

Supraleitende Hochstromkabel und Leitungen Ohne Widerstand in die Anwendung

MATHIAS NOE | MARKUS BAUER

Supraleitende Kabel und Leitungen sind weit entwickelt, erste wirtschaftliche Anwendungen sind absehbar. Ein Hindernis für eine breite Anwendung ist eine noch nicht ausreichende Anzahl erfolgreicher Prototypen im Dauereinsatz. Hinzu kommen Unkenntnis über die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und die Ausgereiftheit der Technik. Wir stellen hier den Entwicklungsstand für Hochtemperatur-Supraleiter vor, verschiedene Anwendungsmöglichkeiten sowie ein spannendes Projekt in München.

Die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung 1986 durch Karl Alexander Müller und Georg Bednorz [1] hatte zunächst zu einer Euphorie gerade im Hinblick auf den Einsatz in der Energietechnik geführt. Mehr als 30 Jahre später muss man feststellen, dass bisher nur wenige Anwendungen mit Hochtemperatur-Supraleitern kommerziell erfolgreich entwickelt wurden. Dabei hat eine Vielzahl an Demonstratoren und Prototypen das Potenzial dieser Anwendungen bestätigt und die technische Machbarkeit eindrucksvoll unter Beweis gestellt [2].

Dies gilt insbesondere für supraleitende Energiekabel und -leitungen, bei denen der weltweit erste Netzeinsatz mit Hochtemperatur-Supraleitern im Jahr 2001 erfolgte [3]: Der US-amerikanische Kabelhersteller Southwire installierte auf dem Firmengelände ein 30 m langes Testkabel, das Produktionsanlagen erfolgreich mit Strom versorgte. Seitdem sind mehr als zehn supraleitende Energiekabel mit Längen von bis zu einem Kilometer in länger andauernden Netzeinsätzen erfolgreich getestet worden. Als weltweiter Benchmark für die Erfüllung der betrieblichen Anforderungen kann zweifelsohne das 1 km lange, für 40 MVA ausgelegte, 10-kV-Kabel AmpaCity in der Innenstadt von Essen aufgeführt werden. Seit Frühjahr 2014 ist es zuverlässig in Betrieb [4].

Noch gibt es Vorbehalte von Netzbetreibern über die Zuverlässigkeit, die Wirtschaftlichkeit und die betriebliche Sicherheit von supraleitenden Kabeln, die oftmals durch die Unkenntnis des Entwicklungsstandes begründet ist. Trotzdem beginnen nun immer mehr Projekte einen dauerhaften Netzeinsatz, und erste Pilotstrecken versprechen bereits

eine wirtschaftliche Anwendung. Dazu gehört unter anderem das 2020 begonnene Kabelprojekt SuperLink der Stadtwerke München für die Technologieentwicklung eines kompakten 110-kV-Kabels, das perspektivisch ein 380-kV-Kabel ersetzen und damit ein aufwendiges Tunnelbauwerk in der Innenstadt von München vermeiden könnte.

Aktuell mehren sich Anzeichen, die auf eine erfolgreiche Etablierung von supraleitenden Energiekabeln hoffen lassen. Ein wichtiger Treiber ist das Vorhandensein einer kompletten Liefer- und Versorgungskette, vom Supraleitermaterial beginnend bis hin zur langjährigen betrieblichen Wartung und Überwachung. Das Supraleitermaterial ist heute wettbewerbsfähig verfügbar und in angemessener Zeit für ein Kabelprojekt lieferbar. Der Netzeinsatz in Essen hat gezeigt, dass die noch notwendigen Wartungen am Kühlsystem ohne Betriebsunterbrechung durchgeführt werden können.

Weiterhin sehr zuversichtlich für den zukünftigen Einsatz von supraleitenden Energiekabeln stimmen uns die neuen Anforderungen durch die Energiewende und die wachsende Bedeutung von Wasserstoff. Bei Hochleistungsstrassen spielen die Genehmigung und die Akzeptanz in der Bevölkerung eine zunehmende Rolle. Hier bieten supraleitende Kabel entscheidende Vorteile, da sie höchste Leistungen bei niedrigerer Spannung und ohne elektromagnetische und thermische Beeinflussung der Umgebung in sehr kompakten Trassen übertragen können. Dies vereinfacht nicht nur den Genehmigungsprozess, sondern führt auch zu einer höheren Akzeptanz durch die Bevölkerung.

Da flüssiger Wasserstoff bei 20 K die höchste Energiedichte bei der Speicherung bietet, erscheinen einige Transport- und Übertragungsaufgaben in diesem Aggregatzustand sehr attraktiv – trotz des zusätzlichen Energieaufwands zur Verflüssigung. Da dann die kalte Umgebung für den Supraleiter vorhanden ist, eignet sich die Kombination von Flüssigwasserstoff und Hochtemperatur-Supraleitung nahezu ideal auch für Transport- und Übertragungsaufgaben für Energie.

Supraleitende Materialien

Supraleiter müssen unter eine kritische Temperatur T_c abgekühlt werden, um supraleitende Eigenschaften zu zeigen. Als Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) bezeichnet man da-

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

bei eine ganze Klasse von Verbindungen, die sich dadurch auszeichnet, dass ihr T_c über 25 K liegt. Vor der Entdeckung der HTS wiesen alle bekannten Supraleiter kritische Temperaturen darunter auf, sodass diese heute auch Niedertemperatur-Supraleiter genannt werden.

Heute sind viele HTS-Verbindungen bekannt, die man in drei Gruppen einteilen kann. Die prominenteste Gruppe, die von Müller und Bednorz 1986 entdeckt wurde, basiert auf Kupferoxid-Verbindungen (Kuprate). Deren für technische Anwendungen wichtigsten Vertreter sind $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) mit einem T_c von 92 K, $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ mit 93 K sowie $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO) mit 110 K. 2001 wurde entdeckt, dass die metallische Verbindung Magnesiumdiborid, MgB_2 , mit einem T_c von 39 K in den Bereich der Hochtemperatur-Supraleitung fällt. Und nur wenige Jahre später konnten japanische Wissenschaftler im dem Material $\text{LaFeAsO}_{0,9}\text{F}_{0,1}$ Supraleitung mit einer Sprungtemperatur von 26 K nachweisen [5]. Viele weitere Verbindungen dieser auf Eisen und Arsen basierten Supraleiter mit Sprungtemperaturen bis 56 K wurden seitdem entdeckt [6].

