

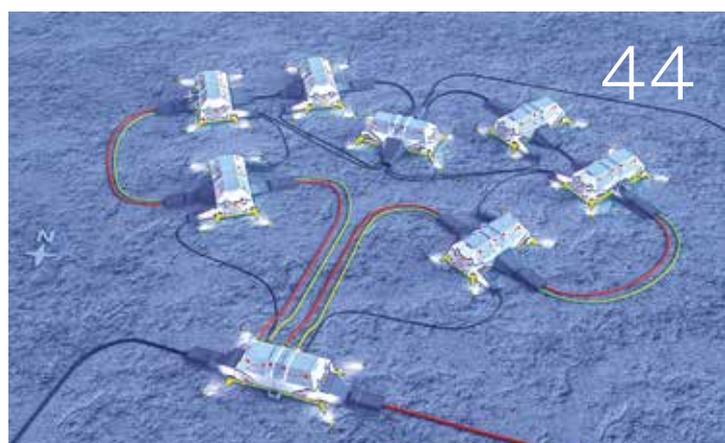
# review

01|2020 de

Inspiration für die Zukunft



- 06–17 Innovations-Highlights
- 18–41 Digitale Zukunft
- 42–60 Extreme Anforderungen





36

## Wertschöpfung durch Co-Innovation



Einstufiger  
Turbolader A200-H

56



## Digitale Transformation

---

05 Editorial

---

## Innovations-Highlights 2020

08 Ausgewählte Innovationen  
in Kürze

---

## Digitale Zukunft

20 Digitale Transformation  
24 Innovation und Industrie 4.0  
30 OPC UA und TSN  
36 Wertschöpfung durch Co-Innovation

---

## Extreme Anforderungen

44 Elektrifizierung unter Wasser  
50 Unterwasser-Umrichter  
56 Einstufiger Turbolader A200-H

---

## Buzzwords entschlüsselt

62 Additive Fertigung

---

63 Impressum



## OmniCore™-Robotersteuerung

---

**Innovation ist viel mehr als nur eine neue oder gute Idee. Sie erfordert Vision, Flexibilität, Ausdauer, Konsequenz, stetige Wiederholung und vor allem einen klaren Fokus auf die Lösung echter Probleme und die Schaffung neuer Möglichkeiten. Vieles davon bildet die Grundlage der umfangreichen Erfahrung von ABB. Lassen Sie sich inspirieren. Wie immer freuen wir uns über Ihr Feedback.**

**[abb.com/abbreview](http://abb.com/abbreview)**

EDITORIAL

# Inspiration für die Zukunft



Liebe Leserin, lieber Leser,

man sagt, wer als Werkzeug nur einen Hammer hat, wird jedes Problem für einen Nagel halten. Dies gilt erst recht für Maschinen. Die klassische Massenproduktion basiert auf sich ständig wiederholenden Vorgängen, die zu einheitlichen Produkten führen. Dabei gibt es viele Probleme und Anforderungen, die alles andere als einheitlich, sondern variabel oder gar willkürlich sind. Bei der Massenproduktion werden Parameter und Anforderungen häufig künstlich vereinheitlicht (weniger Auswahl für den Kunden), während Handarbeit weiter dort gefragt ist, wo diese Einheitlichkeit nicht erreicht werden kann.

Im Kontext der vierten industriellen Revolution kommen zunehmend Geräte und Systeme zum Einsatz, die in der Lage sind, eine Vielzahl von Situationen und Problemen autonom zu erkennen – und sich daran anzupassen (oder, falls dies nicht möglich ist, Alarm zu schlagen). Die vorliegende Ausgabe der ABB Review befasst sich mit Produkten, Dienstleistungen und Lösungen, die diesen Wandel anführen, ermöglichen oder veranschaulichen.

Eine interessante Lektüre wünscht Ihnen

A handwritten signature in red ink, appearing to read 'Bazmi Husain'. The signature is stylized and fluid.

Bazmi Husain  
Chief Technology Officer



# Innovations- Highlights 2020



13



10

ABB arbeitet ständig daran, die Grenzen des Machbaren zu erweitern. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Lösungen entwickelt, die berechenbar, zuverlässig, sicher und ökonomisch sind. Von Rennstrecken über Fabriken bis hin zu Werften gilt: Was heute möglich erscheint, wird morgen machbar und bald unverzichtbar sein.

- 08 KI plus Robotik: die Formel für flexible Fabriken
- 09 Roboter: fit für die Endmontage im Kfz-Bereich
- 10 ABB erweitert Azipod®-Familie für Fähren und RoPax-Schiffe
- 11 OmniCore™-Robotersteuerung für IERA-Innovationspreis nominiert
- 12 Unterwasser-Elektrifizierungssystem ermöglicht den Sprung ins tiefe Wasser
- 13 Ultraschneller Hochstrom-DC-Leistungsschalter auf Leistungselektronikbasis
- 14 Anomalieerkennungs-App reduziert Stillstandszeit von Robotern
- 15 EC Titanium – die integrierte intelligente Motor- und Antriebslösung
- 16 Neue Pick-&-Pack-Software verkürzt Inbetriebnahmezeiten von Tagen auf Stunden
- 17 A200-H – der neue Maßstab in der einstufigen Turboaufladung



08



## KI PLUS ROBOTIK: DIE FORMEL FÜR FLEXIBLE FABRIKEN

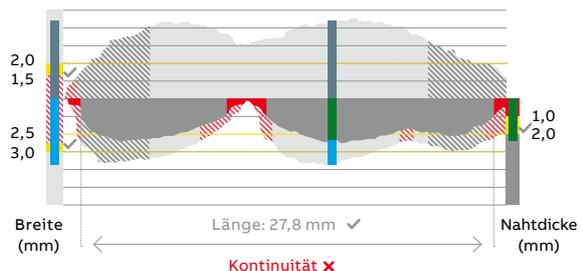
Die Kombination von künstlicher Intelligenz (KI) und Robotik bietet die Möglichkeit, starre Anwendungen lernfähig zu machen und so die Flexibilität in der Fabrikautomatisierung deutlich zu verbessern. Das Ergebnis ist eine Erweiterung der Funktionalitäten von Robotern zur Steigerung der Produktivität, Verbesserung der Arbeitssicherheit und Beschleunigung der Produktion. Anwendungen von ABB in diesem Bereich nutzen KI, um Roboter mit der Fähigkeit auszustatten, ihre Umgebung zu erfassen und darauf zu reagieren, Fehler zu erkennen und zu analysieren und Prozesse autonom zu optimieren.

KI kann mit Vision-Sensoren ausgestatteten Robotern dabei helfen, Objekte unabhängig von ihrer Position zu identifizieren, während maschinelle Lernalgorithmen die Möglichkeit bieten, optimale Bewegungsbahnen und Greiferpositionen zum Aufnehmen der Objekte zu bestimmen.

KI ermöglicht es Robotern, eine Vielzahl von Objekten (z. B. Schweißnähte, siehe Grafik) zu inspizieren und analysieren, um Fehler und Qualitätsmängel zu erkennen. Dies wird erreicht durch die Kombination von Vision-Sensoren und überwachtem Lernen, d. h. Training durch Beispiele.

Ein einzigartiges Beispiel für autonome Prozessoptimierung ist der ABB Ability™ Connected Atomizer, der erste mit Sensoren ausgerüstete vernetzte Zerstäuber für Lackierroboter, der eine intelligente Echtzeit-Diagnose und Optimierung der Lackqualität in Echtzeit ermöglicht. Durch Überwachung von Größen wie Beschleunigung, Druck, Vibration und Temperatur reduziert der Zerstäuber den Lackverlust beim Farbwechsel um 75 % und senkt den Druckluftverbrauch um 20 %.

Zudem nutzt ABB KI-Algorithmen zur Analyse des Verhaltens von Pressen und Robotern in Press- und Stanzlinien zur Minimierung von Wartezeiten. Dabei erkennt ein Algorithmus Engpässe und steuert die Start- und Stopzeiten der Roboter und Pressen so, dass ein stabiler und vorhersehbarer Betrieb gewährleistet ist. •



## ROBOTER: FIT FÜR DIE ENDMONTAGE IM KFZ-BEREICH

Produktionslinien für Kfz werden häufig als hochgradig automatisierte Anlagen dargestellt, in denen Roboter fleißig Karosserien zusammenschweißen. Dabei sind nicht alle Aspekte der Fahrzeugfertigung technologisch so fortschrittlich. Bei der Endmontage verlangen z. B. komplexe Prozesse wie die Verkabelung, Sitzmontage und das Einsetzen des Armaturenbretts eine geschickte Handhabung.

ABB ist dabei, Verfahren zu entwickeln, die es Robotern ermöglichen, einige Aufgaben in diesem Bereich zu übernehmen. Der wohl schwierigste Aspekt dabei ist, dass sich die Karosserien bei der Endmontage stetig weiterbewegen. Dies wird gelöst, indem der betreffende Roboter durch eine Kombination aus optischen und Kraftsteuersensoren in Echtzeit geführt wird, anstatt einer programmierten Bahn zu folgen.

Um eine Montageaufgabe in dieser instabilen Umgebung auszuführen, muss sich der Roboter zunächst mit der linearen Bewegung der Montagelinie synchronisieren. Dies wird mithilfe konventioneller Technologie zur Verfolgung von Förderbändern oder fahrerlosen Transportfahrzeugen (AGVs) erreicht. Die AGV-Verfolgung, die auch mit herkömmlichen Förderzeugen verwendet werden kann, basiert auf der optischen Echtzeit-Verfolgung von zweidimensionalen Barcodes, sogenannten AprilTags. Ein solches Tag befindet sich normalerweise an der Vorrichtung, die das Zielfahrzeug transportiert, während die Kamera im Boden oder im Roboterfuß installiert ist, wenn der Roboter auf einer linearen Achse montiert ist.

Ist ein Roboter mit der Bewegung eines Zielfahrzeugs synchronisiert, beginnt dieser mit der Ausführung einer Montageaufgabe, während er mithilfe des von ABB entwickelten Echtzeit-Bildverarbeitungssystems an seinem Greifer kontinuierlich die natürlichen Merkmale des Montagebereichs verfolgt. Die Eingaben des Systems werden mit ständigen Feedback-Daten von einem zwischen dem Handgelenk und Greifer installierten Kraftsteuerungssensor kombiniert.

Die Kombination von optischer Echtzeit-Führung und kraftgesteuerter Manipulation (Sensorfusion) ist der Schlüssel zur erfolgreichen Ausführung eines Montagevorgangs. Zurzeit finden Pilotanwendungen in Zusammenarbeit mit einem großen Automobilhersteller statt. Unter anderem werden Armaturenbretter in Deutschland und China montiert. Die hier und in anderen Anlagen gewonnenen Erfahrungen sind potenziell auch auf andere Montageanwendungen im Kfz-Bereich und andere Fertigungsumgebungen mit sich kontinuierlich bewegenden Objekten übertragbar. •



## ABB ERWEITERT AZIPOD®-FAMILIE FÜR FÄHREN UND ROPAX-SCHIFFE

Seit seiner Einführung im Jahr 1990 hat sich der elektrische Azipod-Antrieb als Standardlösung für eine breite Palette von Schiffen unterschiedlicher Größe etabliert. Auf vielfachen Kundenwunsch schließt ABB mit einer neuen Reihe von Azipod-Antrieben für den mittleren Leistungsbereich von 7,5 bis 14,5 MW die Lücke zwischen den bereits verfügbaren Antrieben mit niedriger und hoher Leistung. Neben Fähren und RoPax-Schiffen (für Fahrzeuge und Passagiere) eignet sich die neue Serie für größere Offshore-Bauschiffe, mittelgroße Kreuzfahrtschiffe und Shuttle-Tanker. Damit deckt die Azipod-Antriebsfamilie nun einen Leistungsbereich von 1 bis 22 MW ab.

Das Herzstück der neuen Antriebe bilden die neuen ABB-Permanentmagnetmotoren der vierten Generation. Diese basieren auf bewährten Azipod-Antriebstechnologien, wurden aber in puncto Leistung und Wirkungsgrad weiter verbessert. Die Einfachheit der Konstruktion des Antriebssystems sorgt für eine hohe Robustheit und Zuverlässigkeit und vereinfacht die Wartung.

Darüber hinaus ist die neue „M“-Reihe darauf ausgelegt, Eignern und Betreibern von Fähren und RoPax-Schiffen einen operativen Nutzen zu bieten. So ist das Antriebssystem von der Höhe her so konzipiert, dass es auf RoPax-Schiffen unter dem Autodeck installiert werden kann, d. h. es beansprucht keinen Platz an Deck und behindert die Fahrzeugbewegung nicht.

Die neue Serie basiert auf den gleichen einfachen, robusten und wartungsfreundlichen Konstruktionsprinzipien, dank denen Azipod-Antriebe in fast drei Jahrzehnten auf 25 Schiffstypen eingesetzt wurden. Die neuen Antriebe kommen zu einer Zeit auf den Markt, in der die Eigner von Fähren und RoPax-Schiffen zunehmend unter dem Druck stehen, ihre Energieeffizienz zu steigern und Emissionen zu reduzieren. •





## OMNICORE™-ROBOTERSTEUERUNG FÜR IERA-INNOVATIONSPREIS NOMINIERT

OmniCore™, eine neue Generation von Robotersteuerungen von ABB, die für die flexiblen Fabriken der Zukunft entwickelt wurde, ist für den Invention and Entrepreneurship in Robotics and Automation (IERA) Award nominiert. Der von der International Federation of Robotics (IFR) und der IEEE Robotics and Automation Society verliehene Preis gilt als eine der bedeutendsten Auszeichnungen in der Robotikindustrie. Ausgezeichnet werden Unternehmen und Erfinder, die innovative Ideen in marktverändernde Produkte verwandeln.

ABB-Robotersteuerungen sind bekannt für ihre erstklassige Bahngenaugigkeit und hervorragenden Zykluszeiten. Aufbauend auf diesen Eigenschaften hat ABB mit OmniCore eine neue Steuerung entwickelt, die die Flexibilität bei der Fertigung deutlich erhöht und gleichzeitig Zukunftssicherheit zur Integration digitaler Technologien bietet.

So haben Kunden die Möglichkeit, einen vielfältigeren Produktmix mit kleineren Stückzahlen zu produzieren, ohne dabei an Produktivität einbüßen zu müssen.

Dank der „Power-on and Connect“-Funktionalität und ABB Ability™ kann OmniCore mit erweiterten Services zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit verbunden werden. Außerdem ist eine problemlose Anbindung an eine Vielzahl von Feldbussen, Bildverarbeitungssystemen und Kraftsteuerungen zur Schaffung ganzheitlicher Lösungen möglich. OmniCore bietet eine verbesserte Cybersicherheit zur Verhinderung von Datenverlust und schließt damit den Kreis zwischen Konnektivität, Daten und Steuerung. Außerdem enthalten ist SafeMove2, eine ABB-Softwarelösung, die Industrieroboter in kollaborative Roboter verwandelt, die ohne Produktivitätseinbußen Seite an Seite mit Menschen arbeiten können.

Trotz aller fortschrittlichen Merkmale ist OmniCore einfach und intuitiv in der Anwendung. Der Zugang erfolgt über eine neu gestaltete FlexPendant-Benutzerschnittstelle mit einem einfachen Touchscreen für die visuelle Programmierung. •

## UNTERWASSER-ELEKTRIFIZIERUNGSSYSTEM ERMÖGLICHT DEN SPRUNG INS TIEFE WASSER

Im Jahr 2013 startete ABB mit ihren Industriepartnern Equinor, Total und Chevron ein umfangreiches Projekt mit dem Ziel, eine vollständige Unterwasser-Elektrifizierungslösung für die Öl- und Gasindustrie zu entwickeln und zu testen. Um den Betrieb an entlegenen Standorten in großen Wassertiefen zu ermöglichen, entwickelte ABB verschiedene modulare Komponenten und Einheiten für ein integriertes Unterwasser-Elektrifizierungssystem<sup>1</sup>. Das System mit einer erwarteten Lebensdauer von 30 Jahren besteht aus drehzahlgeregelten Antrieben (VSDs), einer Schaltanlage und einem Schutz- und Steuerungssystem und soll Unterwasserpumpen und -kompressoren mit einer Spitzenleistung von 100 MW in Wassertiefen von bis zu 3.000 m über Entfernungen von bis zu 600 km versorgen. Dies hilft, wertvollen Platz auf Plattformen zu sparen, die Stromversorgungsanforderungen zu verringern und Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

In einem pragmatischen, schrittweisen Ansatz wurden Simulationen, Labor- und Feldversuche durchgeführt, um sicherzustellen, dass alle Komponenten, Baugruppen und Einheiten die Qualifikationsanforderungen gemäß DNV RP-A203 (Technologie-Reifegrade) und API 17F (Steuerungssysteme in der Unterwasserproduktion) erfüllen.

Nachdem die Ergebnisse für die einzelnen Geräte zufriedenstellend ausfielen, wurde der Prototyp eines Mittelspannungs-VSD im flachen Wasser eines Hafens über 1.000 Stunden lang erfolgreich getestet<sup>2</sup>.

Im Juni 2019 wurde ein Prototyp des gesamten Elektrifizierungssystems bestehend aus zwei parallel geschalteten VSDs mit Schaltanlage und Steuerung einem Flachwassertest unterzogen – dieses Mal über 3.000 Stunden. Die Ergebnisse dieser und aller vorherigen Qualifizierungsprüfungen bestätigen die Zuverlässigkeit des Systems unter rauen Unterwasserbedingungen. Der erfolgreiche Abschluss der Flachwassertests im November 2019 zeigt, dass die Elektrifizierungslösung für den Einsatz in großen Wassertiefen bereit ist. •

### Fußnoten

1) Mehr über das System erfahren Sie im Artikel „Zukunftsweisende Technologie für die Stromversorgung auf dem Meeresboden“ auf Seite 44.

2) Siehe auch „Umrichter für den Unterwassereinsatz“ auf Seite 50.



## ULTRASCHNELLER HOCHSTROM-DC-LEISTUNGSSCHALTER AUF LEISTUNGSELEKTRONIKBASIS



Gleichstrom-Verteilssysteme erfordern häufig einen sehr schnellen Fehlerschutz, der auch eine hohe Selektivität, Überlebensfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit nach einem Fehler bietet. ABB hat einen halbleiterbasierten DC-Leistungsschalter (SS DCCB) mit äußerst geringen Leitverlusten, hoher Leistungsdichte und ultraschneller Ansprechzeit entwickelt, der diese Anforderungen erfüllt. Die Hochstrom-Schalter sind für Nennströme von 1.000 bis 5.000 A bei einer Betriebsspannung von 1.000 V DC ausgelegt und können einen prospektiven Kurzschlussstrom von mehreren Hundert kA bis zu 1.000-mal schneller abschalten als elektromechanische Leistungsschalter.

Der SS DCCB von ABB basiert auf der Parallelschaltung von rückwärts sperrenden Silizium-IGCTs (RB-IGCTs), die eigens von ABB entwickelt wurden. Der Leistungsschalter kann mit einer Wasserkühlung zur Erhöhung der Leistungsdichte oder mit einer fortschrittlichen Zweiphasenkühlung ausgestattet werden, die ähnlich einfach aufgebaut ist wie eine Luftkühlung, aber fast so leistungsfähig ist wie eine Flüssigkeitskühlung und geringe

Installations- und Wartungskosten mit einer langen Lebensdauer verbindet. Die Leistungsverluste sind um 70 % geringer als bei vergleichbaren leistungselektronischen Lösungen.

Mit der wachsenden Popularität von voll-elektrischen Schiffen gewinnt auch die Gleichstrom-Verteilung an Bord zunehmend an Bedeutung, da sie die Handhabung großer Lastflüsse auf engem Raum mit hoher Systemeffizienz und niedrigen Lebenszykluskosten ermöglicht. Der SS DCCB eignet sich perfekt für solche maritimen Anwendungen und wird auch dort seine erste Anwendung finden. Er ist der erste ABB-Leistungsschalter, der sich direkt in jedes DC-Verteilssystem eines Schiffs integrieren lässt. Eine modulare Architektur, vereinfachte Hardware und digitale Schnittstellen sorgen dabei für eine maximale Flexibilität.

Darüber hinaus ist der neue Leistungsschalter in vielen weiteren Bereichen wie DC-Mikronetze, batteriegestützte Energiespeichersysteme, Rechenzentren, Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge usw. einsetzbar. Die erste kommerzielle Anwendung ist in diesem Jahr vorgesehen. •



---

## ANOMALIEERKENNUNGS-APP REDUZIERT STILLSTANDSZEIT VON ROBOTERN

Jeder weiß, was eine Anomalie ist – oder? Wenn an Ihrem Hemd alle Knöpfe bis auf einen zusammenpassen, ist das ziemlich offensichtlich. Doch wenn es darum geht, bei Fabrikrobotern echte Alarme von Fehlalarmen zu trennen, kann es knifflig werden.

Die Anomalieerkennung – ein Teilbereich des maschinellen Lernens – befasst sich mit der Erkennung und Identifizierung von Abweichungen in großen Datenmengen oder -strömen. Solche Abweichungen können – wenn sie wiederholt erkannt und lokalisiert werden – frühzeitig vor Störungen warnen oder Ereignisse bestätigen, die menschliches Eingreifen erfordern.

Mithilfe eines historischen Ansatzes haben die ABB-Softwareingenieure einen statischen Weg entwickelt, um die Ereignisverteilung für einzelne Roboter in Fabrikumgebungen zu bestimmen und Statusinformationen von in Betrieb befindlichen Robotern in Echtzeit zu erfassen. Das

Verfahren ist darauf ausgelegt, Anomaliewerte für die Roboterflotte in Dashboards anzuzeigen, Ereignisalarme automatisch zu generieren, eine proaktive und prädiktive Wartung zu unterstützen, Stillstandszeiten zu reduzieren, Mikro-Stopps zu verhindern und letztendlich die Gesamtanlageneffektivität (OEE) zu maximieren.

Das Ziel ist die Entwicklung eines Tools, das es Kunden ermöglicht, Daten zu physikalischen Parametern sowie von Robotern erzeugte Alarme und Ereignisse in gebündelter Form zu verwalten und Statusupdates und Trenddarstellungen zu erhalten, die auf zukünftige Probleme hinweisen und eine schnelle Bestimmung von Problemursachen ermöglichen.

Das auf maschinellen Lernverfahren basierende Tool wird als Anwendung mit der neuesten Generation der ABB Ability™ Connected Services angeboten werden. •

## EC TITANIUM – DIE INTEGRIERTE INTELLIGENTE MOTOR- UND ANTRIEBSLÖSUNG

Die neue intelligente Motor- und Antriebslösung EC Titanium von ABB integriert Motor und drehzahlgeregelten Antrieb (VSD) in einem installationsfreundlichen Paket. EC Titanium richtet sich an Anwendungen im Leistungsbereich von 1 bis 10 PS und kombiniert modernste Motor- und Umrichter-Technologie zu einer äußerst effizienten, kompakten und vernetzten Lösung.

Als Motorkonzept wurde ein ferritmagnetunterstützter Synchronmotor gewählt, da diese Motoren aufgrund ihrer geringen Verluste auf kostengünstige Weise die Wirkungsgrad-Klasse IE5 erreichen können. Weitere Vorteile sind ein installationsfreundliches Design und eine hohe Leistungsdichte (doppelt so hoch wie bei Asynchronmotoren).

Dank des integrierten VSD können Kunden die Antriebsdrehzahl an die Prozessanforderungen anpassen und ihre Betriebsmittel mit optimalem Wirkungsgrad betreiben, was die Lebensdauer verlängert, Energie spart und die Erfüllung von Effizienzvorgaben erleichtert. Das System bietet eine hohe Gesamteffizienz bei Vollast.

Im Teillastbereich, in dem viele Kunden arbeiten, kann ein um 16 % besserer Wirkungsgrad erzielt werden als mit einem entsprechenden Asynchronmotor.

