EAM), Workforce Management (WFM) und Asset Performance Management (APM) bestens geeignet, die vorausschauende und vorbeugende Instandhaltung zu revolutionieren. „Die ABB Ability Asset- und Workforce Management-Lösungen sind optimal auf die Bedürfnisse der Elektrizitätswirtschaft abgestimmt“, so Danieli von ABB. „Unsere anhaltende Marktführerschaft im Bereich EAM stärkt die Position von ABB als bevorzugter Partner.“ •

PRODUKTIVITÄT

Cosimulationsbasierte Entwicklung von Leistungsschalter-Antrieben

Die Entwicklung von Leistungsschalter-Antrieben der nächsten Generation erfordert ein fundiertes Verständnis mechanischer, elektrischer und magnetischer Phänomene und deren Wechselwirkungen. Cosimulation ermöglicht hier eine beschleunigte Entwicklung und Verbesserung der Antriebe.

—
Thorsten Schindler
Arda Tüysüz
Christian Simonidis
ABB Corporate Research
Ladenburg, Deutschland

thorsten.schindler@
de.abb.com
arda.tueysuez@
de.abb.com
christian.simonidis@
de.abb.com

Die allgemeine Besorgnis über den Klimawandel und ein steigender Energiebedarf fördern den raschen Ausbau der erneuerbaren Energien. Tatsächlich sind Wind und Sonne heute die am stärksten wachsenden Energiequellen für die Stromerzeugung. Allerdings stellt gerade die Natur dieser Ressourcen die Übertragungs- und Verteilnetze vor besondere Herausforderungen [1] →1.

—
Der ABB MS-Leistungsschalter VM1 ist wartungsfrei und kann in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden.

So zwingt die starke Zunahme der Nutzung von Wind- und Solarenergie Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber dazu, nach fertigen Lösungen und neuen mittel- und langfristigen Strategien Ausschau zu halten. In Deutschland weist der Netzbetreiber TenneT z. B. regelmäßig auf die enorme Zunahme von Noteingriffen hin, die zur Stabilisierung des Netzes erforderlich

sind [2]. Die Gründe hierfür liegen zum einen im schwankenden Energiebedarf im Süden Deutschlands und zum anderen in der hochgradig stochastischen Windenergieerzeugung im Norden sowie im langsamen Bau von geeigneten Nord-Süd-Verbindungen.

Elektromagnetisch angetriebene Schaltgeräte sind prädestiniert für neue qualitative Herausforderungen wie häufigeres (kapazitives) und synchrones Schalten durch die Einbindung von mehr Kompensationsanlagen, schnelleres und zuverlässigeres Schalten sowie die bedarfsgerechte Anpassung der zeitlichen Bewegung der elektrischen Kontakte. Im Vergleich zu herkömmlicher Ausrüstung zeichnen sich diese Schaltgeräte durch weniger Bauteile, einfachere mechanische Abläufe, eine extrem hohe Zuverlässigkeit und Gesamtqualität, eine sehr lange Lebensdauer und eine universelle Einsetzbarkeit aus. Der Mittelspannungs-(MS-)Leistungsschalter VM1 von ABB ist z. B. wartungsfrei und kann in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden: von Kraftwerken über die Verteilung in Umspannwerken bis hin zu verschiedenen Anwendungen in der Chemie-, Stahl- und Automobilindustrie sowie für Stromversorgungen in Flughäfen, Gebäuden usw. [3].

—
01 Die zunehmende Anbindung von erneuerbaren Energiequellen ans Netz stellt hohe Anforderungen an die Ausrüstung, insbesondere an Schaltgeräte wie Leistungsschalter. Durch Cosimulation der Mechanik, Elektrik und Magnetik von Leistungsschaltern lassen sich bessere Schaltdesigns realisieren.



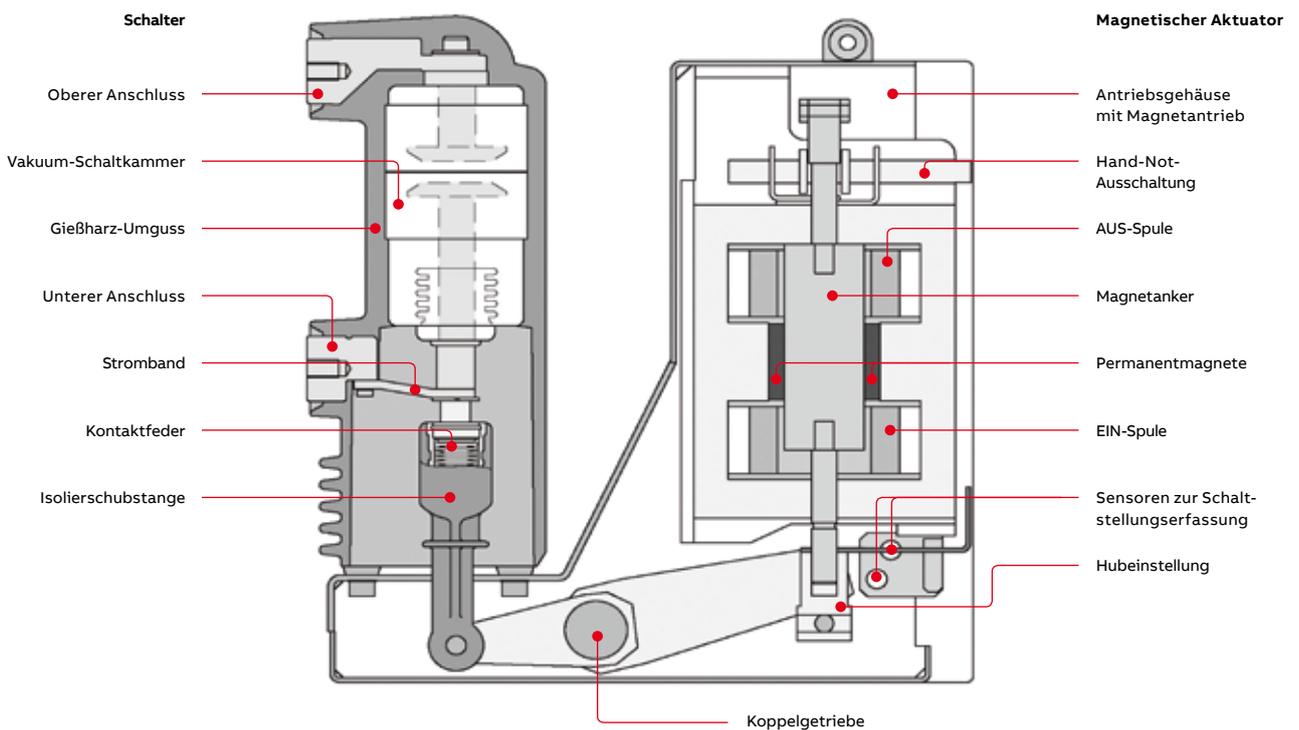


02

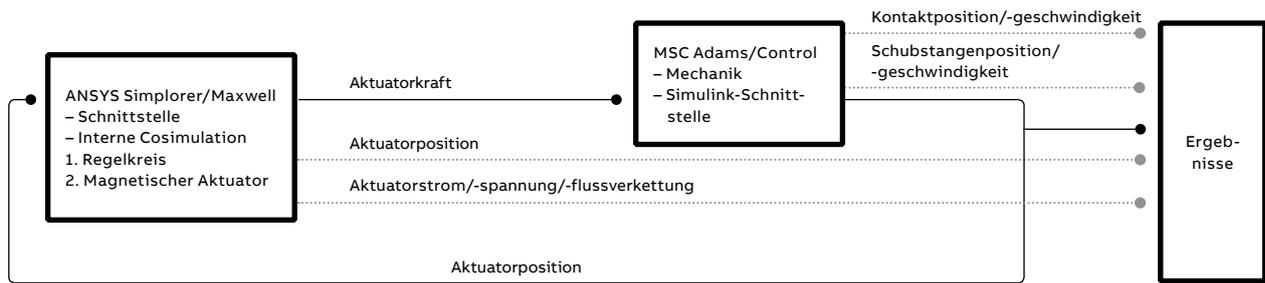
Der Aufbau des VM1-Leistungsschalters ist in →2,3 dargestellt. Dieser besteht aus einem linearen elektromagnetischen Aktuator, einem elektronischen Steuermodul, einem Kondensator als Energiespeicher, einer Hauptwelle, die mit drei Vakuum-Schaltkammer-Polteilen verbunden ist, sowie mehreren Sensoren zur Erkennung der Schaltstellung. Das Gesamtsystem umfasst drei Hauptteile: die drei Pole, das Koppelgetriebe zum Aktuator und den linearen magnetischen Aktuator. Dank der Ein- und Ausschaltspulen können das Öffnen, Schließen, Arretieren und Lösen mit einem einzigen Aktuator erfolgen.

