

## Interdisziplinäre Forschung entlang einer Wertschöpfungskette

Das Projekt «SwiSS Transformer», das vom Schweizerischen Nationalfonds im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 70 gefördert wird, beschäftigt sich mit neuen Technologien für das Stromnetz der Zukunft. Im Zentrum steht der sogenannte Solid-State Transformator (SST). Damit liesse sich eine Vielzahl photovoltaischer Anlagen ins Stromnetz integrieren.

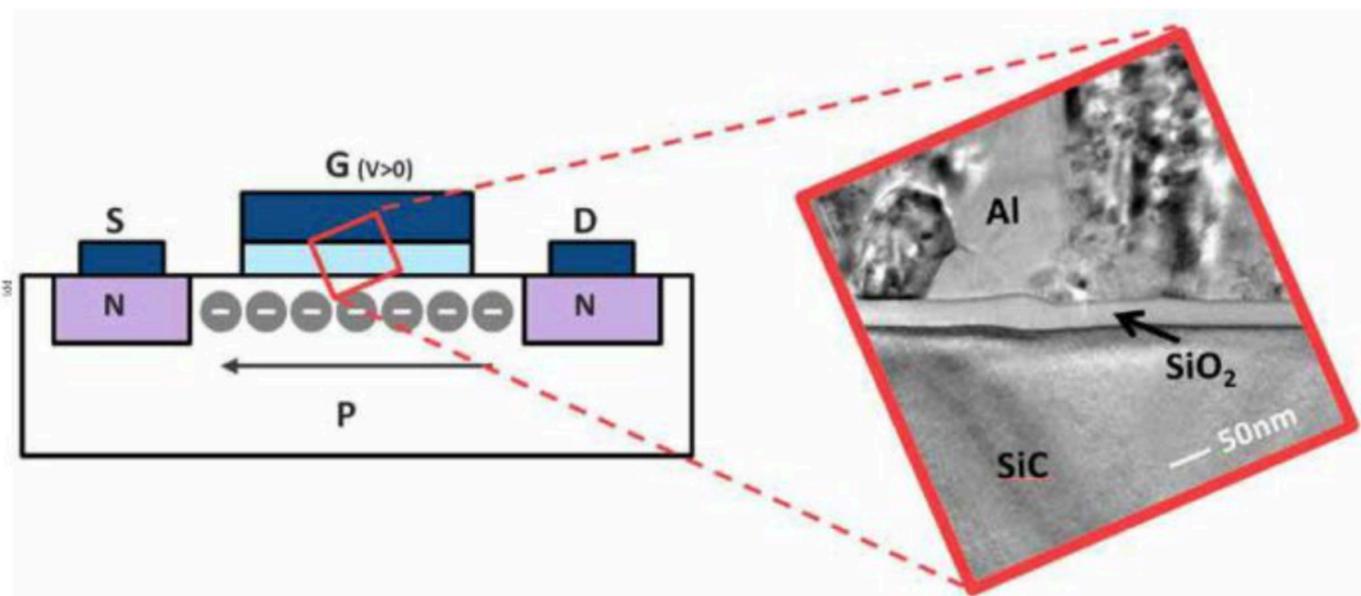


Bild 1: Schematische Darstellung eines lateralen MOSFET. Schwerpunkt aktueller Forschung ist die defektreiche Grenzfläche zwischen SiC und dem thermisch gewachsenen Siliziumdioxid.

Im Vergleich zu herkömmlichen, aus Kupfer und Eisen bestehenden Trafos, ist der SST ein leistungselektronisches System und kann an seinen Eingangs- und Ausgangsseiten nahezu alle elektrischen Grössen wie Spannung, Phasenwinkel oder Frequenz frei einstellen. Diese Eigenschaften könnten in Zukunft helfen, eine grosse Zahl von Photovoltaik-Anlagen in das Stromnetz zu integrieren. Mit einem möglichen Gleichstrom-Abgang des Trafos könnten darüber hinaus Solaranlagen, Akkuspeicher und Ladestationen für Elektrofahrzeuge direkt – und damit verlustarm – angebunden werden.

