

HTS-Industriestromschienen: Verlustarme Hochstromsysteme für industrielle Gleichstromversorgungen

Arbeitspapier



Förderkennzeichen: 03ET1630B

Förderbereich: Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe,
Handel und Dienstleistungen (GHD)

Verbundpartner

Technische Universität Darmstadt**
**Konsortialführer



Karlsruher Institut für Technologie



Im Unterauftrag

IREES GmbH



ETA-Solutions GmbH



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Karlsruhe, den 29.10.2021

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Jessica Walther

Technische Universität Darmstadt
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)
Eugen Kogon Straße 4
64287 Darmstadt

Tel. +49 (6151) 16 20478

Fax +49 (6151) 16 20087

info@ptw.tu-darmstadt.de

Verfasser der vorliegenden Untersuchung:

Philipp Haltenort

Dr. Bernhard Schäfer

Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer

Institut für Katalyseforschung & -technologie (IKFT)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Tel. +49 (721) 608 22401

Fax +49 (721) 608 22244

office@ikft.kit.edu

Kontakt:

Tel. +49 (721) 608 26345

philipp.haltenort@kit.edu

Inhaltsverzeichnis

0.	Vorbemerkungen	4
1.	Kurzdarstellung der genutzten Methodik EDUAR&D	5
2.	Beschreibung der untersuchten Technologie	1
2.1.	HTS-Materialien und Bandleiter	1
2.2.	HTS-Industriestromschienen	2
2.3.	Kühlung von HTS-Stromschienen	3
3.	Marktkontexturierung	5
3.1.	Anbieter von HTS-Leitern und Industriestromschienen	5
3.2.	Potentielle Anwenderindustrien	5
4.	Energietechnische und Energiewirtschaftliche Bewertung	7
4.1.	Energietechnische Bewertung	7
4.2.	Energiewirtschaftliche Betrachtung	9
5.	Technologiezyklusanalyse	10
6.	Innovationssystemanalyse	12
7.	Ableitung möglicher Entwicklungsziele	13
7.1.	Forschungsempfehlungen	13
7.2.	Übergeordnete Trends und Themen	14
8.	Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen	15
9.	Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen	15

0. Vorbemerkungen

Diese Ausarbeitung dient als eine erste Grundlage für Telefonate mit Fachleuten im Bereich supraleitender Stromschienen (superconducting busbars) für Gleichstromanwendungen in Industrie und Gewerbe. Ziel dieser Analysen und Gespräche ist es:

- den heutigen Stand der Technik der supraleitenden Stromschienen,
- ihren heutigen und zukünftigen Stand der Marktdiffusion in Deutschland (und im Ausland) sowie
- ihre heutigen in der deutschen Wirtschaft zu beobachtende Markteintrittsbarrieren und erforderliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu besprechen.

Im Energie-Forschungsprogramm der Bundesregierung wurde die Stromschienen-Technik auf Basis von Hochtemperatursupraleitung (HTS) in den letzten 6 Jahren in zwei Verbundprojekte vom BMWi gefördert, die in der EnArgus-Projektdatebank ausgewiesen sind:

- „3S-SupraStromSchiene: Supraleitendes Hochstromsystem für DC-Anwendungen“ (2015-2018, FKZ: 03ET1294, beteiligt waren 3 Partnern: Vision Electric Super Conductors GmbH, Institut für Technische Physik/KIT, Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH) [1]
- „Demo200“ (07/2019-12/2021, FKZ: 03ET1670A, beteiligt sind 3 Partner: Vision Electric Super Conductors GmbH, Institut für Technische Physik des KIT, MESSER Group GmbH) [2]

Im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM, Projektträger AiF Projekt GmbH) des BMWi erfolgte die Projektförderung:

- „Industrielle Grundlagenforschung und Entwicklung einer DC-Stromzuführung von 20 - 200 kA für supraleitende Stromschienensysteme“ (05/2014-07/2016, FKZ: KF327930RR3, beteiligt waren zwei Partner: FB Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Kaiserslautern, Vision Electric Super Conductors GmbH) [3]

