



Innovative supraleitende Energiekabel für die Umsetzung der Energiewende

Robert Bach · Werner Prusseit

Eingegangen: 10. August 2023 / Angenommen: 24. Oktober 2023 / Online publiziert: 23. November 2023
© The Author(s) 2023

Zusammenfassung Die bevorstehende Energiewende erfordert im Vergleich zur heutigen Situation den Transport einer viel größeren Menge elektrischer Energie in die Städte, die die fossil erzeugte Energie ersetzt. Damit werden die bestehenden Energiekabelsysteme in Zukunft noch nie dagewesenen Herausforderungen ausgesetzt sein. Problematisch könnte dabei insbesondere werden, dass die meisten der bestehenden 110-kV-Kabelsysteme in den Städten in den 70er- und 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts gelegt wurden bzw. in dieser Zeit in Betrieb gingen. Damals wurden sie für die Bewältigung einer solchen Belastung, oder Belastungszyklen, wie wir sie in Zukunft erwarten, nicht ausgelegt.

Da der Platz unter der Straßenoberfläche von Großstädten immer ein Thema ist, wirbt der Artikel für eine weitere innovative Kabeltechnologie, die viele Vorteile für die kommenden Herausforderungen mit sich bringt. Supraleitende Kabel, sogenannte HTS-Kabel, können bei sehr kleinem Querschnitt eine sehr große Menge elektrischer Energie transportieren. Das Münchner Projekt namens Superlink zielt darauf ab, ein 110-kV-HTS-Kabel mit 500 MVA zu verlegen, wobei der Querschnitt des gesamten Drehstromkabels etwa 200 mm betragen wird. Darüber hinaus gibt es keine thermischen oder magnetischen Feldemissionen, was diesen Kabeltyp in Zukunft zu einer echten Alternative zu Standard-VPE-Kabeln macht. Da es im Vergleich zu Kabeln mit Aluminium- oder Kupferleiter keine Strom-Wärme-Verluste gibt, verringert das HTS-

Kabel die Belastung der bestehenden alten Kabelleitungen und verschafft somit Zeit für den Austausch der gealterten Kabelanlagen. Schließlich zeigen erste Berechnungen, dass der Nettobarwert des HTS-Kabels deutlich niedriger ist als der eines vergleichbaren VPE-Kabelsystems. Viele Vorteile, die HTS-Kabel in naher Zukunft immer mehr in den Fokus von Verteilnetzbetreibern rücken lassen könnten, um diese Technologie einzusetzen.

Schlüsselwörter Hochtemperatur-Supraleitung · HTS-Kabel · Superlink · Hochleistungskabel

Innovative superconducting energy cables for the implementation of the energy transition

Abstract The upcoming energy transition requires the transport of a much higher amount of electrical energy replacing fossil-generated energy into the cities compared with the situation today. Thus, the existing energy cable systems will be challenged in the future like never before. Despite the fact that most of the existing 110 kV cable systems were built in the 1970s and 1980s, and, respectively, service has changed since then, they have never been planned to manage a load or load cycles which they will be exposed to in the future.

Since space in the underground of big cities is always an issue, the article promotes another innovative cable technology which brings a lot of advantages for the upcoming challenges. Superconducting cables, called HTS cables, can transport a very high amount of electrical energy at a very small cross-section. The Munich project called Superlink aims to run a 110 kV HTS cable with 500 MVA while the cross-section of the whole three-phase cable will be around 200 mm. Additionally, there are neither thermal nor magnetic field emissions, which enables this cable type to be

R. Bach (✉)
Fachhochschule Südwestfalen, Lübecker
Ring 2, 59494 Soest, Deutschland
bach.robert@fh-swf.de

W. Prusseit
THEVA GmbH, Ismaning, Deutschland

a real alternative to standard XLPE cables in the future. Since the resistance is much smaller compared to cables with aluminium or copper conductors, the HTS cable will reduce the load of the existing old cable lines while being installed and makes a longer service of the existing cables more likely. Finally, first calculations show the net present value of the HTS cable is much lower than the one of comparable XLPE cable systems. All in all, many advantages which may bring HTS cables more and more in the focus of distribution system operators to use this technology in the near future.