### SiC-Halbleiter noch wenig erforscht

Die Besonderheit an dem hier betrachteten System ist der Typ der verwendeten Leistungshalbleiter: Diese bestehen nicht aus herkömmlichem Silizium, sondern aus Silizium-Karbid (SiC) und eröffnen die Möglichkeit für höhere Wirkungsgrade und einen deutlich kompakteren und somit kostengünstigeren Aufbau. Allerdings ist der Entwicklungsstand von SiC-Halbleitern bei Wei-

tem noch nicht so ausgereift wie bei Silizium, und es sind viele offene Punkte zu klären. Diese reichen von der Materialforschung an den Halbleiterstrukturen selbst über die Systemauslegung und -optimierung unter thermischen, elektrischen und magnetischen Gesichtspunkten bis zur Untersuchung, wo und wie sich die neuartigen Technologien in zukünftigen Szenarien ideal einsetzen lassen.

### Interdisziplinäre Zusammenarbeit

So arbeiten im Projekt «SwiSS Transformer» Wissenschaftler des Paul-Scherrer-Instituts an der Optimierung der Grenzfläche zwischen SiC und dem Oxid von SiC-MOSFETs und testen ihre Erkenntnisse an den dort hergestellten Leistungstransistoren. An der ETH Zürich werden mit SiC-MOSFETs kompakte und hocheffiziente leistungselektronische Schaltungen entwickelt und charakterisiert. Ein speziell darauf angepasstes und optimiertes Kühlsystem wird an der EPFL entwickelt. An der FHNW werden schlussendlich die Anwendungen für SiC-basierte leistungselektronische Systeme im Stromnetz von morgen untersucht.

### Auch für andere Anwendungen interessant

Diese Kette reicht von der Grundlagenforschung über die Entwicklung bis zur Anwendung und umfasst mehrere wissenschaftlich-technische Fachgebiete. Um die spätere Nutzung und Umsetzung der Forschungsergebnisse sicherzustellen, wird das Projekt von den Unternehmen ABB als potenzieller Technologie-Entwickler und BKW als möglicher Anwender begleitet.

In den folgenden Abschnitten stellen Wissenschaftler aus dem Projekt einige ihrer Arbeitsthemen vor. Wie man sich bei der Lektüre sicher vorstellen kann, sind die Technologien auch für etliche weitere Anwendungen geeignet, denn auf Energie- und Kosteneffizienz kommt es schliesslich nahezu überall an. ●

Nicola Schulz, FHNW

## Herausforderungen und aktuelle Forschung an SiC-Leistungstransistoren

Mit den wachsenden Herausforderungen an Leistungselektronikbauteile in Bezug auf Energieeffizienz, Schaltverluste und Leistungsdichte stossen gängige Systeme auf Siliziumbasis immer mehr an ihre Grenzen. MOSFETs (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldefekttransistoren) aus Siliziumkarbid (SiC) haben dank überlegener Materialeigenschaften mehrere Vorteile gegenüber herkömmlichen Leistungselementen: Die grosse Bandlücke von 3,2 eV führt nicht nur zu bedeutend geringeren Leckströmen, sondern ermöglicht auch wesentlich höhere Betriebstemperaturen. Durch die hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit (2,8 MV/cm) von SiC können kompaktere Transistoren gebaut werden, was zu kürzeren Schaltzeiten und damit verbunden zu reduzierten Schaltverlusten führt. Dank guter thermischer Leitfähigkeit bei den typischen Betriebstemperaturen steigt auch die erreichbare Leistungsdichte und Stromtragfähigkeit. Neben den elektrischen Eigenschaften überzeugt SiC auch durch seine Robustheit, einen ho-

hen Schmelzpunkt und bessere Strahlungsresistenz.

### Es braucht Forschung

Obwohl SiC-MOSFETs mittlerweile kommerziell erhältlich sind, liegen deren Charakteristika teilweise noch weit hinter den theoretischen Erwartungen zurück: Der hohe Einschaltwiderstand (RDS,on) der Transistoren und damit verbundene Durchlassverluste sowie die niedrigere Mobilität der Ladungsträger im Leitungschanal sind Schwerpunkte aktueller Forschung.