Zu den weiteren Vorteilen für Pumpen- und Lüfteranwendungen gehören reduzierte Inventaranforderungen, da mit demselben Paket unterschiedliche Durchflussmengen erreicht werden können. Darüber hinaus tragen integrierte Produkte durch eine geringere Teilezahl und vereinfachte Beschaffung und Montage zur Kostenreduzierung bei. EC Titanium bietet Kunden verschiedene Konnektivitätsoptionen (festverdrahtet, RS485 oder Bluetooth). Der Umrichter fungiert als Sensor für das Motor-/Umrichter-Paket, außerdem kann ein Smart Sensor für Motoren zur Messung zusätzlicher Leistungsparameter hinzugefügt werden. Die Daten können an die ABB Ability™-Plattform übertragen werden, wo sie von fortschrittlichen Algorithmen zum Zweck der Zustandsüberwachung und vorausschauenden Wartung auf Unregelmäßigkeiten analysiert werden. •



## NEUE PICK-&PACK-SOFTWARE VERKÜRZT INBETRIEBNAHMEZEITEN VON TAGEN AUF STUNDEN

Wie können Hersteller effizient auf Forderungen nach individueller Massenfertigung und kürzeren Produktlebenszyklen reagieren? Eine Lösung bietet die digitale Zwillingstechnologie, die es Kunden ermöglicht, Konfigurationen an virtuellen Produktionslinien zu testen, bevor reale Linien verändert oder gebaut werden.

Vor diesem Hintergrund hat ABB Robotics die dritte Generation der PickMaster®-Software für robotergestützte Pick-&-Pack-Anwendungen auf den Markt gebracht.

Die Software ist seit über 18 Jahren Marktführer und branchenweiter Maßstab für die einfache Konfiguration komplexer, robotergestützter, kamerageführter Kommissionier-, Verpackungs- und Handhabungssysteme mit willkürlichem Produktfluss.

Erstmals mit digitaler Zwillingstechnologie ausgestattet, verkürzt die Software die Inbetriebnahmezeiten von mehreren Tagen auf wenige Stunden und Umrüstzeiten von Stunden auf Minuten. Sie bietet größere Flexibilität und eine verbesserte Visualisierung der Zusammenarbeit von mehreren Robotern und ermöglicht so einen optimierten Durchsatz ohne Produktverluste oder unvollständige Packungen bei der Schlauchbeutel-Verpackung, Tray-Beladung, Kisten- und Kartonverpackung und -handhabung.

Da die Software die Offline-Programmierung von Pick- und Packaufgaben unterstützt, kann eine komplette Roboterinstallation ohne Beeinträchtigung der realen Produktionslinien in einer virtuellen Umgebung simuliert und getestet werden. Mithilfe der digitalen Zwillingstechnologie lässt sich der Pickvorgang in der virtuellen Welt in Echtzeit optimieren, während der reale Prozess entsprechend reagiert. Dies hilft Kunden nicht nur dabei, zeit- und kostenintensive Risiken zu verringern, sondern auch Projekteinführungszeiten zu verkürzen, da Produktlinien ohne Überraschungen bei der Inbetriebnahme schneller installiert und hochgefahren werden können.

PickMaster® bietet zudem eine moderne Bedienoberfläche für den Fertigungsbereich, die Bedienern und Anlagenmanagern vollen Einblick und Kontrolle über die Produktionsergebnisse gibt. Die Kompatibilität mit dem PackML-Industriestandard ermöglicht eine nahtlose Integration mit anderen Verpackungsmaschinen sowie Produktions- und Fabrikplanungssystemen.

PickMaster® ist in verschiedenen Konfigurationen erhältlich und funktioniert nahtlos mit allen ABB-Robotern sowie verschiedenen virtuellen und physischen Maschinen. Die Software eignet sich besonders für Fabriken und Produktionslinien, bei denen es auf einen höheren Output, schnellere Reaktionszeiten und rasche Umrüstungen ankommt. •





## A200-H – DER NEUE MASSSTAB IN DER EINSTUFIGEN TURBOAUFLADUNG

Mit Druckverhältnissen von bis zu 5,8 und einem Wirkungsgrad von bis zu 66 % sind die ABB-Turbolader vom Typ A100-H für die einstufige Aufladung bei einem Mitteldruck von bis zu 22 bar zurzeit das Maß der Dinge. Für höhere Mitteldrücke gibt es das zweistufige Power2-System. Doch für Anwendungen mit einem Mitteldruck zwischen 22 und 24 bar ist eine zweistufige Aufladung meist zu komplex.

Um diese Lücke zwischen ein- und zweistufiger Aufladung zu schließen, hat ABB den einstufigen A200-H mit einem Druckverhältnis von bis zu 6,5 und einem Spitzenwirkungsgrad von über 69 % entwickelt. Der A200-H ermöglicht die einstufige Aufladung von schnelllaufenden Gasmotoren mit etwa 24 bar Mitteldruck bei gleichzeitiger Steigerung des Motorwirkungsgrads im Vergleich zum A100-H.

Die Turbine des A200-H wurde so auf den Verdichter abgestimmt, dass bei Erfüllung der mechanischen Anforderungen ein größtmöglicher Turbolader-Wirkungsgrad erzielt wird. Mit Blick auf zukünftige Peak-Shaving-Anwendungen mit vielen Start-Stopp-Zyklen wurde zudem das Gehäusedesign optimiert<sup>1</sup>.

Dank des patentierten Lagermoduldesigns hat der Kunde erstmalig die Wahl zwischen zwei Lagerkonzepten: den bewährten Gleitlagern von ABB oder neu entwickelten, hocheffizienten Kugellagern. Letztere haben bei Teillast einen Leistungsverlust von 15 % gegenüber der Gleitlagerausführung und verkürzen die Zeit bis zum Erreichen der Vollast um 15 %.

Eine Überwachung der Drehzahl, Temperaturen, Start-Stopp-Zyklen, Umgebungsbedingungen und anderer Parameter wird ermöglicht durch integrierte Sensoren oder den Zugriff auf die Daten des Generatorsystems. Dies wiederum ermöglicht eine belastungsbasierte Beurteilung der Lebensdauer einzelner Komponenten, was z. B. dazu führen kann, dass Rotoren länger betrieben werden können, als es starre, konventionelle Austauschkonzepte zulassen. ●

### — Fußnote

1) Mehr über den A200-H erfahren Sie im Artikel „A200-H – der neue Maßstab in der einstufigen Turboaufladung“ auf Seite 56.



# Digitale Zukunft



20



24



30

Mehr als jede andere Technologie in der Vergangenheit verwandeln digitale Werkzeuge ganze Volkswirtschaften und Kulturen. Diese Entwicklungen – und deren Rückwirkung auf die Nutzung der Werkzeuge – erfordern neues, innovatives Denken hinsichtlich der Art und Weise, wie Unternehmen arbeiten. Auch ABB befasst sich mit zentralen Aspekten dieses Wandels.

- 20 Die Zukunft der Industrie: digitale Transformation
- 24 Innovation im Zeitalter der vierten industriellen Revolution
- 30 OPC UA und TSN: Industrie 4.0 für Endgeräte
- 36 Gezielte Wertschöpfung bei industriellen KI-Projekten durch Co-Innovation



36



## DIGITALE ZUKUNFT

# Die Zukunft der Industrie: digitale Transformation

Die Industrie steht an der Schwelle eines nie dagewesenen Wandels. Die Digitalisierung bringt fundamentale Veränderungen mit sich, die sich auf die Organisation, Kunden-Lieferanten-Beziehungen und sogar die Weiterbildung von Mitarbeitern auswirken.



**Reiner Schönrock**  
ABB Corporate  
Communications  
Zürich, Schweiz

reiner.schoenrock@  
ch.abb.com

Der Wunsch nach höherer Produktivität, immer kürzere Produktlebenszyklen, der Trend zur kundenindividuellen Massenfertigung sowie gestiegene Anforderungen an Umweltschutz und Compliance zusammen mit ständig leistungsfähigeren digitalen Funktionen zur Kommunikation, Datenauswertung oder -präsentation sorgen für Umwälzungen in den globalen Wertschöpfungsketten und einen tiefgreifenden Strukturwandel in Industrien. Um in diesem disruptiven Umfeld wettbewerbsfähig zu bleiben und selbst hochindividualisierte Produkte in kleinsten Losgrößen kostengünstig und nachhaltig anbieten zu können, brauchen die Industrien ein Ökosystem, das durch stark vernetzte, datenintensive digitale Lösungen und Dienstleistungen angetrieben wird: Die Industrien brauchen eine digitale Transformation.

Konnektivität, Kompatibilität und Kollaboration werden durch digitale Technik verbessert und machen die Fertigungs- und Prozessindustrie so flexibel, produktiv und effizient wie nie zuvor. Die digitale Transformation der Industrie – in unterschiedlichen Ausprägungen auch als vierte industrielle Revolution, Industrial Internet of Things, Industrie 4.0, China 2025 usw. bezeichnet – kann einzelne Fertigungs- oder Prozessschritte optimieren, aber auch globale Wertschöpfungsketten und Ökosysteme umwälzen. ABB ist ein führender Anbieter entsprechender Lösungen in diesen Bereichen, die unter der Bezeichnung ABB Ability™ vermarktet werden.

Voraussetzung für die digitale Transformation ist die Konnektivität der Assets wie etwa Werkzeuge,

Maschinen, Materialien und Mitarbeiter entlang der Wertschöpfungskette →01. Dadurch wird die Verbindung der realen, physischen mit der vernetzten, digitalen Welt erreicht. Dafür sind einheitliche Kommunikationsprotokolle und Datenformate sowie Hardware-Schnittstellen erforderlich. ABB ist weltweit in den maßgebenden Organisationen zur Entwicklung von Standards vertreten.

**Konnektivität, Kompatibilität und Kollaboration werden verbessert, und Industrien werden flexibler, produktiver und effizienter.**

Verstehen die Assets den Sinn einer Information, weil sie das gleiche Vokabular nutzen, dann verstehen sie Nachrichten untereinander und können darauf reagieren. Dies schafft die Voraussetzung dafür, dass sie autonom interagieren und die zu erfüllenden Aufgaben erledigen können. Der Einsatz fortschrittlicher Verfahren wie etwa industrielle künstliche Intelligenz ist ein Forschungs- und Entwicklungsgebiet von ABB auf dem Weg, Industrien autonom zu machen.

Der digitale Zwilling, das digitale Abbild eines physischen Assets, ist eine Ausprägung der digitalen Transformation. Damit lassen sich Zeiten für Entwicklung, Produktion und Tests deutlich verkürzen und die Kosten für Prototypen und den Hochlauf der Produktion reduzieren.

—  
Titelbild: Der  
Zweiarm-Roboter  
Yumi von ABB setzt  
neue Maßstäbe in der  
Mensch-Roboter-Kolla-  
boration.



01

Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der digitalen Zwilling-Technologie sind konsistente Daten entlang des gesamten Asset-Lebenszyklus. Das Asset selbst kann ein Produkt, ein System oder eine Fabrik sein. Mit einem digitalen Zwilling lassen sich Produktdetails verbessern oder Optimierungen entlang der Wertschöpfungskette vornehmen.

Datenintegrität und Cyber-Security-Maßnahmen stellen sicher, dass die entlang der Wertschöpfungskette verarbeiteten Daten vollständig und unverändert bleiben. Nur dann können aus den Daten die gewünschten Informationen zur Optimierung der Prozesse gewonnen werden.

Den Menschen in heutigen Betrieben soll damit die Arbeit erleichtert und nicht streitig gemacht werden. Vielmehr übernehmen autonome Systeme Aufgaben, die monoton, gefährlich oder anstrengend sind, und treffen Entscheidungen, für die das Eingreifen von Menschen nicht erforderlich ist. Erst wenn die Systeme richtige Entscheidungen in Situationen treffen, die ihnen zuvor nicht beigebracht (programmiert) wurden, kann von autonomen Entscheidungen gesprochen werden →02.

Automatisierung kann anspruchsvolle Arbeitsplätze für Menschen schaffen. Um besser auf die Jobs von morgen vorbereitet zu sein, müssen

laut einer von ABB in Auftrag gegebenen Studie allerdings selbst gut gerüstete Länder ihre Aus- und Weiterbildungskonzepte überdenken. ABB selbst bereitet sich mit der Schaffung digitaler Arbeitsplatzumgebungen und der intensiven Schulung der Mitarbeiter in digitalen Automationstools bereits intensiv auf die Zukunft vor. Auch in der Hochschulausbildung ist ABB aktiv. So gründete das Unternehmen 2007 die Jürgen Dormann Foundation for Engineering Education. Die Stiftung vergibt weltweit Stipendien an Studenten der Elektrotechnik, die hervorragende akademische Leistungen vorweisen und zur Fortführung ihres Studiums finanzielle Mittel benötigen. Mit dem 2016 erstmals vergebenen ABB-Forschungspreis zu Ehren von Hubertus von Grünberg wird alle drei Jahre ein Betrag von 300.000 US-Dollar zu Forschungszwecken ausgelobt.

---

Der digitale Zwilling ermöglicht eine deutliche Verkürzung der Zeiten für Entwicklung, Produktion und Tests.

Neben der Interoperabilität der einzelnen Elemente und der zunehmenden Autonomie wird mit der digitalen Transformation auch ein

—  
01 Menschen und Roboter arbeiten immer enger zusammen. Virtual-Reality-Tools unterstützen Entscheidungen und erleichtern den Zugang zu Informationen in verschiedensten Anwendungen von der Vor-Ort-Wartung bis zum Produktdesign.

—  
02 Durch Scannen des QR-Codes auf dem Frequenzrichter vom Typ ACS880 erhält der Techniker unmittelbaren Zugang zu einer Fülle von Daten.

höherer Grad an Nachhaltigkeit angestrebt. So können digitale Technologien dabei helfen, die Belastung des Klimas zu reduzieren. ABB treibt den Klimaschutz unter dem Motto „Mission to Zero“ voran und hat schon signifikante Ergebnisse erzielt. Das Unternehmen erzielt bereits über die Hälfte seiner Umsätze mit umweltfreundlichen Produkten und Systemen, Tendenz steigend. Produkte für die Gebäudeautomation im privaten und gewerblichen Bereich ermöglichen die Energieoptimierung und komfortable Steuerung von elektrischen Verbrauchern. So können dank digitaler Transformation Energieeinsparungen von bis zu 30 % erreicht werden.

Unter ABB Ability™ hat ABB viele Lösungen zur digitalen Transformation zusammengefasst und erweitert ihr Angebot von Produkten und Dienstleistungen auf der Grundlage einer einheitlichen Plattform ständig weiter. Die derzeit rund 200 Lösungen können durch intensiven Austausch mit Kunden in Customer Experience Centern individuell angepasst werden.

—  
ABB bereitet sich mit der Schaffung digitaler Arbeitsplatzumgebungen auf die Zukunft vor.

#### Bereit für die Transformation

Die digitale Transformation der Industrie hat unterschiedliche Ausprägungen. Der Begriff selbst ist der kleinste gemeinsame Nenner für die vielfältigen Umwälzungen, die zurzeit stattfinden. Die digitale Transformation umfasst Initiativen und Konzepte wie die vierte industrielle Revolution, das Industrial Internet of Things, Industrie 4.0, Industrial Internet Consortium, China 2025 und viele andere mehr. Über die einzelnen Initiativen und Konzepte sollte nur mit Hinweis auf die Einbettung in die digitale Transformation kommuniziert werden. •



## DIGITALE ZUKUNFT

# Innovation im Zeitalter der vierten industriellen Revolution

Wie können Innovationsprozesse verändert werden, um das Potenzial der vierten industriellen Revolution bestmöglich zu nutzen? Und wie können Unternehmen prozess- oder technologiespezifische Probleme identifizieren, die sich mit dem Ziel, ganze Industrien zu revolutionieren, über Standorte oder Industriebereiche hinweg replizieren lassen? Der Autor eines neuen Buches über die Technologien und Geschäftsstrategien von morgen erklärt.



**Wilhelm Wiese**  
Corporate Technology  
Center India  
ABB Global Industries  
and Services Private  
Limited  
Bengaluru, Indien

wilhelm.wiese@  
in.abb.com

Mit Anbruch der vierten industriellen Revolution und angesichts der zunehmenden Geschwindigkeit, mit der sich Produkte und ganze Märkte verändern, ist der Aspekt der Operational Excellence für den geschäftlichen Erfolg von Unternehmen entscheidender denn je. In einer Welt, in der die Entwicklung und der Einsatz in industriellen Anwendungen einen kontinuierlichen Prozess bilden, sind Entwicklungsmodelle und -verfahren mit Aktualisierungs- und Wartungszyklen von Monaten oder gar Jahren nicht mehr zeitgemäß. Die vierte industrielle Revolution erfordert einen Paradigmenwechsel hinsichtlich der Art und Weise, wie neue Produkte, Technologien und Lösungen auf den Markt gebracht werden, damit sie mit den Erwartungen Schritt halten können.

**Unternehmen müssen Probleme identifizieren, die sich über Standorte oder Industriebereiche hinweg replizieren lassen.**

Ein bedeutendes Schlagwort in diesem Zusammenhang ist Problemlösung. Viele Unternehmensbosse kündigen enthusiastisch die Digitalisierung ihrer Anlagen oder die Umwandlung ihres Unternehmens von einem Produktanbieter zu einem Lösungsanbieter an. Wozu dieser

ganze Medienrummel? Ist dies nicht Sinn und Zweck, warum wir neue Produkte, Dienstleistungen und Prozesse entwickeln? Wenn es darum geht, mit den Erwartungen Schritt zu halten oder ihnen gar voraus zu sein, liegt die wahre Herausforderung nicht in der Problemlösung, sondern in der Problemidentifizierung. Oder einfach ausgedrückt: Ein Unternehmen muss das Problem definieren, bevor es eine Lösung vorschlagen kann. Im Kontext der vierten industriellen Revolution bedeutet dies, herauszufinden, wo neue Technologien Wettbewerbsvorteile gegenüber traditionellen Technologien bieten können →01. Auf diese Weise lassen sich sowohl der Nutzen für Anlagenbetreiber als auch neue Umsatzquellen für industrielle Produktanbieter und Dienstleister identifizieren.

Doch das ist leichter gesagt als getan. Was bei der Ankündigung auf Vorstandssitzungen nach interessanten neuen produktivitätssteigernden digitalen Strategien klingt, kann bei der praktischen Umsetzung schnell zu gewöhnlichen Implementierungen führen. Was am Ende des Tages herauskommt, sind Standardlösungen, die bestehenden Produkten oder Prozessoptimierungen unter dem Mantel digitaler Lösungen nur einen geringen Impuls verleihen. Hinzu kommt, dass viele solcher Maßnahmen letztendlich nur auf sehr spezifische Bereiche anwendbar und nicht skalierbar sind.



02

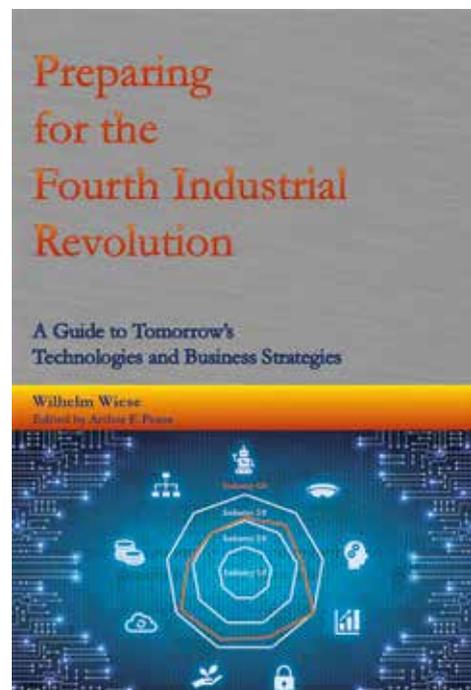
— 01 Wilhelm Wiese ist der Autor eines neuen Buchs, das sich mit der vierten industriellen Revolution befasst. Der vorliegende Artikel basiert auf einem Auszug aus diesem Buch (ISBN 978-1-6871-4652-6).

— 02 Bei industriellen Prozessen gilt es, Zusammenhänge zwischen Hunderten von Variablen zu finden. Ein neues, von ABB entwickeltes Analysemodul nutzt Big Data, um verdächtige Muster zu erkennen und unerwünschte Ereignisse präzise vorherzusagen.

Solche pseudodigitalen Lösungen können zwar tatsächlich gut fürs Geschäft sein und auch Anlagenbetreibern nützen, doch sie bewirken weder einen sprunghaften Anstieg der Produktivität zur Verbesserung des Ertrags noch generieren sie neue Einnahmequellen für Lösungsanbieter, die den Umsatz signifikant steigern. Wenn sich Unternehmen einen bedeutenden Anteil am milliardenschweren Potenzial der vierten industriellen Revolution sichern wollen, müssen sie aktuelle Technologien hinterfragen. Dazu müssen sie, ausgehend vom Produktionsbereich, industrie-, prozess- oder technologie-spezifische Probleme identifizieren, die sich mit dem Ziel, ganze Industrien zu revolutionieren, über Standorte oder Industriebereiche hinweg replizieren lassen →02.

— „Wicked“ Probleme sollten auf keinen Fall gemieden werden, denn sie können ein enormes Potenzial bieten.

Daher muss jede Problemlösung mit der Bestimmung der Problemstellung und des Nutzens dieser Lösung beginnen. Erst nach Abschluss des zweiten Schritts sollte ein Unternehmen den Innovationsprozess initiieren und prüfen, inwieweit neue



01

Technologien der vierten industriellen Revolution eine revolutionäre Wirkung haben können und eine Wertschöpfung für den Kunden bieten.

**Das Potenzial von „wicked“ Problemen**

Wo sollte dieser Gesamtprozess beginnen? Ein guter Ausgangspunkt ist der Kern des heutzutage sehr populären Design-Thinking-Prozesses, dessen fünf Phasen wie folgt beschrieben werden können: (Re-)Definition des Problems, Verstehen und Bewerten des Nutzens, Ideengenerierung, Implementierung, Testen [1]. Dabei ist der Prozess weniger als eine Abfolge einzelner Schritte, sondern vielmehr als ein System von sich überlappenden Prozessen zu verstehen. So können sich Inspiration, Ideenentwicklung und Implementierung mehr als einmal untereinander rückwirkend beeinflussen, während ein Team seine Ideen verfeinert und neue Möglichkeiten sondiert.

Design Thinking ist besonders nützlich, wenn es sich um sogenannte „wicked“ Probleme handelt. Was Horst Rittel und Melvin Weber als „wicked“ Probleme bezeichnen, lässt sich frei als „rätselhafte Probleme“ übersetzen [2], also Probleme, die schlecht definiert, vertrackt und deshalb schwierig oder unmöglich lösbar erscheinen. Solche Probleme sollten auf keinen Fall gemieden werden, denn sie können ein enormes Potenzial bieten. Tatsächlich besteht die eigentliche Gefahr darin, dass wir unser Denken auf wohldefinierte Probleme beschränken, denn diese veranlassen uns dazu, Lösungen zu entwickeln, die auf Standardverfahren oder aktuellem technischen Wissen basieren.

Einen Eindruck davon, was „wicked“ Probleme in Bezug auf Entscheidungsfindungsprozesse im Kontext der vierten industriellen Revolution sind, vermittelt das angepasste Johari-Fenster →03a [3].

Das ursprünglich von Psychologen für die Arbeit in Selbsthilfegruppen entwickelte Johari-Fenster kann Nutzern dabei helfen, bisher verborgene Probleme zu erkennen, und somit Impulse zur Entwicklung neuer Lösungen liefern. Wie in →03b dargestellt, kann das Fenster in vier Hauptlösungsbereiche unterteilt werden. Der erste Bereich umfasst inkrementelle Lösungen. Ist ein Problem einem selbst und anderen in einer Branche bekannt, kann man davon ausgehen, dass es bald mit heutigen Technologien oder einigen inkrementellen Änderungen gelöst wird.

—  
**Lösungen für „wicked“ Probleme haben eine revolutionäre Wirkung und somit allerbeste Erfolgsaussichten.**

Der zweite Bereich umfasst sogenannte „niedrig hängende Früchte“, also Lösungen, die einen schnellen Erfolg versprechen. Hier sind die Problemstellungen für Branchenexperten (z. B. Anlagenbetreiber) bekannt. Diese sind sich einer Verbesserungsmöglichkeit bewusst, von der ein Lösungsanbieter bisher aber noch nichts weiß. Dieser Bereich kann in Kundenworkshops, sogenannten Co-Creation-Workshops, behandelt werden, in denen Lösungsanbieter anfangen, die Herausforderungen von Anlagenbetreibern zu verstehen, und technische Experten einbeziehen, um gemeinsam eine Lösung zu erarbeiten. Der daraus resultierende Informationsaustausch unterstützt die Formulierung wohldefinierter Problemstellungen, die gute Aussichten haben, zu replizierbaren und skalierbaren Lösungen zu führen.