Keywords High-temperature superconductivity · HTS cables · Superlink · High-power cable systems

1 Einleitung

Die Mittel- und Hochspannungskabelnetze, die die elektrische Energie in die Städte und Industriegebiete bringen und dort verteilen, sind zum Teil schon viele Jahrzehnte alt. Bei den Isolierungen wurden im Wesentlichen zwei verschiedene Systeme eingesetzt: während vor allem in Kabeln älterer Bauart eine mit Isoliermasse getränkte Papierisolierung zum Einsatz kam, wurde seit den späten Achtziger Jahren immer mehr und nach der Jahrtausendwende fast ausschließlich Kunststoff (vernetztes Polyethylen, VPE) zur Isolierung der Kabel verwendet.

Von einigen Schwierigkeiten bei der ersten Generation der Mittelspannungs-Kunststoffkabel einmal abgesehen, sind insbesondere die seit den späten Neunziger Jahren eingesetzten Kunststoffkabel von herausragender Qualität. Dies zeigt sich vor allem daran, dass Ausfälle im Betrieb sehr selten sind und häufig auf externe Beschädigung (Bagger) oder auf fehlerhafte Montagearbeiten zurückzuführen sind. Aber auch die älteren Masse-Papier-isolierten Kabel geben derzeit wenig Anlass zur Sorge, da sie, solange die Durchtränkung mit nachfließender Masse gegeben ist, über viele Jahrzehnte einen störungsfreien Betrieb ermöglichen.

Die vor allem in größeren Städten auch eingesetzten Hochspannungskabel der 110-kV-Spannungsebene basieren ebenfalls entweder auf getränkter Papierisolierung oder Kunststoffisolierung aus vernetztem Polyethylen. Der Unterschied zu den Mittelspannungskabeln zeigt sich meist durch aufwändigere Bauformen (Niederdruck-Ölkabel, Gasinnen-/Gasaußendruck Kabel) oder durch eine zusätzliche Querwasserbarriere (Metallfolie), die verhindert, dass Feuchtigkeit an die Kunststoffisolierung gelangt.

2 Herausforderungen an städtische Kabelnetze

Die Belastung der bestehenden Kabelnetze konnte bisher mit Hilfe von Erfahrungswerten gut geplant werden und variierte nur in vergleichsweise engen Grenzen. Durch die Energiewende wird sich dies

voraussichtlich deutlich verändern. Da zukünftig verschiedene fossile Energiequellen für den Bedarf in Städten nicht mehr oder zumindest nur noch sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen, muss der Energiebedarf der in den Städten angesiedelten Bewohner, der Betriebe und auch für die Mobilität durch elektrische Energie gespeist werden. Das bedeutet, dass auch die Energie für Produktionsbetriebe, für Wärme und Kälte etc. aus elektrischer Energie bereitgestellt werden muss. Welche Flächenleistungsdichte zukünftig in Städten genau gebraucht wird und wie stark der Anstieg sein wird, lässt sich nur schwer vorhersagen. Klar ist aber, dass die Steigerung aus heutiger Sicht beachtlich sein wird und es wird schnell gehen.

Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass es mehr und häufigere Lastwechsel aufgrund der volatilen regenerativen Einspeiser geben wird. Flexible Verbraucher werden als eine wesentliche Säule der zukünftigen Energiesysteme ihren Teil dazu beitragen, dem schwankenden Energieangebot durch eine flexible Nachfrage Rechnung zu tragen. Das bedeutet aber auch, dass zukünftig häufiger von Volllast auf minimale Last gewechselt werden wird, was eine relativ neue Belastung für die vorhandenen gealterten Kabel darstellt.