Für Kabelanwendungen in der Energietechnik sind allerdings Kupferoxid-Supraleiter mit einem T_c über 77 K von besonderem Interesse, da man dann flüssigen Stickstoff als kostengünstiges und für die Kühlung von langen Leitungen geeignetes Kühlmedium verwenden kann. Alle diese Kuprate sind kompliziert aufgebaute keramische Verbindungen, deren Herstellung gleich aus verschiedenen Gründen aufwendig ist. Zum einen muss die chemische Zusammensetzung der Verbindungen in sehr engen Grenzen kontrolliert werden – und das bei Prozesstemperaturen von 700 °C und mehr. Zum anderen ist eine hohe supraleitende Stromtragfähigkeit dieser Materialklasse nur gegeben, wenn die Verbindung keine größeren Störungen der Kristallstruktur aufweist. Da auch schon Korngrenzen eine solche Störung darstellen, ist insbesondere die Herstellung von langen Drähten eine Herausforderung. Sie müssen idealerweise einen hunderte Meter langen Einkristall darstellen. Die Alternative ist eine ausreichend gute, durchgehende biaxiale, also zweiachsige Textur des Substrats, um eine hohe Kristallqualität der darauf aufgewachsenen Supraleiterschicht zu erzielen. Zudem ist auch noch eine ausreichende Flexibilität notwendig, damit diese Drähte in Anwendungen eingesetzt werden können. Auch das ist eine Herausforderung, wenn man bedenkt, dass es sich um spröde keramische Verbindungen handelt.

Seit der Entdeckung der HTS hat sich die Forschung und Entwicklung dieser Herausforderung gestellt. Inzwischen stehen diverse Verfahren zur Verfügung, mit denen es möglich ist, industriell lange Drähte mit hervorragenden supraleitenden Eigenschaften herzustellen (Abbildung 1). Als Erstes wurde das metallurgische Powder-in-Tube-(PIT)-Verfahren entwickelt. Dabei wird BSCCO in Silberrohre gefüllt, die anschließend zu dünnen, filamentierten Bändern gewalzt werden. Da diese HTS-Bandleiter der ersten Generation aber zu einem großen Anteil aus Silber bestehen, sind die Materialkosten grundsätzlich hoch.

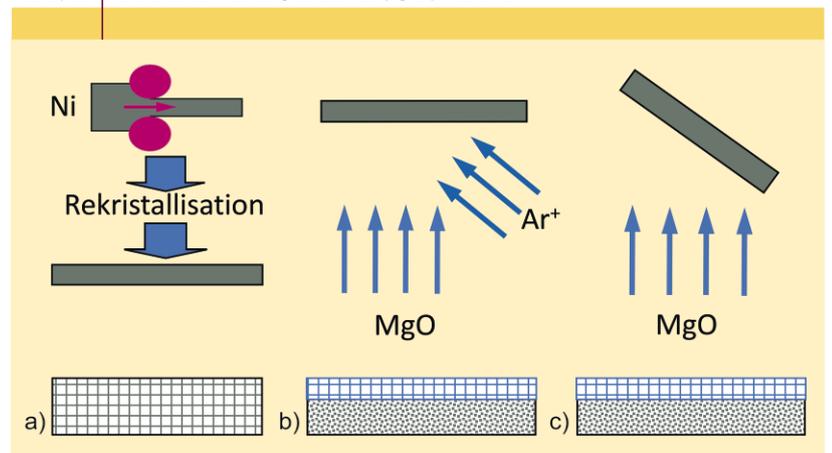


Abb. 1 Produktionsanlagen zur Herstellung von HTS-Bandleitern bei der THEVA Dünnschichttechnik GmbH in Ismaning bei München.

Eine Alternative mit wesentlich geringeren Materialkosten stellen Bandleiter der zweiten Generation dar. Diese bestehen aus einer dünnen Metallfolie als flexibles Substrat und einer sehr dünnen Schicht des Supraleiters. Um zu erreichen, dass der Supraleiter die notwendige Kristallqualität aufweist, wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt (Abbildung 2). Alle beruhen darauf, dass zuerst eine kristallin orientierte Unterlage hergestellt wird, deren Orientierung anschließend von der HTS-Schicht durch Epitaxie übernommen wird.

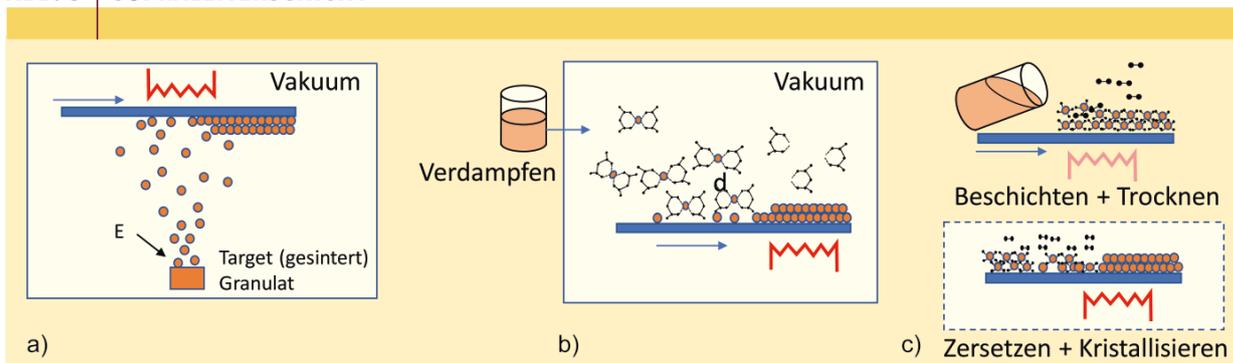
Während beim sogenannten RABiTS-Verfahren (Rolling-Assisted Biaxially-Textured Substrate) bereits das Substrat selbst durch Walzen und Rekristallisieren texturiert wird, benutzt man bei den anderen beiden Verfahren, IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) und ISD (Inclined Substrate

ABB. 2 | BIAxIAL TEXTURIERTE SUBSTRATE



Drei Verfahren zur Herstellung von biaxial texturierten Substraten für lange HTS-Bandleiter [7]: a) RABiTS (Rolling-Assisted Biaxially-Textured Substrate), b) IBAD (Ion Beam Assisted Deposition), und c) ISD (Inclined Substrate Deposition).