Weiterhin beschäftigten sich die folgenden Forschungsprojekte mit der Entwicklung einer zweiten Generation von Supraleitern, die mittels kontinuierlicher Beschichtungsverfahren produziert werden können, um bessere Verarbeitungseigenschaften, gleichbleibende hohe Stromtragfähigkeiten und höhere Produktionskapazitäten zu gewährleisten:

- „ELSA - Entwicklung innovativer Supraleiter mit Schichtarchitektur für die Energietechnik“ (07/2007-06/2010, FKZ: 0327433, beteiligt waren zwei Partner: GTT Gesellschaft für Technische Thermochemie und -physik mbH, Zenergy Power GmbH) [4]
- „HIGHWAY - Optimierte ReBCO-Bandleiter für Stark- und Wechselstromanwendungen“ (11/2008-10/2011, FKZ: 0327489, beteiligt waren drei Partner: Theva Dünnschicht GmbH, IAP Uni Tübingen, ITEP KIT) [5]
- „SupraTech - Supraleiter für energietechnische Anwendungen“ (07/2011-06/2015, FKZ: 03ET1010, beteiligt waren zwei Partner: Deutsche Nanoschicht GmbH, Theva Dünnschichttechnik GmbH und Unterauftragnehmer) [6, 7]
- „HTS-NextGEN - Fertigungstechnologie für HTS-Bandleiter der nächsten Generation“ (09/2017-08/2020, FKZ: 03ET1497A, Theva Dünnschichttechnik GmbH und Unterauftragnehmer) [8]

Obwohl sich die allgemeine Wahrnehmung von HTS-Kabeln hauptsächlich auf elektrische Stromnetze fokussiert, besteht auch in der Industrie ein Interesse an der Übertragung großer Mengen elektrischer Energie über kurze Entfernungen. HTS-Stromschienen stellen für entsprechende Applikationen eine attraktive Option dar. Dabei können hohe Stromstärken bei relativ niedrigen Spannungen übertragen werden.

1. Kurzdarstellung der genutzten Methodik EDUAR&D

EDUAR&D, kurz für „Energiedaten und -analyse R&D“, ist die im Rahmen des Projekts EE4InG genutzte Methodik zur Bewertung von vielversprechenden Technologien, die potenziell zu einer erheblichen Senkung des Energiebedarfs und/oder der Treibhausgasemissionen in den Forschungsfeldern (und teilweise darüber hinaus) beitragen könnten. EDUAR&D ist ein strukturierter Such- und Analyseprozess, der verschiedene methodische Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung der Technologien miteinander verbindet. Dabei werden die Werkzeuge der Technologieanalyse abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationen gewählt. Ziel ist es, Handlungsempfehlungen für die thematische Schwerpunktsetzung und die Intensivierung bestehender Förderungen für die zukünftige Energieforschung des Bundes abzuleiten. Die EDUAR&D-Methodik wurde im Auftrag des BMWi am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung entwickelt [1]. Abbildung 1 zeigt den typischen Gesamt Ablauf des EDUAR&D-Prozesses.