### Defekte verstehen

Im Rahmen des SwiSS Transformer-Projekts wird am Paul-Scherrer-Institut (PSI) vor allem an der Reduzierung des Kanalwiderstands und einer Verbesserung der Kanalmobilität geforscht. Im Mittelpunkt steht die Untersuchung der Oxidationsprozesse während der MOSFET-Herstellung. Bei Temperaturen über 1000°C entsteht eine grosse Zahl an Defekten an der Grenzfläche zwischen dem thermisch gewach-

senen Oxid und SiC, was zu der niedrigen Elektronenmobilität und einer begrenzten Zuverlässigkeit des Leistungsbauteils führt. Um den Ursprung dieser Defekte zu verstehen und die Oxidationsbedingungen zu optimieren, benötigen wir verschiedene fundamentale Charakterisierungsmethoden wie Röntgenabsorption und Elektronenspektroskopie.

### Bauteile aus Siliziumkarbid

Zusätzlich zu Untersuchungen auf Mikro- und Nanometerebene werden in den Räumlichkeiten des PSI verschiedene elektronische Bauteile wie Schottkydioden oder MOS-Kondensatoren aus Siliziumkarbid designt, fabriziert und getestet. Dabei können neue Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung direkt in die Prozessoptimierung einfließen und den Weg für verlustärmere und verlässlichere Leistungselemente ebnen. ●

Judith Wörle, Massimo Camarda, Hans Sigg und Jens Gobrecht, PSI

## Ein passives Kühlsystem für SiC-Leistungshalbleiter

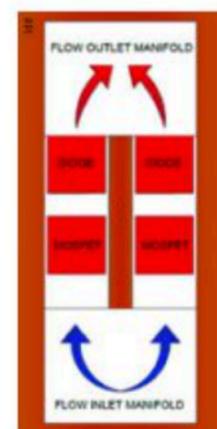


Bild 2: Schema und Auslegung der Wärmesenke.

Das Kühlsystem für die SiC-Halbleiter besteht aus einem Thermosiphon-Kreislauf, in dem ein Kühlmittel im Zweiphasenstrom (flüssig und gasförmig) zirkuliert. Alleine durch den Dichteunterschied zwischen der flüssigen und der Gasphase wird die Zirkulation im Kühlkreislauf in Gang gesetzt. Ein

äusserer Antrieb, wie z. B. eine Pumpe, und somit eine zusätzliche Energiezufuhr, ist nicht erforderlich. Das gesamte Kühlsystem besteht nur aus wenigen Komponenten: dem Kühlkörper, an welchem die SiC-Halbleiter ihre Wärme an das Kühlsystem abgeben, dem Verflüssiger, wo die Wärmeabgabe an die Um-

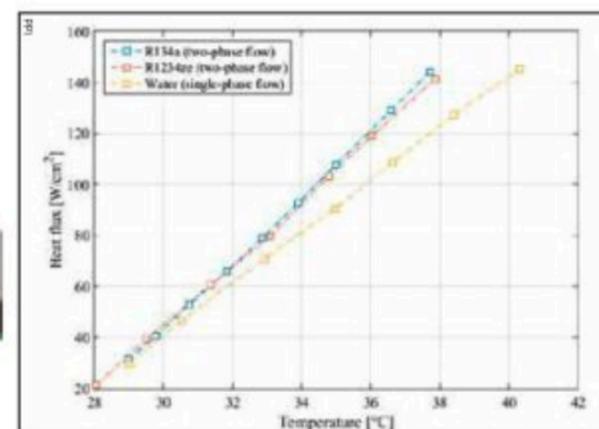


Bild 3: Thermischer Leistungsvergleich von Kältemitteln in Zweiphasenstrom gegenüber Wasser in Einphasenströmung.

gebung in Form von freier Konvektion erfolgt, sowie zwei Verbindungsrohren, der Steigleitung und dem Rücklaufrohr. Für die Untersuchungen des Kühlsystems wurde das Kühlmittel vorerst mit einer Pumpe angetrieben. Das Layout ist an das Design von SiC-Halbleitermodulen angepasst und in Bild 2 darge-

stellt. Die Kühlfläche ist in einen vorderen und einen hinteren Bereich aufgeteilt, um eine ungleichmäßige Verteilung des Wärmeflusses senkrecht zur Strömungsrichtung zu vermeiden. Um darüber hinaus eine gleichmäßige Verteilung des Durchflusses auf die beiden Kühlbereiche zu gewährleisten, steuern zwei Verteiler die Durchflüsse.