Aufgrund des transienten Verhaltens des Aktuators müssen sowohl die Mechanik als auch die Elektromagnetik untersucht werden.

Zum Schließen muss der Aktuator binnen 45 bis 60 ms eine lineare Bewegung auf die Schubstange ausüben. Die Gegenkraft, die der Aktuator erfährt, entspricht der Summe der Kräfte, die zum Zusammendrücken der Kontaktfedern erforderlich sind, und der Trägheitskräfte, die auf die Achse des



03



04

— 02 Aufbau des Leistungsschalters VM1 [3].

— 03 Schematische Darstellung des Leistungsschalters VM1 [3].

— 04 Überblick über die Cosimulation.

linearen Aktuators wirken. Die Hauptenergiequelle ist der Kondensator, der mit 100 bis 400 VDC geladen wird und, gesteuert vom elektronischen Steuermodul, die Aktuatorspule speist. Aufgrund des transienten Verhaltens des elektromagnetischen Aktuators müssen sowohl die Mechanik als auch die Elektromagnetik des Systems untersucht werden, wenn es darum geht, den gesamten Vorgang zu verstehen und das Betriebsverhalten im puncto Robustheit und Effizienz zu optimieren. Aus diesem Grund wurde eine Cosimulations-Umgebung für die Entwicklung von elektromagnetischen Aktuatoren erarbeitet.

Cosimulation – Kopplung von Elektromagnetik und Mechanik

Normalerweise wird zur Entwicklung von MS-Aktuatoren entweder ein einfaches mechanisches Modell der nichtlinearen Kopplung und Kontakttrennung in das Simulationsprogramm für die Elektromagnetik importiert, oder es wird eine aus der Elektromagnetik-Simulation abgeleitete quasistatische Kraft-Positions-Kurve mit einer komplexen und detailgetreuen mechanischen Modellierung verwendet. Mittlerweile ist die Verwendung sogenannter Mehrkörper-Simulationswerkzeuge wie MSC Adams und deren Erweiterung durch geeignete Deformations-, Reibungs- und Gelenkspielmodellierung für die Leistungsschalterentwicklung unverzichtbar.

Das präzise und robuste Verhalten von Leistungsschaltern ist abhängig von den genannten Mechanismen, deren Vernachlässigung zu Fehlinterpretationen führen kann. Aus diesem Grund wurde eine Umgebung für transiente Cosimulationen eingeführt, in der ein quasi-transientes elektromagnetisches Modell des Aktuators auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) mit einem mechanischen Mehrkörpermodell des restlichen

Leistungsschaltersystems gekoppelt wird. Das FEM-Modell des Aktuators wird mit der Software ANSYS Maxwell zur Simulation elektromagnetischer Felder erstellt, die Kopplung mit dem (auf MSC Adams basierenden) mechanischen Mehrkörpermodell erfolgt mithilfe einer Kombination von ANSYS Simplorer, Matlab, Simulink und MCS Adams/Control. Simulink ist eine grafische Programmierumgebung für Matlab, ANSYS Simplorer ist eine Multi-Domain-Simulationssoftware. Eine Übersicht der Cosimulations-Umgebung ist in →4 dargestellt.

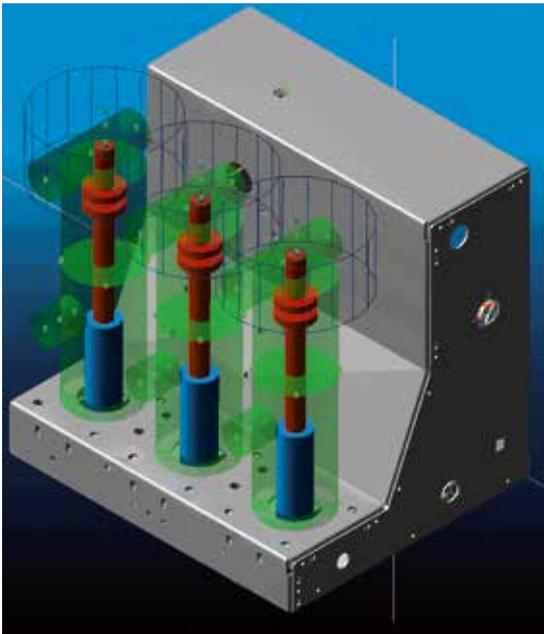
— Für eine Wiederverwendung in einer validierten Bibliothek ist es sinnvoll, die Modelle parametrisch darzustellen.

Im Prinzip übergibt das elektromagnetische Modell die Kraft an das mechanische Modell, das die lineare Verschiebung an das elektromagnetische Modell zurückliefert.

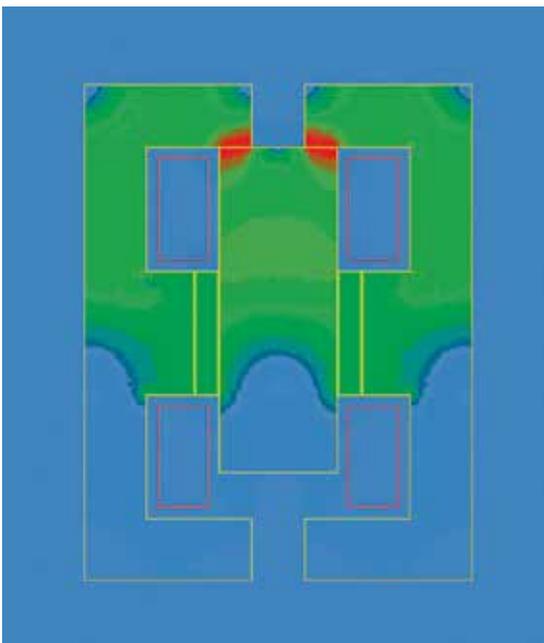
MSC Adams – Mehrkörpersimulation und -kopplung

Die Mehrkörpersimulation von Leistungsschaltern erfordert eine differenzierte und systematische Modellierung der Gelenke einschließlich Reibung und Gelenkspiel. Dies kann z. B. in MSC Adams erfolgen →5. Es ist sinnvoll, die Modelle der Pole, des Koppelgetriebes und des Gehäuses parametrisch darzustellen, um eine Wiederverwendung in einer validierten Bibliothek zu ermöglichen. Die physikalischen Parameter werden dazu den entsprechenden realen Designs entnommen.

Das finale Kopplungsmodell wird mithilfe von MSC Adams/Control erstellt. Das Eingangssignal ist die



05



06

Kraftvariable, das Ausgangssignal ist mindestens die Bewegung des Ankers, wobei auch der Kontaktspalt und die Geschwindigkeit der Vakuum-Schaltkammer sowie die Position und Geschwindigkeit der Schubstange von Interesse sein können.