Die existierenden Kabelnetze sehen sich also zwei Herausforderungen gegenübergestellt: es wird einen deutlichen Anstieg der Last geben und es wird häufigere intensive Lastwechsel geben. Während noch nicht bei allen Isoliersystemen vollständig geklärt ist, ob häufigere starke Lastwechsel aufgrund der damit verbundenen Aufheiz- und Abkühleffekte die Kabelisolierung oder die Garnituren schädigen oder schneller altern lassen, so gibt es aber bereits Hinweise darauf, dass getränkte Papierisoliersysteme durch die Herausforderungen ungewohnt stark belastet werden. Der Anstieg der Last hat hingegen klare Grenzen, die durch die Leitermaterialien und Querschnitte sowie die eingesetzten Isoliersysteme gegeben sind. Werden die Kabel über die maximale Belastungsgrenze beansprucht, droht ein irreversibler thermischer Schaden der Isolierung.

Somit ist klar, dass die Kabelnetze in den Städten für ein Gelingen der Energiewende ausgebaut und auch erneuert werden müssen. Häufig wird ein Austausch älterer Kabelsysteme eine sinnvolle Option sein.

Um mehr elektrische Energie in die Städte zu leiten und dort zu verteilen, gibt es grundsätzlich verschiedene Ansätze. Sie reichen von einer stückweisen Verstärkung der bestehenden Kabelsysteme bis hin zum Bau neuer Kabelnetze, die dem zukünftigen Bedarf aus heutiger Sicht entsprechen. Dabei sind alle städteplanerischen Aspekte, demografische Entwicklungen sowie Quartierskonzepte zu berücksichtigen. Ein Netzausbau wird aber mit großer Wahrscheinlichkeit erforderlich sein.

Erst wenn klar ist, wieviel elektrische Leistung zukünftig an Orte in der Stadt transportiert werden

muss, wo bisher nur Kabel mit kleinen Querschnitten lagen, wird das Ausmaß der Umgestaltung erkennbar. Es werden dann vermutlich deutlich größere Leistungen als heute auf der 110-kV-Spannungsebene und auch auf der Mittelspannungsebene transportiert werden müssen. Dieses Ergebnis zeigen mehrere Untersuchungen verschiedener Verteilnetzbetreiber in Deutschland. Für die Stadt München ist beispielsweise davon auszugehen, dass es einen zusätzlichen innerstädtischen Transportbedarf von 500 MVA gibt. Ähnliche Aufgaben werden auf fast alle städtischen Netzbetreiber zukommen.

Natürlich kann die genannte Leistung auch mit Hilfe von konventionellen 110-kV-VPE-Kabeln transportiert werden, nur muss bei der Wahl der erforderlichen Querschnitte (und der damit einhergehenden Biegeradien) die Bauraumanforderungen im Erdreich in der Stadt (Abstand und Bodenerwärmung) und auch die potenzielle Beeinflussung anderer Infrastrukturen (Fernwärme, Energie etc.) beachtet werden, um die Realisierbarkeit derartiger Versorgungsaufgaben rechtzeitig zu prüfen.

3 Supraleitende Kabel als Alternative zu Standard-VPE-Kabeln

Es ist davon auszugehen, dass eine Lösung der beschriebenen Herausforderungen mit Standard-VPE-Kabeln zwar grundsätzlich machbar, jedoch aus mehreren Gründen extrem aufwändig ist. Innovative supraleitende Kabel kommen als mögliche Alternative in Betracht.

Supraleitende Kabel basieren auf der Idee, den konventionellen Aluminium- oder Kupferleiter eines Kabels durch einen supraleitenden Leiter zu ersetzen. Supraleitende Materialien sind bereits seit vielen Jahren bekannt und lassen sich grob in sogenannte

- Tieftemperatur-Supraleiter (TTS) und
- Hochtemperatur-Supraleiter (HTS)

einteilen. Während TTS bei Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunktes (0 K bzw. -273°C) betrieben werden und heute in allen Magnetresonanztomographen Anwendung finden, sind HTS bereits bei Temperaturen um 77 K supraleitend und können schon mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden. Dieses Kühlmedium ist in industriellem Maßstab verfügbar, leicht zu handhaben und ermöglicht somit, im HTS-Leiter sehr viel elektrischen Strom in extrem kleinen Querschnitten nahezu widerstandsfrei fließen lassen kann.