Der dritte Bereich umfasst hypothetische Problemstellungen. Hier sind die Risiken hoch, weil der Lösungsanbieter möglicherweise viel Geld in die Entwicklung investieren muss, ohne eine sichere Aussicht auf Erfolg zu haben, da die Lösung vom Kunden nicht als technisch notwendig erachtet wird oder keine ausreichende Wertschöpfung bietet.

Damit kommen wir schließlich zum vierten Bereich: „wicked“ Probleme. Diese sind so etwas wie der Treibstoff der vierten industriellen Revolution. Hier ist das Risiko offensichtlich hoch, da der Innovationsprozess komplex ist und einige Ideen mit Sicherheit scheitern werden. Andererseits hat das Lösen von „wicked“ Problemen eine revolutionäre Wirkung, d. h. die daraus resultierenden Lösungen haben allerbeste Erfolgsaussichten.

	Mir bekannt	Mir unbekannt
Anderen bekannt	Öffentlicher Bereich	Blinder Fleck
Anderen unbekannt	Geheimer Bereich	Unbekannter Bereich

03a

	Dem Lösungsanbieter bekannt	Dem Lösungsanbieter unbekannt
Der Branche bekannt	Inkrementell Geringes Geschäftspotenzial Geringes Risiko	Niedrig hängende Früchte Hohes Geschäftspotenzial Geringes Risiko
Der Branche unbekannt	Hypothetisch Geringes Geschäftspotenzial Hohes Risiko	<b>Wicked</b> Hohes Geschäftspotenzial Hohes Risiko

03b

—  
03 Das ursprünglich von Psychologen für Selbsthilfegruppen entwickelte Johari-Fenster kann Managern dabei helfen, versteckte Probleme zu erkennen und somit neue Lösungen zu entwickeln.

03a Das Johari-Fenster kann in vier Hauptlösungsbereiche unterteilt werden.

03b Anwendung des Johari-Fensters zur Darstellung verschiedener Arten von Problemstellungen.

—  
04 Ein typischer Batch-Reaktor.



04

## Revolutionäre Veränderungen ebnen den Weg für die Implementierung neuer Technologien der vierten industriellen Revolution.

### Behandlung eines „wicked“ Problems in der Praxis

Kürzlich hat sich ABB in Zusammenarbeit mit einem Kunden aus der chemischen Industrie mit einem Problem befasst, das in die Kategorie „wicked“ Probleme fällt [4]. In diesem Fall kam es bei einem Rezepturverfahren in der Kundenanlage gelegentlich zu unerwarteter Schaumbildung →04. In der chemischen und pharmazeutischen Industrie werden Rezepturverfahren auch als „Batch-Prozesse“ bezeichnet. Es handelt sich hierbei um die Ausführung mehrerer Produktionsschritte (Prozess) zur Erzeugung einer Produktcharge (Batch) nach einem genauen Rezept. Die Schaumbildung verursachte so starke Verunreinigungen im Produkt, dass eine Charge, deren Herstellung 17 Stunden gedauert hat, abgelassen und recycelt werden musste. Hinzu kamen mehrere Stunden unproduktiver Zeit für die Reinigung der Tanks und Rohrleitungen.

In Batch-Prozessen werden häufig Produkte hergestellt, die hohen Qualitätsstandards genügen müssen. Dennoch sind aufgrund der vielen beteiligten Variablen keine zwei Chargen absolut identisch. Faktoren wie die Qualität der Einsatzstoffe, Chargengröße, Temperatur, Feuchtigkeit und andere Umweltfaktoren können einander beeinflussen, sodass es zu abweichenden Bedingungen kommt. Zudem ist auch das Management des Produktionsprozesses selbst häufig mit Hunderten von Variablen verbunden, die in komplexen Wechselbeziehungen stehen. Angesichts dieser Faktoren ist eine genaue Überwachung für das Verständnis und das Management dieses hochgradig dynamischen Prozesses unerlässlich. In diesem speziellen Fall stand dem Kunden zwar eine große Menge an Daten zur Verfügung, doch es bestand nicht die Möglichkeit, die Daten von über 100 Prozessgrößen aus mehreren Hundert Chargen mit anderen Produktionsdaten wie Rohstoffspezifikationen, Stromverbrauch und Messungen von Prozessgrößen zu verknüpfen.

In enger Zusammenarbeit mit dem Kunden nutzten die Experten von ABB Verfahren aus dem Bereich der Big-Data-Analyse, um die Ursache des Problems zu bestimmen. Dabei konnten auffällige Muster in Form von Stromverbrauchsspitzen und Anomalien im Dampfstrom erkannt werden. Schließlich wurde gemeinsam mit dem

Kunden ein Vorhersagekonzept entwickelt, das in der Lage ist, äußerst präzise frühzeitige Warnungen ca. 30 Minuten vor einer wahrscheinlichen Schaumbildung zu liefern.

Bei der Zusammenarbeit nutzte das Team Batch-Insight von ABB →05, ein Tool, das Verfahren aus den Bereichen Business Intelligence, klassische Datenanalyse und maschinelles Lernen miteinander kombiniert, um Prozessexperten bei der ganzheitlichen Analyse von Batch-Prozessen zu unterstützen.

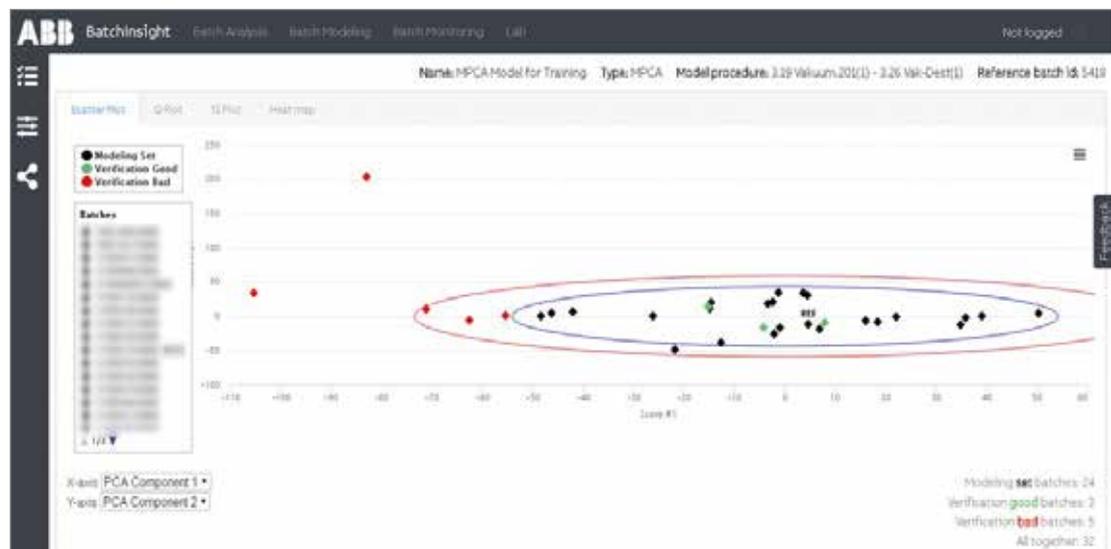
Was sagt uns dieses Beispiel? Es zeigt, dass revolutionäre Veränderungen bei der Problemlösung den Weg für die Implementierung neuer Technologien der vierten industriellen Revolution ebnen, die wiederum eine bedeutende Rolle bei der Identifizierung von schwierigen, schlecht definierten Problemen spielen können. An diesen Prozess kann z. B. eine durch künstliche Intelligenz gestützte Ursachenanalyse angeschlossen werden, um Lösungen abzuleiten, an die zuvor niemand gedacht hat. Alles, was notwendig ist, um sich eingehender mit den Daten und der Technologie auseinanderzusetzen, ist eine erste Idee, wo Verbesserungspotential bestehen könnte!

Doch auch Ideen benötigen einen Auslöser. Ein guter Ausgangspunkt ist es, die eigenen Anlagen zu besuchen und zu fragen, ob es irgendwelche Probleme mit der Produktivität oder Qualität gibt, die die Betriebsleiter nicht erklären können. So erhält man viele Hinweise. Darauf aufbauend können verschiedene Fragetechniken – z. B. ein Ishikawa-Diagramm [5] – verwendet werden, um Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu analysieren. Entscheidend bei der Anwendung dieser iterativen Fragetechnik in Bezug auf „wicked“ Probleme ist es,

nicht nach deren Ursache zu suchen. Das Verfahren dient vielmehr dazu, den Umfang der zu erfassenden Daten zu definieren und zu bestimmen, welche Technologie verwendet werden kann, um eine Ursache-Wirkungs-Beziehung zu finden, die mit den vorhandenen Daten und dem vorhandenen Wissen über diese Daten nicht erkannt werden kann. Dieser Vorgang kann als Prozess mit drei Schritten beschrieben werden →06.

## Die Lösungsentwicklung beginnt typischerweise mit Machbarkeitsstudien auf der Basis von Modellen oder digitalen Zwillingen.

Der erste Schritt ist eine erweiterte Datensuche. Hier besteht das Ziel darin, Daten zu finden, die eventuell in Beziehung zueinander stehen, aber bisher noch nicht in diesem Kontext betrachtet wurden. Im zweiten Schritt wird neueste Technologie wie maschinelle Lernverfahren oder künstliche Intelligenz auf die Daten angewendet, um neue Erkenntnisse über mögliche Ursachen zu gewinnen. Im dritten Schritt geht es um die Entwicklung einer Lösung. Hier wird es nun richtig interessant. Die Lösungsentwicklung für „wicked“ Probleme beginnt typischerweise mit mehreren Machbarkeitsstudien auf der Basis von Modellen oder digitalen Zwillingen. Diese sind unverzichtbar, da das Ergebnis von maschinellen Lernalgorithmen einer bestimmten Wahrscheinlichkeit unterliegt, die erst überprüft werden muss, bevor die Lösung in einem echten industriellen Prozess implementiert werden kann.





06

— 05 Das BatchInsight-Datenanalysemodul kombiniert Verfahren aus den Bereichen Business Intelligence, klassische Datenanalyse und maschinelles Lernen, um Prozessexperten bei der ganzheitlichen Analyse von Batch-Prozessen zu unterstützen.

— 06 Lösungsprozess für „wicked“ Probleme.

— 07 Co-Invention ist der Schlüssel zur erfolgreichen Lösung von „wicked“ Problemen.

#### Literaturhinweise

[1] Plattner, H. et al. (Hrsg.): „Design Thinking: Understand – Improve – Apply“. Understanding Innovation. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2011. S. xiv–xvi.

[2] Wikipedia: „Design thinking“. Verfügbar unter: [https://en.wikipedia.org/wiki/Design\\_thinking](https://en.wikipedia.org/wiki/Design_thinking) (abgerufen am 03.12.2019).

[3] Wikipedia: „Johari window“. Verfügbar unter: [https://en.wikipedia.org/wiki/Johari\\_window](https://en.wikipedia.org/wiki/Johari_window) (abgerufen am 03.12.2019).

[4] Der Autor bedankt sich bei Benedikt Schmidt vom ABB-Forschungszentrum in Deutschland für die Unterstützung bei der Zusammenstellung der Informationen für dieses Beispiel.

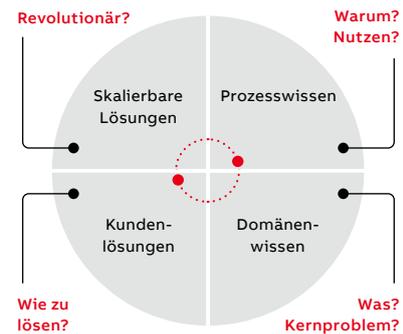
[5] Wikipedia: „Ishikawa diagram“. Verfügbar unter: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ishikawa\\_diagram](https://en.wikipedia.org/wiki/Ishikawa_diagram) (abgerufen am 03.12.2019).

Kann ein Anlagenbetreiber, Systemanbieter oder Gerätehersteller dies allein schaffen? Wahrscheinlich nicht. Ein guter Weg zur Problemlösung ist es, den Prozess in drei Schritte herunterzubrechen: Warum–Was–Wie →07, wobei es im letzten Schritt darum geht, wie Probleme auf traditionelle Weise gelöst werden und wie sie auf kollaborative Weise gelöst werden sollten, um eine revolutionäre Wirkung zu erzielen.

**Lösen von „wicked“ Problemen durch Co-Invention**  
Ausgehend vom „Warum“, sollte ein umfassendes Verständnis der Bedürfnisse und Ziele des Kunden sowie der Unterscheidungsmerkmale seiner Produkte die Grundlage für den gemeinsamen Lösungsprozess bilden. Ansonsten läuft man Gefahr, statt der eigentlichen Lösung nur technische Behelfe und Teillösungen zu implementieren. Mit anderen Worten, das Team muss die Produktionsprozesse und die Wertschöpfungskette der betreffenden Anlage ebenso verstehen wie deren Auswirkungen auf die Anlagenproduktivität und die Eigenschaften der erzeugten Produkte.

Erst nachdem die Problemstellung klar definiert wurde, ist es an der Zeit, Prozesswissen und neueste Technologien wie Big-Data-Analysen oder maschinelles Lernen anzuwenden, um die Ursache des Problems und das „was“ verändert werden muss, zu identifizieren.

In dritten Schritt geht es um das „Wie“. Hier liegt der Kern des Paradigmenwechsels von einfacher Zusammenarbeit (Kollaboration) zu gemeinsamer Erfindung (Co-Invention). Dies ist entscheidend, denn das Ziel besteht nicht darin, eine schnelle Lösung auf eine bestimmte Anlage oder einen bestimmten Betriebsbereich anzuwenden,



07

sondern Technologien der vierten industriellen Revolution wie künstliche Intelligenz und autonome Systemkonzepte zu nutzen, um eine revolutionäre Veränderung der Anlagenproduktivität oder der Eigenschaften der erzeugten Produkte zu erzielen, die über alle Anlagen des Kunden hinweg repliziert oder sogar für eine ganze Industrie hochskaliert werden kann.

— Die Lösung von Problemen durch Co-Invention wird eine Produktivität ermöglichen, die mit heutiger Technologie kaum vorstellbar ist.

Alles in allem ist zu erwarten, dass die Entwicklung von Lösungen für heutige „wicked“ Probleme dabei helfen wird, das Potenzial vieler neuer Technologien der vierten industriellen Revolution freizusetzen. Außerdem werden durch die Anwendung von Lösungen auf industrielle Umgebungen die Fähigkeiten maschineller Lernsysteme kontinuierlich überprüft und verbessert. Darüber hinaus müssen für den Prozess Lösungen vorab evaluiert werden, was die Erstellung von immer mehr digitalen Zwillingen erfordert. Diese wiederum liefern die Daten, die die Entwicklung der autonomen Systeme von morgen unterstützen und beschleunigen werden. Mit anderen Worten, die Lösung von „wicked“ Problemen durch Co-Invention wird nicht nur das Potenzial neuer Technologien freisetzen, sondern auch eine Produktivität ermöglichen, die mit heutiger Technologie kaum vorstellbar ist. •



---

DIGITALE ZUKUNFT

# OPC UA und TSN: Industrie 4.0 für Endgeräte

OPC UA und IEEE TSN sind zwei wegweisende Elemente von Industrie 4.0, die das Potential haben, die industrielle Automatisierung von der Feldgeräte- bis zur Unternehmensebene zu revolutionieren. Wie gut eignen sich die allgegenwärtigen, manchmal über begrenzte Ressourcen verfügenden Geräte der heutigen Automatisierungslandschaft für diese neuen Technologien?



—  
Titelbild: OPC UA und TSN könnten das Gesicht der industriellen Datenerfassung und -verarbeitung verändern – so wie in dieser Fertigungsanlage für Solarmodule.

Für ABB spielt Industrie 4.0 eine entscheidende Rolle für die Zukunft der Industrieautomatisierung. Zwei bedeutende Elemente von Industrie 4.0 sind OPC UA und IEEE TSN.

OPC UA (Open Platform Connectivity and Unified Architecture) ist die nächste Generation von OPC. OPC UA beseitigt viele Unzulänglichkeiten von OPC und ermöglicht eine flexiblere, sicherere, offenere und zuverlässigere Handhabung von Daten. OPC (OLE for Process Control, wobei OLE für „Object Linking and Embedding“ steht) geht auf eine standardisierte Software-Schnittstelle zurück, die es Windows-Programmen erlaubt, mit kompatibler industrieller Hardware zu kommunizieren. OPC basiert auf einer Server-Client-Architektur. Bei OPC handelt es sich um einen offenen Standard, d. h. ein Hardwarehersteller braucht lediglich einen OPC-Server für sein Gerät bereitzustellen, der dann problemlos mit jedem anderen OPC-Client kommunizieren kann. Dies löst das Problem von herstellerspezifischen Protokollen, Schnittstellen usw. OPC UA ist besser in der Lage, das Volumen und die Komplexität der heutigen Datenlandschaft zu bewältigen – eine Herausforderung, die die Entwickler von OPC nicht voraussehen konnten.



**Alexander Gogolev**  
ABB Corporate Research  
Ladenburg, Deutschland

alexander.gogolev@  
de.abb.com

IEEE TSN (Time-Sensitive Networking) ist die Bezeichnung einer Reihe von IEEE-Standards,

die eine deterministische Datenübertragung für OPC UA auf den unteren Kommunikationsebenen ermöglicht. Miteinander kombiniert haben TSN und OPC UA nicht nur das Potenzial, vorhandene Feldbusse zu ersetzen, sondern auch leistungsmäßig zu übertreffen [1]. Beide Technologien sind auf dem Markt erhältlich, jedoch mit unterschiedlichem Reifegrad.

Endgeräte mit OPC UA und TSN auszurüsten, kann zur Herausforderung werden, wenn diese über begrenzte Ressourcen verfügen. Kürzlich hat ABB das Leistungsvermögen typischer Endgeräte im Hinblick auf eine Implementierung von OPC UA und TSN untersucht. Im Rahmen eines Forschungsprojekts im Kontext von IIoT (Industrial Internet of Things) wurden mehrere Hard- und Softwareplattformen evaluiert, um drei Proof-of-Concept-Implementierungen für verschiedene ABB-Produktprototypen zu entwickeln. Diese Geräte wurden mit OPC UA ausgerüstet, und anschließend wurde die Systemintegration mit Extended Automation System 800xA und TSN verglichen. Die Leitfrage lautete: „Ist das Industrie-4.0-Konzept in der Lage, die deterministische Datenübertragung und den erweiterten Datenzugang mit TSN und OPC UA zum Vorteil zu nutzen, und können diese neuen Mechanismen in Produkte integriert werden, um erweiterte Fähigkeiten und eine höhere Leistung zu erzielen?“

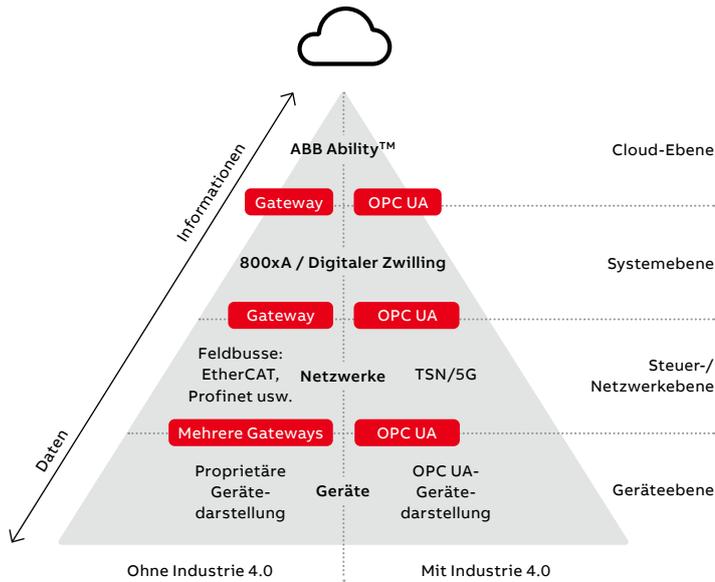
—  
**OPC ist eine standardisierte Software-Schnittstelle, die es Windows-Programmen erlaubt, mit kompatibler industrieller Hardware zu kommunizieren.**

#### **Neue Konzepte in der Industrieautomatisierung**

Die Industrieautomatisierung sieht sich mit einer ganzen Reihe neuer Konzepte wie Datenanalysen, Cloud- und Edge-Computing usw. konfrontiert, in deren Mittelpunkt Informationen und deren Erfassung, Abruf, Darstellung, Verarbeitung und Verteilung stehen.

Prozessrelevante Daten von Geräten, die z. B. an der Produktionslinie einer Fabrik installiert sind, müssen eventuell vorverarbeitet, gefiltert und zur weiteren Darstellung und Analyse in die Cloud übertragen werden. Zurzeit werden Rohdaten aus der Produktion häufig über Feldbustechnologien abgerufen, die sowohl für die Semantik als auch die Übertragung der Daten proprietäre Spezifikationen nutzen. Um auf die Prozessdaten zuzugreifen, benötigt man feldbusspezifische Gateways, die eine Brücke zu den Daten- und Übertragungsformaten schlagen. OPC UA ist jedoch in der Lage, die Informationsmodelle für alle Systemgeräte

zu vereinheitlichen, um einen besseren und transparenten Datenzugriff über TSN als Transportmittel zu ermöglichen →01. Darüber hinaus bietet die Kombination von OPC UA und TSN eine leistungsstarke Semantik zur Darstellung der Geschäftslogik der Geräte sowie eine transparente Client-Server-Kommunikation, die den Fertigungsbereich mit der Cloud verbindet.



01

Ein weiterer positiver Aspekt von OPC UA und TSN ist der Wechsel von einer proprietären in eine standardisierte Welt.

Neben herstellerspezifischen Schnittstellen und Protokollen können sich auf der Ebene der Produktionslinie noch weitere Herausforderungen ergeben. So sind für anspruchsvolle Anwendungen wie z. B. Motion Control eine hohe Leistungsfähigkeit und Determinismus bei der Datenübertragung zwischen Geräten erforderlich. Die Feldbustechnologien, die vor mehreren Jahrzehnten entwickelt wurden, haben Mühe, den heutigen Anforderungen gerecht zu werden. TSN ist nicht nur in der Lage, bestehende Feldbusse



Photo fig. 02: ©istockphoto.com/AleksandarGorjiev

02

—  
01 Automatisierungs-  
pyramide mit und ohne  
Industrie 4.0.

—  
02 OPC UA und TSN  
ermöglichen die Verein-  
heitlichung von Informa-  
tionsmodellen und  
eine deterministische  
Datenübertragung.

leistungsmäßig zu übertreffen [1], sondern ermöglicht auch zukünftiges Wachstum bei der Hochleistungs-Datenübertragung.

Die Anforderung zur Vereinheitlichung komplexer Informationsmodelle einerseits und zur deterministischen Datenübertragung andererseits stellt vorhandene Systemarchitekturen vor eine große Herausforderung. Eine Lösung im Sinne von Industrie 4.0 bieten IIoT-Mechanismen wie OPC UA und IEEE TSN. Während TSN die Datenübertragung auf den unteren Ebenen gewährleistet, kann OPC UA als IIoT-Enabler für übergeordnete Anwendungen dienen. Durch die Kombination beider Technologien lassen sich zwei für die Zukunft der Industrieautomatisierung wesentliche Merkmale bereitstellen: eine schnelle und robuste Datenübertragung und eine Client-Server-Kombination für komplexe Gerätesemantik →02.

## Die Kombination beider Technologien ermöglicht eine schnelle, robuste Datenübertragung und eine Client-Server-Kombination für komplexe Gerätesemantik.

Ein weiterer positiver Aspekt der Nutzung von OPC UA und TSN ist der Wechsel von einer proprietären und kundenspezifischen in eine vereinheitlichte und standardisierte Welt. Ein offensichtlicher Vorteil ist hier die Vereinheitlichung der Software, Schnittstellen und Zugriffsmodelle über Produktpaletten hinweg. Darüber hinaus ermöglichen OPC UA und TSN die Bündelung von Entwicklungskompetenz zwischen Unternehmen, sodass doppelte oder redundante Expertise in speziellen Bereichen vermieden werden kann.

### Nicht alles ganz so einfach

Trotz der neuen Möglichkeiten und der verbesserten Leistungsfähigkeit, die OPC UA und TSN versprechen, bleiben einige offene Fragen:

- Ist der Markt bereit, proprietäre (aber bekannte) Lösungen hinter sich zu lassen und sich standardisierten und offenen (aber neuen) Lösungen zuzuwenden?
- Wie kann eine reibungslose Evolution der Technologie in das neue Paradigma gewährleistet werden?
- Gibt es TSN- und OPC UA-fähige Pilotlösungen? Und welche Technologien und Strategien sind notwendig, um OPC UA und TSN in ein System einzubinden?