#### Kühlkörper auf dem Prüfstand

Die Kühlwirkung des Kühlkörpers wurde mittels einer Siedekurve ausgewertet, bei der

der Wärmestrom als Funktion der Temperatur aufgetragen wird. Wenn bei gegebenem Wärmestrom eine niedrigere Temperatur erreicht wird, ist die Kühlwirkung besser. Im Versuch wurde ein vorgegebener Wärmestrom durch Heizelemente erzeugt, die auf dem vorderen Kühlbereich der Wärmesenke montiert waren. Die Siedekurve wurde für die beiden Kältemittel R134a und R1234ze aufgenommen und mit der von Wasser verglichen. In Bild 3 ist der Vergleich der beiden Kältemittel in Zweiphasenströmung gegen-

über Wasser in einphasiger Strömung dargestellt. Die Temperatur der Heizelemente ist bei Wasser immer höher als bei den Kühlmitteln – bei einer Wärmeleistung von 150 W um fast 3 K. Die Zweiphasenströmung wirkt sich zudem vorteilhaft auf den Druckabfall in der Wärmesenke aus: Aufgrund des Auftriebseffekts bei gleichzeitiger Anwesenheit von Flüssigkeit und Gasphase sind die Druckabfälle mit Kältemitteln viel geringer als bei Wasser. ●

Filippo Cataldo, John Thome, EPFL

## Solid-State Transformator mit moderner SiC-Halbleitertechnologie

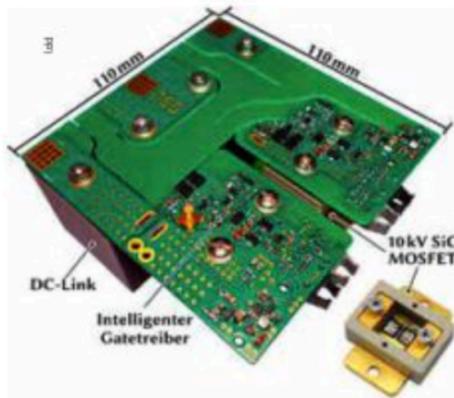


Bild 4: An der ETH Zürich entwickelter Prototyp eines Mittelspannungskonverters, ausgerüstet mit modernen 10-kV-SiC-MOSFETs.

Das Institut für Leistungselektronik und Messtechnik (Power Electronic Systems Laboratory) der ETH Zürich befasst sich mit der Analyse, Optimierung und experimentellen Verifizierung neuer leistungselektronischer Schaltungen und Systeme. Im Projekt «SwiSS Transformer» ist das Institut für die Realisierung des 25-kW-Solid-State-Transformators für die bidirektionale Anbindung eines 400-VDC-Verteilnetzes (z. B. zur Versorgung der Serverracks von Datacentern) an das 6,6-kV-AC-Mittelspannungsnetz verantwortlich. Die Analyse möglicher Schaltungsstrukturen, die Festlegung der Betriebsparameter und die Validierung der einzelnen Schaltungskomponenten erfolgen dabei mithilfe von Mehrkriterien-Optimierungen, welche neben Effizienz und Leistungsdichte auch die Kosten einbeziehen. Weiterhin werden die Beanspruchung der elektrischen Isolation und Schutzfunktionen berücksichtigt. Insgesamt wird so eine Grundlage für einen wirtschaftlichen Einsatz und eine hohe Be-

triebssicherheit sowie Verfügbarkeit von SSTs in zukünftigen Smart Grids geschaffen.

#### Hohe Schaltfrequenzen bei geringen Verlusten

Auf Basis neuer Halbleitermaterialien mit hohem Bandabstand wie z. B. Siliziumkarbid (SiC) ist es möglich, schnelle und verlustarme Schaltelemente (z. B. SiC-MOSFETs) mit Sperrspannungen von über 10 kV herzustellen, wodurch die Anzahl der auf der Mittelspannungsseite benötigten Schaltelemente sinkt und insgesamt eine Konverterschaltung geringerer Komplexität resultiert. Durch die hervorragenden Schalteigenschaften von SiC-MOSFETs sind trotz der hohen Spannung beeindruckend hohe Schaltfrequenzen von über 100 kHz möglich, was eine Reduktion des Volumens und Gewichts des zur Potenzialtrennung und Spannungsanpassung eingesetzten Transformators erlaubt.