ANSYS Maxwell/Simplorer – elektromagnetische Simulation und Kopplung

Das elektromagnetische FEM-Modell des Aktuators des VM1 ist in →6 dargestellt. Durch Verwendung eines zweidimensionalen Modells wird der Rechenaufwand reduziert, wobei gleichzeitig eine gute

Genauigkeit hinsichtlich der Modellierung des Leistungsverhaltens des Aktuators gegeben ist. Da die Spulen aus einem dünnen Draht gewickelt sind, können Skin- und Proximity-Effekte vernachlässigt werden, was die Berechnung weiter vereinfacht. Andererseits wird die teilweise magnetische Sättigung des Magnetkerns mithilfe einer genauen Magnetisierungskurve berücksichtigt, auch wenn dies die numerische Lösung anspruchsvoller macht, da die Sättigung eine wichtige Rolle für den Betrieb des Aktuators spielt.

Die Größe der Zeitschritte einschließlich der Kopplung mit MSC Adams wird in ANSYS Simplorer definiert. Das elektromagnetische FEM-Modell (ANSYS Maxwell) wird als transienter Cosimulationsblock eingefügt, wobei Simplorer als Master fungiert. Für den Stromkreis bietet sich die Verwendung eines zustandsabhängigen Schalters an, der nach Abklingen anfänglicher Vibrationen im mechanischen Modell einschaltet (um sicherzustellen, dass ein statischer Anfangszustand erreicht ist) und bei einem bestimmten Wert des Gesamthubs ausschaltet (um eine grundsätzliche Steuerbarkeit zu erreichen und den Energieverbrauch zu begrenzen). Ein fortschrittlicherer zustandsabhängiger Schaltvorgang zur Modellierung verschiedener Stromregler und Schaltmuster und zur Entwicklung besser steuerbarer Leistungsschalterantriebe kann ebenfalls mit Simplorer implementiert werden.

—
Die dynamische Cosimulation erweitert die klassische Vorausberechnung der Aktuatorkraft um die dynamische Kopplung und Wirbelströme.

Matlab/Simulink – Kopplung und Nachverarbeitung

Die Übersicht aus der Sicht von Matlab/Simulink ist in →4 dargestellt. Die Cosimulation wird zur Nachverarbeitung aller interessanten Größen aus den elektromagnetischen und mechanischen Simulationen von Matlab aus gestartet. Die Cosimulation sorgt dafür, dass alle Integrationsverfahren von ANSYS Maxwell/Simplorer, MSC Adams und Matlab/Simulink parallel mit dem spezifizierten Kommunikationsintervall ablaufen. Bei einer Kopplung mit ANSYS Simplorer fungiert Simplorer bei dieser Top-Level-Simulation in jedem Fall als Master.

Ergebnisse der Cosimulation

Im Folgenden sollen einige typische Ergebnisse einer dynamischen Cosimulation für einen linearen elektromagnetischen Antrieb beschrieben werden.

— 05 Mehrkörperdynamikmodell in MSC Adams.

— 06 Elektromagnetisches Modell in ANSYS Maxwell.

— 07 Darstellung des zu erwartenden qualitativen kinematischen Verhaltens beim Schließen eines Leistungsschalters (Auszug aus MSC Adams und ANSYS Maxwell zur Verifizierung).

Die Cosimulations-Umgebung zur Entwicklung von elektromagnetischen Aktuatoren liefert beispielhafte Ergebnisse.

Die dynamische Cosimulation erweitert die klassische quasistatische Vorausberechnung der Aktuatorkraft um zwei Phänomene: die dynamische Kopplung und Wirbelströme, die beide zu zusätzlichen Verlusten hinsichtlich des Aktuator-Kraftniveaus führen. Das realistische Kraftniveau lässt sich nur durch die dynamische Cosimulation gut darstellen und kann – je nach Aktuatortyp – zwei- bis dreimal kleiner sein als das von der quasistatischen Simulation errechnete.

Infolgedessen werden bei der quasistatischen Simulation z. B. die Schließgeschwindigkeiten zu hoch eingeschätzt, was zu falschen Schlüssen bei der Auslegung der elektromagnetischen Betätigung von Leistungsschaltern führt.

Cosimulation für elektrische Antriebe

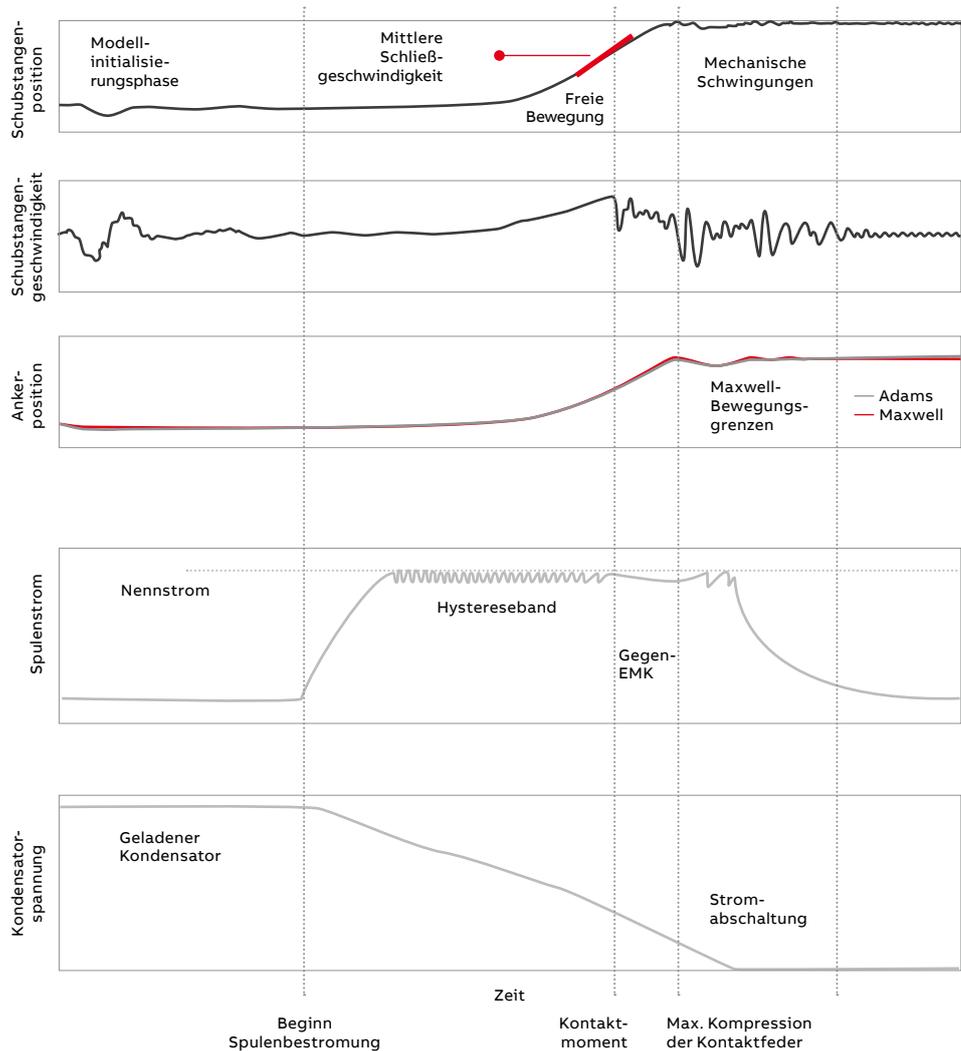
Die Cosimulations-Umgebung zur Entwicklung von elektromagnetischen Aktuatoren für MS-Leistungsschalter liefert beispielhafte Ergebnisse. Die Umgebung lässt sich nicht nur problemlos auf jede Art von elektromagnetischer und mechanischer Kopplung anwenden, die für die Entwicklung von elektrischen Antrieben erforderlich ist, sondern kann auch für eine schnelle und automatisierte Entwicklung von Aktuatoren von Nutzen sein, die die Schaltanforderungen des zukünftigen Stromnetzes erfüllen. •

Literaturhinweise

[1] „dena Ancillary Services Study 2030. Security and reliability of a power supply with a high percentage of renewable energy“. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) – German Energy Agency, Energy Systems and Energy Services, Berlin, 2013.