Entscheidet sich ein Systementwickler, Industrie 4.0 anzugehen, sollte dieser zunächst mehrere Fragen beantworten. Zum Beispiel: „Braucht das System wirklich alle Fähigkeiten und Merkmale von OPC UA und TSN?“ Da nicht jede Anwendung eine deterministische Datenübertragung oder eine niedrige Latenz bei der Kommunikation benötigt, wird der Umfang der TSN-Nutzung wahrscheinlich unterschiedlich ausfallen: Für die Interaktion auf der Cloud-Ebene ist für gewöhnlich kein TSN erforderlich. Gleiches gilt in manchen Fällen auch für die Feldsensoren. Genauso benötigen nicht alle Endgeräte eine komplexe Semantik und eine einheitliche Zugänglichkeit der Daten.

Die zweite der drei oben angeführten Fragen bezieht sich auf die Integration von OPC UA und TSN in bestehende Systemdesigns und Managementtools. Hier stellt sich die Frage, welche Mechanismen verwendet werden sollten und wie sie vereinheitlicht werden sollten. Diese Fragen sind angesichts der Diversität von Systemen mit Komponenten verschiedener Hersteller und den entsprechenden Tools alles andere als trivial.

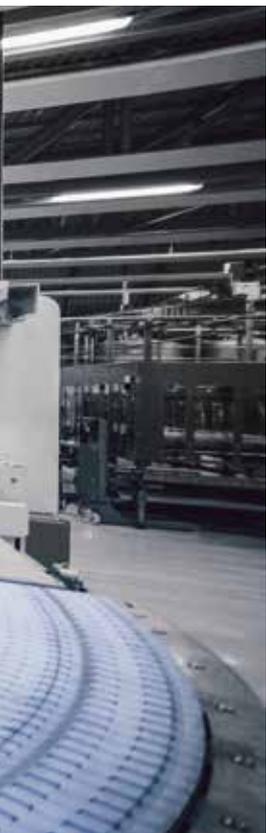
Ist die Entscheidung für die Unterstützung von OPC UA und TSN gefallen, sind die dringendsten Fragen:

- Wo und in welchem Umfang benötigt das System neue Technologien?
- Wie passen OPC UA und TSN in die Systemarchitektur, und wie sollten sie konfiguriert werden?

Hierbei ist zu beachten, dass jedes System am Endgerät beginnt (bzw. endet) und diese allgegenwärtigen Endgeräte häufig nur über begrenzte Ressourcen verfügen. Ursprünglich kam OPC UA nicht in Geräten mit eingeschränkter Rechenleistung, Speicherkapazität oder Stromversorgung zum Einsatz. Außerdem ist für eine vollständige TSN-Unterstützung spezielle Hardware erforderlich, die die Echtzeitfähigkeit sicherstellt. Die Frage ist also, in welchem Umfang ein Endgerät erweitert werden muss, um die neuen Technologien zu unterstützen, und was genau gemacht werden muss, um Endgeräte für Industrie 4.0 und das IIoT vorzubereiten. Das Ausrüsten solcher ressourcenbegrenzter Geräte mit OPC UA und TSN ist möglicherweise der anspruchsvollste Aspekt der Implementierung.

### Ausrüstung von ABB-Endgeräten mit OPC UA und TSN

Bei ABB rüstete ein interdisziplinäres Team drei Endgeräte prototypisch mit OPC UA aus: einen Coriolis Masse-Durchflussmesser vom Typ FCB400, einen Laser-Füllstand-Messumformer vom Typ LLT100 und einen universellen



Motor-Controller vom Typ UMC. Die Implementierung selbst wird in einem zukünftigen Artikel genauer beschrieben.

Die TSN-Implementierung für die drei Prototypen erfolgte im Rahmen der OPC UA-Evaluierung unter Verwendung von Drittanbieter-Hardware für die Infrastruktur. Der Testaufbau umfasst mehrere TSN-Switches (von TTTech), zwei Industrie-PCs und die Prototypen der Endgeräte von ABB →03. Die Konfiguration des Testaufbaus erfolgt mithilfe prototypischer Software, die klassische Befehlszeilentools mit neuer Technologie wie NETCONF (Network Configuration Protocol) und YANG, einer Datenmodellierungssprache, kombiniert.

Mithilfe von Time-Aware Shaping (TAS) ermöglicht die TSN-Switching-Infrastruktur einen Echtzeit-Datenaustausch mit einer Genauigkeit im Mikrosekundenbereich. Ressourcenbegrenzte

Endgeräte sind jedoch häufig nicht in der Lage, die Datenübertragungszeiten an die im Mikrosekunden-Bereich liegenden Übertragungsfenster der TSN-Switches anzupassen. Um die Auswirkungen unter solchen Bedingungen zu untersuchen, wurde dieses Szenario in den ersten Schritten der TSN-Evaluierung genauer betrachtet.

Die Evaluierung hat gezeigt, dass die Latenz des OPC UA-Datenaustauschs erheblich reduziert werden kann.

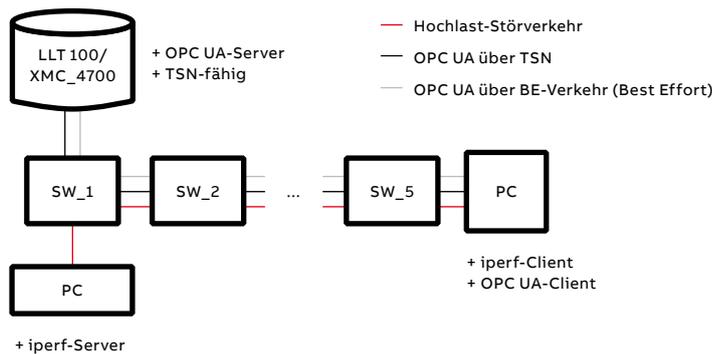
Im Fokus standen dabei Anwendungsanforderungen wie die Dauer der Regelzyklen (1 bis 5 ms) und die Menge der ausgetauschten Daten (typischerweise eine Schreib-Lese-Operation auf mehreren Variablen). In der ersten Phase des Projekts wurden Latenz und Jitter des OPC UA-Verkehrs in Szenarien mit unterschiedlichen Verkehrslasten untersucht. Die Anwendungssynchronisierung und Systemintegration für TSN sind Schwerpunkt der zweiten Projektphase und Gegenstand eines zukünftigen Artikels.

**Ergebnisse und Spin-offs**

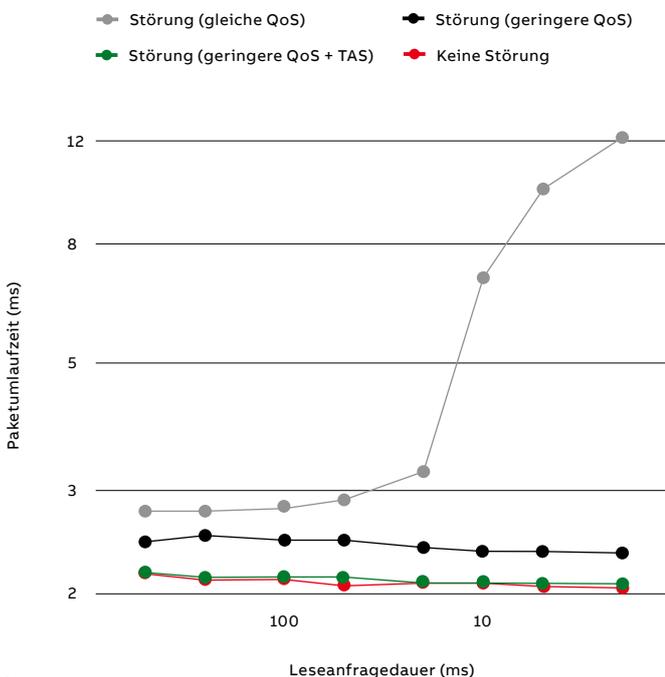
Die Evaluierung der TSN-Implementierung hat gezeigt, dass die Latenz des OPC UA-Datenaustauschs erheblich reduziert und mit einer geringeren Abweichung verbunden werden kann. →04 zeigt den Unterschied in der Latenz für OPA UA-Leseanfragen zum und vom eingebetteten OPC UA-Server (in diesem Fall des LLT100) in einem Netzwerk, in dem 95 % des Durchsatzes durch Störverkehr belegt werden, in Abhängigkeit von der Dienstgüte (Quality of Service, QoS). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Latenz durch die Einführung von QoS-Mechanismen trotz des starken Störverkehrs reduziert wird. In TSN-Switches ermöglicht QoS die Einteilung von Nachrichten in acht Prioritätsstufen, um sicherzustellen, dass wichtige Nachrichten zuerst gesendet werden. TSN-Mechanismen wie Time Aware Traffic Shaping (TAS) sorgen für eine weitere Verkürzung und Stabilisierung der OPC UA-Latenz. So trägt schon eine grundlegende TSN-Unterstützung der Software auf dem Endgerät im Zusammenhang mit einer TSN-fähigen Infrastruktur zur Verbesserung des Determinismus beim Datenzugriff bei.

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Softwarekonzepte werden in der zweiten Phase der TSN-Einführung weiterentwickelt. Der Schwerpunkt dieser Phase liegt auf der automatisierten Integration von Endgeräten in TSN-fähige Systeme.

03



04



— 03 Testaufbau für die TSN-Evaluierung. Der Hochlast-Störverkehr wurde mithilfe von Iperf 2.0.5, einem gängigen Tool zum Testen von Netzwerken, erzeugt.

— 04 Latenz von OPC UA-Leseanfragen bei Störverkehr in TSN-Netzwerken.

— 05 Industrie 4.0 wird eine entscheidende Rolle für die Zukunft der Industrieautomatisierung spielen. ABB unterstützt die Entwicklung von OPC UA und TSN, die zur Harmonisierung und Standardisierung von Industrie 4.0 beitragen.

Das Forschungsprojekt führte zur Entwicklung von neuen Geräteprototypen mit OPC UA. Tatsächlich hat die Produktentwicklung für einige Zielgeräte bereits begonnen. Darüber hinaus sind im Rahmen des Forschungsprojekts verschiedene Tools und Best Practices für die OPC UA-Einführung entstanden – z. B. ein automatisierter Codegenerator, der die Entwicklungsartefakte (z. B. Gerätebeschreibungsdateien) in C-basierten Programmcode übersetzt, der anschließend kompiliert und zur Verwendung mit einem OPC UA-Server auf das Gerät geladen werden kann. Ein weiteres Beispiel sind die DI-Modellrichtlinien (Device Integration), die Entwicklern aus verschiedenen Bereichen dabei helfen, die Geschäftslogik der Geräte auf standardisierte und funktionale Weise darzustellen.

### Game-Changer für die Industrieautomatisierung

TSN-fähige Switches, die den geforderten Determinismus bei der Vernetzung gewährleisten, sind bereits auf dem Markt erhältlich. Auch Client-Server-Software für OPC UA steht als integrationsberechtigtes Produkt zur Verfügung. Die für Hochleistungsanwendungen relevante OPC UA-Erweiterung PubSub (Publish-Subscribe) wird in Kürze erwartet. Laut der OPC Foundation [2] erweitert PubSub den Einsatzbereich von OPC UA bis in die untersten Ebenen der Fabrikautomatisierung, wo Controller, Sensoren und eingebettete Systeme in der Regel eine optimierte Kommunikation bei geringem Stromverbrauch und geringer Latenz in lokalen Netzwerken erfordern.

Verschiedene Endgeräte von ABB können bereits heute mit einer grundlegenden TSN-Unterstützung ausgerüstet werden. Eine vollständige TSN-Unterstützung einschließlich Hardware wird in absehbarer Zukunft möglich sein. Die vollständige Systemintegration von TSN ist hingegen größtenteils noch eine offene Frage. Switch-Hersteller streben keine Lösungen für eine vollständige Systemintegration an, sondern fügen eher Zusatzmodule für die Netzkonfiguration hinzu. Automatisierungstechnik-Anbieter und Systemintegratoren wie ABB besitzen das automatisierungstechnische Know-how und verfügen über die Engineering-Tools und das notwendige Wissen, um Entscheidungen zum Umfang der TSN-Nutzung und -Integration zu treffen →05. Aus diesem Grund arbeiten Automatisierungstechnik-Anbieter, Hersteller von Netzwerk-Komponenten und Systemintegratoren weiterhin zusammen an der Entwicklung von Standard-Integrationsmechanismen für TSN, die industrieweit anwendbar sind.



05

— **Vertreter von ABB sind aktiv an der Standardisierung von OPC UA und TSN beteiligt.**

Um als Technologie-Paradigma weithin anerkannt zu werden, müssen die grundlegenden Industrie 4.0-Elemente harmonisiert und standardisiert werden. Aus diesem Grund sind auch Vertreter von ABB aktiv an der Standardisierungsarbeit zieht immer mehr Akteure an, die neue Überlegungen einbringen. Daraus ergeben sich wiederum neue Merkmale, die mit bereits definierten harmonisiert werden müssen. Eine Vereinheitlichung in dieser Größenordnung ist mit erheblichen Anstrengungen verbunden. Es sind jedoch Fortschritte zu verzeichnen, die zunehmend an Bedeutung gewinnen. •

#### Danksagung

Dieser Artikel wäre ohne die Ideen, Arbeit und den Einsatz des gesamten Projektteams nicht möglich gewesen. Besonderer Dank gebührt Francisco Mendoza, Roland Braun, Philipp Bauer und Thomas Gamer.

#### Literaturhinweise

[1] D. Bruckner et al.: „OPC UA TSN A new Solution for Industrial Communication“. WEKA Fachmedien. Verfügbar unter: [https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/OPC\\_UA\\_TSN\\_-\\_A\\_new\\_Solution\\_for\\_Industrial\\_Communication.pdf](https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/OPC_UA_TSN_-_A_new_Solution_for_Industrial_Communication.pdf) (abgerufen am 03.12.19).

[2] OPC Foundation: „OPC Foundation announces OPC UA PubSub release as important extension of OPC UA communication platform“. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/news/press-releases/opc-foundation-announces-opc-ua-pub-sub-release-important-extension-opc-ua-communication-platform> (abgerufen am 03.12.19).

---

DIGITALE ZUKUNFT

# Gezielte Wertschöpfung bei industriellen KI-Projek- ten durch Co-Innovation

ABB hat einen vierschrittigen Co-Innovationsansatz für Projekte im Bereich Advanced Analytics und künstliche Intelligenz (KI) entwickelt. Dieser bietet ABB, Kunden und Partnern die Möglichkeit, Domänenverständnis, Engineeringwissen und Data-Science-Expertise auf wirksame Weise zu kombinieren und Advanced-Analytics- und KI-Lösungen gemeinsam zu entwickeln.



—  
01 Der vierschrittige Co-Innovationsansatz von ABB für Advanced-Analytics- und KI-Lösungen.

Auf der Suche nach mehr Autonomie gewinnen Advanced-Analytics- und KI-Anwendungen in der industriellen Automatisierung zunehmend an Bedeutung [1–2]. Gleichwohl ist KI kompliziert, und sie einfach mit der Automatisierung zu kombinieren, reicht nicht aus, um einen echten Mehrwert zu generieren. Für eine echte Wertschöpfung sind Fokussierung, Kompetenz und zuverlässige Daten erforderlich. Werden Advanced Analytics und KI auf relevante, wohldefinierte Problemfälle angewandt, lässt sich ein erheblicher Mehrwert als integraler Bestandteil einer ganzheitlichen Lösung erzielen. Die Grundlage hierfür ist das richtige Zusammenspiel von Data-Science-Expertise, Domänenverständnis und Engineeringwissen, verstärkt durch kollaborative Forschung und Entwicklung, bei der Wissen und Erfahrung geteilt und effizient umgesetzt werden. Mithilfe ihrer Experten und deren Erfahrung hat ABB einen standardisierten Co-Innovationsprozess entwickelt, der die kollaborative Entwicklung von KI-Lösungen effizient lenkt.

—  
**Werden Advanced Analytics und KI auf relevante, wohldefinierte Problemstellungen angewandt, lässt sich ein erheblicher Mehrwert erzielen.**

Der neue vierschrittige Ansatz orientiert sich lose am CRISP-DM-Modell [3] und wurde für die Durchführung von Co-Innovationsprojekten im Bereich Advanced Analytics, maschinelles Lernen und KI mit Partnern und Kunden angepasst. Auch wenn der Ansatz als Konzept in vier Schritten beschrieben ist, handelt es sich in der Praxis um einen iterativen Prozess, da aus dem Wissen und Verständnis, das im Laufe der Zusammenarbeit generiert wird, stets neue Ideen entstehen. ABB hat diesen Prozess im Laufe der letzten Jahre mit Kunden aus verschiedenen Branchen wie der chemischen Industrie, der Automobilindustrie und der Energiewirtschaft genutzt, um hochwertige Daten zu generieren, zu bündeln und zu nutzen und so die Wertschöpfung in Advanced-Analytics- und KI-Projekten zu erhöhen [4–5].

**Vier Schritte zur Wertschöpfung: Co-Innovation**  
Das Co-Innovationskonzept definiert Prozesse und Ziele in klar strukturierten Schritten, sodass Automatisierungsanbieter und Kunden zu jedem Zeitpunkt eines Projekts wissen, wo sie stehen und wo sie hin müssen →01.

—  
**Benjamin Kloeppe**  
**Martin W. Hoffmann**  
ABB Corporate Research  
Ladenburg, Deutschland

benjamin.kloeppe@  
de.abb.com  
martin.w.hoffmann@  
de.abb.com

**James Ottewill**  
ABB Corporate Research  
Krakau, Polen

james.ottewill@  
pl.abb.com

### Wertversprechen

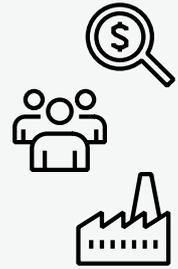
Was sind die Probleme und der Nutzen des Kunden?

Kann die Analyse von Daten helfen?

Nutze Domänenexpertise

Vom Wertversprechen zur spezifischen KI-/Analysefragestellung

**ENTWICKLE DAS RICHTIGE!**



### Verfügbare Daten

Prüfe die verfügbaren Daten

Plane die Datenerfassung

Erfasse Musterdaten

Untersuche die Daten und formuliere Hypothesen

Bereite die Daten vor und reinige sie

**NUTZE DIE RICHTIGEN DATEN!**



### KI- & Analyseverfahren

Entwickle die KI & Datenanalyse

Designe auf Basis der KI-/Analysefrage, der verfügbaren Daten und des Domänenwissens

Es gibt kein Rezept für die Wahl des besten Ansatzes

**VERSTEHE DIE METHODEN!**



### Bereitstellung

Validiere die Ergebnisse anhand der realen Betriebsmittel

Entwickle die passendste Visualisierung zusammen mit dem Endbenutzer

Optimiere die Lösung hinsichtlich der SW-Architektur

Verbreite das neue Wissen

**MACH ES SKALIERBAR!**



01

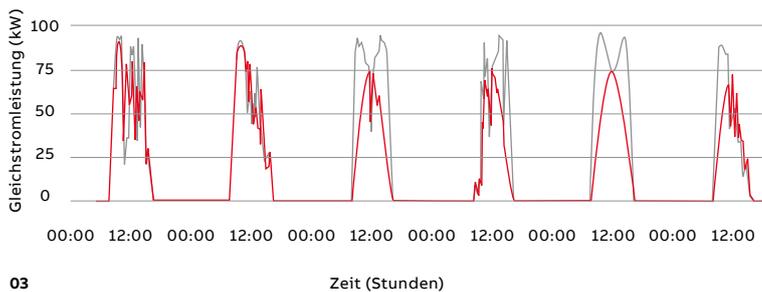
- Schritt 1: Problemidentifizierung und Formulierung des Wertversprechens
- Schritt 2: Datenprüfung und -erfassung
- Schritt 3: KI- und analytische Modellierung
- Schritt 4: Bereitstellung

**Schritt 1:** Beginnend mit der Identifizierungsphase werden im Rahmen von Workshops mit Kunden und ABB-Experten Probleme und Schwierigkeiten („Pain Points“) sowie die relevanten Akteure bestimmt. Anschließend wird ein Wertversprechen – d. h. der vom Kunden zu erwartende Nutzen oder Mehrwert – definiert. Daraus wird dann das KI-Problem formuliert.

**Schritt 2:** Entscheidend für den Erfolg von Entwicklungsprojekten im Bereich Advanced Analytics und KI ist der Zugang zu den richtigen Daten mit der richtigen Qualität. Die Datenprüfung und -erfassung sorgt dafür, dass diese Voraussetzungen erfüllt werden.

Zunächst bestimmen Domänen- und Data-Science-Experten die zur Behandlung des KI-Problems erforderlichen Daten im Rahmen von Workshops oder Interviews, wodurch auch der Wissensaustausch gefördert wird.

Anschließend wird die Eignung von bereits verfügbaren Daten geprüft, und fehlende Daten werden identifiziert. Außerdem prüfen die Experten, wie durch Zusammenführung von heterogenen Daten aus verschiedenen Quellen (z. B. Signaldaten, Alarm- und Ereignisdaten, Geschäftsdaten) die Umsetzung des Wertversprechens unterstützt werden kann.



03

Ist die Datenmenge oder -qualität unzureichend, können Datenerfassungskampagnen geplant, zusätzliche Sensoren installiert oder fehlende Daten durch weniger naheliegende Datenquellen ersetzt werden [6].

**Schritt 3:** Dieser Schritt beginnt mit der Untersuchung der Daten und deren Vorbereitung für die Modellierung durch die KI- und Data-Science-Experten von ABB. Verbleibende Probleme hinsichtlich der Datenqualität werden erkannt und behandelt [7], Zusammenhänge in den Daten werden identifiziert, Modellmerkmale werden entwickelt, und Hypothesen werden herausgearbeitet. Erkenntnisse, die in dieser Phase gewonnen wurden, fließen in die Feinanpassung des KI-Problems ein.

Als Nächstes wird der sogenannte „Train-Validate-Tune“-Testzyklus initiiert. Hierbei werden zunächst datenbasierte Modelle entwickelt, trainiert und anhand von Validierungsdaten (oder durch Kreuzvalidierung) bestätigt. Anschließend werden die Hyperparameter der Modelle bzw. Modellmerkmale bei Bedarf angepasst. Die Methoden reichen von

rein datenbasierten Verfahren wie neuronale Netze bis hin zu vorwiegend physikalischen Modellen einschließlich aller Zwischenformen. Durch die Entwicklung hybrider Verfahren können die Stärken einzelner Modelle genutzt und deren Schwächen abgemildert werden. Die Modellentwicklung von der Definition der Modelleingaben, Modellausgaben und der Modellstruktur über die Wahl des geeigneten Modellierungsverfahrens bis hin zur Definition einer Kostenfunktion zur genauen Quantifizierung der Modelleistung wird durch das kombinierte Domänenverständnis und Data-Science-Wissen der Experten geleitet.

Bei der Validierung wird das Modell mit neuen Daten getestet, mit denen die Algorithmen nicht trainiert wurden. Darüber hinaus wird die Schlussfolgerung (Reasoning) in Black-Box-Modellen wie Random Forests oder künstlichen neuronalen Netzen mithilfe von Methoden zur Modellinterpretation untersucht.

Bereits zu einem frühen Zeitpunkt werden einfache nicht- oder teilfunktionale Prototypen (Mock-ups) der Benutzeroberfläche auf der Basis realer Daten und Vorhersagen erstellt, um die Modellierung und die Workflow-Evaluierung zu unterstützen. Durch den ständigen Austausch von Zwischenergebnissen und Wissen mit den Akteuren und Kunden erhält ABB in dieser Phase wichtige Rückmeldungen zur Verbesserung des KI-Modells.

**Schritt 4:** Im Bereitstellungsschritt werden die Daten-Pipelines und Workflows für das maschinelle Lernen aus der KI-Modellierungsphase operationalisiert. Dazu ist ein vorhandenes System zum Nachtrainieren des KI-Modells (bei Bedarf, geplant oder ereignisbasiert) erforderlich. Ein Softwaresystem sorgt für das Scoring des maschinellen Lernmodells und die Ausgabe des Ergebnisses an den Nutzer.

**ABB hat den vierschriftigen Prozess bereits mit Kunden aus verschiedenen Branchen angewandt.**

Zusammen mit dem Kunden entscheidet ABB, wie die KI-Lösung bereitgestellt werden soll – z. B. als Web-Dashboard, in eine vorhandene Software integriert oder als virtueller Assistent.