Die HTS-Materialklasse wurde 1986 gefunden (Physik-Nobelpreis für Bednorz und Müller, IBM-Laboratorium, Zürich) und ist seitdem im Fokus für Anwendungen in der Energietechnik. Es dauerte dennoch bis zum Jahr 2001 bis das erste HTS-Kabel seinen Probebetrieb in Dänemark aufnahm. Bis heute wurden immer größere Pilotprojekte in Europa, den USA und in Asien realisiert, die eindrucksvoll die Fähigkeiten

und die Zuverlässigkeit von HTS-Kabeln gezeigt haben (Beispiel Deutschland: Projekt AmpaCity [1, 2]).

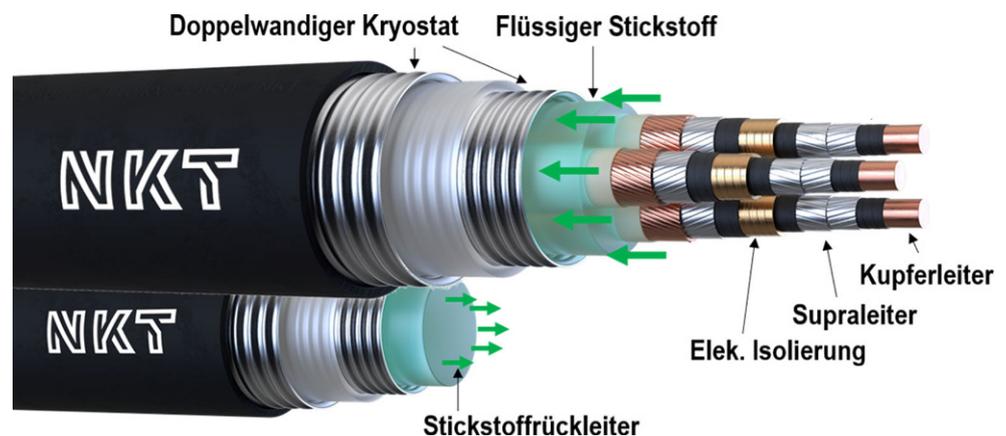
Das eigentliche Material, aus dem HTS gefertigt werden, ist im weitesten Sinne Keramik. Da sich aber die Struktur einer Keramik nicht sonderlich gut für biegsame Kabel eignet, wurde zunächst das HTS-Material in eine Matrix aus Silber gebettet und zu schmalen Bändern ausgewalzt. Diese lassen sich dann helixförmig um einen Rundleiter oder auch Hohlleiter wickeln. Das bringt die für Kabel erforderliche Flexibilität mit sich. Da Silber an sich aber bereits vergleichsweise kostenintensiv ist, wurde der HTS-Draht der zweiten Generation entwickelt. Dieser wird ebenfalls als Bandleiter mit einer Breite von einigen Millimetern gefertigt. Seine Struktur ist dagegen vollkommen anders aufgebaut: auf dem Grundmaterial aus einer Stahlfolie wird das HTS-Material abgeschieden und anschließend versiegelt. Dieser Prozess lässt sich günstig in industrielle Größenordnungen überführen, was wiederum für die erforderliche Kostensenkung und Kapazitätsausweitung erforderlich ist, da die Kosten im Unterschied zu Kupferleitern fast ausschließlich in der Fertigung auftreten. Die Materialkosten sind bei HTS-Leitern der zweiten Generation überraschend gering. Deshalb ist eine skalierbare industrielle Fertigung der Bandleiter für die weitere Verbreitung dieser Technologie von großer Bedeutung.