[2] Focus Online: „Stromnetz unter Druck – Betreiber zahlten 2017 fast eine Milliarde Euro für Noteingriffe“. Verfügbar unter: https://www.focus.de/immobilien/energiesparen/foerderung-in-energie-wende-fehlt-stromnetz-unter-druck-betreiber-zahlten-2017-fast-eine-milliarde-euro-fuer-noteingriffe_id_8180597.html

[3] ABB VM1 Produktbroschüre. Verfügbar unter: [https://library.e.abb.com/public/e090697e77f9425fbc2337890525a4d/Cat_VM1\(EN\)M_1VCP000157.pdf](https://library.e.abb.com/public/e090697e77f9425fbc2337890525a4d/Cat_VM1(EN)M_1VCP000157.pdf)



PRODUKTIVITÄT

Performance-Überwachung von Leistungstransformatoren in SCADA

Das neue modellbasierte Überwachungssystem von ABB nutzt standardmäßige Stationsausrüstung und wird in MicroSCADA Pro dargestellt. Dieser einzigartige Ansatz ermöglicht die Evaluierung der Performance von Betriebsmitteln im laufenden Betrieb ebenso wie die Erkennung sich anbahnender Fehler.

—
Tord Bengtsson
Nilanga Abeywickrama
Robert Saers
Subrat Sahoo
 ABB AB, Corporate
 Research, Västerås,
 Schweden

tord.bengtsson@
 se.abb.com
 nilanga.abeywickrama@
 se.abb.com
 robert.saers@se.abb.com
 subrat.sahoo@
 se.abb.com

In der vernetzten Welt von heute verlangen Kunden ein hohes Maß an Zuverlässigkeit. Dies wiederum erfordert einen einfachen Zugang zu Informationen über den Zustand von Betriebsmitteln – einschließlich solcher Komponenten wie Transformatoren, die traditionell nicht überwacht werden →1,2. Hierzu wurden verschiedene Überwachungsmethoden entwickelt, um sich anbahnende Probleme von Leistungstransformatoren und anderen Komponenten in einem Stromnetz zu erkennen. Auch ABB bietet eine breite Palette solcher Asset-Monitoring-Systeme an [1].

Es gibt jedoch auch Nachteile: Die Installation moderner Überwachungssysteme erfordert spezielle Ausrüstung und diverse proprietäre Software. Außerdem basiert die Überwachung für gewöhnlich auf Zustandsbeurteilungsmodellen, die wiederum Daten von speziellen Sensoren – z. B. für den Gasgehalt im Öl, Temperatur, dielektrische Verluste, Teilentladungen usw. – nutzen.

Hinzu kommt, dass bei einer durchschnittlichen Ausfallrate von etwa 1 % pro Jahr [2–4] die meisten Leistungstransformatoren manuell durch periodische Offline-Messungen überwacht werden. Da die Messungen nicht so häufig stattfinden, sind Betreiber nur beschränkt in der Lage, schnell auf Fehler zu reagieren oder einen Messwert mit einem Systemereignis in Verbindung zu bringen.

Performance-Überwachung

Angesichts dieser Einschränkungen sind die Experten von ABB der Frage nachgegangen, ob die

standardmäßige Ausrüstung einer Unterstation zur Überwachung eines Transformators im laufenden Betrieb genutzt werden kann, um derzeitige Online-Überwachungssysteme zu ergänzen. Dies hätte folgende Vorteile:

- Es wäre normalerweise weder spezielle Ausrüstung noch die Installation zusätzlicher Hardware erforderlich.
- Das SCADA-System der Station könnte zur Datenanalyse, Darstellung, Alarmierung und Protokollierung genutzt werden. Zudem wäre durch vollständige Integration des Systems mit allen Funktionalitäten der Unterstation eine Kommunikation mit übergeordneten Systemen möglich.

—
 ABB hat zwei einzigartige Überwachungsanwendungen entwickelt, die in MicroSCADA Pro integriert sind.

Die gewonnenen Informationen wären nicht nur für eine Vielzahl bekannter Fehlerszenarien relevant, man könnte auch analysieren, wie gut das betreffende Betriebsmittel seine Aufgabe erledigt, d. h. seine Performance überwachen.

Darauf aufbauend hat ABB zwei einzigartige Überwachungsanwendungen entwickelt: einen Performance-Monitor für Leistungstransformatoren und einen Monitor für den Stufenschalterbetrieb. Beide sind in das MicroSCADA Pro-System von ABB integriert



01

— 01 ABB bietet ihren Kunden modernste Überwachungssysteme, um eine optimale Zuverlässigkeit ihrer Betriebsmittel zu gewährleisten.

und nutzen dessen Infrastruktur zur Kommunikation, Darstellung und Alarmierung. Die zur Bereitstellung der erforderlichen Messungen notwendigen Modifikationen an der Station beschränken sich auf die Installation von Überwachungsanwendungen und die Konfiguration von Schutzrelais.

Überwachung der Transformator-Performance

Der Performance-Monitor für Leistungstransformatoren analysiert alle ankommenden und abgehenden Spannungen und Ströme eines Transformators und leitet daraus Schätzungen des Windungsverhältnisses, der Kurzschlussimpedanz und der Verlustleistung ab [5–7]. Diese Werte können direkt mit den Werten auf dem Typenschild und den Werten der Werksabnahmeprüfungen verglichen werden. So sind die Ergebnisse einfach zu interpretieren, und die geschätzte Sensitivität gegenüber Veränderungen entspricht der erforderlichen Genauigkeit von Offline-Prüfungen [8,9]. Das Überwachungssystem von ABB ermöglicht die Erkennung häufiger Transformatorprobleme wie Windungsschlüsse, verformte Wicklungen und Wirbelströme mit großer Empfindlichkeit. Durch die Messung der Verlustleistung im laufenden Betrieb erhalten Betreiber viel schneller Hinweise auf Veränderungen im Zustand des Transformators, als es mithilfe der Temperatur möglich ist. Durch eine solche Überwachung kann zudem die Häufigkeit von traditionellen Offline-Prüfungen reduziert werden.

Darüber hinaus werden neue Messungen mit früheren Messungen verglichen. So können auch kleinste

plötzliche Veränderungen in der Performance des Transformators erkannt werden. Bei einer Störung kann die Performance vor und nach dem Vorfall verglichen werden. Netzzustände, die sich auf die Performance des Transformators auswirken – wie etwa ein Leistungsrückfluss durch regenerative Erzeugung – können ebenfalls festgestellt werden.

— **Das Überwachungssystem erkennt Windungsschlüsse, verformte Wicklungen und Wirbelströme mit großer Empfindlichkeit.**

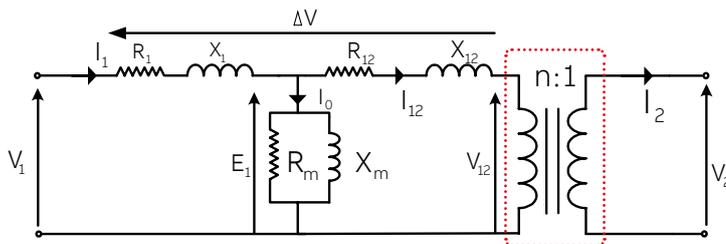
Modellbasierte Überwachung

Der Performance-Monitor erfasst in regelmäßigen Abständen, typischerweise einige Male pro Stunde, statische Abbilder der ankommenden und abgehenden Spannungen und Ströme. Die beobachteten Spannungen und Ströme werden dazu verwendet, die Parameter eines einfachen Transformatormodells festzulegen. Der Beitrag der Magnetisierung (R_m und X_m) kann mithilfe von Messungen unter verschiedenen Lastbedingungen aus den Wicklungsimpedanzen herausgerechnet werden. Damit sind alle Modellparameter bestimmt →3.