#### **Anwendungsbeispiel: Leistungsüberwachung in einem Solarkraftwerk**

Der vierschriftige Forschungs- und Entwicklungsansatz von ABB wurde unter anderem erfolgreich



03

02 Der Algorithmus unterscheidet korrekt zwischen einem ausgefallenen Nachführsystem (rot) und einem normal arbeitenden System (grau).

03 Die digitale e-mesh™-Lösung von ABB integriert die fertige KI-Lösung als zusätzliche Softwarefunktionalität in die Basislösung zur Überwachung, Optimierung und Verbesserung der Leistung von dezentralen Energieressourcen.

zur Entwicklung von Advanced-Analytics-Lösungen für die Automatisierung in der Energiewirtschaft und der Prozessindustrie eingesetzt.

In einem Fall half der Co-Innovationsansatz von ABB Domänen- und Data-Science-Experten aus den Geschäftsbereichen Stromnetze und Elektrifizierung sowie Forschungs- und Entwicklungsteams in Polen, China, Schweden, der Schweiz und Deutschland dabei, eine innovative Advanced-Analytics-Lösung zur Überwachung der Leistung von Photovoltaikanlagen bereitzustellen.

**Schritt 1:** Zustandsüberwachungssysteme können dabei helfen, die Verfügbarkeit und den Ertrag einer Solaranlage zu steigern und die Lebenszykluskosten der Anlage zu senken. Allerdings sind solche dezentralen und modularen Anlagen mit besonderen Herausforderungen verbunden, die durch ihren häufig entlegenen Standort und typischerweise unbemannten Betrieb noch verstärkt werden. Daher benötigen die Betreiber solcher Anlagen präzise und kostengünstige Überwachungssysteme, die in der Lage sind, die aktuelle Leistung und den aktuellen Zustand einer Anlage zu übermitteln und die Ursache möglicher Probleme zu bestimmen.

**Schritt 2:** Die Kosten, die mit der Installation, Konfiguration und Wartung eines eigenständigen Zustandsüberwachungssystems mit maßgeschneiderter Highend-Sensorik, Verkabelung und Kommunikation verbunden sind, können sich schnell negativ auf die Grenzkosten eines solchen Systems auswirken. Als Anbieter fortschrittlicher digitaler Technologien für die Industrie weiß ABB, dass in Solaranlagen bereits eine beträchtliche Zahl von Datenerfassungs- und Speichersystemen in Form von SCADA-Systemen, Fernwerkeinheiten (Remote Terminal Units, RTUs), Wechselrichtern und Wartungsmanagementsystemen zum Einsatz kommt. Also nutzte ABB ihr domänenspezifisches Wissen auf dem Gebiet der Photovoltaik, Leistungselektronik, Automatisierung und Zustandsüberwachung, um die Nutzbarkeit dieser Daten im Hinblick auf das Wertversprechen zu evaluieren und die Analyseaufgabe zu formulieren.

Der Co-Innovationsansatz half bei der Entwicklung einer Advanced-Analytics-Lösung zur Überwachung der Leistung von Photovoltaikanlagen.

**Schritt 3:** Anschließend entwickelten und implementierten die Experten von ABB neueste Methoden zur Lösung der Analyseaufgabe. Dabei wurden die Eingaben, Ausgaben und Algorithmen von datenbasierten Modellen der Anlagenkomponenten passgenau entwickelt. Das daraus resultierende System ist in der Lage, aussagekräftige, praktisch umsetzbare Erkenntnisse, z. B. Degradationsraten, Fehlerdiagnosen und Ursachenanalysen, aus den Daten abzuleiten →02.

**Schritt 4:** Im letzten Schritt wurde eine ganzheitliche Lösung unter Berücksichtigung aller analytischen Schritte von der Datenaufnahme über die Bereinigung der Daten bis hin zur Modellierung und Bereitstellung entwickelt. Durch das besondere Augenmerk auf das Nutzererlebnis während des gesamten Prozesses konnte ein hohes Maß an Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Advanced-Analytics-Lösung gewährleistet werden. Die entwickelte Funktionalität wird zurzeit in die e-mesh™ Analytics Suite integriert und wird in Zukunft als Anwendung in der digitalen ABB Ability™ e-mesh™ Monitor Lösung zur Verfügung stehen →03. Diese baut auf einer cloudbasierten digitalen Plattform auf, die Daten von dezentralen Energieanlagen bündelt. Die neue Lösung ist skalierbar, einfach zu implementieren und bietet die Möglichkeit, von einer zentralen Stelle aus wichtige Informationen von mehreren Anlagen abzurufen.

### Anwendungsbeispiel: vorausschauende Wartung von rotierenden Maschinen

In einem weiteren Projekt nutzte ABB die Co-Innovationsmethode zur Entwicklung einer Lösung für die vorausschauende Wartung von rotierenden Maschinen in einer Prozessanlage →04 [8–9].

In diesem Fall arbeiteten kundenseitige Projektpartner wie Anlagenmanager, Anlagenfahrer und Wartungsingenieure mit Data-Science-Wissenschaftlern, Fachleuten für rotierende Maschinen und Design-Thinking-Experten zusammen, um ein Wertversprechen für die vorausschauende Wartung von rotierenden Maschinen zu entwickeln. Eine typische Prozessanlage verfügt in der Regel über eine Vielzahl von Niederspannungsmotoren und daran angeschlossenen Pumpen. Ausfälle und die anschließende ungeplante Instandsetzung dieser Betriebsmittel sind in der Regel viel kostspieliger als eine geplante Wartung. Da eine manuelle Datenaufzeichnung und Analyse des Funktionszustands jedes einzelnen Betriebsmittels aufgrund der großen Anzahl kaum machbar ist, werden die Betriebsmittel für gewöhnlich bis zu ihrem Ausfall betrieben und anschließend ausgetauscht, was mit hohen Kosten verbunden ist.

**Schritt 1:** Als Wertversprechen wurde festgelegt: „Absichern des Betriebs gegen ungeplante Stillstände von Standardpumpen innerhalb der nächsten zwei Wochen“. Daraus wurde die Analyseaufgabe abgeleitet: „Vorhersagen, ob eine Pumpe innerhalb der nächsten zwei Wochen ausfällt, und wenn ja, warum“.

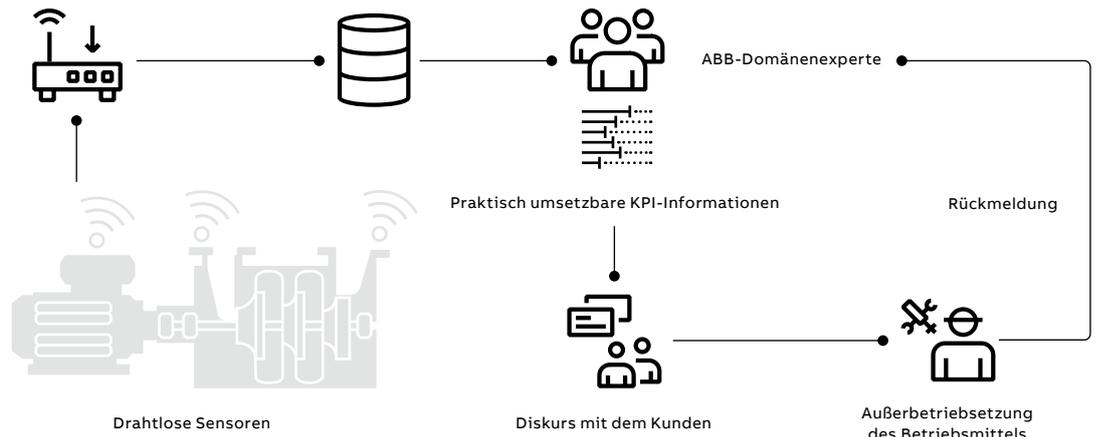
—  
Zusammen mit dem Kunden entwickelte ABB eine Lösung für die vorausschauende Wartung von rotierenden Maschinen in einer Prozessanlage.

**Schritt 2:** Die Datenüberprüfung ergab, dass die bereits erfassten Daten für die Analyse unzureichend waren. Zustandsüberwachungssysteme waren nur für größere, kritische Pumpen implementiert. Dabei können sich auch unkritische Betriebsmittel erheblich auf die Wartungskosten auswirken. Da diese nicht im selben Umfang überwacht wurden, bestimmte der Kunde mithilfe von ABB eine Pilotanlage, an der drahtlose Sensortechnik von ABB installiert wurde, um die



—  
04 Die Anwendung des vierschrittigen Co-Innovationsansatzes auf die Zustandsüberwachung und vorausschauende Wartung von rotierenden Maschinen ermöglicht Kunden einen effizienteren Anlagenbetrieb.

—  
05 Die KI-Lösung für rotierende Standardmaschinen bietet Betreibern die Möglichkeit, Pumpenausfälle innerhalb der nächsten zwei Wochen vorherzusagen.



05

erforderlichen Daten zu generieren. Durch die Einrichtung einer entsprechenden Datenerfassungsinfrastruktur konnten auch die Data-Science-Experten von ABB auf die Daten zugreifen.

## Die Zusammenarbeit und der Austausch zwischen Data-Science- und Domänenexperten, Kunden und weiteren Akteuren sorgen für einen erheblichen Mehrwert.

**Schritt 3:** Die Data-Science- und Domänenexperten von ABB analysierten die eingehenden Daten, wobei Anzeichen von potenziellen Fehlern erkannt wurden →05. Solche Erkenntnisse wurden dem Kunden unverzüglich mitgeteilt, der die erkannten Probleme untersuchen und bestätigen konnte. Mithilfe von Daten von fehlerfreien Systemen sowie kundenseitig bestätigten Ausfällen wurde ein Deep-Learning-Modell trainiert, das

den Ausfall einer Pumpe innerhalb der nächsten zwei Wochen vorhersagt.

**Schritt 4:** Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten werden in das Asset-Performance-Portfolio von ABB integriert. Dieses umfasst verschiedene Dienste für Asset-Experten von ABB und Wartungsmanager des Kunden zur Überwachung von Betriebsmitteln, unterstützt durch die KI-Algorithmen von ABB [9].

### Werden Sie Teil des Co-Innovationsprozesses

Das neue vierschrittige Konzept zur Unterstützung kollaborativer Forschung und Entwicklung bietet ABB die Möglichkeit, auf effiziente Weise maßgeschneiderte industrielle KI-Lösungen für verschiedene Kunden zu entwickeln. Die Zusammenarbeit und der Wissensaustausch zwischen Data-Science- und Domänenexperten, Kunden und weiteren Akteuren tragen zu einem beträchtlichen Mehrwert bei. ABB lädt ihre Kunden und Partner dazu ein, mit den Data-Science- und Domänenexperten von ABB zusammenzuarbeiten, um diesen erleuchtenden Prozess selbst zu erfahren und bei Bedarf an ihre spezifischen Projektanforderungen anzupassen. •

### Literaturhinweise

[1] T. Gamer, A. Isaksson: „Autonome Systeme“. ABB Review 04/2018, S. 8–11.

[2] T. Gamer et al.: „The Autonomous Industrial Plant – Future of Process Engineering, Operations and Maintenance“. 12th International Conference on Dynamics and Control of Process Systems (DYCOPS), Vol. 52-1 (2019), S. 435–460.

[3] R. Wirth, J. Hipp: „CRISP-DM: Towards a standard process model for data mining“. 4th International Conference on the Practical Applications of Knowledge Discovery and Data Mining (2000), S. 1–11.

[4] B. Schmidt et al.: „Industrial Virtual Assistants: Challenges and Opportunities“.

ACM International Joint Conference and International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers. Singapur 2018.

[5] M. Atzmueller et al.: „Big data analytics for proactive industrial decision support“. atp edition, Bd. 58, Nr. 09 (2016), S. 62–74.

[6] J. Ottewill et al.: „Was Ströme über Vibrationen verraten“. ABB Review 01/2018, S. 72–79.

[7] R. Gitzel et al.: „Data Quality in Time Series Data: An Experience Report“. 18th IEEE Conference on Business Informatics (CBI), 2016.

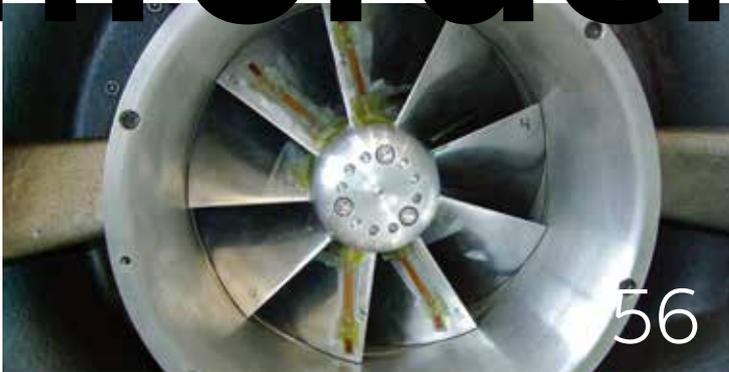
[8] I. Amihai et al.: „An Industrial Case Study Using Vibration Data

and Machine Learning to Predict Asset Health“. 20th IEEE Conference on Business Informatics (CBI), 2018.

[9] R. Gitzel et al.: „Neue Wege bei der Zustandsüberwachung rotierender Maschinen“. ABB Review 02/2019, S. 58–63.



# Extreme Anforderungen



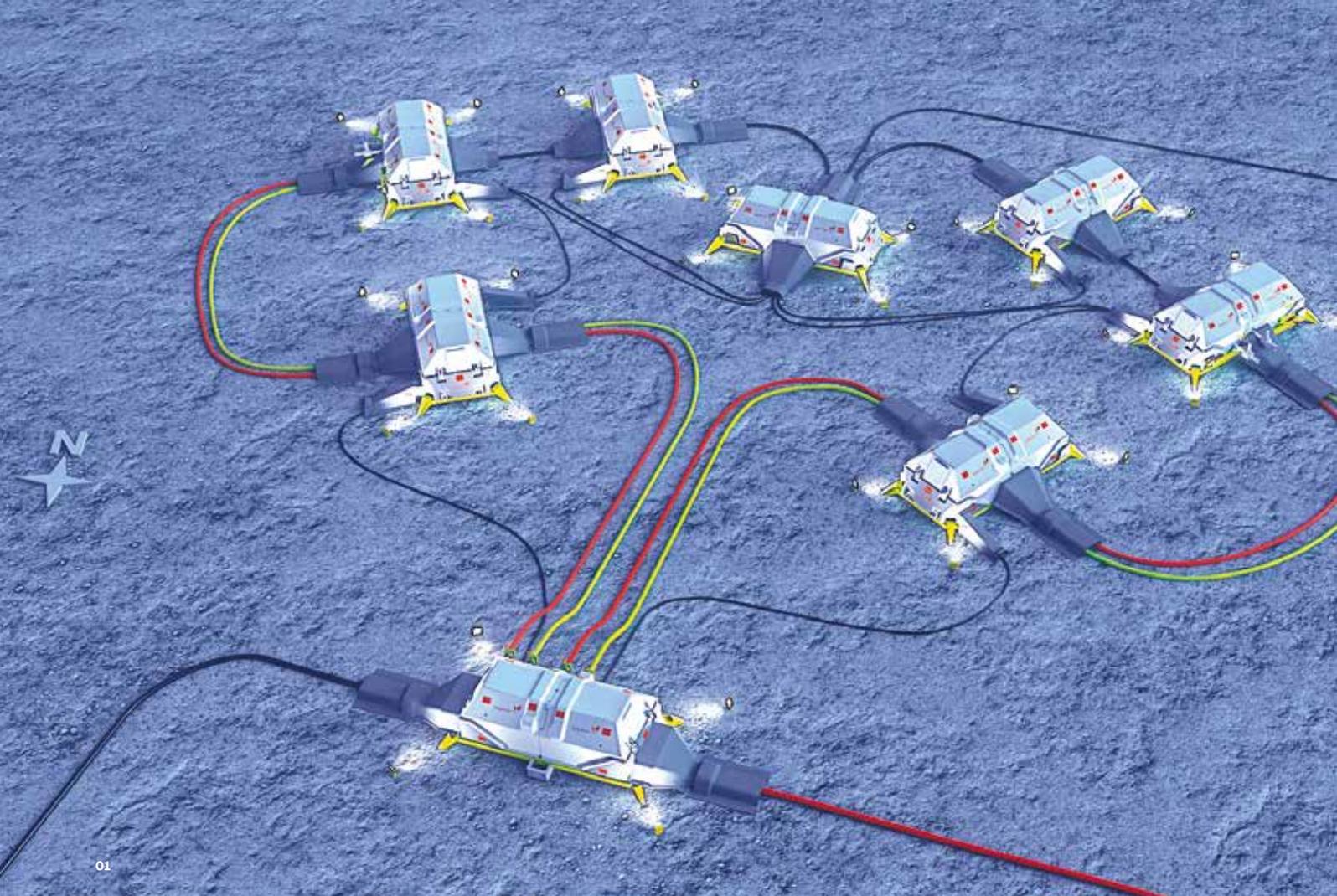
n



Neue Lösungen auf dem Grunde des Ozeans zu realisieren, gehört zu den wohl gefährlichsten und schwierigsten Unterfangen. Gleichzeitig ist es ein idealer Prüfstand für Technologien, die den Betrieb und die Überwachung aus der Ferne ermöglichen. Erkenntnisse, die hier gewonnen werden, können auch an anderer Stelle genutzt werden.

- 44      Zukunftsweisende Technologie für die Stromversorgung auf dem Meeresboden
- 50      Umrichter für den Unterwassereinsatz
- 56      A200-H – der neue Maßstab in der einstufigen Turboaufladung





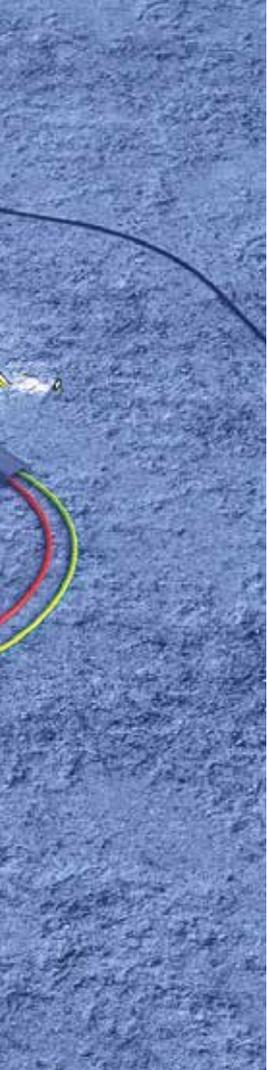
01

---

EXTREME ANFORDERUNGEN

# Zukunftsweisende Technologie für die Stromversorgung auf dem Meeresboden

Dank des neuen, ultrazuverlässigen modularen Designs und der erfolgreichen Qualifizierung des einzigartigen Unterwasser-Elektrifizierungssystems von ABB rückt die Möglichkeit zur profitablen Öl- und Gasförderung in großen Wassertiefen in greifbare Nähe. Die reibungslosen Tests unter realen Bedingungen zeigen, dass das System für den Einsatz in der Tiefe bereit ist und die Realisierung einer kompletten Produktionsanlage unter Wasser nicht mehr allzu fern ist.



Der weltweite Bedarf an Energie in Form von fossilen Brennstoffen ist nach wie vor hoch. Gleichzeitig sinkt die Ergiebigkeit von bereits erschlossenen Öl- und Gasfeldern [1]. Um den Bedarf weiterhin zu decken, dringen internationale Öl- und Gasfirmen in immer schwierigere Umgebungen in großen Wassertiefen vor [2]. Die Entwicklung neuer, intelligenter und zuverlässiger Technologien, die bis vor Kurzem noch als zu aufwändig und zu teuer galten, können der Öl- und Gasindustrie dabei helfen, an entlegenen Standorten unter Wasser profitabel zu fördern. Fortschritte im Bereich der Unterwasser-Elektrifizierung könnten eines Tages den Bau ganzer Öl- und Gasproduktionsanlagen auf dem Meeresgrund und somit die Erschließung tieferer, kleinerer und schwer zugänglicher Lagerstätten ermöglichen →01. Dies erfordert jedoch eine äußerst zuverlässige Ausrüstung, die praktisch wartungsfrei ist, da eine Bergung vom Meeresboden zu Reparaturzwecken zu teuer wäre.

Vor dem Hintergrund dieser Vision hat ABB im Jahr 2013 zusammen mit Equinor (vormals Statoil), Total und Chevron ein vom Norwegischen Forschungsrat unterstütztes Gemeinschaftsprojekt mit einem Budget von 100 Mio. USD ins Leben gerufen [3]. Aufbauend auf ihre Erfahrung als weltweit führendes Unternehmen in der Energie- und Automatisierungstechnik hat ABB ein Elektrifizierungssystem zur Versorgung von Unterwasserpumpen und -kompressoren mit einer Spitzenleistung von 100 MW in Wassertiefen von bis zu 3.000 m über Entfernungen von bis zu 600 km entwickelt, das über eine Lebensdauer von 30 Jahren nur wenig oder gar keine Wartung benötigt. Damit ist ein bedeutender Schritt zur Realisierung einer Produktionsstätte unter Wasser gelungen.

#### Der Nachteil von Topside-Anlagen

Heutzutage wird der bei der Offshore-Förderung von Öl und Gas benötigte Strom in der Regel lokal mit Gasturbinen erzeugt, die über der Wasseroberfläche auf festen oder schwimmenden Plattformen oder auf Schiffen installiert sind (sogenannte Topside-Anlagen). Wird der Strom unter Wasser benötigt, gelangt dieser über mehrere Kabel zu den Verbrauchern wie Pumpen und Kompressoren auf dem Meeresboden. Topside-Anlagen müssen nicht nur regelmäßig gewartet werden und erfordern eine komplizierte Logistik und Unterstützung, sondern sind auch auf eine Stromerzeugung angewiesen, bei der große Mengen von Treibhausgasen anfallen – ein teures Unterfangen.

Die Möglichkeit, Strom über große Entfernungen unter Wasser zu übertragen, zu verteilen und umzuwandeln würde die Öl- und Gasindustrie

nachhaltig verändern. Durch Installation solcher Elektrifizierungssysteme in unmittelbarer Nähe der Verbraucher werden der Platzbedarf und das Gewicht der Topside-Anlagen reduziert, die Reaktionszeiten an den Bohrlöchern verkürzt, die Anforderungen an die Stromversorgung reduziert und die Treibhausgasemissionen verringert. Aus diesem Grund bringt ABB ihr technisches Know-how in das umfangreiche Projekt ein, das wichtige Voraussetzungen für die zukünftige Realisierung einer ganzen Produktionsstätte auf dem Meeresboden schafft.

—  
**Unterwasser-Elektrifizierungs-lösungen könnten eines Tages ganze Produktionsanlagen auf dem Meeresgrund ermöglichen.**

#### Richtungsweisendes Design

Mithilfe eines richtungsweisenden Designansatzes hat ABB eine flexible, modulare Unterwasser-Elektrifizierungslösung auf der Basis bewährter Technologien entwickelt, die folgende Komponenten umfasst:

- drehzahl geregelter Antrieb (Variable-Speed Drive, VSD)
- Mittelspannungs-(MS-)Schaltanlage
- Steuerungen und Niederspannungs-(NS-)Verteilung

Aufbauend auf dem Wissen und der Erfahrung von der Entwicklung des ersten Unterwasser-Transformators im Jahr 1999 ist es ABB gelungen, eine ebenso vielseitige und robuste wie leistungsstarke und zuverlässige Ausrüstung zu entwickeln. Da sämtliche Komponenten, Baugruppen und Einheiten extremen Belastungen ausgesetzt sind, war ein genaues Verständnis der elektrischen und thermischen Eigenschaften der Ausrüstung für den Erfolg des Projekts von entscheidender Bedeutung.

Angesichts dieser Anforderungen implementierte ABB ein rigoroses Qualifizierungsprogramm, das sich an den im Verfahren DNV RP-A203 definierten Empfehlungen und Technologie-Reifegraden (Technology Readiness Level, TRL) für Komponenten, Baugruppen und Einheiten zur Erschließung und Förderung von Kohlenwasserstoffen im Offshore-Bereich orientierte. Darüber hinaus wurden Anforderungen an Topside-Systeme und -Ausrüstung, die Vorgaben der API 17F für Steuerungssysteme in der Unterwasserproduktion einschließlich Wärme-, Schwingungs- und Druckprüfungen sowie beschleunigte Lebensdauerprüfungen und Equinor-eigene Anforderungen

—  
 01 Künstlerische Darstellung einer Stromversorgungs- und Druckerhöhungsanlage aus einer Fallstudie von Equinor.