Wie bereits erwähnt, kann HTS-Material sehr viel Strom ohne nennenswerten Widerstand durch sehr kleine Querschnitte leiten. Damit kann das Stromspannungs-Paradigma, demzufolge für den Transport größerer Leistungen höhere Spannungsebenen benötigt werden, um die Leiterquerschnitte handhabbar und kostenmäßig überschaubar zu halten, ein Stück weit aufgeweicht werden. Die Übertragung hoher Leistungen kann mit HTS-Kabeln gegenüber konventionellen Kabeln auf niedrigeren Spannungsebenen erfolgen. Dies ist ein unschätzbare Vorteil, wenn bei begrenztem Bauraum unter der Straße in Innenstädten zukünftig deutlich mehr Leistung transportiert werden soll.

Vollkommen widerstandsfrei sind HTS-Leiter streng genommen nur bei Gleichstrom. Bei Wechselstrom wird durch die entstehenden Magnetfelder ein sehr geringer Widerstand dadurch verursacht, dass die magnetischen Feldlinien vom Supraleiter verdrängt werden. Kapazitive und induktive Blindwiderstände bleiben davon unberührt und sind vom Material im Feldraum und der Geometrie abhängig.

Die Konstruktion von HTS-Mittel- oder HTS-Hochspannungskabeln ist, wenn von dem speziellen Aufbau des Leiters abgesehen wird, am ehesten mit Öl/Papier-Kabeln vergleichbar. Nach einer leiterglättenden Lage, werden Kunststoff- oder beschichtete Papierbänder als elektrische Isolation auf den Leiter gewickelt und mit flüssigem Stickstoff imprägniert. Als Schirm kann grundsätzlich Kupfer verwendet werden. Es empfiehlt sich aber, auch den Schirm aus HTS-

Abb. 1 Aufbau eines 110-kV-HTS-Kabels mit optionalem Stickstoffrückleiter für 500 MVA. (Quelle: NKT)



Material herzustellen, da auf diesem Wege vermieden wird, dass Magnetfelder nach außen dringen. Zwar liegen die drei Phasen bei einem supraleitenden Kabel sehr dicht beieinander, jedoch ist auch der Strom mit einigen Kiloampere sehr hoch, wodurch ein resultierendes Magnetfeld entsteht. Zudem würden im Kupferschirm induzierte Ströme Strom-Wärmeverluste erzeugen, die zusätzliche Kühlleistung erfordern würden.

4 HTS-Kabel im Projekt SuperLink

Für das im Projekt SuperLink verwendete Kabel werden drei HTS-Kabeladern in einem Rohr zusammengeführt, durch das flüssiger Stickstoff als Kühlmedium und gleichzeitig als imprägnierendes Isoliermittel fließt (Abb. 1). Zur thermischen Isolierung ist dieses Rohr seinerseits in einem Isolierrohr (Kryostaten) untergebracht, in dem ein Isoliervakuum herrscht.

Flüssiger Stickstoff ist ein ausgesprochen leistungsfähiges flüssiges Isoliermedium mit hoher elektrischer Festigkeit und sehr niedriger Dielektrizitätszahl. Der Stickstoff wird durch das Rohr gepumpt, in dem sich die drei Kabeladern befinden, durchsetzt damit auch die gewickelte Isolierung vergleichbar mit Isolieröl bei papierisolierten Kabeln, und wird am Ende des Kabels in einem Kühlkreislauf rückgeführt. Selbst bei einem Ausfall der Kühlung kann das HTS-Kabel aufgrund seiner Wärmekapazität viele Stunden normal weiterbetrieben werden und ist schwarzstartfähig. Ist die Unterbrechung der Kühlung jedoch von größerer Dauer, so steigt die Temperatur nach dieser Zeit über die kritische Temperatur an (77 K) und der Leiter verliert seine supraleitende Eigenschaft. Eigene Berechnungen haben ergeben, dass dies frühestens nach ca. 15 h der Fall wäre. Eine Wiederinbetriebnahme setzt in einem solchen Fall einer längeren Unterbrechung eine Kühlung der gesamten Kabelanlage von einigen Tagen voraus.