Sind die Modellparameter festgelegt, liefert der Monitor kontinuierlich neue Schätzungen, um mögliche Veränderungen zu erkennen. Dabei wird jede neue



02



03

Messung mit den Modellvorhersagen verglichen, sodass plötzliche Veränderungen der Performance so schnell erkannt werden können, wie es die Messrate erlaubt.

Gleichwohl gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit: Bei Spannungs- und Stromwandlern liegt die Genauigkeit im Bereich von 1 %, während die Verlustleistung eines modernen Transformators typischerweise darunter liegt. Umfangreiche Feldversuche haben jedoch gezeigt, dass einzelne Messwandler empfindlicher gegenüber Veränderungen sind, als deren angegebene Genauigkeit vermuten lässt (mindestens eine Größenordnung besser).

Der Performance-Monitor liefert zudem regelmäßige Schätzungen zum Übersetzungsverhältnis,

zur Impedanz und zum Magnetisierungsstrom und analysiert für jede neue Messung sowohl die Verlustleistung als auch mögliche Abweichungen von den Modellvorhersagen.

—
Der Monitor analysiert den internen Verlust des Transformators während einer Stufenumschaltung.

Überwachung des Stufenschalterbetriebs

Da die Laststufenschalter die einzigen mechanisch bewegten Komponenten eines Transformators sind, liegt hier die Ursache für rund ein Drittel aller Transformatorausfälle [2–4].

Folglich wurden bereits viele Methoden zur Überwachung von Stufenschaltern untersucht [10–12]. Diese sind jedoch abhängig von zusätzlichen Sensoren für Vibrationen oder Motorströme und liefern somit keine klare Schätzung der Kommutierungszeit, die einen wichtigen zusätzlichen Leistungsindikator darstellt.

02 Kunden benötigen unmittelbare, präzise Informationen über die Performance eines Transformators, und der Bedienerarbeitsplatz in der Leitwarte ist der beste Ort, um die Ergebnisse darzustellen.

03 Klassische Ersatzschaltung eines Zwe Wicklungstransformators mit Darstellung der Primärseite.

04 Beobachteter zusätzlicher Leistungsverlust bei der Stufenumschaltung. Die grauen und schwarzen Linien zeigen den Anteil der einzelnen Phasen, die rote Linie zeigt den Gesamtverlust. Hier öffnet eine Phase den Hauptkontakt ca. 2 ms nach den anderen.

05 Abweichung des Stroms von den erwarteten Werten. Hier bewirkte ein paralleles Einschaltereignis am 22. Mai eine permanente Veränderung der Transformatorparameter, die allerdings im Vergleich zum Rauschen und zum Nennlaststrom gering ausfällt (30 mA bzw. ca. 0,5 A).

Der Monitor für den Stufenschalter analysiert den internen Verlust des Transformators während einer Stufenumschaltung mithilfe der gleichen Spannungs- und Stromsignale, die auch der Performance-Monitor nutzt. Dieser neuartige Monitor liefert eine Schätzung der Kommutierungszeit und des zusätzlichen, mit der Kommutierung einhergehenden Verlusts. Bei einer zu kurzen Übergangszeit besteht die Gefahr, dass die Schaltkontakte durch einen Lichtbogen überbrückt werden. Eine zu lange Übergangszeit hingegen spricht für mechanische Probleme. Untersuchungen von ABB zeigen, dass Veränderungen des Kommutierungsverlusts auf die Überschaltwiderstände zurückzuführen sind, d. h. der zu erwartende Leistungsverlust kann anhand des Typenschildes des Stufenschalters bestimmt werden.

Funktion des Stufenschalter-Monitors

Ein Stufenschalter schaltet nicht einfach auf eine andere Windungszahl im Transformator um, er verändert das Windungsverhältnis in mehreren aufeinander folgenden Schritten, um eine übermäßige Lichtbogenbildung und andere potenzielle Gefahren zu vermeiden. Aufgrund der Spannungsdifferenz kommt es zu einem Kreisstrom zwischen den alten und neuen Schaltstellungen, der durch die Überschaltwiderstände begrenzt wird.

Der Kreisstrom verursacht einen vorübergehenden zusätzlichen Verlust, der durch sorgfältige Signalanalyse extrahiert werden kann →4. Die Kommutierungszeit und der Widerstandswert lassen sich aus der Dauer und Höhe des zusätzlichen Verlusts schätzen.

Der Stufenschalter-Monitor analysiert die während einer Stufenumschaltung aufgezeichneten Strom- und Spannungsverläufe hinsichtlich des zusätzlichen Verlusts. Solche Aufzeichnungen können ohne Weiteres mit einem entsprechend konfigurierten Störschreiber erstellt werden.

Fallbeispiele

Wie genau die Performance eines Transformators mit den innovativen Lösungen von ABB überwacht werden kann, zeigen verschiedene Beispiele aus der Praxis. Abweichungen vom Modell liefern nicht nur Informationen über das Auftreten und den zeitlichen Verlauf eines Ereignisses, sondern auch über seine Ursache.

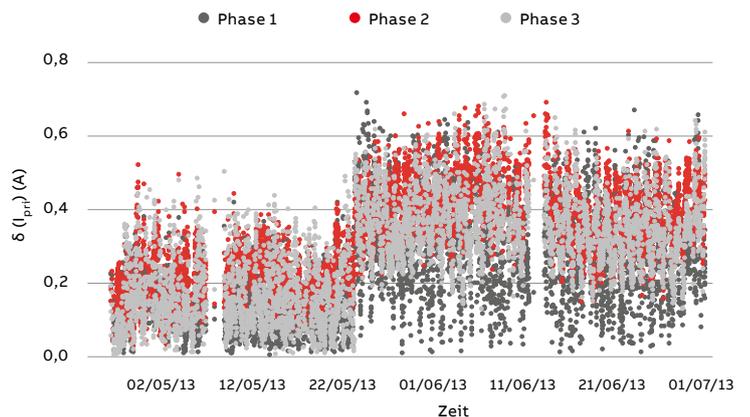
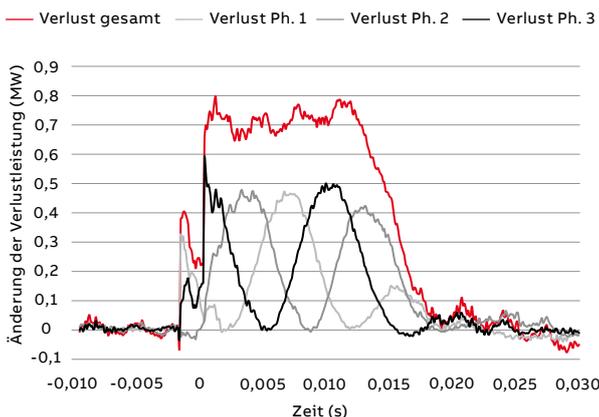
Praxistests zeigen, wie genau die Performance eines Transformators mit den innovativen Lösungen von ABB überwacht werden kann.