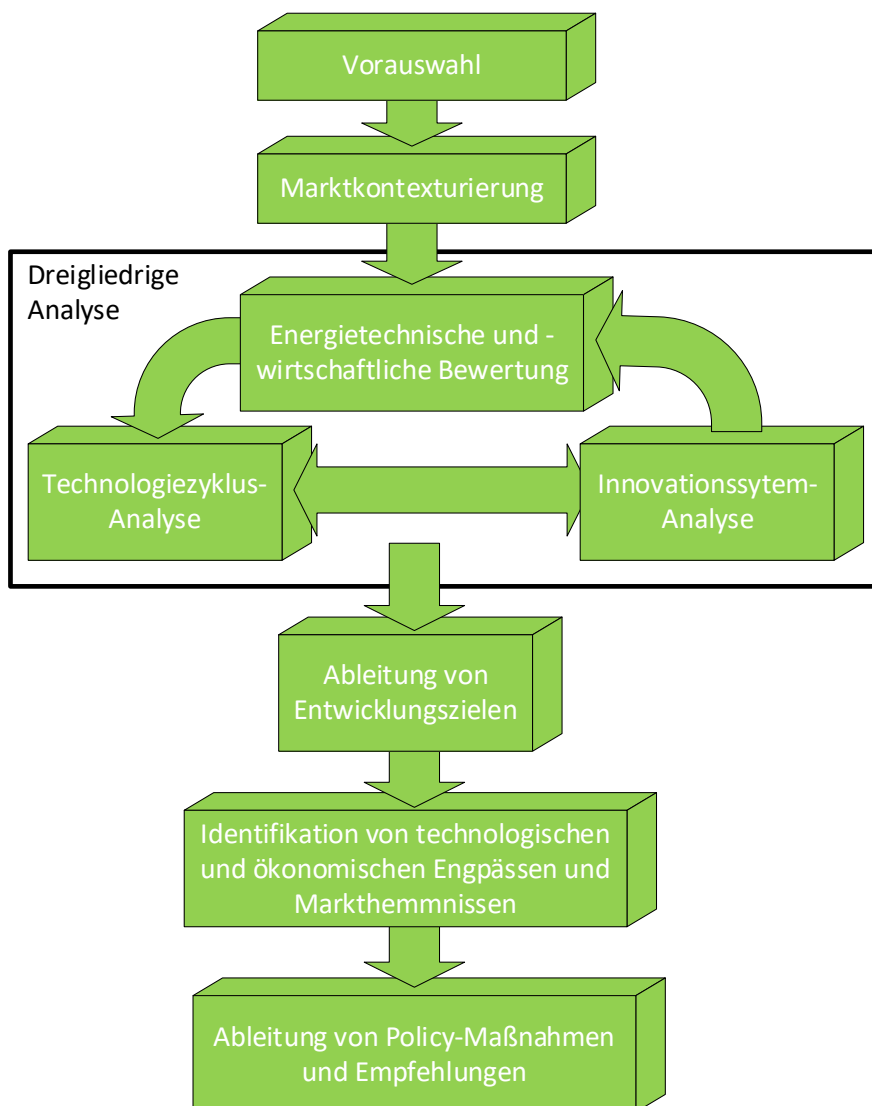


Abbildung 1: Ablaufstruktur der EDUAR&D-Analyse.

Für eine ausgewählte Technologie (beispielsweise anhand ihrer potenziellen Relevanz für den Energieverbrauch oder die THG-Emissionen einer Branche oder eines bestimmten Produktionsprozesses) wird zunächst eine Marktkontexturierung durchgeführt. Diese beschreibt die Regionalität der denkbaren Märkte und die derzeitige oder absehbar überwiegende Marktform (Monopol – Polypol) sowie mögliche Konkurrenztechnologien und die hierdurch absehbare Wettbewerbsintensität.

Zentraler und komplexester Teil der EDUAR&D-Analyse ist die dreigliedrige Analyse, welche aus einer energietechnischen und -wirtschaftlichen Bewertung, einer Technologiezyklus-Analyse sowie einer Innovationssystem-Analyse besteht. Die energietechnische/-wirtschaftliche Bewertung schätzt den möglichen Einfluss der Technologie auf den Energiebedarf einer Branche oder Produktion ab. Die Technologiezyklus-Analyse dient dazu, die technologische und ökonomische Marktnähe der Technologie besser verorten zu können. Die sechs Phasen des Technologiezyklus (Entdeckung, Euphorie, Ernüchterung, Reorientierung, Aufstieg und Diffusion) können auch dazu dienen, je nach Verortung der Technologie zielgerichtete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Verortung im Technologiezyklus kann durch Patent- und Publikationsanalysen unterstützt werden (z.B. über das Verhältnis von Grundlagen- und Anwendungspatenten, Zunahme oder Abnahme von Patenten und Publikationen über die Zeit). Auch eine SWOT-Analyse kann Bestandteil der Technologiezyklus-Analyse sein. Gemäß der Definition in [2] generieren, verbreiten und nutzen Innovationssysteme Innovationen. Sie setzen sich zusammen aus Komponenten und Relationen, wobei erstere Akteure, Technologien und den regulatorischen Rahmen (inkl. Förderpolitik) umfassen, und letztere die vielfältigen formellen und informellen Beziehungen zwischen diesen Komponenten.