ABB. 3 | SUPRALEITERSCHICHT



Drei Verfahren zur Herstellung der Supraleiterschicht: a) die physikalische Gasphasen-Abscheidung (PVD) nutzt Laserablation, Elektronenstrahlverdampfen oder Ionensputtern, um das Material zu verdampfen; b) metallorganische chemische Gasphasen-Abscheidung (MOCVD); c) Lösungsbeschichtung (CSD/MOD) [7].

Deposition), polykristallines Substrat und scheidet auf diesem eine texturierte Pufferschicht ab. Zusätzlich müssen bis zu vier weitere Pufferschichten als Diffusionsbarrieren, Haftvermittler und zur Anpassung der Gitterkonstanten verwendet werden. Auch für die Herstellung der HTS-Schicht wurden mehrere Verfahren entwickelt (Abbildung 3). Neben Vakuum-Beschichtungsmethoden gibt es auch rein chemische Methoden. Mit allen diesen Verfahren kann man heute mehrere hundert Meter lange HTS-Bandleiter mit sehr guten Eigenschaften herstellen.

Der einzige Hersteller von HTS-Bandleitern in Europa ist THEVA Dünnschichttechnik in Ismaning bei München, wo einer der beiden Autoren bis vor Kurzem als Vertriebsleiter tätig war. THEVA verwendet in der Produktion (Abbildung 1) eine Kombination aus ISD-Pufferschicht und PVD-HTS-Beschichtung (Physical Vapour Deposition, physikalische Gasphasen-Abscheidung). Mit dieser Kombination gelingt es, die Anzahl der notwendigen Beschichtungen stark zu reduzieren. Neben der ISD-Schicht, die für die erforderliche biaxiale Textur sorgt, ist nur eine Deck-

schicht notwendig, bevor der Supraleiter GdBaCuO direkt aufgedampft wird.

Bei allen Herstellungsverfahren wird der Leiter anschließend mit einer circa 1 μm dicken Silberschicht umgeben. Das ist notwendig, um die stark mit Wasser reagierende HTS-Schicht chemisch zu schützen und um eine gute elektrische Kontaktierung der Keramik zu ermöglichen. Zusätzlich verwendet man eine Kupferschicht oder lötet alternativ eine dünne Kupferfolie auf (Abbildung 4). Neben einem rein mechanischen Schutz wird so auch eine elektrische Stabilisierung gewährleistet, die den Supraleiter bei elektrischer Überlastung vor lokaler Überhitzung – dem „Durchbrennen“ – schützt.

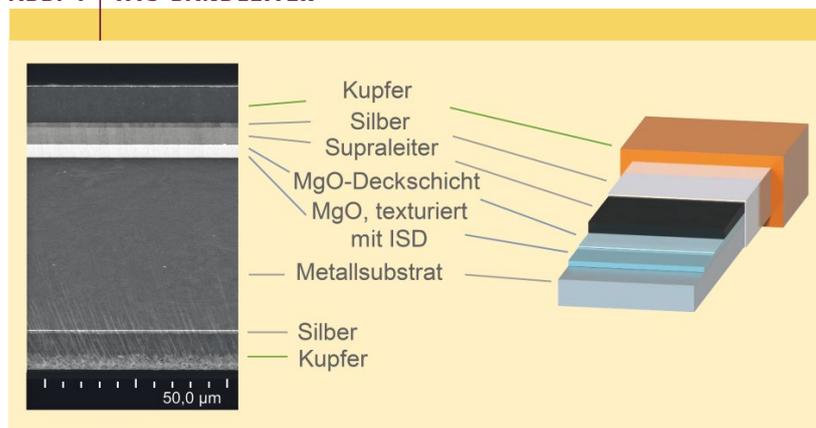
Heute arbeitet man mit bis zu mehr als 1 km langen, 10 oder 12 mm breiten und nur 30 bis 100 μm dünnen Metallfolien als Ausgangsmaterial vor der Beschichtung. Für Kabelanwendungen werden die dann bereits mit dem Supraleiter beschichteten Bänder vor der Kupferbeschichtung mit Rollenmessern oder Laser auf 2 bis 6 mm Breite längsgeteilt.

Hochtemperatur-Supraleiter sind harte Typ-II-Supraleiter. Das bedeutet, dass magnetischer Fluss in Form von quantisierten Flusslinien in das Material eindringt und dort an sogenannten Pinningzentren verankert wird. Fließt ein elektrischer Strom, wirkt auf die Flussfäden die Lorentz-Kraft. Diese übersteigt ab einem gewissen Strom, dem kritischen Strom I_c , die Pinningkraftdichte. Die Flussfäden beginnen sich zu bewegen, wobei Verluste auftreten, was zu einem Spannungsabfall führt.

Üblicherweise wird als Kriterium für den kritischen Strom I_c ein Spannungsabfall von 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ definiert. I_c ist von der Temperatur und der magnetischen Flussdichte abhängig. Je tiefer die Temperatur ist, umso größer wird I_c . Mit zunehmender magnetischer Induktion steigt dagegen die Dichte der Flussfäden, sodass die Pinningkraftdichte früher überschritten wird und I_c sinkt. Abbildung 5 zeigt diese Abhängigkeit exemplarisch für einen HTS-Bandleiter.

Bei der Auslegung eines Kabels wie auch jeder anderen Anwendung müssen folglich die Temperatur sowie das

ABB. 4 | HTS-BANDLEITER



Aufbau des HTS-Bandleiters von THEVA. Links ein mit dem Rasterelektronen-Mikroskop aufgenommener Querschnitt, rechts eine nicht maßstabgetreue 3D-Darstellung; der Supraleiter ist $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

Magnetfeld, das der Betriebsstrom erzeugt, berücksichtigt werden. Üblicherweise wird hierfür als Referenzwert der kritische Strom der HTS-Bandleiter bei 77 K und ohne externes Magnetfeld vermessen, da entsprechende Messgeräte zur Verfügung stehen. Anschließend wird dann auf I_c bei den geforderten Bedingungen im Kabel anhand der dargestellten Abhängigkeit geschlossen.