—  
**Stian Ingebrigtsen**  
 ABB AS Energy Industries  
 Bergen, Norwegen

stian.ingebrigtsen@no.abb.com

**Svein Vatland**  
 ABB AS Energy Industries  
 Oslo, Norwegen

svein.vatland@no.abb.com

**Heinz Lendenmann**  
 ABB System Drives  
 Västerås, Schweden

heinz.lendenmann@se.abb.com



02a



02b

(z. B. hinsichtlich Auslegungsmargen und der Unempfindlichkeit der Ausrüstung) berücksichtigt. Dank des systematischen Projekt- und Designansatzes sowie der engen Zusammenarbeit mit den Experten der Projektpartner konnten notwendige Designänderungen schnell erkannt und Verbesserungen frühzeitig umgesetzt werden. Damit wurde eine hohe Zuverlässigkeit innerhalb der festgelegten Betriebsbedingungen sichergestellt und ein erfolgreiches Risikomanagement gewährleistet. So kann sich die Öl- und Gasindustrie sicher sein, dass die gesamte entwickelte Technik für den Einsatz unter anspruchsvollsten Tiefstwasser-Bedingungen bereit ist.

—  
**Das ABB-System liefert Strom über eine Entfernung von 600 km an Verbraucher auf dem Meeresboden in bis zu 3.000 m Tiefe.**

#### **Qualifizierung ist alles: das Unterwasser-Elektronikmodul**

Das Unterwasser-Steuerungs- und Schutzsystem ist das „Gehirn“ der gesamten Energieversorgungslösung, die aus Haupteinheiten für die Stromverteilung und -umwandlung, Hilfsstromversorgung und Steuerung besteht. Das neue System muss in der Lage sein, Strom über eine Entfernung von bis zu 600 km an Verbraucher auf dem Meeresboden in bis zu 3.000 m Tiefe zu liefern – was in dieser Form bisher noch nie gemacht wurde.

Zur Bewältigung dieser enormen Herausforderung wurde ein pragmatischer, schrittweiser Ansatz gewählt, der die Entwicklung

der gesamten Ausrüstung und Systeme einschließlich des Steuerungssystems von der Entwurfsphase bis zum Systemtest umfasst →02,03. Unter anderem wurden Verfahren entwickelt, um das Verhalten und die Grenzen von Werkstoffen, Teilen, Komponenten, Geräten, Unterbaugruppen und Baugruppen zu untersuchen. Simulationen, Labor- und Feldversuche ermöglichten die Durchführung von iterativen Designmodifikationen nach Prüfungen und Wiederholungsprüfungen →02. So wurden z. B. Steuergeräte in schwer zugänglichen Umgebungen getestet, um die Bedingungen an entlegenen Unterwasser-Standorten nachzubilden. Dabei wurden unter rauesten Testbedingungen vorübergehende Abweichungen festgestellt, die wieder verschwanden, sobald sich die Bedingungen änderten. Um festzustellen, welche Bedingungen genau zu den Störungen führten, wurden während der Tests Gerätedaten erfasst und anschließend einer Ursachenanalyse unterzogen. Durch die anhand von Design- und Testiterationen gewonnenen Erkenntnisse gelang es ABB, selbst schwer greifbare Designprobleme zu bewältigen und alle Qualifizierungsanforderungen für Komponenten, Baugruppen und Einheiten zu erfüllen. So konnte die Qualifizierung des montierten Unterwasser-Elektronikmoduls (Subsea Electronics Module, SEM) bereits vor der Durchführung von Tests unter nahezu realen Feldbedingungen erreicht werden →03.

#### **VSD-Design und Qualifizierung**

Frequenzumrichter in Form von drehzahlgeregelten Antrieben bilden das Herzstück der Unterwasser-Stromversorgungslösung. VSDs regeln die Drehzahl und das Drehmoment von Unterwasser-Motoren für Pumpen und Kompressoren, die zur Injektion von Meerwasser



03

—  
02 Die Steuerungs-  
komponenten wurden  
entwickelt, getestet,  
modifiziert und erneut  
getestet. Zwei Ent-  
wicklungsphasen sind  
hier dargestellt.

02a Controller  
in einer frühen  
Entwicklungsphase.

02b Controller bei  
der abschließenden  
Qualifikationsprüfung.

—  
03 Der finale Prototyp  
des SEM PEC, hier auf  
seinem Montage-Chas-  
sis, erfüllte die in den  
Standards API 17F,  
ISO 13628-6 und dem  
Statoil-Standard  
TR1233v7 definierten  
Anforderungen der  
Ölindustrie.

und zur Druckerhöhung bei der Ölförderung bzw. zur Verdichtung von Erdgas auf dem Meeresboden eingesetzt werden. Dazu wurden die Antriebe modular, kompakt, robust und extrem zuverlässig – mit einer Wartungsfreiheit von bis zu 30 Jahren – ausgelegt<sup>1</sup>.

Die Umrichter liefern eine variable Ausgangsspannung von 2,3 kV bis 7,2 kV oder mehr. Der Betriebsfrequenzbereich ist – außer für schnell laufende Kompressorlasten unter 5 MVA – auf 200 Hz begrenzt. Ein in den VSD integrierter Ausgangsfilter sorgt dafür, dass die Stromqualität und Spannungsspitzen innerhalb der Toleranzen der Motoren und Kabel bleiben.

Ein ebenfalls integrierter Umrichtertransformator wird von der Unterwasser-Schaltanlage mit der Bemessungs-Versorgungsspannung (11–33 kV) und einer Standardfrequenz von 50/60 Hz oder einer niedrigen Frequenz (LFAC) von 16⅔ Hz gespeist. Dies ermöglicht die Stromübertragung über ein einziges Kabel über bemerkenswert große Entfernungen von bis zu 600 km.

Das modulare VSD-Design von ABB ist für den Betrieb verschiedener Unterwasser-Motoren mit Scheinleistungen von bis zu 18 MVA skalierbar. So kann durch Parallelschaltung von zwei Umrichtereinheiten selbst der größte Unterwasser-Kompressor auf dem Meeresboden gespeist werden →04.

Die VSDs (und die MS-Schaltanlage) sind in ölgefüllten, druckkompensierten Tanks untergebracht, wobei das Öl als Isolier- und Kühlmedium für die Leistungskomponenten fungiert.

Basierend auf einer robusten Zellentopologie mit Leistungshalbleitern und integrierter Redundanz in den Steuer- und Stromkreisen unterstützt das Design minimale Wartungsanforderungen. Fällt eine Zelle aus, verhindert das System einen

Übergang des Fehlers auf benachbarte Zellen. Der Umrichter funktioniert auch bei Verlust von einer oder zwei Zellen pro Phase. Ein integriertes, ebenfalls auf mehreren Ebenen redundantes Fehlermanagement-System sorgt für eine zusätzliche Erhöhung der Zuverlässigkeit.

—  
Durch Design- und Testiterationen konnten selbst schwer greifbare Designprobleme bewältigt werden.

Im Forschungs- und Entwicklungszentrum von Equinor im norwegischen Trondheim absolvierten die Hauptkomponenten und Baugruppen der Umrichter einschließlich der Lichtwellenleiter und Anschlüsse einen erfolgreichen Drucktest bei 345 bar über einen Zeitraum von 3.000 Stunden und stellten damit ihre Bereitschaft für den Einsatz unter realen Unterwasserbedingungen bei hohem Druck unter Beweis.

#### Design und Qualifizierung der Unterwasser-Schaltanlage

Die ABB Mittelspannungs-Unterwasserschaltanlage hat die Aufgabe, den Strom an die VSDs und andere Verbraucher auf dem Meeresboden zu verteilen.

Die neu konzipierte Anlage unterstützt bis zu sechs Verbraucherabzweige und verfügt über einen Kuppelschalter zur Kopplung von zwei Schaltanlagen →05. Die Zuleitung der Anlage ist mit der Sekundärseite eines Unterwasser-Abspanntransformators oder direkt mit einem von der Wasseroberfläche oder vom Land kommenden Unterwasserkabel verbunden. Die Abzweige wiederum sind mit den Verbrauchern (Umrichter für die Pumpen und Kompressoren auf dem Meeresboden) verbunden. Mit einer Bemessungs-Außenleiterspannung von 36 kV und einem Hauptsammelschienenstrom von 1.600 A deckt das modulare und skalierbare Design eine Vielzahl von Anwendungen und Systemkonfigurationen ab. Die Schaltanlage verfügt über zwei integrierte Hilfsabspanntransformatoren zur Versorgung des Hilfsstromverteilungssystems, das aus separat bergbaren redundanten Einheiten besteht. Niederspannungs-Leistungsschutzschalter ermöglichen ein Spannungsfrei-Schalten des Systems und unabhängiges Bergen des angeschlossenen Hilfsverbrauchers. Außerdem bieten sie Schutz gegen Fehler im Hilfssystem und ermöglichen eine externe Stromspeisung für Updates des Systemzustands nach einer Abschaltung.

#### Fußnote

1) Siehe „Umrichter für den Unterwassereinsatz“ auf Seite 50.



04



05

Basierend auf der vielfach eingesetzten Vakuumleistungsschalter-Technologie von ABB wurden die von Öl umgebenen Komponenten unter zyklischem und statischem Druck getestet und nach IEC/IEEE bauartgeprüft. Die Qualifizierung der Leistungsschalter beinhaltet außerdem Ein- und Ausschaltprüfungen bei 16⅔ Hz Versorgungsfrequenz, Bemessungs-Kurzschlussstrom und maximaler Asymmetrie. Es wurden mehrere Leistungsschaltermodule gefertigt und zusammen mit den entsprechenden elektrischen und optischen Steuerschnittstellen u. a. elektrischen Bauartprüfungen, mechanischen Dauerprüfungen und Schwingungsprüfungen für Betriebs- und Transportfälle unterzogen.

In einer frühen Phase des Projekts wurden vier unterschiedliche Ausführungen der Leistungsschalter-Pole aus verschiedenen Materialien und mit unterschiedlichen Designs näher untersucht. Der erfolgreiche Entwurf, ein Schaltermodul mit vier Verbraucherabzweigen, wurde anschließend

bei ABB in Ratingen (Deutschland) als Prototyp realisiert und getestet.

#### **Flachwassertests sprechen für sich**

Nach den erfolgreichen Labortests wurde die Ausrüstung unter Mitwirkung der Projektpartner im Rahmen von Flachwassertests erstmalig einem Praxistest unterzogen. Im Dezember 2017 erreichte das Projekt einen bedeutenden Meilenstein, als erstmalig ein maßstabsgerechter Prototyp eines Mittelspannungs-VSD bei ABB im finnischen Vaasa erfolgreich im flachen Wasser getestet wurde. Dabei wurde der Umrichter über 1.000 Stunden lang bei Nenn- und Vollast in einer Power-in-the-Loop-Konfiguration am Netz betrieben. Auf diese Weise mussten nur einige Hundert Kilowatt vom Netz ausgeglichen werden. Bei dem Test zeigten die elektronischen Bauteile und Leistungskomponenten unter allen Umgebungsbedingungen und Belastungen ein hervorragendes thermisches Verhalten.

—  
Die erfolgreichen Tests und das Erreichen des Reifegrads TRL 4 ebnet den Weg für die kommerzielle Einführung.

Im Juni 2019 wurde ein Prototyp der gesamten Elektrifizierungslösung bestehend aus zwei parallel geschalteten VSDs sowie der dazugehörigen Schaltanlage und Steuerung im flachen Wasser getestet →06. Die erfolgreiche Durchführung der Tests und das Erreichen des Technologie-Reifegrads TRL 4 ebnet den Weg für die kommerzielle Einführung des modularen Elektrifizierungssystems.

#### **Vom geschützten Hafen zur vollständigen Markteinführung**

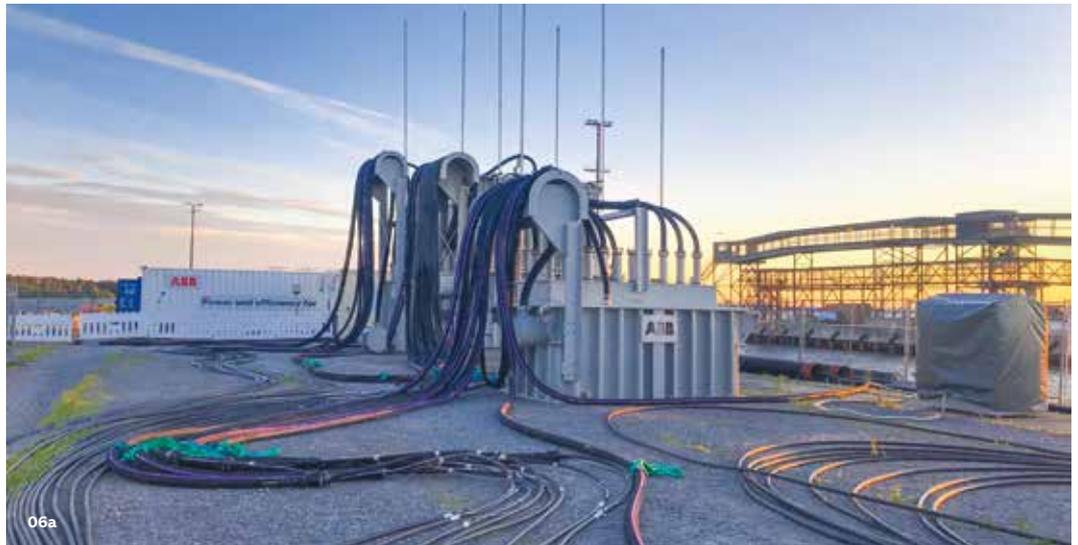
Mit einem VSD, der in der Lage ist, eine Last von bis zu 9 MVA zu speisen und bis zu 18 MVA in paralleler Konfiguration zu unterstützen, deckt die ultrazuverlässige, flexible und skalierbare Lösung die meisten Anforderungen von Unterwasseranwendungen ab. Zudem kann der Strom von jeder beliebigen Topside-Anlage oder auch von Land aus eingespeist werden.

Mit dieser einzigartigen Lösung hat ABB die strengen Prüf- und Qualifizierungsanforderungen der Öl- und Gasindustrie mehr als erfüllt. Die neuen Design- und Testverfahren sowie die enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern haben einen entscheidenden Anteil am Erfolg des Projekts. Ihnen ist es zu verdanken, dass die Elektrifizierungslösung bereit ist für den Sprung ins tiefe Wasser. •

—  
04 Zwei Unterwasser-Umrichter in paralleler Konfiguration.

—  
05 Die modulare Schaltanlage mit vier Abzweigen. Die ABB-Schaltanlage mit einer Ausgangsfrequenz von 16% Hz ermöglicht eine Stromverteilung über sehr große Entfernungen.

—  
06 Die bei den Flachwassertests im Juni 2019 verwendete Ausrüstung mit den dazugehörigen Hebevorrichtungen.

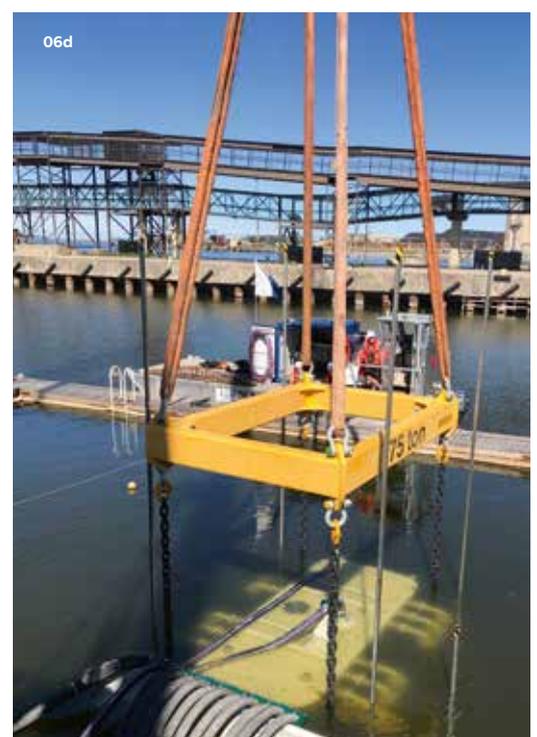
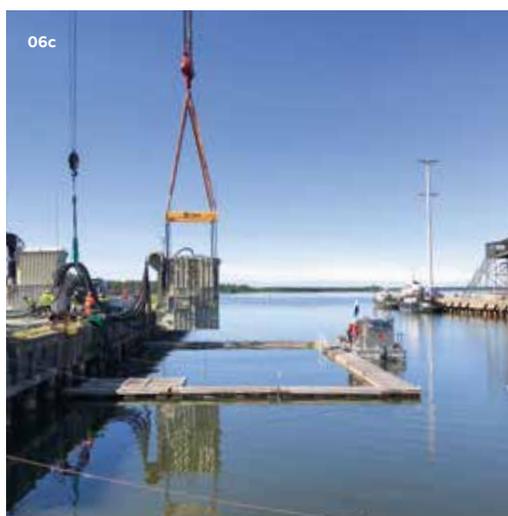


06a Der Schaltanlagen-Prototyp „MVDU“ mit den beiden VSDs dahinter.

06b Absenken von „MVDU“ in den Hafen von Vaasa.

06c Einer der VSD-Prototypen vor dem Herunterlassen ins Wasser.

06d Die Hebevorrichtung für einen der VSD-Prototypen.



#### Literaturhinweise

[1] EIA: „EIA predicts 28% energy use increase by 2040“. Verfügbar unter: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=32912> (abgerufen am 28.11.2019).

[2] O. Oekland et al. (2013): „Steps to the Subsea Factory“. Proceedings of Offshore Technology Conference. Rio de Janeiro, Brasilien. S. 304–313.

[3] J. O. Bugge, S. Ingelbrigtsen (2017): „Subsea Power JIP – As Enabler for all Subsea Electric Power Production“. Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston, Texas USA. S. 2885–2895.

---

EXTREME ANFORDERUNGEN

# Umrichter für den Unterwassereinsatz

01



In Zusammenarbeit mit Industriepartnern hat ABB ein elektrisches Unterwasser-Versorgungssystem für die Öl- und Gasindustrie entwickelt, das seinesgleichen sucht. Das mit einem druckkompensierten Mittelspannungs-Frequenzumrichter ausgerüstete System steht kurz vor dem Abschluss des Qualifizierungsprozesses und ebnet den Weg für Unterwasseranlagen mit integrierten drehzahlgeregelten Antrieben für Pumpen und Kompressoren.



—  
01 Prototypen der drehzahlgeregelten Antriebe vor einem Flachwassertest in der Nähe von Vaasa, Finnland.

Die Öl- und Gasindustrie ist bestrebt, Off-shore-Ressourcen möglichst effizient zu fördern. Wie wäre es, wenn dabei die gesamte elektrische Ausrüstung, die zum Antrieb und zur Steuerung von Unterwasser-Pumpen und -Kompressoren für Öl und Gas erforderlich ist, auf dem Meeresgrund in unmittelbarer Nähe der Anlagen platziert werden könnte?

Traditionell werden solche Versorgungssysteme an Land oder auf Plattformen im Meer installiert. Durch eine Platzierung auf dem Meeresboden können nicht nur Gewicht und Platz auf Plattformen eingespart werden. Auch die Verkabelungskosten werden erheblich reduziert, die Reaktionszeiten bei Schwankungen an den Bohrlöchern verkürzt und die Kosten für die Stromversorgung deutlich gesenkt. Gleichzeitig wird die Zuverlässigkeit erhöht und die Wartungskosten werden drastisch gesenkt<sup>1</sup>.

—  
**Heinz Lendenmann**  
ABB System Drives  
Västerås, Sweden

heinz.lendenmann@se.abb.com

**Tor Laneryd**  
ABB Corporate Research  
Västerås, Sweden

tor.laneryd@se.abb.com

**Raphael Cagienard**  
**Thomas Wagner**  
ABB System Drives  
Turgi, Schweiz

raphael.cagienard@ch.abb.com  
thomas.wagner@ch.abb.com

**Stian Ingebrigtsen**  
**Svein Vatland**  
ABB AS Energy Industries  
Bergen, Norwegen

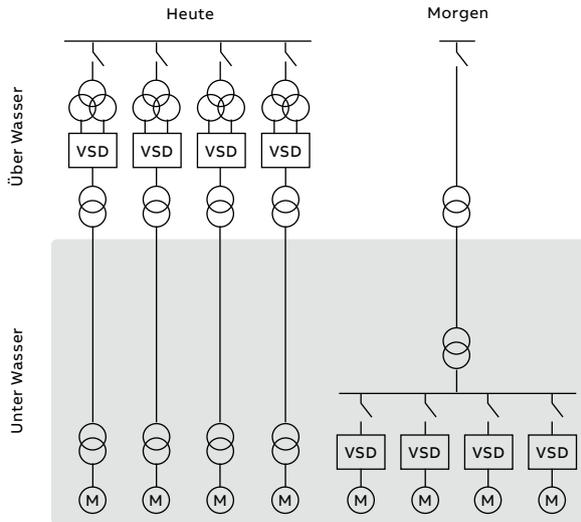
stian.ingebriqtsen@no.abb.com  
svein.vatland@no.abb.com

**Kim Missing**  
**Esa Virtanen**  
ABB Transformers  
Vaasa, Finnland

kim.missing@fi.abb.com  
esa.virtanen@fi.abb.com

—  
Wie wäre es, wenn die elektrische Ausrüstung zum Antrieb und zur Steuerung von Pumpen und Kompressoren auf dem Meeresgrund platziert werden könnte?

Angesichts dieser Vorteile haben ABB, Equinor, Total und Chevron im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts Technologien für die Stromverteilung und -umwandlung unter Wasser entwickelt und getestet. Im ersten Teil des Projekts wurde der Prototyp eines Mittelspannungs-Frequenzumrichters (Variable Speed Drive, VSD) im Maßstab 1:1 gebaut und Ende 2017 für 1.000 Stunden in flachen Gewässern getestet →01. Nach Kenntnissen von ABB war dies das erste Mal, dass ein Mittelspannungs-Frequenzumrichter mit 9 bis 12 MVA für eine längere Zeit in einer Meerwasserumgebung betrieben wurde.



02

Vor Kurzem erfolgte ein weiterer Test unter Verwendung eines zweiten Umrichters mit verbessertem Design. Dabei wurden beide Umrichter parallel geschaltet, um höhere Leistungen zu erreichen. Hinzu kamen Unterwasser-Schaltanlagen und Steuerungen, um einen Test des gesamten Unterwasser-Versorgungssystems zu ermöglichen.

Ein Unterwasser-VSD-System kann mehrere nahegelegene Kompressoren und Pumpen über ein einziges Kabel mit fester Frequenz steuern.

#### Bahnbrechende Technologie

Die drehzahlgeregelten Antriebe von ABB bilden das Herzstück des Projekts. Die über 50 t schweren Ungetüme speisen nahegelegene Elektromotoren für Pumpen und Kompressoren. Die modular aufgebauten VSDs mit Leistungen von 0,5 bis 18 MVA und Spannungen von 2,0 bis 7,2 kV eignen sich für eine breite Palette von Unterwassermotoren. Außerdem sind sie in der Lage, Pumpen mit normaler Drehzahl und Nassgaskompressoren mit 50 bis 120 Hz sowie Gaskompressoren mit hohen Drehzahlen von bis zu 18.000 U/min zu speisen. Die Entfernung zwischen Umrichter und Motor kann dabei einige Kilometer, die Entfernung zwischen der Stromversorgung auf der Plattform oder an Land und dem Unterwassersystem bis zu 600 km betragen.