Mit dem beschriebenen Kabelaufbau ist es zum Beispiel möglich, ein 110-kV-Kabel auf HTS-Basis zu bauen, welches bei einem Außendurchmesser von weniger als 200 mm mehr als 500 MVA elektri-

sche Leistung transportieren kann. Das vorstehend beschriebene HTS-Kabel wird in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima der Bundesrepublik Deutschland unterstützten Projekt in München im Projekt SuperLink derzeit gefertigt und der nächste Schritt ist ein Test unter realen Bedingungen im Netz für eine Zeitdauer von sechs Monaten.

Die Vorteile von HTS-Kabeln können zusammenfassend wie folgt beschrieben werden.

- **Vermeidung von Strom-Wärme-Verlusten**
Dadurch, dass das Kabel nahezu keinen Widerstand hat, werden Strom-Wärme-Verluste vermieden und somit auch das CO₂, welches für diese Verlustleistung freigesetzt werden müsste, eingespart.
- **Vermeidung von Erwärmung des Erdbodens**
Der Kryostat schützt nicht nur vor Erwärmung des Kühlmittels, sondern vermeidet zugleich einen ungewollten Temperaturexaustausch mit der Umgebung. Dadurch kann das HTS-Kabel z. B. auch direkt neben einer Fernwärmeleitung verlegt werden.
- **Vermeidung von Magnetfeld-Emissionen**
Die für die Übertragung der hohen Leistung erforderlichen Ströme erzeugen auch hier Magnetfelder. Da aber der Schirm der einzelnen Adern aus HTS-Material besteht, ergibt sich nach außen eine vollständige Magnetfeldkompensation (widerstandsfreie Schirmung).
- **Vermeidung von Beeinflussung anderer Medien**
Ein HTS-Kabel ist nach außen hin vollständig neutral: keine Erwärmung des Bodens (thermische Isolation durch den Kryostaten), keine Magnetfelder (durch einen Schirm aus HTS-Material) und wie bei konventionellen Kabeln auch, keine elektrischen Felder.
- **Weniger Tiefbau, weniger Belastung durch Baustellen (minimale Verkehrs-Eingriffe)**
Für eine Leistung, die von einem HTS-Kabel auf der 110-kV-Ebene übertragen werden kann (Beispiel: 500 MVA, entsprechend einem Betriebsstrom von ca. 2,7 kA) ist ein Biegeradius ≤ 3 m für das komplette Kabel mit Kryostaten ansetzbar. Alternativ dazu könnten drei 110-kV-VPE-Kabelsysteme mit

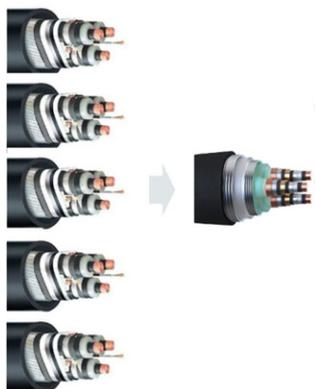


Abb. 2 Übertragung von 500 MVA im städtischen Bereich mit fünf VPE-Kabelsystemen (Stadt-kabel 630 mm² mit einem Durchmesser eines Rohres je System von 159 mm) oder ein HTS-Kabelsystem (Durchmesser ca. 200 mm)