Typische Werte für den Referenz- I_c von 12 mm breiten Leitern und einer Dicke von circa 0,1 mm sind 500 bis 800 A, schmalere Leiter tragen entsprechend weniger Strom. Im Vergleich zu Kupferleitern ergeben sich damit um den Faktor 100- bis 200-mal höhere Stromdichten, was Kabel mit deutlich höherer Strom- und Leistungsdichte ermöglicht.

Trotz zunehmendem Ausbau der Fertigungskapazitäten und mehr als zehn Firmen weltweit, die solche HTS-Bandleiter entwickeln, befindet sich die Produktion noch nicht in einem industriellen Großmaßstab. Aktuell können erst einige 1000 km HTS-Bandleiter weltweit pro Jahr hergestellt werden. Dies reicht aber schon aus, um größere Kabelstrecken in angemessener Zeit auszustatten. Zum Vergleich beträgt die Fertigungskapazität für den Tieftemperatur-Supraleiter NbTi, wie sie in Magnetresonanztomographen eingesetzt werden, in einem einzigen Werk schon mehr als 100 000 km pro Jahr. Bei zunehmendem Bedarf wird ein weiterer Ausbau der Fertigung von HTS-Bandleitern deren Kosten weiter senken.

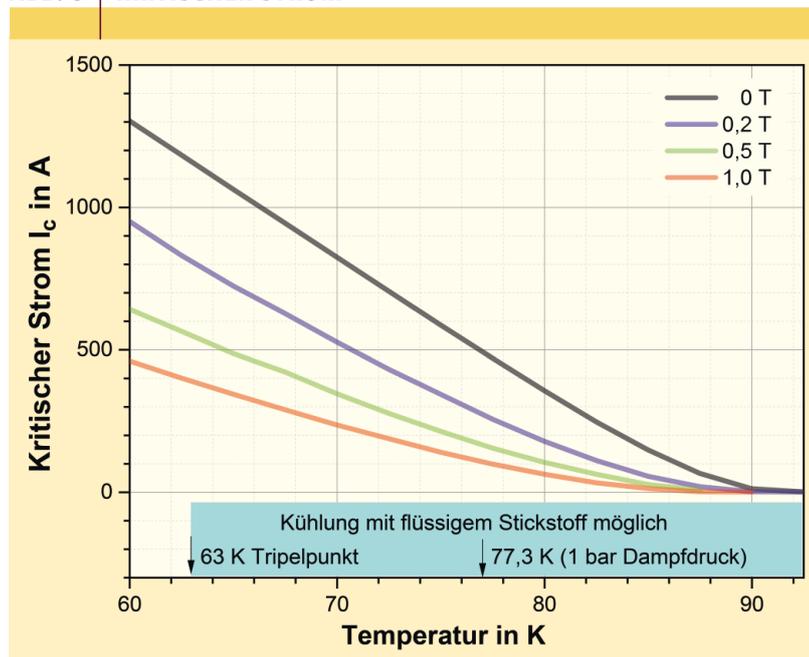
Aufbau supraleitender Kabel

Abbildung 6 zeigt den grundlegenden Aufbau supraleitender Wechselstromkabel. Auf das flexible Innenrohr werden in der Regel 4 mm breite Bandleiter helikal aufgewickelt. Je nach Stromtragfähigkeit können mehrere Lagen Bandleiter erforderlich werden. Durch die extrem hohe Stromtragfähigkeit der Supraleiter ist somit der Außendurchmesser des Kabels nur noch sehr geringfügig vom Bemessungsstrom abhängig. Darauf folgt die elektrische Isolation, die aus mit Polypropylen laminiertem Papier (PPLP) bestehen kann. Diese ist unter Druck mit Stickstoff gefüllt, was elektrisch gesehen eine Flüssig-Feststoff-Isolation ergibt, deren Einsatz bis zu höchsten Spannungen möglich ist.

In einem dreiphasig konzentrischen Kabel folgen dann die zwei weiteren Phasenleiter inklusive elektrischer Isolation, bevor ein normalleitender Neutralleiter aufgetragen wird. Der Transport des flüssigen Stickstoffs als Kühlmittel erfolgt als Hinleiter im Innenrohr, als Rückleiter bietet sich der Zwischenraum zwischen Neutralleiter und Kryostatinnenrohr an. Je nach Kabellänge kann dadurch eine separate Rückleitung für den Flüssigstickstoff entfallen.

Der dreiphasig konzentrische Aufbau (Abbildung 6 rechts) wird bis zu Spannungen von etwa 50 kV realisiert und ist wegen des geringeren Supraleiterbedarfs gegenüber den anderen Aufbauten bevorzugt. Mit höherer Spannung geht man dann auf das Dreileiterkabel über (Abbildung 6 Mitte), da der dreiphasig konzentrische Aufbau wegen der zunehmenden Isolationsdicke nicht mehr sinnvoll realisiert werden kann. Das Dreileiterkabel ist typisch für eine Span-