Die Analyse schließt mit der Identifikation möglicher Entwicklungsziele, von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen aus den vorherigen Analyseschritten. Hieraus werden dann wiederum Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Im Rahmen des Vorhabens EE4InG dienen die EDUAR&D-Technologieanalysen auch als Input für Expertengespräche und werden in Folge dieser Gespräche nach Bedarf angepasst.

2. Beschreibung der untersuchten Technologie

2.1. HTS-Materialien und Bandleiter

Die Hochtemperatur-Supraleitung (HTS) wurde 1986 durch Müller und Bednorz entdeckt und ermöglicht die Übertragung hoher Stromdichten mit vernachlässigbarem Widerstand bei einer Kühlung mit flüssigem Stickstoff bei -196 °C [9]. Die erste Generation (1G) von HTS Drähten wurde mit der PIT-Technik (powder in tube) hergestellt. Dazu wurde das supraleitende keramische Material in ein Rohr aus Silber oder Silberlegierung gefüllt und dann extrudiert oder zu Draht mit einem Durchmesser von 1-2 mm gezogen. Bündel dieser Drähte wurden dann erneut in einem Rohr zu Draht gezogen, gewalzt und getempert. 1G-HTS-Drähte sind seit vielen Jahren kommerziell in hoher Qualität verfügbar. Ein Nachteil der 1G-Leiter besteht in den hohen Materialkosten, welche durch den Silberanteil von ca. 70 % verursacht werden [10].

Die verbesserte zweite Generation (2G) von HTS-Bandleitern beruht auf dem Konzept, dünne Schichten des keramischen Supraleiters auf einem flexiblen metallischen Substrat abzuscheiden. Da eine hohe Stromtragfähigkeit auf einer fast perfekten einkristallinen Ausrichtung der keramischen supraleitenden Materialien auf dem Metallsubstrat beruht, ist die Herstellung eines langen Metallbandes mit quasi einkristalliner biaxial texturierter Oberfläche nötig [11]. Darauf kann die HTS-Schicht mittels verschiedener Methoden, wie PVD (physical vapour deposition), MOCVD (metal organic chemical vapour deposition) oder Lösungsbeschichtung (CSD / MOD) abgeschieden werden.

In Abbildung 2 ist exemplarisch ein HTS-Bandleiter TPL2100 der Produktlinie Pro-Line der Firma Theva dargestellt [11]. Auf dem Band einer hochkorrosionsbeständigen Nickel-Chrom-Molybdän-Wolfram-Legierung (Hastelloy C276) mit einer Dicke von $100\text{ }\mu\text{m}$ wird eine Schichtarchitektur aufgebaut. Diese besteht aus ISD-MgO ($\sim 3\text{ }\mu\text{m}$), einer Deckschicht ($\text{MgO } 0,3\text{ }\mu\text{m}$), dem Supraleiter ($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$, $3,5\text{ }\mu\text{m}$), einem Silberkontakt ($\sim 1,5\text{ }\mu\text{m}$) und einem stabilisierenden Laminat aus Cu-Folie ($100\text{ }\mu\text{m}$). Der 2G-Bandleiter ist 12 mm breit, $0,22\text{ mm}$ hoch und trägt bei einer Temperatur von 77 K einen Strom I_c von $275\text{-}500\text{ A}$ [12].