Aluminiumleiter und einem Leiterquerschnitt von 2500 mm² gelegt werden. Die Biegeradien liegen bei *einem* VPE-Kabel dieser Bauart bei 2,65 m bei Legung. Zusammen mit dem ungleich breiteren Grabenprofil wird die Verlegung dieser VPE-Alternative im Stadtbereich problematisch. Daher ist ein Vergleich eher mit fünf 110-kV-VPE Kabelsystemen mit einem Leiterquerschnitt von 630 mm² zum Beispiel als Stadtkabel sinnvoll (fünf Stadtkabelsysteme mit einem Biegeradius von 3,3 m pro System). Auch in diesem Vergleich ist der Aufwand für Graben und Legung bei dem HTS-Kabel deutlich geringer (Abb. 2). Durch die geringen Abmaße des HTS-Kabels aber vor allem dadurch, dass nur ein System benötigt wird, wird vor allem der Tiefbau erheblich günstiger. Zudem können HTS-Kabel in einem Graben mit deutlich kleinerem Grabenprofil verlegt werden (theoretisch ist sogar ein Mittelspannungskabel-Grabenprofil möglich). Abstände zu anderen Energiekabeln oder Leitungen sind wegen der thermischen Isolierung nicht notwendig. Das reduziert die Anzahl der Baustellen erheblich. Tatsächlich ist das bei beengten Verhältnissen in Innenstädten der bei Weitem überzeugendste Vorteil, der solche HTS-Kabelsysteme auch wirtschaftlich interessant macht.

- **Keine Alterung**

Da das Kabel bei einer Temperatur von ca. 77 K betrieben wird, kann davon ausgegangen werden, dass es hier keine thermische Alterung gibt. Das dürfte vor allem dann ein großer Vorteil sein, wenn die geforderten Leistungen stetig ansteigen und sich somit die Isolierung konventioneller Kabel durch die Strom-Wärme-Verluste stärker als in der Vergangenheit erwärmt und somit auch altern wird. Dies ist bei einem HTS-Kabel nicht zu erwarten. Das HTS-Kabel kann bis zu dem kritischen Strom belastet werden, ohne dass sich ein Strom-Wärme-Verlust ergibt. Auch haben aktuelle Untersuchungen im Rahmen des Projektes SuperLink gezeigt,

dass das Isoliersystem aus Kunststoffbändern getränkt mit flüssigem Stickstoff extrem hohe Festigkeiten und eine erstaunliche Resistenz gegenüber Teilentladungen aufweist [3].

Die Übersicht zeigt, dass HTS-Kabel eine ganze Reihe von bedeutenden Vorteilen mit sich bringen. Vorteile, die gerade in Bezug auf den Netzausbau als Grundlage der Energiewende, an einigen Stellen keine technisch sinnvolle Alternative zu HTS-Kabeln erkennen lassen.

Als Nachteile der HTS-Kabel sind aus heutiger Sicht der Preis und die Notwendigkeit eines zusätzliche Kühlkreislaufs zu nennen. Es ist jedoch aus den dargelegten Gründen zu erwarten, dass der Preis für das HTS-Kabel durch Preis-Mengen-Effekte in Zukunft noch deutlich sinken wird. Auch bei der Kühltechnik sind noch Innovationen zu erwarten, die zu einer Effizienzsteigerung führen werden, sobald sich aus dem HTS-Kabel ein „standardisiertes Betriebsmittel“ entwickelt und ein Markt entsteht.

5 Wirtschaftlichkeit von supraleitenden Hochleistungskabel

Häufig stellt sich an dieser Stelle die Frage, ob denn eine HTS-Kabelverbindung auch wirtschaftlich vorteilhaft gegenüber den vergleichbaren VPE-Systemen wäre. Insbesondere die für die Kühlung erforderliche Kälteleistung und die dafür aufzuwendende Energie werden kritisch gesehen. Vergleiche und Berechnungen anlässlich des SuperLink-Projektes haben aber deutlich gezeigt, dass die Stromwärme-Verluste konventioneller Kabel den Kälteenergiebedarf bei diesem HTS-Kabel übersteigen. Insgesamt zeigen wirtschaftliche Vergleichsrechnungen, dass HTS-Kabel unter den angesprochenen Bedingungen in Bezug auf den Barwert (also unter Zugrundelegung der Betriebs- und Investitionskosten über 40 Jahre) deutlich günstiger sind als leistungsgleiche VPE-Kabelsysteme [4]. Dies dürfte sich noch zugunsten der HTS-Kabel verstärken, da die Preise für Energie, CO₂-Zertifikate, Tiefbau etc. vermutlich in Zukunft eher steigen werden und sich so vorteilhaft zugunsten der Wirtschaftlichkeit des HTS-Kabels auswirken.