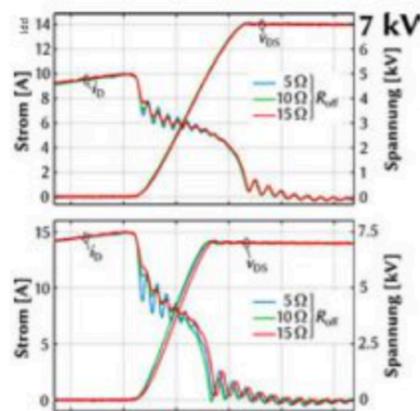


Bild 5: Gemessenes Ausschaltverhalten (Schalterstrom und Schalterspannung) eines 10-kV-SiC-MOSFETs.

#### Elementarer Bestandteil zukünftiger Netze

Gleichzeitig ergeben sich aber aus der Kombination hoher Spannung und hoher Schaltfrequenz neue Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich der elektrischen Isolation und der verwendeten Materialien. So müssen z. B. die Wicklungsverluste des im SST eingesetzten Mittelfrequenztransformators durch die elektrische Feststoffisolation nach aussen geführt werden, was spezielle Isolationsmaterialien mit zugleich sehr guten elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften erfordert. SSTs stellen damit einerseits ein interdisziplinäres, zukunftsweisendes Forschungsfeld, andererseits aufgrund ausgezeichneter Regelbarkeit und hoher Effizienz sowie Leistungsdichte einen elementaren Bestandteil zukünftiger intelligenter Netze dar.

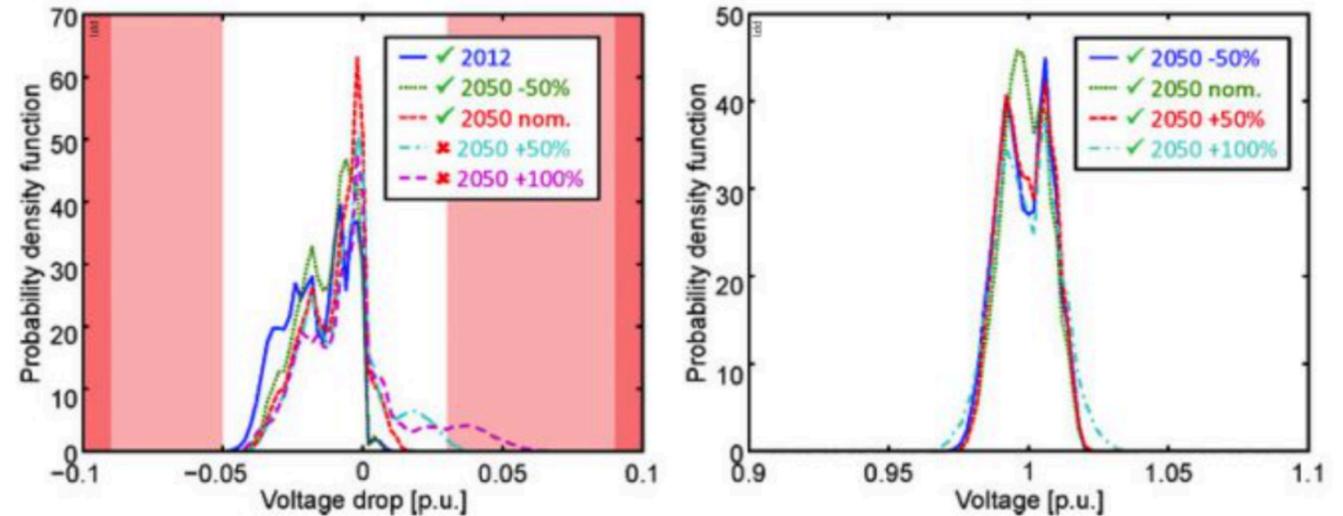
#### Prototyp einer Schaltstufe

Bild 4 zeigt den ersten Prototyp einer an der ETH Zürich entwickelten hochkompakten 10-kV-SiC-MOSFET-Schaltstufe. Diese verfügt über eine intelligente Ansteuerinheit, welche im Fehlerfall einen Kurzschluss oder Überstrom innerhalb von nur 24 ns abschalten kann. Im regulären Betrieb erlaubt die Konverterstufe das Schalten von Spannungen bis zu 7 kV und Strömen von bis zu 20 A mit Frequenzen von über 100 kHz.