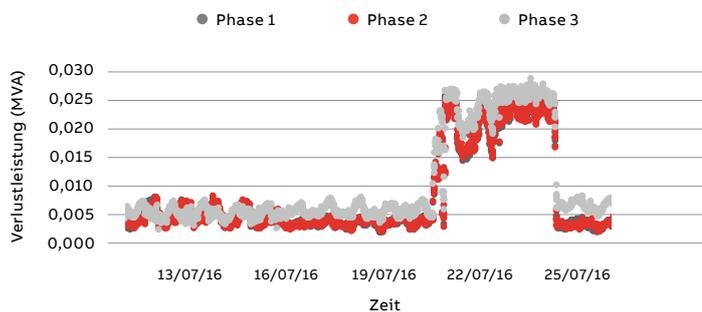
Permanente Veränderung durch Sättigung

In einem Fall untersuchte ABB einen Transformatorvorfall, der sich am 22. Mai ereignete, als sich die Abweichung des Stroms vom erstellten Modell abrupt änderte →5. Da diese Änderung unabhängig von der Last war, wurde sie auf das Vorhandensein eines Magnetisierungsstroms zurückgeführt. Der Zeitpunkt der Änderung fiel mit dem Einschalten eines nahegelegenen Transformators zusammen. Vermutlich hat der daraus resultierende Spannungseffekt den Transformator in die Sättigung getrieben, was zur Entstehung von permanenten Wirbelstrompfaden in den strukturellen Teilen geführt hat. Dennoch blieb der Transformator in Betrieb, da die Zunahme der Verlustleistung mit etwa 20 % der Leerlaufverluste relativ gering ausfiel.

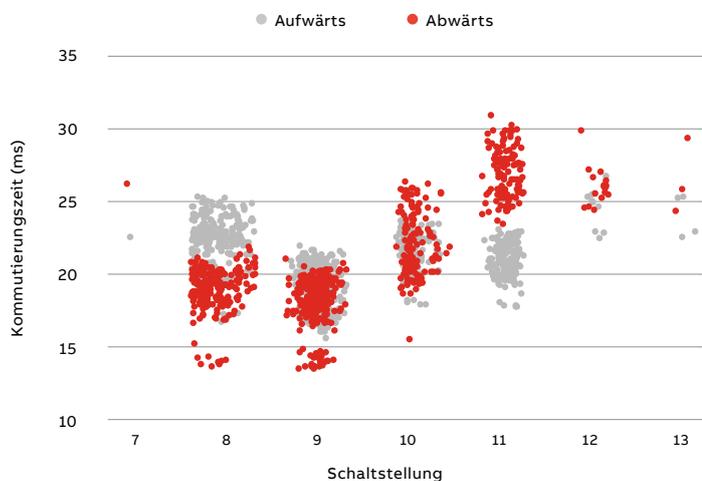
Vorübergehender hoher Verlust aufgrund externer Bedingungen

Da die Bedingungen im Netz, also außerhalb des Transformators, die Performance ebenfalls beeinflussen können, hat ABB die Verlustleistung in einer Feldstudie an einem realen Transformator untersucht. Der betrachtete 50-MVA-Transformator hatte immer





06



07

wieder Alarme aufgrund einer erhöhten Temperatur ausgelöst. Mithilfe des Performance-Monitors konnte ein ungewöhnlicher Leistungsverlust präzise ausgemacht werden →6. Da die beobachtete Zunahme der Verlustleistung nur vorübergehend war, kam es zu keiner dauerhaften Veränderung der Transformatoreigenschaften. Ein erhöhter Leistungsverlust wurde bereits in der Vergangenheit mehrfach festgestellt und auf den Betrieb eines kleinen, auf der Sekundärseite gelegenen Wasserkraftwerks zurückgeführt. Mit dem neuen Überwachungssystem von ABB konnten der Zeitpunkt und die wahrscheinliche Ursache des Ereignisses bestimmt werden. Ergebnisse wie dieses unterstreichen die Notwendigkeit zur Überwachung der regenerativen Stromerzeugung.

Veränderung der Kommutierungszeit

Bei einigen Stufenschaltern kann die Kommutierungszeit zwischen den Schaltstellungen variieren. Um dies zu veranschaulichen, hat ABB die Kommutierungszeit für mehrere Tausend Schaltvorgänge eines in Betrieb befindlichen Stufenschalters berechnet →7. Die dabei festgestellten Zeitunterschiede zwischen den Stufen sind signifikant und lassen auf Kontaktverschleiß schließen, weshalb der Schalter einer Wartung unterzogen werden sollte.

Implementierung in MicroSCADA Pro

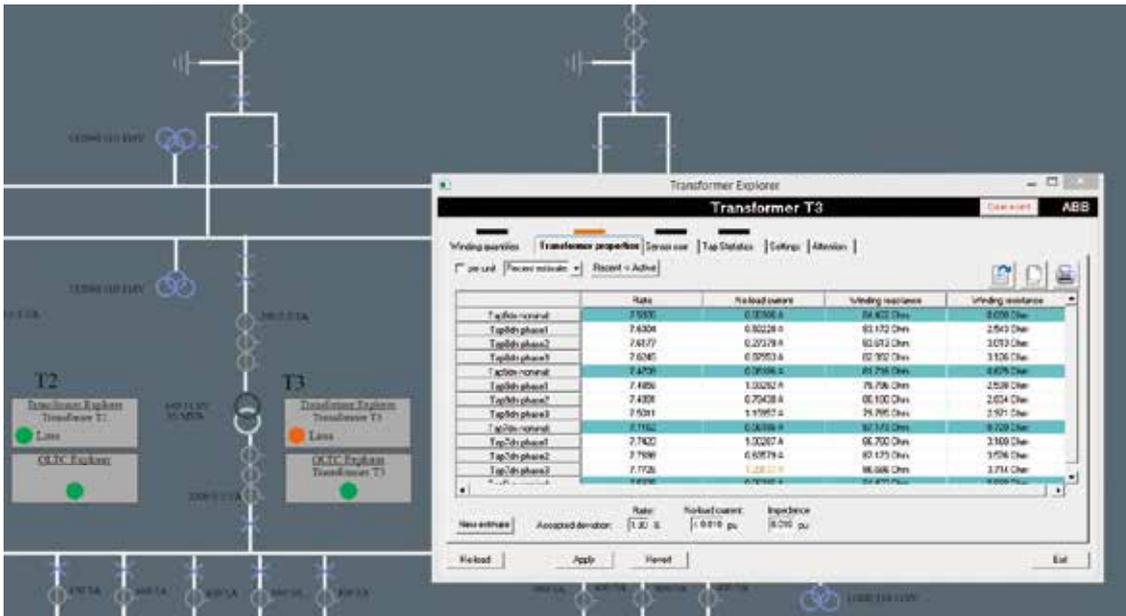
Eine SCADA-Umgebung (Supervisory Control and Data Acquisition) eignet sich ideal für die Darstellung von Überwachungsergebnissen, da die meisten anderen Aspekte des Stationsbetriebs wie Ereignisbehandlung und Cybersicherheit bereits zur Verfügung stehen. Ein entsprechend konfiguriertes elektronisches Schutzgerät (IED) dient als Erfassungseinheit, und die Störschriebe werden mithilfe des IEC 61850-8-1-Protokolls bereitgestellt. Die vorverarbeiteten Ergebnisse werden in der ABB MicroSCADA Pro-Terminologie an die Prozessobjekte der SCADA-Anwendung übermittelt.

Durch die Verwendung von standardmäßigen IEDs für die Signalerfassung entfällt nicht nur die Notwendigkeit spezieller Erfassungshardware, es können auch herkömmliche (110 V/5 A) oder digitalisierte Signale auf dem Prozessbus der Station zur Überwachung genutzt werden.

Ein Update der Prozessobjekte, die zu einer bestimmten MicroSCADA Pro-Funktion gehören, löst zusätzliche Analysen und Aufmerksamkeitsindikatoren wie Übersetzungsverhältnis, Verlust, Impedanz, Stromdifferenz, Betriebszeit und Trend des Stufenschalters aus. Zurzeit werden einige Dutzend solcher Indikatoren berechnet, die in spezifischen Einheiten eines zulässigen Grenzwerts dargestellt werden. So bedeutet ein Wert von eins z. B., dass die überwachte Größe genau dem zulässigen Grenzwert entspricht.

—
MicroSCADA Pro eignet sich ideal für die Darstellung der Ergebnisse, da andere Aspekte des Stationsbetriebs bereits zur Verfügung stehen.