ABB. 5 | KRITISCHER STROM



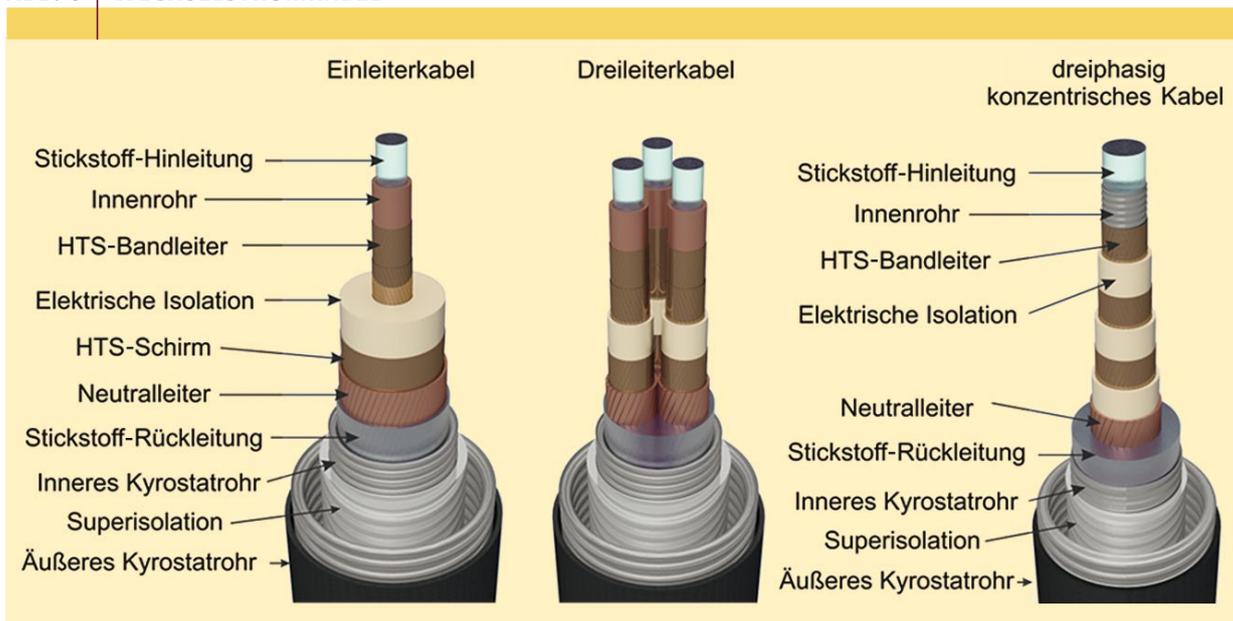
Kritischer Strom eines 12 mm breiten HTS-Bandleiters in Abhängigkeit von der Temperatur und der magnetischen Induktion direkt am Supraleiter. Auch die Richtung des Magnetfelds hat einen Einfluss auf I_c . Hier ist die Abhängigkeit bei ungünstigster Orientierung dargestellt.

nung von etwa 110 kV und benötigt gegenüber dem dreiphasig konzentrischen Kabel zwar mehr Supraleiter, kommt aber noch mit einer Kryostathülle für alle drei Phasen aus.

Bei höheren Spannungen wie 380 kV sind drei Stränge eines Einleiterkabels (Abbildung 6 links) zu bevorzugen, da dann auch das Dreileiterkabel sehr unhandlich werden würde. Je nach Kabeldurchmesser ergeben sich bei allen drei Kabeltypen ähnlich wie bei konventionellen Kabeln Einzelstücklängen zwischen 500 und 1000 m, bevor diese durch eine Muffe verbunden werden müssen.

Alle Kabeltypen benötigen eine thermische Isolation, die gleich aufgebaut ist. Von innen nach außen gesehen beginnt sie mit dem inneren Kryostatwellrohr. Zwischen diesem und dem äußeren Kryostatwellrohr befindet sich eine Mehrlagen-Superisolation in einem guten Vakuum. Dies ist erforderlich, um den Wärmeintrag in das Kabel möglichst zu minimieren. Bei üblichen Kabeldurchmessern und gut ausgeführten Kabeln kann man damit Werte von nur 1 W Wärmeintrag pro Meter Länge erhalten. Das Vakuum wird beim Hersteller erzeugt und kann über einen sehr langen Zeitraum, aktuell von bis zu zehn Jahren, garantiert werden. Bei einigen Fehlerarten kann das Kabel vor Ort repariert und das Vakuum wiederhergestellt werden. Grundsätzlich sind anstelle von flexiblen Wellrohren auch feste Rohre möglich, die dann stückweise aneinandergelegt werden können.

Bei einem supraleitenden Kabel ergeben sich zwischen Anfang und Ende ein Druckabfall und ein Temperatur-

ABB. 6 | WECHSELSTROMKABEL

Grundlegender Aufbau von Wechselstromkabeln mit Hochtemperatur-Supraleitern.

anstieg des flüssigen Stickstoffs, der die festgelegten Auslegungswerte – zum Beispiel 68–77 K bei einigen bar – nicht überschreiten darf. Dies erfordert nach einer gewissen Kabellänge eine Zwischenkühlung, um den Druck und die Temperatur wieder auf die Anfangswerte zu bringen. Für Wechselstromkabel liegt diese Grenze bei Wellrohren zwischen 5 und 10 km, die mit glatten Rohren und Gleichstromkabeln noch deutlich überschritten werden können. Damit sind heute schon in Innenstädten eine Vielzahl von Kabelstrecken ohne Zwischenkühlung möglich, da dort in der Regel ein sehr hoher Anteil der Kabelstrecken von mehr als 80% nur eine Länge von weniger als 5 km aufweist.

Alle Kabeltypen müssen ein Kühlsystem besitzen, um den flüssigen Stickstoff zu transportieren und den Wärmeeintrag abzuführen. Grundsätzlich werden diese Systeme in offene oder geschlossene Systeme unterteilt. Bei offenen Systemen wird der Stickstoff in einem großen Behälter aufbewahrt und der Bedarf durch Pumpen in das Kabel verteilt. Am Schluss wird der Stickstoff dann einfach in die Außenluft abgeführt. Diese Art der Kühlung ist, wie im Essener Projekt AmpaCity gezeigt, sehr zuverlässig und erfordert dort für das 1 km lange dreiphasig konzentrische Kabel ein Nachfüllen im zeitlichen Abstand von etwa 14 Tagen. Mehr Kälteleistung benötigt häufigeres Nachfüllen, was ir-

gendwann unpraktisch wird und ein geschlossenes Kühlsystem mit einer Kälteanlage erforderlich macht. Die technische Machbarkeit dieser Kühlart wurde schon in einer Vielzahl von Projekten demonstriert.