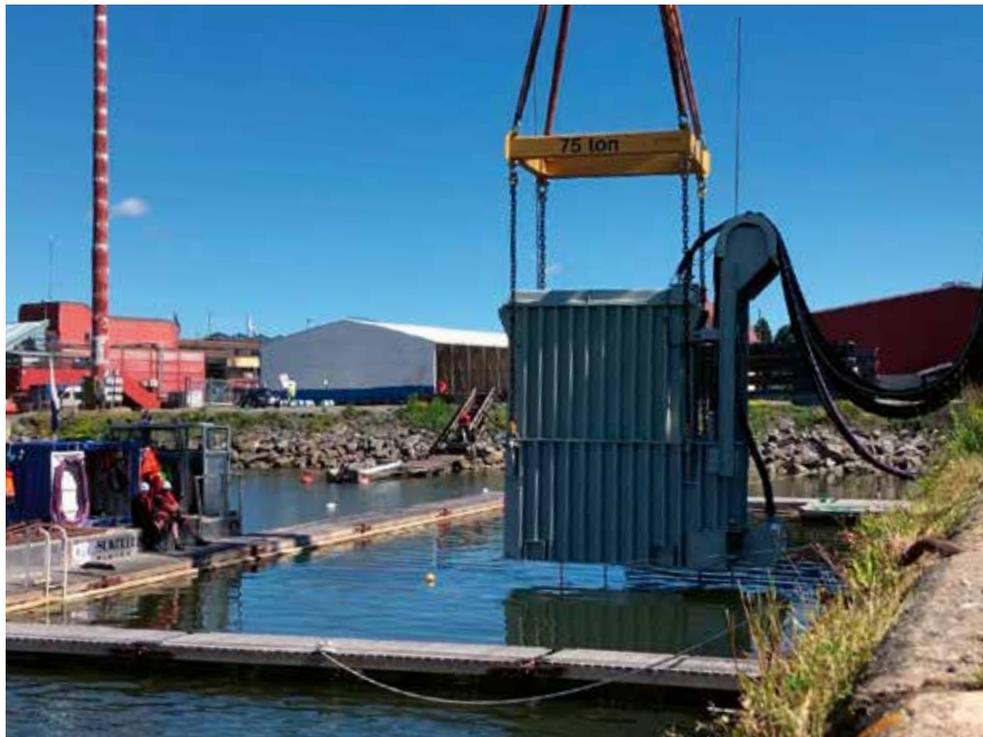
Alle VSD-Module sind für einen Betrieb in Wassertiefen von 3.000 m und mehr ausgelegt und wurden gemäß API 17F und SEPS SP-1002 qualifiziert. Eine der Qualifikationsprüfungen beinhaltete den Betrieb eines Leistungsmoduls in einem Druckbehälter bei 345 bar, wobei alle Elektronik- und Leistungskomponenten voll funktionsfähig bleiben mussten. Unter diesen Bedingungen wandelte das Leistungsmodul 3.000 Stunden lang Ströme von bis zu 1.000 A um. Dies war ein entscheidender Schritt zur Erlangung des Technologie-Reifegrads (Technology Readiness Level) TRL 4 – ein Meilenstein, der die Tür für den Einsatz der Ausrüstung auf Öl- und Gasfeldern öffnet.

Der Tank für den gesamten VSD basiert auf einer druckkompensierten Konstruktion, wodurch die Einsatztiefe praktisch nicht begrenzt ist. Die Druckkompensation wird dadurch erreicht, dass die Umrichterkomponenten einschließlich des Transformators vollständig von einer dielektrischen Flüssigkeit umgeben sind, die gleichzeitig als Kühlmittel dient. Die elektrischen Leistungskomponenten des Umrichters inklusive der Kondensatoren, Halbleiter und Steuerelektronik sind mit größeren Sicherheitsreserven, redundanter Hardware und hoher Druckfestigkeit ausgelegt. Bei der Wahl der Werkstoffe wurde besonders auf deren Verträglichkeit mit der dielektrischen Flüssigkeit geachtet, um ein hochgradig zuverlässiges Gesamtdesign sicherzustellen. Die Systementwicklung orientierte sich am Designkonzept der ABB-Unterwassertransformatoren und erweiterte dieses. Die robusten, wartungsfreien und extrem zuverlässigen Transformatoren werden seit 1999 erfolgreich eingesetzt. Ferner verfügen die neuen VSDs von ABB über einen Controller und eine Kommunikationsschnittstelle zur Wasseroberfläche, die in einem austauschbaren elektronischen Unterwassermodul untergebracht sind.

#### Auf Tauchstation

Im Jahr 2019 wurden zwei VSDs testweise im flachen Wasser eines Hafens nahe der finnischen Stadt Vaasa installiert. Beide Umrichtereinheiten wurden in einem vollständigen Unterwasser-Versorgungssystem parallel geschaltet, um die höchsten geforderten Leistungen zu erreichen.

Während der Flachwassertests wurden die Umrichter über 3.000 Stunden (etwa 125 Tage) lang mit einer Eingangsspannung von 22 kV und Ausgangsspannungen von 6,9–7,2 kV bei unterschiedlichen Leistungen betrieben. Dabei zeigte sich, dass sämtliche Komponenten des VSD-Systems einwandfrei zusammenarbeiteten. Auch die



03

— 02 Derzeitige und zukünftige Lösungen für die Konfiguration wichtiger elektrischer Komponenten in Unterwasser-Umgebungen. Durch Platzierung der VSDs auf dem Meeresboden (rechts) lässt sich die erforderliche Verkabelung für die Motoren erheblich reduzieren.

— 03 Traditionell an Land oder auf Plattformen untergebrachte VSDs könnten schon bald auf dem Meeresboden platziert werden. Zwei Unterwasser-VSDs wurden im Hafen von Vaasa (Finnland) in 9 m Tiefe getestet. Das gesamte System arbeitete für die Testdauer von über 3.000 Stunden fehlerfrei.

#### Fußnote

1) Siehe „Zukunftweisende Technologie für die Stromversorgung auf dem Meeresboden“ auf Seite 44.

angestrebte Fehlertoleranz konnte nachgewiesen werden. So sorgte die eingebaute Redundanz der VSDs dafür, dass das System nach absichtlicher Trennung (und späterem Wiederanschluss) einiger interner Module durch Befehle von der Oberfläche problemlos weiterlief.

#### Richtungsweisendes Konzept

Wie bereits erwähnt, bietet die Platzierung der Umrichter unter Wasser viele Vorteile gegenüber herkömmlichen, über der Wasseroberfläche angeordneten Lösungen. Wie in →02 dargestellt, ist bei letzteren für jeden Motor ein eigenes Kabel erforderlich, das mehrere Kilometer lang sein kann. Außerdem erfordern solche Lösungen – neben dem Platz für den VSD auf der Plattform – einen Step-up-Transformator an der Oberfläche und einen Step-down-Transformator unter Wasser zur Bewältigung der Kabelverluste [1].

Ein Unterwasser-VSD-System hingegen kann mehrere nahegelegene Kompressoren und Pumpen über ein einziges Kabel mit fester Frequenz zur Station steuern. Verschiedene Konzepte dieser Art wurden bereits von großen Ölfirmen vorgestellt, darunter auch das auf Seite 44 dargestellte „Subsea-Garden-Konzept“ [2].

Für die Ingenieure war die einzuschlagende Richtung also von Anfang an klar →03. Die Frage war nur, mit welcher Technologie dies erreicht werden konnte.

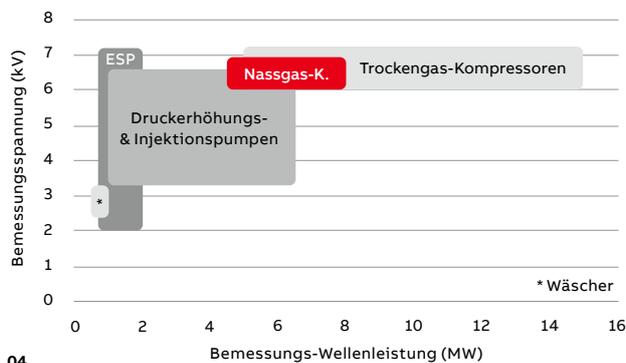
— Die thermische Architektur des Tanks musste so ausgelegt sein, dass auch bei maximaler Tiefe eine zuverlässige Kühlung gewährleistet ist.

Trotz der neuen Umgebung für die VSDs und der erforderlichen einwandfreien Zuverlässigkeit wurde schnell klar, dass nicht alles neu entwickelt werden musste. So wussten die Projekttechniker, dass die Geräte – um die Beschränkungen hinsichtlich der Einsatztiefe zu beseitigen – ähnlich wie Standardtransformatoren mit einer dielektrischen Flüssigkeit gefüllt sein mussten, die für die innere Druckübertragung, Kühlung und elektrische Isolierung sorgt [3]. So kann der Tank nach ähnlichen Designprinzipien konzipiert werden wie ein klassischer Transformatorentank und muss nicht in der Lage sein, so hohen Drücken standzuhalten wie einige andere Systeme. Stattdessen kommt ein Unterwasser-Balgkompensatorsystem von ABB zum Einsatz, das dafür sorgt, dass der Innen- und Außendruck stets nahezu identisch sind.

Eine besondere Herausforderung bestand jedoch darin, die elektrischen und mechanischen VSD-Komponenten – also Kondensatoren, Halbleiter, lokale Elektronik und Verdrahtung – so anzupassen, dass diese dem vollen Umgebungsdruck am Einsatzort auf dem Meeresgrund standhalten. Außerdem galt es, die chemische Verträglichkeit sämtlicher Komponenten gegenüber der dielektrischen Flüssigkeit sicherzustellen. Darüber hinaus musste die thermische Architektur des gesamten Tanks so ausgelegt sein, dass auch bei maximaler Tiefe eine äußerst zuverlässige Kühlung gewährleistet ist. Dies waren die entscheidenden neuen Aspekte, die im Rahmen des aktuellen Projekts erfolgreich behandelt wurden. Dies ist deshalb so bedeutend, weil bei vorherigen Bemühungen zur Entwicklung einer VSD-Technologie für den Unterwassereinsatz übermäßig schwere, massive Stahlbehälter erforderlich waren, um dem Wasserdruck standzuhalten, was trotz des umgebenden kalten Wassers zu Schwierigkeiten mit der Kühlung führte [4].

### Die Lösung lag in einem modularen System, genauer gesagt in einer zellenbasierten Umrichtertopologie.

Die Einhaltung der Temperaturgrenzen für sämtliche Komponenten ist entscheidend für die Zuverlässigkeit und Sicherheit eines Systems. Um dies sicherzustellen, haben die Projekttechniker ein passives Kühlkonzept entwickelt, das die Schnittstelle zwischen den Tankwänden und dem Meerwasser nutzt, um Verlustwärme abzuführen. Das System basiert also ausschließlich auf natürlicher Konvektion und erfordert keine bewegten Teile, die potenzielle Ausfallursachen darstellen.



04

Die Leistungsfähigkeit des passiven Kühlsystems wurde am vollständigen System im Rahmen der Flachwassertests analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturverteilung innerhalb des Tanks den konstruktiven Erwartungen entsprach, d. h. für temperaturkritische Komponenten konnte auch bei höheren Leistungen eine niedrige Umgebungstemperatur und somit eine maximale Zuverlässigkeit gewährleistet werden. Tatsächlich wird für die Elektronikmodule eine nahezu ideale thermische Umgebung erreicht, indem die Ölkühlung die Temperatur konstant und niedrig hält. Dieser Ansatz hat sich als wirksam erwiesen und funktioniert zuverlässig bei jeder Temperatur, jedem Druck und jedem Salzgehalt des Meerwassers, da die Eigenschaften des Wassers bei diesen Bedingungen wohlbekannt sind [5].

### Eine modulare Lösung für hohe Leistungsanforderungen

Eine weitere technische Herausforderung, mit der sich die Projekttechniker konfrontiert sahen, war die sehr große Bandbreite der Leistungs- und Spannungsanforderungen → 04, denen die VSDs – insbesondere im Hinblick auf Druckerhöhungs- und Injektionspumpen, Nass- und Trockengaskompressoren sowie kleinere Anwendungen wie Tauch- und Wäscherpumpen – gerecht werden müssen.

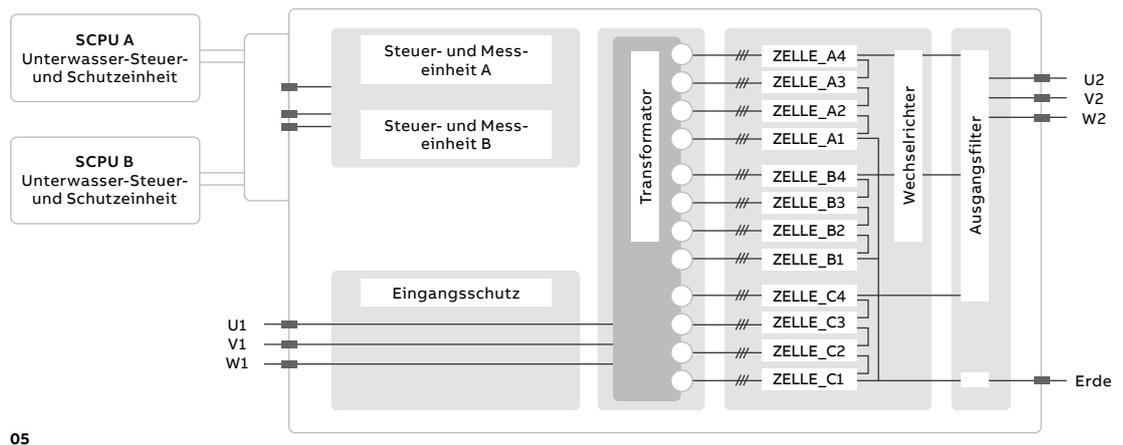
In Zusammenarbeit mit bedeutenden Industriepartnern wurde eine Designgrundlage für VSD-betriebene Unterwasserausrüstung festgelegt, die folgende elektrische Spezifikationen beinhaltet:

- 2,0–7,2 kV Ausgangsspannung
- 0,3–15 MW Motorwellenleistung
- 0–200 Hz bzw. für Umrichter mit < 5 MVA bis 300 Hz Grundausgangsfrequenz
- 11–33 kV Eingangsspannung
- 30 Jahre Einsatzdauer
- Meerwasserumgebung in 3.000 m Tiefe, 0–20 °C Wassertemperatur

Angesichts der Bandbreite dieser Anforderungen wurde schnell klar, dass nicht alles mit einem einzigen, festen VSD-Design abgedeckt werden konnte. Die Lösung lag in einem modularen System, genauer gesagt in einer zellenbasierten Umrichtertopologie. Die für das Projekt gewählte Topologie basiert auf einem Leistungsmodul, der sogenannten Zelle. Die Spannung der einzelnen Zellen und die Anzahl miteinander verbundener Zellen bestimmen die vom VSD bereitgestellte Ausgangsspannung. Die Zellengröße, die im direkten Verhältnis zu ihrem Bemessungsstrom steht, entspricht auch dem Bemessungsstrom des Umrichters.

—  
04 Zielanwendungen für den Unterwasser-VSD mit deren typischen Leistungsbereichen und Motorspannungen.

—  
05 Hauptbausteine, Konfiguration und Prinzipschaltbild vom Prototyp des Unterwasser-Umrichters.



05

Bei den ersten beiden gebauten Einheiten waren die Zellen für eine Stromstärke von 1.000 A ausgelegt. Bei der Optimierung der Zuverlässigkeit für eine bestimmte Ausgangsspannungsklasse ist eine sorgfältige Abwägung zwischen der Zellennennspannung und der Anzahl der Zellen erforderlich, denn eine höhere Zellenspannung senkt zwar die Anzahl der erforderlichen Zellen und die Komplexität, reduziert aber auch die Möglichkeit für redundante Zellen. Die Komplexität des Umrichtertransformators spielt bei der Abwägung ebenfalls eine Rolle.

Die Zelle selbst besteht aus zwei IGBT-Halbbrücken (Bipolartransistoren mit isoliertem Gate) und mehreren Kondensatoreinheiten für den Gleichspannungs-Zwischenkreis (DC-Zwischenkreis). Die IGBT-Gate-Treiber werden direkt vom DC-Zwischenkreis gespeist, sodass keine isolierten Hochspannungs-Steuerstromversorgungen erforderlich sind. Die Kommunikation mit der Zelle erfolgt über Lichtwellenleiter von einer Steuer- und Messeinheit innerhalb des Tanks.

Jede Zelle verfügt über mechanische Komponenten (Trennschalter, Bypass), die eine Trennung vom Hauptstrokreis ermöglichen. Das Ergebnis ist ein fehlertoleranter Umrichter, der auch bei Ausfall einer Zelle in Betrieb bleibt. Der Grad der Redundanz kann über die Anzahl der Zellen bestimmt werden, die zusätzlich zu den für eine bestimmte Ausgangsspannung erforderlichen Zellen in einer VSD-Einheit installiert werden. Damit stellt die Zelle nicht nur einen wichtigen Baustein des Unterwasser-Umrichters, sondern auch eine funktionale Teileinheit dar, die zusammen mit ihren Teilkomponenten eine bedeutende Rolle für die Qualifizierung spielt.

—  
Die Zelle ist nicht nur ein wichtiger Baustein des Umrichters, sondern auch eine funktionale Teileinheit.

Wie in →05, dargestellt, wird der Wechselrichter mit seinen vom Umrichtertransformator gespeisten Zellen durch einen Ausgangsfilter und eine eingangsseitige Schutzzeinheit ergänzt, die darauf ausgelegt sind, transiente Überspannungen auf ein für die Anschlüsse, Kabel und den Motor akzeptables Maß zu begrenzen bzw. interne Komponenten gegen dynamische Überspannungen zu schützen. Diese drei Einheiten bieten eine inhärente Flexibilität, d. h. bei projektspezifischen Anpassungen ist keine erneute Qualifizierung erforderlich, da lediglich identische interne Teilkomponenten neu angeordnet werden. Dank dieses Ansatzes lässt sich für jedes Projekt der gewünschte Spannungsbereich realisieren, indem einfach die richtige Anzahl von qualifizierten Einheiten gewählt und zu einem Umrichter zusammengesetzt wird. Sind höhere Ausgangsströme erforderlich, können durch Parallelschaltung zweier kompletter Umrichtereinheiten Leistungen von bis zu 18 MVA erreicht werden.

Die Flachwassertests haben bewiesen, dass der Unterwasser-VSD von ABB und alle seine Komponenten einschließlich der Redundanz und der passiven Kühlung bis 1.000 A einwandfrei zusammen funktionieren. Damit hat das System sein Ziel – den Technologie-Reifegrad 4 – erreicht und ist bereit für den Einsatz auf dem Meeresboden. ●

#### Literaturhinweise

[1] G. Scheuer et al (2009): „Subsea Compact Gas Compression with High-Speed VSDs and Very Long Step-Out Cables“. Proc. 6th IEEE PCIC Eur. Conf. Rec., S. 163–173.

[2] Ø. H. Sneffjellå (2014): „Subsea factory from an electrical perspective“. IFEA, Subsea Kraft, 2014, Industriens forening for elektroteknikk og automatisering. 4.–5. Februar 2014.

[3] E. Virtanen, A. Akdag (2012): „Power below the waves“. ABB Review Special Report Transformers, S. 33–36.

[4] T. Hazel et al.: „Taking Power Distribution Under the Sea“. IEEE Industry Applications Magazine Vol. 19, No. 5, S. 58–67.

[5] H. Lendenmann et al.: „Shallow Water Testing of 9–12 MVA Variable Speed Drive for Subsea Installation“. Off-Shore technology conference 2019.



01

—  
EXTREME ANFORDERUNGEN

# A200-H – der neue Maßstab in der einstufigen Turboaufladung

Um die Lücke zwischen dem einstufigen Turbolader A100-H und dem zwei-stufigen Power2® zu schließen, hat ABB den A200-H entwickelt. Mit einem Druckverhältnis von bis zu 6,5 und einem Spitzenwirkungsgrad von über 69 % ermöglicht der A200-H die einstufige Aufladung von schnelllaufenden Gasmotoren mit 24 bar Mitteldruck.

01 Der A200-H schließt die Lücke zwischen ein- und zweistufigen Turboladern und bietet neue Möglichkeiten für eine breite Palette von Anwendungen.

02 Druckverhältnisanforderungen von schnelllaufenden Mager-Gasmotoren.

**Gerald Müller**  
**Antje Hertel**  
**Franco Domenig**  
**Martin Seiler**  
**Florian Maurer**  
 ABB Turbo Systems  
 Baden, Schweiz

gerald.mueller@ch.abb.com  
 antje.hertel@ch.abb.com  
 franco.domenig@ch.abb.com  
 martin.a.seiler@ch.abb.com  
 florian.maurer@ch.abb.com

Angetrieben durch die steigende Nachfrage nach dezentraler, flexibler, kostengünstiger und umweltfreundlicher Stromerzeugung sind schnelllaufende Gasmotoren mit magerer Verbrennung zu einer bedeutenden Stütze der modernen Erzeugungslandschaft geworden. In den vergangenen 20 Jahren ist der Mitteldruck dieser Motoren alle drei Jahre etwa um 1 bar gestiegen, während sich die elektrischen Wirkungsgrade im gleichen Zeitraum erheblich verbessert haben – eine Entwicklung, die entsprechende Verbesserungen im Druckverhältnis und Wirkungsgrad von Turboladern verlangt.

Mit ihrer aktuellen Generation von einstufigen Turboladern des Typs A100-H definiert ABB die Grenze der einstufigen Aufladung mit Druckverhältnissen von bis zu 5,8 und einem Turbolader-Wirkungsgrad von bis zu 66 % [1]. Der A100-H eignet sich für Mager-Gasmotoren mit bis zu 22 bar Mitteldruck. Für höhere Mitteldrücke wurde vor etwa 10 Jahren eine fortschrittliche zweistufige Aufladung für die gasmotorbasierte Stromerzeugung auf den Markt gebracht, die seitdem für überzeugende Betriebsergebnisse sorgt. Das zweistufige Power2®-System von ABB zeichnet sich unter anderem durch großzügige Druckverhältnisreserven und Wirkungsgrade von über 73 % aus – ist aber auch komplexer, schwerer und teurer als einstufige Lösungen. Für Gasmotoren, die mit einem Mitteldruck von 22 bis 24 bar arbeiten, ist eine zweistufige Aufladung meist zu komplex, während ein Mitteldruck von über 24 bar erforderlich ist, um das Potenzial des Power2 voll auszuschöpfen.

Um diese Lücke zwischen ein- und zweistufiger Aufladung zu schließen und Herstellern von schnelllaufenden Gasmotoren dabei zu helfen, die Leistungsdichte ihrer Motoren weiter zu erhöhen oder Höhenanwendungen zu unterstützen, hat ABB den neuen A200-H mit einem Druckverhältnis von bis zu 6,5 und einem Spitzenwirkungsgrad von über 69 % entwickelt →01,02. Der A200-H ermöglicht die einstufige Aufladung von schnelllaufenden Gasmotoren mit einem Mitteldruck von etwa 24 bar bei gleichzeitiger Steigerung des Motorwirkungsgrads im Vergleich zum A100-H.

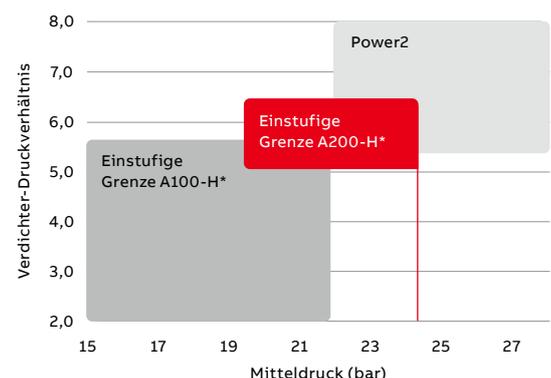
Um die Lücke zwischen ein- und zweistufiger Aufladung zu schließen, hat ABB den A200-H entwickelt.

### Turbolader-Wirkungsgrad

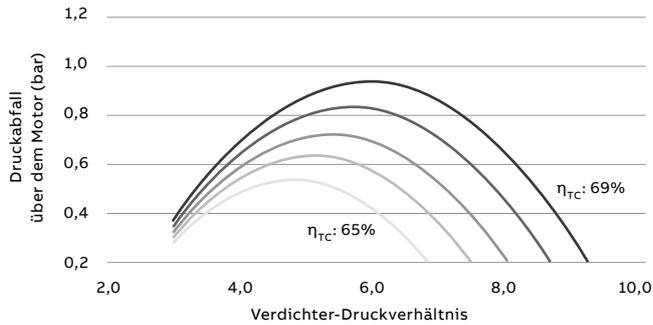
→03 zeigt, dass bei einem höheren Druckverhältnis ein höherer Ladewirkungsgrad erforderlich ist, um den Druckabfall über dem Motor (der Druck im Sammler minus dem Druck vor der Turbine) konstant zu halten. Aus diesen Anforderungen haben sich die Entwicklungsziele für den A200-H ergeben: Steigerung des Druckverhältnisses bei einem höheren Ladewirkungsgrad im Vergleich zu den aktuellen Turboladern der Reihe A100-H.