Hinzu kommt, dass bei neuen Betriebsmitteln, wie bei einem HTS-Kabel, noch sehr viel Innovationspotenzial besteht, welches bei den Standardkabeln bereits weitgehend ausgeschöpft ist. So ist zu erwarten, dass durch neue innovative Kryostate der Durchmesser der hier dargestellten HTS-Kabel (110 kV, 500 MVA) auf zum Beispiel 150 mm reduziert werden kann. Das würde den Einsatz als Retrofit von Gasinnen- oder Gasaußendruckkabeln ermöglichen. Auch ist, wie bereits erwähnt, zu erwarten, dass Innovationen im Herstellungs- und auch im Kühlbereich für zusätzliche Kostensenkungspotenziale sorgen.

Netzberechnungen im Rahmen des Projektes Superlink haben zudem gezeigt, dass durch den Einbau von HTS-Kabeln das bestehende Kabelnetz mas-

siv entlastet und Verluste im umliegenden Netz erheblich gesenkt werden. Das würde die gealterten Bestandskabel schonen und den Zeitraum für einen Austausch vergrößern [5].

6 Zusammenfassung

HTS-Kabelsysteme können zukünftig ein bedeutender Bestandteil beim Netzausbau im Rahmen der Energiewende sein, vorausgesetzt, die hohen Leistungen kommen zum Tragen, wovon aber ausgegangen werden muss. Dann jedoch sind HTS-Kabel technisch und wirtschaftlich in sehr vielen Fällen im Stadtbereich alternativlos. Es bleibt zu hoffen, dass dies auch von den Netzbetreibern erkannt wird und diesem neuen und sehr innovativen Kabeltyp ein fester Platz als neue Standard-Netzkomponente zuteil werden wird.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Stemmler M, Merschel F, Noe M (2015) Ampacity Project – Update on World's first Superconducting Cable and Fault Current Limiter Installation in a German City Centre, Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires. Ed.: Kenichi Sato, World Scientific Publishing, ISBN: 978-981-4749-25-12
2. Buchholz A et al (2021) Environmental Life Cycle Assessment of a 10 kV High-Temperature Superconductor Cable System for Energy Distribution, IEEE Transaction on. Appl Supercond
3. Mansheim P et al (2023) Effect of Partial Discharges Activity by artificial Failures on Composite Insulation Systems of Mini-Cable-Samples in. LN, Bd. 2. Jicable, Lyon
4. Bach R (2022) BMWK FORSCHUNGSFELDER ENERGIE – HTS SuperLink – Kabelprojekt. München, Bd. 110. kV, ZHIEL-Konferenz, Berlin
5. Willén D et al (2023) Development and Impacts of a Superconducting Power Cable in a 110 kV Distribution Network, 16th. Eur Conf Appl Supercond Bologna

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.



Robert Bach, schloss das Studium der Elektrotechnik im Jahr 1989 an der Technischen Universität Berlin ab und promovierte dort im Jahr 1993 auf dem Gebiet der Hochspannungskabeltechnik. Er arbeitete fast 15 Jahre im VEW- und später im RWE-Konzern und wechselte im Jahr 2008 als Technischer Vorstand zu NKT cables nach Köln und zwei Jahre später zur Tele-Fonika Kablo nach Krakau, wo er bis 2011 als Vorstandsvorsitzender arbeitete. Seit 2012 ist er Professor für

Hochspannungstechnik an der Fachhochschule Südwestfalen in Soest. Er beschäftigt sich maßgeblich mit der Forschung im Bereich der Energiekabeltechnik und hier insbesondere auch an Supraleitenden Kabeln.



Werner Prusseit, ist promovierter Physiker und Gründer, sowie geschäftsführender Gesellschafter der THEVA GmbH seit 1998. Er ist Gründungsmitglied des Industrieverbandes Supraleitung e.V. (www.ivsupra.de). Dr. Prusseit gilt als international anerkannter Experte für Supraleitung und deren Anwendungen.