Sollte sich zukünftig Wasserstoff als erneuerbarer Energieträger etablieren, ist seine flüssige Form wegen der hohen Energiedichte für einige Anwendungen sehr vorteilhaft. Die dann vorliegende Temperatur von 20 K eignet sich ideal in der Kombination mit dem Transport elektrischer Energie. Da sich die Stromdichte des Supraleiters gegenüber 77 K nochmal um den Faktor 5–10 erhöhen kann [8], ergeben sich Leistungen im Gigawattbereich bei geringsten Außendurchmessern. Abbildung 7 zeigt ein Probestück eines supraleitenden Gleichstromkabels mit einem Nennstrom in der Größenordnung von 100 kA. Damit wären schon bei einer niedrigen Spannung von 10 kV Übertragungsleistungen von 1 GW realisierbar.



Abb. 7 Dieses Gleichstromkabelmodell mit Hochtemperatur-Supraleitern der 100-kA-Klasse bei 20 K hat einen Außendurchmesser von nur 70 mm.

Vorteile supraleitender Kabel und Leitungen

Aus der Anwenderperspektive lassen sich die Vorteile supraleitender Kabel und Leitungen in die drei Bereiche der Legung und Trassenführung, der Umwelt und des Betriebs unterteilen.

Durch das sehr kompakte Kabel lässt sich der Flächenbedarf und die benötigte Trassenbreite deutlich reduzieren. Bei 380-kV-Kabeln sind Trassen-

breiten von etwa 25 m erforderlich, wohingegen eine vergleichbare supraleitende Leitung nur weniger als 7 m beanspruchen würde. Auch in Industrieanwendungen ergibt sich durch die kompakte Leitung eine einfachere Führung und Installation. Der Aufwand bei der Kabellegung reduziert sich entsprechend, sie kann schneller erfolgen. Ein besonderer Vorteil ergibt sich, wenn das supraleitende Kabel die gleiche Leistung bei einer geringeren Spannungsebene übertragen kann. Daraus können sich vereinfachte Genehmigungsverfahren ergeben, die zu einer deutlichen Beschleunigung der Umsetzung der Kabelstrecke führen können.

Sind die Kabel wie in Abbildung 6 gezeigt aufgebaut, entstehen im Betrieb keine elektromagnetischen Streufelder, da diese durch den supraleitenden Schirm vollständig abgeschirmt werden. Dadurch kann in bestimmten Fällen die Legung weniger tief erfolgen, und die Akzeptanz wird erhöht. Überdies erwärmt ein supraleitendes Kabel nicht den umliegenden Boden, da es am Außenmantel dessen Temperatur annimmt. Eine mögliche Bodenaustrocknung und der Einsatz gut wärmeleitender Füllmaterialien im Boden wird dadurch vermieden. Zusätzlich kann ein supraleitendes Kabel je nach Auslastung Leitungsverluste reduzieren und somit den CO₂-Fußabdruck verringern. Gerade bei Gleichstromleitungen und hohen Strömen sind signifikante Verlusteinsparungen von deutlich mehr als 50% erzielbar.

Im Betrieb haben supraleitende Kabel und Leitungen den entscheidenden Vorteil, dass sie eine wesentlich höhere Übertragungsleistung bei einer niedrigeren Spannungsebene bieten oder dass sich ihre Übertragungsleistung bei gleichem Außendurchmesser deutlich steigern lässt. Durch den koaxialen Aufbau (Abbildung 6) und den widerstand-

losen Leiter ergibt sich eine niedrigere Längsimpedanz. Diese ermöglicht eine niedrigere Spannungserhöhung im Leerlauf, einen geringeren Spannungsabfall im Betrieb und letztendlich einen Betrieb mit sogenannter natürlicher Leistung. Letzteres führt dazu, dass bei Wechselstrom signifikant längere Kabelstrecken ohne Kompensation der Blindleistung möglich werden.

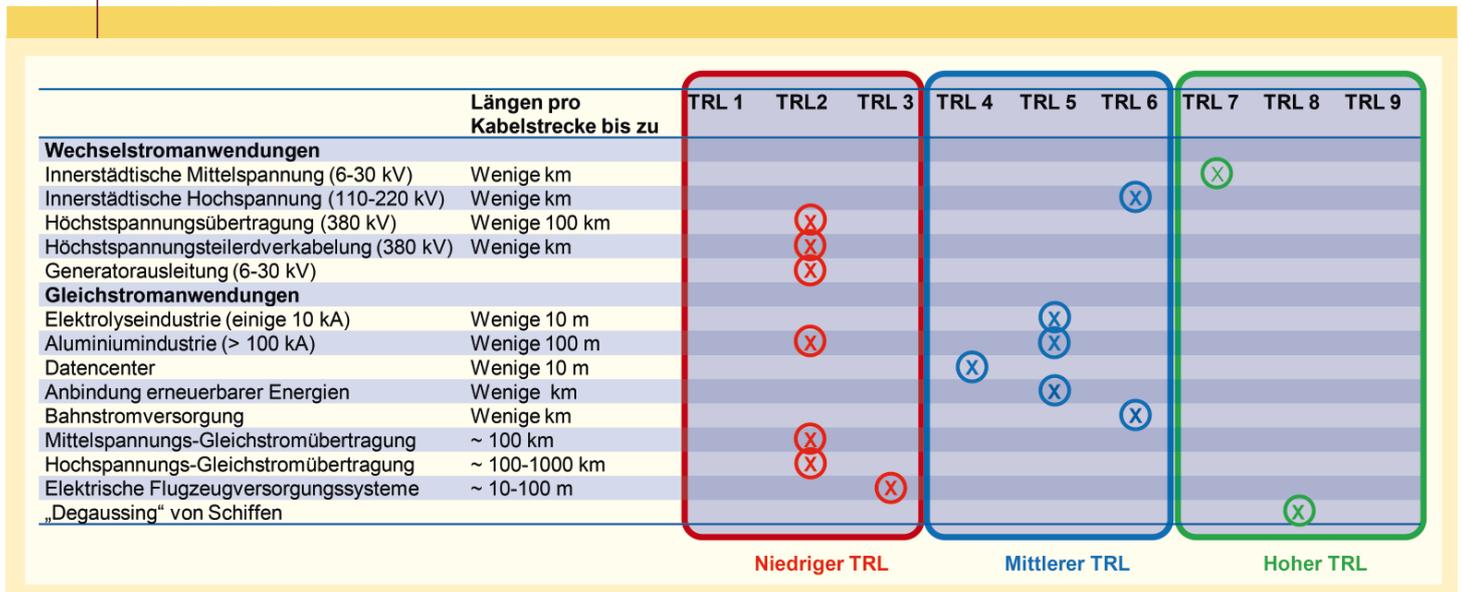
Dieser Vielzahl von Vorteilen steht nur der zusätzliche Aufwand der aktiven Kühlung entgegen. Abhängig von der Anwendung müssen die Vorteile gegenüber diesem Nachteil abgewogen werden.