Die Aufmerksamkeitsindikatoren können unter Verwendung der Höchstwerte aller Einzelindikatoren zu einem einzigen Hauptindikator zusammengefasst werden, der zur Steuerung der Darstellung der Überwachungssymbole verwendet wird →8. Der Nutzer kann dann per Mausklick auf das Symbol zusätzliche Informationen abrufen. Übersteigt ein Indikator den zulässigen Grenzwert, wird ein Event in MicroSCADA Pro ausgelöst. Der Indikator und der Zeitpunkt werden im Ereignisprotokoll festgehalten. Alle aktuellen Daten und Analyseergebnisse werden in den Überwachungsdialogen dargestellt. So können z. B. die Parameter des Transformatormodells für jede Phase und die verwendeten Stufenschalterstellungen angezeigt werden →8.



Die Prozessdarstellung zeigt ein Übersichtsschaltbild mit einer Reihe von Transformatoren. Die Symbole daneben zeigen den jeweiligen Überwachungsstatus an. Per Mausklick wird die dazugehörige Bedienoberfläche aufgerufen – hier mit dem vom Performance-Monitor geschätzten Windungsverhältnis, Leerlaufstrom und der Wicklungsimpedanz für jede Phase und Stufenschalterstellung. Die blauen Zeilen zeigen die Nennwerte gemäß Typenschild. Ein Wert liegt außerhalb der zulässigen Abweichung und ist gelb eingefärbt.

08

06 Beispiel eines Verlustleistungsdiagramms, bei dem es durch eine Erzeugungsanlage auf der Unterspannungsseite zu erhöhten Verlusten im Transformator kam.

07 Kommutierungszeiten eines Stufenschalters in Abhängigkeit von der Schaltstellung für 1750 Schaltvorgänge. Aufwärtsgerichtete Schaltvorgänge sind in Grau, abwärtsgerichtete in Rot dargestellt.

08 Screenshot von MicroSCADA Pro auf einem Rechner vom Typ SYS600C.

Dank der MicroSCADA Pro-Anwendung wird auch die weitere Verarbeitung und Protokollierung erleichtert. So können z. B. ausgewählte Ergebnisse an Asset-Management-Systeme auf Flottenebene kommuniziert werden. Darüber hinaus erzeugen die Überwachungsanwendungen eigene Protokolle, die zur genaueren Analyse an die Experten von ABB gesendet werden können.

Integration neuer Überwachungsfunktionen
Die hier beschriebene Methode und die dargestellten Ergebnisse veranschaulichen den neuen Überwachungsansatz von ABB, der auf der vollständigen Integration zusätzlicher Überwachungsfunktionen in die standardmäßige Ausrüstung von Unterstationen basiert. So ermöglichen die Monitore nicht nur die Erkennung sich anbahnender Fehler, sondern auch die Evaluierung der Performance der Betriebsmittel im laufenden Betrieb.

Bis heute hat ABB die Überwachungsanwendungen erfolgreich an acht Leistungstransformatoren im Leistungsbereich zwischen 30 und 1.000 MVA mit Nennspannungen zwischen 120 und 750 kV getestet. Dabei wurden Daten von etwa zehn Transformatorjahren und 10.000 Schaltvorgängen von Stufenschaltern erfasst, die den innovativen Ansatz von ABB untermauern.

Mit dem Ziel, ihren Kunden heute und in Zukunft bestmögliche Überwachungssysteme breitzustellen, befasst sich ABB mit der Entwicklung weiterer Funktionalitäten auf der Basis einer ähnlichen Struktur. ●

Danksagung

Die Autoren danken ihren Kollegen aus den ABB-Geschäftseinheiten für ihre Unterstützung und ihren Zuspruch.

Literaturhinweise

[1] Advanced services for transformers (ABB Produktübersicht): Verfügbar unter: <https://new.abb.com/products/transformers/service/advanced-services>

[2] CIGRÉ Working Group 05: „An international survey on failures in large power transformers in service“. Electra No. 88, May 1983.

[3] F. Vahidi, S. Tenbohlen: „Statistical Failure Analysis of European Substation Transformers“. ETG-Fachbericht – Diagnostik elektrischer Betriebsmittel 2014, S. 5–9.

[4] M. Minhas et al.: „Failure in power system transformers and appropriate monitoring techniques“. 11th Int. Symp. High Voltage Engineering. London, 1999.

[5] T. Bengtsson, N. Abeywickrama: „On-line Monitoring of Power Transformer by Fundamental Frequency Signals“. Cigré 2012, Paper A2-110.

[6] N. Abeywickrama et al.: „Transformer Explorer – monitoring transformer status by fundamental frequency signals“. Condition Monitoring and Diagnostics (CMD) Conference. Paper 116. X'ian, China, 25.–28. Sept. 2016.

[7] S. Sahoo et al. „Monitoring Power Transformer Performance, Usage and System Event Impacts – A Case Study“. 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Nov. 2017.

[8] IEEE 62-1995: „IEEE Guide for diagnostic field testing of electric power apparatus – Part 1: Oil filled power transformers, regulators, and reactors“.

[9] IEC 60076-1: „Power transformers – Part I: General“.

[10] T. Bengtsson et al.: „Acoustic Diagnosis of Tap Changers“. Cigré 1996, Paper 12–101.

[11] R. Jongen et al.: „On-load tap changer diagnosis with dynamic resistance measurements“. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, 23.–27. Sept. 2012. S. 485–488.

[12] K. G. Lewis et al.: „A tapchanger monitoring system incorporating optical sensors“. Second International Conference on the Reliability of Transmission and Distribution Equipment. Coventry, UK, 1995. S. 97–102.

BUZZWORDS ENTSCHLÜSSELT

Hybrid

Dieses Mal geht es weniger um die Entschlüsselung eines Worts, sondern es wird etwas philosophisch. Schließlich wissen wir alle, was das Wort Hybrid bedeutet, oder? Jedenfalls glauben wir es. Und darin liegt die Schwierigkeit des Worts Hybrid: Es ist zu einem Buzzword geworden.



Michelle Kiener
ABB Review
Baden-Dättwil,
Schweiz

michelle.kiener@
ch.abb.com

Gibt man das Wort Hybrid bei Google ein, erscheint als erstes die Definition für ein Hybridfahrzeug. Ich habe für diesen Artikel eine kleine informelle Umfrage gestartet und verschiedene Leute gefragt, was ihnen beim Wort Hybrid als erstes einfällt – und fast alle sagten „Autos“.

Dabei ist Hybrid so viel mehr als das. Die Idee zu diesem Artikel entstand, als ich in einem Fahrradladen einige E-Bikes sah, die als „Hybridräder“ angeboten wurden. Als Besitzerin eines Hybridautos und eines E-Bikes fiel mir die Bezeichnung sofort ins Auge, und ich vergaß für einen Moment meinen geplanten Einkauf, um näher hinzuschauen. Ich dachte, ich würde die ersten E-Bikes mit Energierückgewinnung – also quasi ein Hybrid aus meinem Auto und meinem Fahrrad – zu sehen bekommen, doch stattdessen handelte es sich vielmehr um eine Mischung aus Straßenfahrrad und Mountainbike.

Streng genommen habe ich auch mein Hybridauto oben nicht richtig definiert. Trotz seines bauartbedingten geringen Gewichts handelt es sich um einen „schweren Hybrid“ mit einem Verbrennungs- und einem Elektromotor, bei dem die Batterie durch Energierückgewinnung geladen wird – im Gegensatz zu einem Plug-in-Hybrid, der – wie der Name schon sagt – zum Laden der Batterie an eine Steckdose angeschlossen werden muss. Also ging ich beim Hybridrad auch von einem schweren Hybrid aus, was Besitzern eines Plug-in-Hybrids vielleicht nicht passiert wäre. Für Gartenfreunde wiederum hat das Wort Hybrid eine ganz andere Bedeutung, denn auch bei Pflanzen spricht man von Hybriden. So handelt es sich bei den Rosen in →1 z. B. um sogenannte Teehybride.