### Konzept der Verdichterstufe

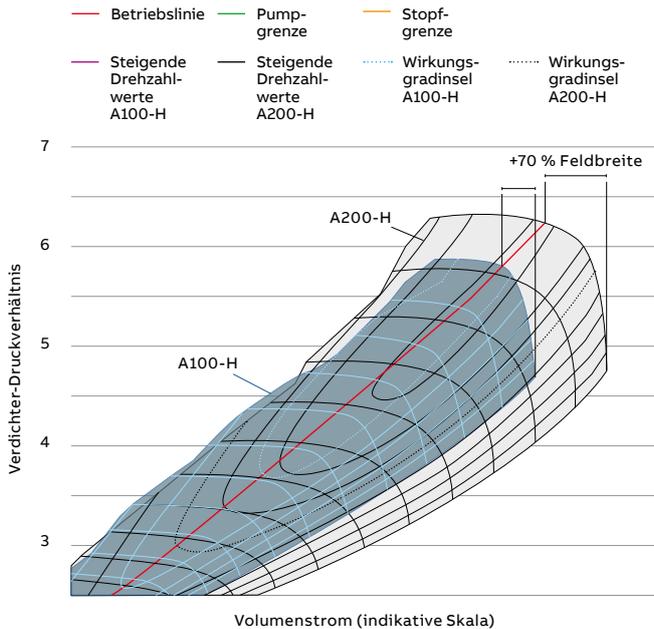
Um die Anforderungen eines hohen Druckverhältnisses und eines hohen Wirkungsgrads zu erfüllen, musste der spezifische Durchsatz des Turboladers optimiert werden. Dabei hatten die Ingenieure die Freiheit, einige Abmessungen größer zu gestalten als beim A100-H. Dennoch blieb die Einfachheit und Kompaktheit der einstufigen Konfiguration gegenüber einer zweistufigen Lösung erhalten. Die Verwendung einer Verdichterstufe mit einem Laufrad aus einer Aluminiumlegierung ermöglicht den Einsatz effizienter Fertigungsprozesse, die die geforderten hohen Qualitätsstandards gewährleisten. Im Hinblick auf die anspruchsvollen thermodynamischen Zielsetzungen sollte das Laufrad Austauschintervalle von 40.000 Betriebsstunden unterstützen (die wie unten beschrieben durch Nutzung einer digitalen Lösung verlängert werden können).



\*Grunddaten für das Matching: 500 m/30 °C  
 (zusätzliche Reserven für die Höhe erforderlich)



03



04

#### Optimierung des Verdichterkennfelds

→04 zeigt, dass das erreichbare Druckverhältnis für den Motornennbetrieb beim A200-H deutlich über 6 liegt. Für einen stabilen Motorbetrieb ist ein ausreichender Abstand der Betriebslinie zur Verdichter-Pumpgrenze erforderlich. Daher wurde das Verdichterkennfeld nicht nur im Hinblick auf die Wirkungsgradanforderungen, sondern auch die Breite des Kennfelds optimiert. Besonderes Augenmerk lag dabei auf dem Betriebsbereich. Hier konnten mithilfe modernster Technologie zur Kennfeldverbreiterung Druckverhältnisse von bis zu 6,5 realisiert werden [2]. Im Vergleich zum A100-H wurde eine Verbesserung der Kennfeldbreite von 70 % erreicht. Nach bewährtem Konzept der ABB-Turbolader ist eine Anpassung an den erforderlichen Volumenstrom durch verschiedene Trim-Werte des Verdichterrads möglich.

#### Mechanische Qualifizierung des Verdichters

Die Verdichterstufe ist mechanisch so ausgelegt, dass sie der Erregung von Eigenschwingungen im Betriebsbereich standhält. Durch Finite-Elemente-(FE-)Analysen und das fundierte Wissen von ABB über das Schwingungsverhalten von Turbinenschaufeln konnten gezielte konstruktive Maßnahmen umgesetzt werden,

um potenziell kritische Resonanzamplituden zu reduzieren bzw. Erregungen zu beseitigen. Das Ergebnis ist ein robustes Design im Hinblick auf die Ermüdung bei hohen Lastspielzahlen (High-Cycle Fatigue), aber mit einer minimalen Anzahl von Qualifizierungsschleifen. Die FE-Analysen ermöglichten zudem die gezielte Platzierung von Dehnungsmessstreifen während des Qualifizierungsprozesses →05.

Die einstufige Bauform zeichnet sich gegenüber einer zweistufigen Lösung durch ihre Einfachheit und Kompaktheit aus.

#### Turbinenstufe

Um die hohen Verdichter-Druckverhältnisse von bis zu 6,5 mit einem hohen Turbinenwirkungsgrad abzudecken, wurde eine neue Turbinenstufe entwickelt. Dabei wurde die Turbine so auf den Verdichter abgestimmt, dass bei Erfüllung der mechanischen Anforderungen ein größtmöglicher Turbolader-Wirkungsgrad erzielt wird. Sämtliche Turbinenkomponenten – Gaseintritt, Düsenring, Turbinenrad und Diffusor – wurden entsprechend den geforderten Volumenströmen und Druckverhältnissen ausgelegt. Mithilfe von dreidimensionalen numerischen Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) wurde die hohe Leistungsfähigkeit des Turboladers und durch FE-Analysen die für die hohen Drehzahlen erforderliche mechanische Integrität sichergestellt. So können trotz der hohen Drehzahlen die notwendige Lebensdauer der Komponenten und die empfohlenen Austauschintervalle für Gasmotorenanwendungen erreicht werden.

In Kombination mit dem Hochdruck-Verdichter konnte in einem Demonstrationssystem ein Turbolader-Wirkungsgrad von über 69 % erreicht werden →06.

#### Gehäusedesign

Angesichts des geforderten hohen Leistungslevels wurde auf ein Drop-in-Design für die Luft- und Gasanschlüsse verzichtet, sodass diese neu positioniert und erweitert werden konnten. Ein Vorteil dieser Neuordnung ist eine bessere Erreichbarkeit der Anschlusspunkte und damit eine deutlich einfachere Handhabung bei der Montage und Wartung des Turboladers.

Mit Blick auf zukünftige Anwendungen zur Lastspitzenreduktion (Peak-Shaving) galt es, bereits in einer frühen Entwicklungsphase die Belastungen des Gehäuses zu berücksichtigen. So wurde z. B. mithilfe fortschrittlicher FE-Werkzeuge ein verbessertes Turbinengehäuse modelliert, das sowohl

—  
03 Druckdifferenz über dem Zylinder in Abhängigkeit vom Ladewirkungsgrad und Druckverhältnis.

—  
04 Verbreitertes Verdichterkennfeld des A200-H bei angenommenen Volllast-Betriebspunkten. In den Wirkungsgrad-Inseln ist die Leistung des Motors am besten.

—  
05 High-Cycle-Fatigue-Test mit Dehnungsmessstreifen.

einem schnellen Anstieg der Gaseintrittstemperaturen nach dem Motorstart als auch einer hohen Anzahl von Start-Stopp-Zyklen standhält.

—  
**Bei der Entwicklung galt es, bereits frühzeitig die Belastungen des Gehäuses zu berücksichtigen.**

Erfahrungen mit dem A100-H haben zudem gezeigt, dass die Montage von größeren Turboladern auf der Motorkonsole durch hydraulische Befestigung oder Spannmuttern erleichtert wird. Deshalb bieten die neuen Turbolader der A200-H-Reihe beide Möglichkeiten →07.

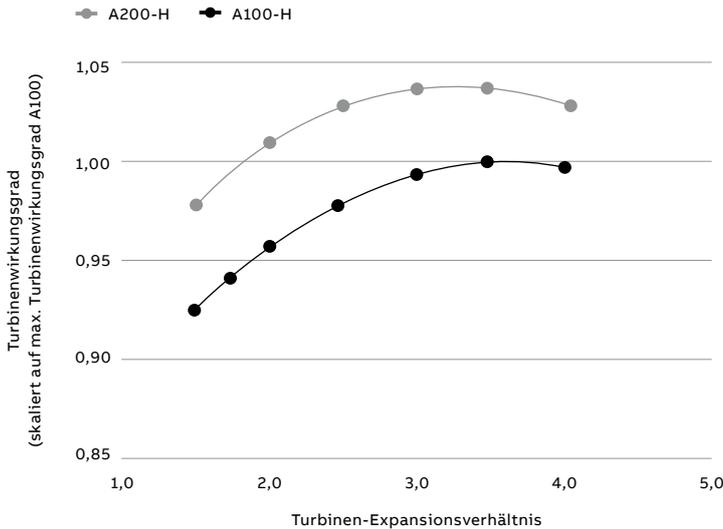
#### Wellen- und Lagersystem

Wie bei heutigen Radialturboladern üblich, stellen auch bei den Turboladern der Reihe A200-H Gleitlager mit Quetschöldämpfern in puncto Kosten und Zuverlässigkeit die vernünftigste Lösung dar. Um eine einfache Montage mit möglichst wenigen Teilen zu gewährleisten, befinden sich die Haupt- und Hilfsaxiallager auf der Verdichterseite.

Wie bei heutigen Radialturboladern üblich, stellen auch bei den Turboladern der Reihe A200-H Gleitlager mit Quetschöldämpfern in puncto Kosten und Zuverlässigkeit die vernünftigste Lösung dar. Um eine einfache Montage mit möglichst wenigen Teilen zu gewährleisten, befinden sich die Haupt- und Hilfsaxiallager auf der Verdichterseite. Beim A200-H hat der Kunde nun erstmalig die Wahl zwischen zwei Lagerkonzepten. So verfügt der A200-H über ein patentiertes Lagermoduldesign, das sowohl die bewährten Gleitlager von ABB als auch neu entwickelte, hocheffiziente Kugellager unterstützt →08. Bei Teillast beträgt der Leistungsverlust der Kugellagervariante gegenüber der Gleitlagerausführung etwa 15 %, womit sie sich ideal für Kunden mit besonders transienten Betriebsarten eignet. Transiente thermodynamische Simulationen auf der Basis eines gängigen 2-MW-Gasmotors und verschiedenen Antriebskonzepten haben eine etwa 15%ige Verkürzung der Zeit bis zum Erreichen der Volllast (nach Warm- und Kaltstart) nur durch den Austausch des Lagersystems gegen Kugellager ergeben.

05





06

### Die digitalen Fähigkeiten des A200-H ermöglichen eine größere Flexibilität bei der Beurteilung des Wartungsbedarfs.

Beide Lagerausführungen sind direkt mit dem normalen Motorölkreislauf verbunden. Für die Kugellagervariante sind keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich, jedoch sind der Ölverbrauch und die Wärmeabgabe an das Öl nur halb so hoch wie beim gleichen Turbolader mit Gleitlagern. Durch die Modulbauweise ist eine Umrüstung von Gleitlagern auf Kugellager problemlos möglich.



07

### Niedrigere Lebenszykluskosten durch digitale Fähigkeiten

Die Lebensdauer des Rotors hängt von der Drehzahl und Temperatur des Turboladers sowie der Anzahl der Lastzyklen ab. In der Vergangenheit wurde von bestimmten Umgebungsbedingungen – mit festgelegten Abweichungen – und einem bestimmten Betriebsprofil ausgegangen, nach denen die zulässigen Werte für die Betriebsparameter eher konservativ festgelegt wurden. Heute jedoch ist vermehrt eine zyklische Betriebsweise – z. B. beim Peak-Shaving – gefragt, bei der die Motoren und Turbolader einer viel höheren Zahl von Start-Stopp-Zyklen ausgesetzt sind als früher. Nicht nur die mechanischen Lastzyklen, sondern auch die starken Temperaturschwankungen haben eine große Auswirkung auf den Verschleiß.

Die digitalen Fähigkeiten der neuen A200-H-Reihe ermöglichen eine größere Flexibilität hinsichtlich der Beurteilung des Wartungsbedarfs von Turboladern und der Freigabe von Betriebsgrenzen, die über heutige Empfehlungen hinausgehen. Eine Überwachung der Drehzahl, Temperaturen, Start-Stopp-Zyklen, Umgebungsbedingungen und anderer Parameter wird ermöglicht durch im Turbolader integrierte Sensoren oder durch den Zugriff auf die Daten des Generatorsystems. Der Zugang zu anlagenspezifischen Betriebsdaten ermöglicht wiederum eine Beurteilung der Lebensdauer von Komponenten auf Basis der realen Belastung – z. B. die Prüfung des Lebensdauerverbrauchs von Rotorkomponenten oder eine Überprüfung von heißen statischen Komponenten anhand der Betriebshistorie.

Durch eine Online-Analyse der erfassten Daten können die Wellen- und Rotorkomponenten bei jeder Inspektion, z. B. alle 20.000 Betriebsstunden für Erdgas-Anwendungen, begutachtet werden. Je nach Ergebnis der Analyse erhält der Kunde eine Freigabe für den Weiterbetrieb für das nächste Inspektionsintervall bei voller Gewährleistung. Bei der Inspektion nach 40.000 Stunden kann sich der Kunde für eine Verlängerung des empfohlenen Austauschintervalls über die nach dem starren, konventionellen Ansatz ohne kontinuierliche digitale Unterstützung festgelegten 40.000 Stunden hinaus entscheiden. Geht man von einer Motorlebensdauer von 120.000 Betriebsstunden mit einer großen Revision aus, kann der Betreiber durch die Verlängerung des Austauschintervalls für den Rotor über die Lebensdauer des Motors hinweg mit zwei Rotoren für den Turbolader auskommen, d. h. den Rotor nur einmal austauschen und somit Kosten sparen.



08

— 06 Turbolader-  
Wirkungsgrad:  
A200-H und  
A100-H.

— 07 Turbolader vom  
Typ A240-H mit  
Spannmuttern.

— 08 Test des Lage-  
moduldesigns an  
einem frühen  
Prototyp auf dem  
Prüfstand bei ABB.

Für heiße statische Teile, die einer zyklischen thermomechanischen Ermüdungsbelastung (Thermo-Mechanical Fatigue, TMF) ausgesetzt sind, lassen sich durch die Erfassung von Betriebsdaten und deren Korrelation mit dem Verschleißverhalten der Teile neue Erkenntnisse gewinnen und vorhandene Erfahrungen ergänzen. Ein neuer Analysealgorithmus und neueste Optimierungswerkzeuge unterstützen die Entwicklung weiterer TMP-optimierter Designs für Gehäuse und andere Teile, die potenziell starken thermomechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Zukünftige Peak-Shaving-Anwendungen profitieren von den neuen digitalen Möglichkeiten durch erweiterte Anwendungsgrenzen und deutlich reduzierte Lebenszykluskosten.

**Kunden mit schnelllaufenden Motoren können gespannt sein auf das Potenzial der neuen Turbolader.**

Die digitalen Lösungen für den A200-H bieten Betreibern von Turboladern zusätzliche Möglichkeiten mit entsprechender Wertschöpfung. Wartungsplanung, Leistungsüberwachung, Flottenmanagement und zeitnahe Upgrade-Empfehlungen sind nur einige Beispiele von neuen Funktionalitäten, die schrittweise mit der neuen Reihe eingeführt werden.

#### **Zeitleiste und Anwendungsbereich**

Mit der Turboladerreihe A200-H setzt ABB einen innovativen Maßstab in der einstufigen Hochdruck-Turboaufladung und reagiert damit auf die Forderungen von Herstellern und Betreibern

von schnelllaufenden Motoren nach einer höheren Leistungsdichte, einem höheren Systemwirkungsgrad und geringeren spezifischen Lebenszykluskosten. Die Turbolader vom Typ A200-H erreichen Verdichter-Druckverhältnisse von bis zu 6,5 und Turbolader-Wirkungsgrade von über 69 %.

Neue Verdichter- und Turbinenstufen wurden entwickelt, um ein hohes Maß an Leistungsfähigkeit und mechanischer Zuverlässigkeit sowie eine lange Lebensdauer der Komponenten im anspruchsvollen Volllastbetrieb zu gewährleisten. Das Design des Turboladers erfüllt höchste Anforderungen, z. B. im Hinblick auf einen zyklischen Betrieb, die Minimierung des Wirkungsgradverlusts, Containment-Sicherheit und Rotordynamik.

Die digitalen Fähigkeiten des A200-H bieten mehr Flexibilität bei der Beurteilung des Wartungsbedarfs des Turboladers und der Lebensdauer seiner Komponenten. Anlagen- und betriebspezifische Daten erleichtern eine belastungsbasierte Beurteilung und ermöglichen eine signifikante Reduzierung der Lebensdauerkosten. Kunden mit schnelllaufenden Motoren können gespannt sein auf das Potenzial der neuen Turbolader, wobei die ersten Prototypen des A240-H Ende 2019 getestet wurden. Mit den Typen A238-H, A234-H und A231-H werden drei kleinere Turbolader folgen und die neue Turboladerreihe komplettieren. Der Fertigungsbeginn dieser Typen ist für 2021/2022 vorgesehen. •

#### **Literaturhinweise**

[1] D. Wunderwald et al. (2008): „The New A100-H Single-Stage Turbocharger Series for High-Speed Engines“. MTZ worldwide, Issue 07-08, Volume 69, S. 9–14.

[2] L. Galloway, et al.: „An Investigation of the Stability Enhancement of a Centrifugal Compressor Stage Using Porous Throat Diffuser“. Journal of Turbomachinery, 140(1), 2017.



BUZZWORDS ENTSCHLÜSSELT

# Additive Fertigung

Die Verwandlung von Daten in dreidimensionale physische Objekte zur Herstellung von individualisierten Massenprodukten und Produktmerkmalen.



**Chau Hon Ho**  
Corporate Research  
Baden-Dättwil,  
Schweiz

chau-hon.ho@  
ch.abb.com

Die additive Fertigung, auch 3-D-Druck genannt, ist ein Verfahren, bei dem ein digitales Modell per Software zunächst in zweidimensionale Schichten zerlegt und anschließend in Anweisungen in Maschinensprache umgesetzt wird. Diese werden vom Drucker ausgeführt, der durch schichtweisen Materialauftrag die Daten in ein dreidimensionales physisches Objekt verwandelt. Der 3-D-Druck unterscheidet sich somit gänzlich von traditionellen subtraktiven Fertigungsverfahren wie Bohren und Bearbeiten oder formgebenden Verfahren wie Spritzgießen.

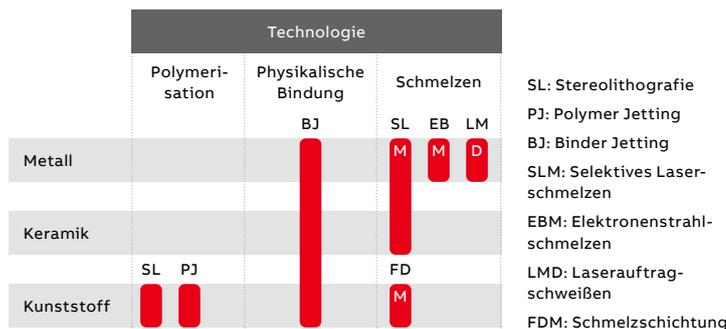
Per 3-D-Druck lassen sich auch komplexe Formen realisieren, die mit anderen Fertigungsverfahren nicht hergestellt werden können. Außerdem ermöglicht die Technologie die Realisierung

kundenspezifischer Produkteigenschaften wie eine optimierte Wärmeleitfähigkeit oder -beständigkeit, hohe Festigkeit oder Steifigkeit und sogar Bioverträglichkeit. Ferner können Werkstoffe mit Metall-, Keramik-, Holz- oder Graphenpartikeln gefüllt oder mit Kohlenstofffasern verstärkt werden. Das Ergebnis sind Teile mit einzigartigen Eigenschaften, die sich für spezielle Anwendungen eignen.

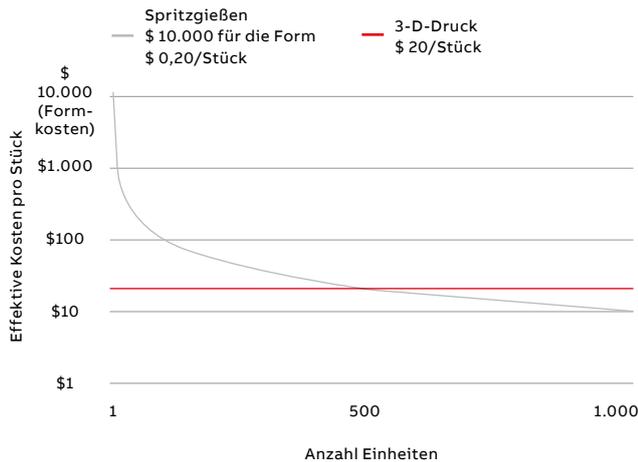
### Geringe Kosten, schnelles Wachstum

Die Kosten für ein 3-D-gedrucktes Teil sind abhängig von der Menge und Art des verwendeten Werkstoffs (Kunststoff, Keramik, Metall), dem Druckverfahren (Polymerisation, physikalische Bindung, Schmelzen), der Druckzeit und der erforderlichen Nachbearbeitungszeit →01. Der einzige Kostenfaktor, der bei Veränderung eines bestehenden Designs anfällt, ist die zur Anpassung des digitalen 3-D-Modells erforderliche Zeit. Somit kann jedes Teil ohne große Auswirkungen auf die Herstellungskosten an spezifische Kundenbedürfnisse angepasst werden.

Da der Stückpreis mit zunehmender Menge nur geringfügig sinkt, kann der 3-D-Druck bei sehr großen Stückzahlen mit traditionellen Fertigungsverfahren nicht konkurrieren →02. Skaleneffekte kommen hier also kaum zum Tragen. Dennoch verlagert sich die Gewinnschwelle angesichts jüngster Entwicklungen in der Automatisierung des 3-D-Drucks und der zunehmenden Kommodifizierung einiger Werkstoffe stetig in Richtung höherer Stückzahlen.



Die Wahl der Drucktechnologie hängt von der Anwendung ab



02

01 Obwohl der 3-D-Druck eine relativ neue Technologie ist, stehen bereits viele fortschrittliche Verfahren und eine breite Palette von Werkstoffen zur Verfügung.

02 Der 3-D-Druck eignet sich kostenmäßig besonders zur Herstellung von Prototypen und kleinen Chargen.

Andere Faktoren, die zur Reduzierung der Kosten beim 3-D-Druck beitragen und den Weg für neue Geschäftsmodelle ebnen können, sind die Entwicklung vollständig integrierter Workflows und Betriebsabläufe sowie die Nutzung künstlicher Intelligenz zur generativen Gestaltung, Prozessoptimierung, Qualitätsvorhersage und automatischen Korrektur während des Drucks.

**Durch jüngste Entwicklungen verlagert sich die Gewinnschwelle des 3-D-Drucks in Richtung höherer Stückzahlen.**

### Blick in die Zukunft

Angetrieben durch schnellere Drucker, sinkende Werkstoffkosten und die steigende Nachfrage nach individualisierten Produkten hat sich der 3-D-Druck mittlerweile als Produktionstechnologie etabliert. So hat die US-amerikanische Hörgeräteindustrie im Jahr 2015 in weniger als 500 Tagen 99 % ihrer Produktion auf additive Fertigung umgestellt.

Laut Wohler's Associates [1] wird die weltweite 3-D-Druckindustrie im Jahr 2020 einen Gesamtumsatz von mehr als 15 Mrd. USD erzielen. Bis 2022 werden über 24 Mrd. USD und bis 2024 über 36 Mrd. USD erwartet. •

### Literaturhinweis

[1] Wohlers Associates: „Wohlers Report 2019“. Verfügbar unter: <https://wohlersassociates.com/2019report.htm> (abgerufen am 28.11.2019).

### 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](http://www.abb.com/abbreview).

Die ABB Review erscheint viermal pro Jahr in Englisch, Französisch, Deutsch, Spanisch und Chinesisch 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](http://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](mailto: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-Daettwil  
Schweiz  
[abb.review@ch.abb.com](mailto: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 ©2020  
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](http://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](http://abb.com/abbreview)





---

# Abonnieren und auf dem Laufenden bleiben

Sie haben eine Ausgabe der ABB Review verpasst? Wussten Sie, dass Sie sich per E-Mail benachrichtigen lassen können, sobald eine neue Ausgabe online ist, oder sich die gedruckte Version direkt zusenden lassen können?

Diese Optionen finden Sie auf unserem Web-Portal – neben einer Auswahl der neuesten Artikel und einer durchsuchbaren Bibliothek mit allen bisherigen Beiträgen bis zurück ins Jahr 1996 (und ausgewählten Artikeln bis zurück zu den Anfängen der Zeitschrift im Jahr 1914).



[www.abb.com/abbreview](http://www.abb.com/abbreview)