Vielfältige Anwendungen

Grundsätzlich lassen sich die Einsatzmöglichkeiten supraleitender Kabel und Leitungen in Wechselstrom- und Gleichstromanwendungen unterscheiden (Abbildung 8). Da bei Gleichstromanwendungen die Wechselstromverluste entfallen, ergeben sich größere Längen ohne Zwischenkühlung und abhängig von der Stromstärke einfachere Kabelaufbauten. Bei Hochspannung ist auch für Gleichstromanwendungen eine gemischte Flüssigstickstoff- und Papierisolation vorteilhaft, wie Abbildung 6 sie für ein Wechselstromkabel zeigt. Im Vergleich zu einer Feststoffisolation bilden sich weniger Raumladungen aus, damit wird der Verlauf des elektrischen Feldes homogener.

Da die typischen Längen einzelner Kabelstrecken in Innenstädten nur einige wenige Kilometer betragen und deren Kühlung erfolgreich demonstriert wurde, ist der Entwicklungsstand bereits weit vorangeschritten. In Essen befindet sich eine solche Kabelstrecke mit einem Kilometer Länge seit 2014 in einem Dauerbetrieb, und auf Jeju Island in Korea wurde ein 154-kV-Kabel längere Zeit erfolgreich erprobt. Dies nun zu Höchstspannungen bis zu 380 kV

ABB. 8 | ANWENDUNGEN



Übersicht über Anwendungen von supraleitenden Kabeln und Leitungen und ihr aktueller Entwicklungsstand gemäß Technology Readiness Level (TRL) der EU H2020.



Abb. 9 Supraleitende 20-kA-Stromschiene in einer Chlorelektrolyse-Anlage in Ludwigshafen (Foto: Vision Electric SuperConductors GmbH).

weiterzuentwickeln, wie sie im europäischen Verbundnetz üblich sind, ist grundsätzlich möglich. Die nötigen Hochspannungskomponenten wurden bereits bis 300 kV entwickelt.

Derzeit befindet sich aber noch kein supraleitendes Höchstspannungskabel in einem Netzeinsatz. Attraktiv wäre diese Anwendung beispielsweise bei der Teilerdverkabelung von Höchstspannungsfreileitungen [9], weil dadurch die Trassenbreite deutlich reduziert und wie schon erwähnt die elektromagnetische und thermische Beeinflussung der Umgebung entfallen würde. Ebenso könnten hier die Mehrkosten für das supraleitende Kabel geringgehalten werden. Um den alten Traum, größte Energiemengen über weite Entfernungen nahezu verlustlos zu übertragen, zu erfüllen, müsste die Herausforderung der Zwischenkühlung mit Kühlstationen in möglichst großen Abständen erfolgreich bewältigt werden. Dazu gibt es vielversprechende Ansätze, aber bisher noch keine einzige realisierte Kabelstrecke.

Supraleiter sind ideal für Gleichstromkabel und -leitungen geeignet, da die Wechselstromverluste entfallen und

fast nur noch die thermischen Verluste der Kryohülle die Gesamtverluste bestimmen. Ebenso sind sehr hohe Ströme von weit mehr als 10 kA realisierbar, die bereits mehrfach demonstriert wurden. So wurde in Ludwigshafen in einer Chlorelektrolyse-Anlage eine supraleitende 20-kA-Stromschiene experimentell erprobt. Dabei konnten die betrieblichen Sicherheitsanforderungen erfüllt werden (Abbildung 9).

Derzeit wird in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojekt die Technologie einer supraleitenden 200-kA-Stromschiene für Aluminiumwerke entwickelt. Diese könnte Verluste im Vergleich zu den üblichen Kupferstromschienen signifikant einsparen. In Japan gibt es erfolgreiche Entwicklungen bei Gleichstromleitungen: In Ishikari verbindet eine 1000 m lange 2,5-kA-Leitung einen Photovoltaikpark mit einem Datacenter, und in einer Teststation des Japanese Railway Technical Research Institute wurde ein 310 m langes 1500-V-Gleichstromkabel in der Bahnstromversorgung erprobt. Eine Nischenanwendung ist das sogenannte Degaussing von Militärschiffen, dafür hat die Firma American Superconductor (AMSC) in den USA bereits das vierte System in einem Schiff installiert. Das Degaussing soll die magnetische Signatur des Schiffes eliminieren.

Grundsätzlich wäre ein supraleitendes Kabel auch für die Hochspannungs-Gleichstromübertragung einsetzbar. In dem EU-Projekt BestPaths [10] wurde dazu 2018 ein 30 m langes Kabelstück für 320 kV mit einer Stromtragfähigkeit von 10 kA entwickelt und erfolgreich getestet. Hier wurde Magnesiumdiborid als Supraleiter, der in der Praxis eine Kühlung bei 20 K erfordert, verwendet. In der Innenstadt von St. Petersburg steht ein 20-kV-Kabel für eine 2,5-kA-Mittelspannungs-Gleichstromverbindung kurz vor der Inbetriebnahme. Zudem werden supraleitende Leitungen auch für elektrisch angetriebene Flugzeuge entwickelt, um den Gewichtsvorteil zu nutzen.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass es eine Vielzahl von Anwendungen für supraleitende Kabel und Leitungen gibt, für Wechsel- wie für Gleichstrom. Der Entwicklungsstand hängt von der jeweiligen Anwendung und der damit verbundenen Spannungsebene ab.