01

Ausgehend vom lateinischen hybrida, einer Variante von ibrida, „Mischling“, insbesondere in der Bedeutung von „Nachkomme eines Haus- und eines Wildschweins“, scheint das Wort Hybrid erstmalig im 16. Jahrhundert in der Bedeutung „Abkömmling von Pflanzen oder Tieren unterschiedlicher Art oder Gattung“ aufzutauchen. Etwa seit dem Jahr 2002 wird Hybrid als Kurzform von Hybridfahrzeug verwendet [1].

Das Wörterbuch [2] definiert Hybrid als:

- 1 ein Nachkomme zweier Tiere oder Pflanzen unterschiedlicher Rasse, Sorte, Art, Spezies oder Gattung
- 2 eine Person mit einem gemischten Hintergrund zweier unterschiedlicher Kulturen oder Traditionen
- 3a etwas von heterogenem Ursprung oder heterogener Zusammensetzung: ein Gemisch
- 3b etwas (z. B. ein Kraftwerk, Fahrzeug oder ein elektronischer Schaltkreis) mit zwei verschiedenartigen Komponenten, die im Wesentlichen die gleiche Funktion erfüllen

Fairerweise hätte ich vielleicht erst bei Wikipedia [3] nachsehen sollen, bevor ich den Fahrradhändler verdächtige, mit dem Wort „Hybridrad“ nur Käufer anlocken zu wollen. Denn dort findet sich – neben den zu erwartenden Definitionen für Pflanzen (siehe Teehybrid), Hybridfahrzeuge, Plug-in-Hybride und Hybridzüge – auch das Hybridrad als „Fahrrad mit Merkmalen eines Straßenfahrrads und eines Mountainbikes“. Darüber hinaus finden sich weitere faszinierende Begriffe wie Hybridbibliothek, Hybridmarkt, Hybridstein und natürlich hybride Welt. Alles gültige Verwendungen des Worts Hybrid, die allerdings seit 2002 zunehmend von der Verkürzung des Worts Hybridfahrzeug zu „Hybrid“ in den Schatten gestellt werden.



02

01 Eine Chrysler Imperial aus der Gattung der Teehybride.

02 Ein Chrysler Imperial aus der Gattung der nicht-hybriden Kraftfahrzeuge.

Literaturhinweise

[1] Online Etymology Dictionary „hybrid (n.)“. Online verfügbar unter <https://www.etymonline.com/word/hybrid> (aufgerufen am 06.07.2019).

[2] Merriam-Webster „hybrid“. Online verfügbar unter <https://www.merriam-webster.com/dictionary/hybrid> (aufgerufen am 25.07.2019).

[3] Wikipedia „Hybrid“. Online verfügbar unter <https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid> (aufgerufen am 23.07.2019).

Das uralte Wort „Hybrid“ beschränkt sich nicht mehr auf Schweine, sondern ist zum Buzzword geworden.

Und hierin liegt die Schwierigkeit des Wortes Hybrid. Heutzutage wird es entweder überbeansprucht oder falsch verstanden. In der Welt der Technik ist das Wort Hybrid in gewisser Weise dem „Apple-Phänomen“ zum Opfer gefallen: Zuerst gab es den iMac, dann kam das iBook, gefolgt vom iPod, dem iPhone und dem iPad. Unternehmen, die ebenso innovativ und schick erscheinen wollen, setzen heute ein „i“ vor den Produktnamen, ganz gleich, ob es technologiebasiert ist oder nicht. So hat man auch schon einen „iUmbrella“ gesehen. Im Technologiesektor verwenden einige das Wort Hybrid, um einen Umweltvorteil – wahr oder nicht – zu implizieren, während manche von uns ihre eigenen Vorstellungen zu einem Produkt, seinem Verhalten und seinem Nutzen haben, wenn sie das Wort Hybrid sehen. Wie so oft gilt es auch hier, das Kleingedruckte zu beachten. Ansonsten besteht die Gefahr, dass Sie einen günstigen Chrysler Imperial Hybrid kaufen, den Sie in Ihren Garten pflanzen müssen, anstatt ihn in der Garage zu parken →2. •

Abonnement

ABB Review abonnieren
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.

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

Bleiben Sie auf dem Laufenden...

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



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

Impressum

Editorial Board

Bazmi Husain
Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Adrienne Williams
Senior Sustainability
Advisor

Christoph Sieder
Head of Corporate
Communications

Reiner Schoenrock
Technology and Innovation

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

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

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

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

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

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

Druck

Vorarlberger
Verlagsanstalt GmbH
6850 Dornbirn
Österreich



Layout

Publik. Agentur für
Kommunikation GmbH
Ludwigshafen
Deutschland

Satz

Konica Minolta
Marketing Services
London WC1V 7PB
Großbritannien

Übersetzung

Thore Speck
24941 Flensburg
Deutschland

Haftungsausschluss

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

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

ISSN: 1013-3119

abb.com/abbreview

Tablet version

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





01|2019

Wegweisende Ideen

Innovations-Highlights

- 06 Kurzartikel Innovationen
- 21 ABB Customer World

Partnerschaften

- 24 Interview mit SynerLeap
- 28 SynerLeap, Graphmatech und Algoryx

Vernetzung und Produktivität

- 36 Auf Kurs zur autonomen Schifffahrt
- 39 ABB Ability™-Leistungstransformator
- 46 Nicht-invasive Sensortechnologie
- 54 Ringbus mit statischer USV
- 61 Neue ABB Tmax XT-Leistungsschalter

Antriebe und Umrichter

- 64 Neuer Smart Sensor für Stehlager
- 68 Werkzeugfreie Verdrahtung

Buzzwords entschlüsselt

- 70 Deep learning



02|2019

Digitale Zwillinge und Simulationen

Digitale Zwillinge und Simulationen

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

Produktivität

- 72 Engineering von Prozessmodulen

Buzzwords entschlüsselt

- 78 Cloud-, Edge- und Fog-Computing



03|2019

Autonome Systeme

Autonome Systeme

- 08 Der Weg zu autonomen Systemen
- 16 Visualisierung von Stromnetzmodellen
- 23 Smarte Visualisierungen
- 30 Anlagenorchestrierung und Pilotanwendungen
- 36 Datenanalysetools für die Industrie
- 44 ABB Drive Connectivity Panel
- 46 Zustandsüberwachung von Erzmöhlen

Energie

- 54 Eine USV für raue Bedingungen
- 60 Grünes Kraftwerk Brennstoffzelle
- 68 Bruchssichere Transformatoren

Buzzwords entschlüsselt

- 74 Autonome Systeme



04|2019

E-Mobilität

E-Mobilität

- 08 Zukunft im Blick: ABB FIA FORMEL E
- 14 Elektrifizierung der Niagara-Schiffe
- 18 Willkommen an Bord, Wasserstoff
- 24 Reichweite – kein Problem für E-Busse
- 30 Die Zukunft des Stromnetzes
- 38 Innovation durch Kooperation

Produktivität

- 46 Maschinen lernen Maschinen
- 52 Optimierung von Antriebssträngen
- 56 Virtuelles Prototyping
- 64 Asset-Optimierung
- 68 Leistungsschalter-Antriebe
- 74 Performance-Überwachung in SCADA

Buzzwords entschlüsselt

- 80 Hybrid

—
Vorschau 01/2020

Inspiration für die Zukunft

Die erste Ausgabe der ABB Review im neuen Jahrzehnt zeigt nicht nur, was heute möglich ist, sondern wirft einen Blick auf neueste Technologien, Anwendungen und Prozessentwicklungen, die den Weg in eine erfolgreiche Zukunft weisen.