In Bild 5 sind an der ETH Zürich gemessene Strom- und Spannungsverläufe neuester 10-kV-SiC-MOSFETs dargestellt. Ein Schaltvorgang bei 7 kV und 15 A dauert nur 150 ns, was zu sehr geringen Schaltverlusten führt bzw. sehr hohe Schaltfrequenzen ermöglicht. ●

Daniel Rothmund, Dominik Bortis, Johann W. Kolar, ETHZ

## Was können leistungselektronische Transformatoren in Niederspannungsnetzen bewirken?



Wahrscheinlichkeitsdichte der Netzknotenspannungen für eine Woche im Sommer mit hoher PV-Produktion. Links: konventioneller Trafo. Verbotene Spannungsbereiche sind rot markiert. Verletzungen der maximalen Spannungsbänder sind klar ersichtlich. Rechts: SST mit Spannungsregulierung. Die Spannungsbänder werden eingehalten.

Die Transformation des elektrischen Energiesystems in der Schweiz führt zu einer starken Zunahme von dezentralen, fluktuierenden Erzeugungsanlagen, welche direkt ins Niederspannungsnetz einspeisen. Die Einhaltung der vorgeschriebenen Spannungsbänder (400 V  $\pm$  10 %, nach EN50160) ist typischerweise der limitierende Faktor, welcher die Aufnahmefähigkeit von dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) im Netz begrenzt.

#### Gegenüberstellung mit herkömmlicher Technologie

Die technologischen Fortschritte der letzten Jahre haben dazu geführt, dass leistungselektronische Transformatoren als Schlüsseltechnologie für verschiedene Anwendungen zukünftiger intelligenter Netze (Smart Grids) gepriesen werden. In der vorliegenden Arbeit wurde das Potenzial von SSTs in realen Niederspannungsnetzen untersucht. Für zukünftige Szenarien der Energiestrategie wurden die Vorteile von SSTs gegenüber konventionellen Netzfrequenztransformatoren (Line-Frequency Transformers, LFTs) ausgewertet.

#### Simulation mit vier Szenarien

Elektrische Verteilungsnetze sind kapitalintensiv, und die Betriebsmittel haben typischerweise eine Lebenserwartung von mehreren Dekaden. Die Untersuchung basiert deshalb auf der unveränderten Kerntopologie zweier realer Vorortnetze in der Schweiz. Die Netze wurden innerhalb von DiGSilent Power Factory modelliert, und mittels Lastflusssimulationen wurden Strom- und Spannungsprofilen für sämtliche Betriebsmittel berechnet. Lastprofile einzelner Hausanschlüsse sowie die Lastverteilung im Netz basieren auf Langzeitmessungen. Erzeugungsseitig wurden vier grobe Szenarien definiert, welche den Zuwachs an Photovoltaik-Anlagen im Gebiet repräsentieren. -50 %, nominal, +50 %, +100 % stehen dabei für den heruntergebrochenen Anteil der dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) bezogen auf die getroffenen Annahmen der Energiestrategie im Jahr 2050. Die Möglichkeiten eines SSTs zur Optimierung der Spannungsqualität sowie zur Erweiterung der Aufnahmekapazität an PV-Erzeugungsanlagen im Netz wurden mit alternativen Strategien oder Technologien verglichen wie z. B.

einer aktiven Blindleistungsregelung oder Batteriespeichern.

#### Erhöhte Kapazität für DEA im Netz

Die Simulationsergebnisse zeigen (Bild 6), dass während Spitzenproduktionszeiten der voraussichtliche Zuwachs an DEA zu Spannungsbandverletzungen sowie zu überlasteten Betriebsmitteln führen kann. Durch die Möglichkeit der Spannungsregelung können SSTs Spannungsverletzungen für alle untersuchten Szenarien vermeiden.

Fazit: SSTs können das Spannungsbandproblem lösen und erhöhen die Kapazität für DEA im Netz. Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass dieser Vorteil allein die Mehrkosten zum Standard-Transformator kompensiert. Nur wenn die breite Palette an SST-Funktionalitäten als intelligenter Energierouter zur permanenten Sicherstellung der Versorgungsqualität ausgenutzt wird, hat der SST auch ökonomisch eine Zukunft in Verteilnetzen. ●

Christoph Hunziker, FHNW

Dieses Forschungsprojekt wird im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Energiewende» [NFP 70] des Schweizerischen Nationalfonds [SNF] durchgeführt. Weitere Informationen zum Nationalen Forschungsprogramm sind auf [www.nfp70.ch](http://www.nfp70.ch) zu finden.