TAB. 1 | BEWERTUNG KONVENTIONELLER LÖSUNGEN IM VERGLEICH ZU EINER HTS-LÖSUNG

Kriterium	Freileitung mit 400 kV	Mehrfachsystem 110-kV-VPE-Kabel ¹	400-kV-Kabel	110-kV-HTS-Kabel
Platzsparend	☹	☹	☹	😊
Akzeptanz	☹	😊	☹	😊
Kostengünstig	😊	☹	☹	😊
Technisch ausgereift	😊	😊	😊	😊
Leistungsfähigkeit	😊	☹	😊	😊
Verlustarm	😊	☹	☹	😊

¹VPE: Kabelisolierung aus vernetztem Polyethylen.

Pilotprojekt der Stadtwerke München

Unter der Leitung der Stadtwerke München (SWM) hat im Oktober 2020 das Verbundprojekt SuperLink begonnen, in dem die Komponenten eines supraleitenden 110-kV-Kabels für 500 MVA innerhalb von zwei Jahren entwickelt und im Umspannwerk Menzing ein halbes Jahr lang in der Praxis getestet werden sollen. Beteiligt sind die Linde AG, der Supraleiterhersteller THEVA, der Kabelhersteller NKT, die Fachhochschule Südwestfalen und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Gefördert wird das Projekt vom BMWi.

Bei Erfolg soll im Anschluss ein 12 km langes supraleitendes Kabel zwischen dem Hauptumspannwerk Menzing und dem Energiestandort Süd in Sendling angegangen werden. Im Vergleich zu den konventionellen Lösungen ist dies umweltneutral, und die Beeinträchtigungen durch Tiefbauarbeiten in der Innenstadt von München können wesentlich reduziert werden. In den meisten Bewertungskriterien (Tabelle 1) schneidet die supraleitende Variante besser ab. Lediglich der technische Reifegrad und die Wirtschaftlichkeit sind für diese Spannungsebene und Kabellänge noch nicht nachgewiesen. Da jedoch ein aufwendiges Tunnelbauwerk in der Innenstadt vermieden wird, wie es ein konventionelles 400-kV-Erdkabel erfordern würde, könnte sich das supraleitende Kabel als wirtschaftlicher herausstellen.

Trotz der sehr guten Fortschritte ist die Entwicklung supraleitender Kabel und Leitungen nicht abgeschlossen, und es bleiben noch einige Herausforderungen bestehen. Dazu gehört die weitere Verbesserung des Preis-Leistungs-Verhältnisses der Hochtemperatur-Supraleiter, die Anpassung der Kühltechnik an längere Kabelstrecken, die Entwicklung von Prototypen für höhere Spannungen und höhere Ströme sowie die Demonstration dauerhafter und erster kommerzieller Anwendungen im Netz- oder Industrieinsatz.

Zusammenfassung

Für supraleitende Kabel und Leitungen gibt es eine Vielzahl potenzieller Anwendungen. Hochtemperatur-Supraleiter sind heute als Bandleiter guter Qualität kommerziell verfügbar. Ihre durchschnittliche Stromtragfähigkeit hat sich in den letzten zehn Jahren etwa verdreifacht, weitere Steigerungen sind absehbar. Zu den Vorteilen im Vergleich zu konventionellen Lösungen zählen signifikant verringerte elektrische Verluste, hohe Übertragungsleistung bei niedrigeren Spannungen sowie eine wesentliche Reduzierung des Platzbedarfs und der elektromagnetischen wie thermischen Belastung der Umgebung. Das vereinfacht zum Beispiel die unterirdische Legung in Innenstädten erheblich. Das Kabelprojekt AmpaCity in Essen hat den dauerhaften und zuverlässigen Betrieb eines supraleitenden Kabels eindrucksvoll unter Beweis gestellt. Im Zuge der Energiewende haben sich die Rahmenbedingungen für energieeffiziente und kompakte Kabel positiv entwickelt. Der Bedarf in Erneuerung und Ausbau des Stromnetzes ist in allen Spannungsebenen stark gewachsen.

Stichwörter

Hochtemperatur-Supraleiter, Supraleitende Materialien, Supraleitende Kabel, Hochstromleitungen, Wechselstromübertragung, Gleichstromübertragung, AmpaCity, SuperLink.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, Zeitschrift für Physik B **1986**, 64, 189.
- [2] B. G. Marchionini, Y. Yamada, L. Martini, H. Ohsaki, IEEE Trans. Appl. Supercond. **2017**, 27, 0500907.
- [3] J. A. Demko et al., AIP Conference Proceedings **2002**, 613, 180.
- [4] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, CIREN 23rd International Conference on Electricity Distribution **2015**, Paper 0678.
- [5] A. Böhmer, A. Kreyszig, Physik in unserer Zeit **2017**, 48(2), 70.
- [6] G. Wu et al., J. Phys. Condens. Matter **2009**, 21(14): 142203.
- [7] M. Bauer, ISD by Thermal Evaporation, in: Second-Generation HTS Conductors (Hrsg.: A. Goyal), Kluwer Academic Publishers, Boston **2005**, S. 53.
- [8] <http://htsdb.wimbush.eu/dataset>
- [9] D. Kottonau et al., Karlsruher Schriftenreihe zur Supraleitung **2019**, Band Nr. 26, <https://t1p.de/380-kV-SL>
- [10] www.bestpaths-project.eu

Die Autoren



Mathias Noe studierte Elektrotechnik an der Leibniz Universität Hannover und promovierte 1998 dort. Nach einem Postdoc-Aufenthalt an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne kam er an das Forschungszentrum Karlsruhe. Seit 2006 ist er Direktor des Instituts für Technische Physik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie Professor für Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung in der Energietechnik an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des KIT.



Markus Bauer studierte Physik an der Technischen Universität München und promovierte 1998 dort auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Supraleitung. Nach mehreren Jahren bei thyssenkrupp Transrapid wechselte der 2010 zur THEVA Dünnschichttechnik. Dort war er zuerst für den Aufbau der Bandleiterproduktion tätig, bevor er ab 2014 die Leitung der Geschäftsentwicklung übernahm. Seit April 2021 ist er Geschäftsführer der thyssenkrupp Transrapid GmbH.

Anschriften

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe, Institut für Technische Physik, Hermann-von-Helmholtz Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen.
Mathias.no@kit.edu

Dr. Markus Bauer, Thyssenkrupp Transrapid GmbH, Moosacker Str. 50, 80809 München.
markus.bauer2@thyssenkrupp.com