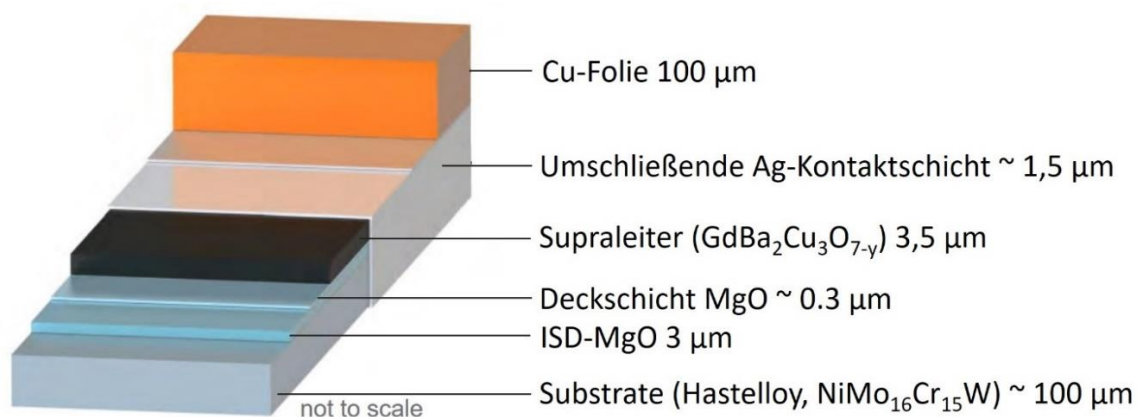


Abbildung 2: Schichtarchitektur des Suprabandleiters TPL2100 der Produktlinie Pro-Line der Firma Theva (Quelle: Theva GmbH, Beschriftung bearbeitet) [11, 12]

Öffentlich geförderte Verbundforschungsprojekte, wie „ELSA“ [4] und „HIGHWAY“ [5], ermöglichten es, die Materialeigenschaften und den Herstellprozess von Bandleitern der zweiten Generation grundlegend zu verbessern. Im Projekt „SUPRATECH“ wurde darüber hinaus eine Skalierung der Produktionsmengen bis hin zu einer Pilotproduktion mit optimierten Eigenschaften adressiert [6, 7]. Die zunehmende Verfügbarkeit der HTS-Bandleiter und ihre Anwendung wird mit dem Projekt „HTS NextGen“ unterstützt, das ein Upscaling der Fertigung in den industriellen Maßstab anstrebte [8]. Dazu soll die Geschwindigkeit der Beschichtungsprozesse deutlich erhöht werden, um so die Produktionskapazitäten weiter zu steigern.

2.2. HTS-Industriestromschienen

Supraleitende Stromschienen dienen zur Übertragung von Gleichströmen im zwei- bis dreistelligen Kiloampere-Bereich. Die Anwendung von supraleitenden Materialien ermöglicht den nahezu verlustfreien Transport von Strom ohne Leitungswiderstände und Wärmeentwicklung [9].

Das Gesamtsystem umfasst die Stromzuführung, die Stromschiene und eine Kälteversorgung, siehe Abbildung 3. Die Stromzuführung, Abbildung 3 c-1, verbindet die supraleitende Stromschiene mit dem normalleitenden Stromnetz. Die Stromschiene ist dabei aus Bündeln von Supraleitern aufgebaut. Es werden Stapel von 100 parallelen HTS-Bändern benötigt, um einen Nennstrom von 20 kA zu transportieren [1]. Diese Bündel werden in einem Kryostaten thermisch verkapselt, um Kälteverluste zu begrenzen bzw. zu minimieren. Dabei kommt Vakuumtechnologie und Superisolierung zum Einsatz. Der Hauptteil des nötigen Kühlaufwands wird beim Übergang zwischen „warmen“ normalleitenden Stromnetz und dem bei -200 °C betriebenen Supraleiter benötigt.

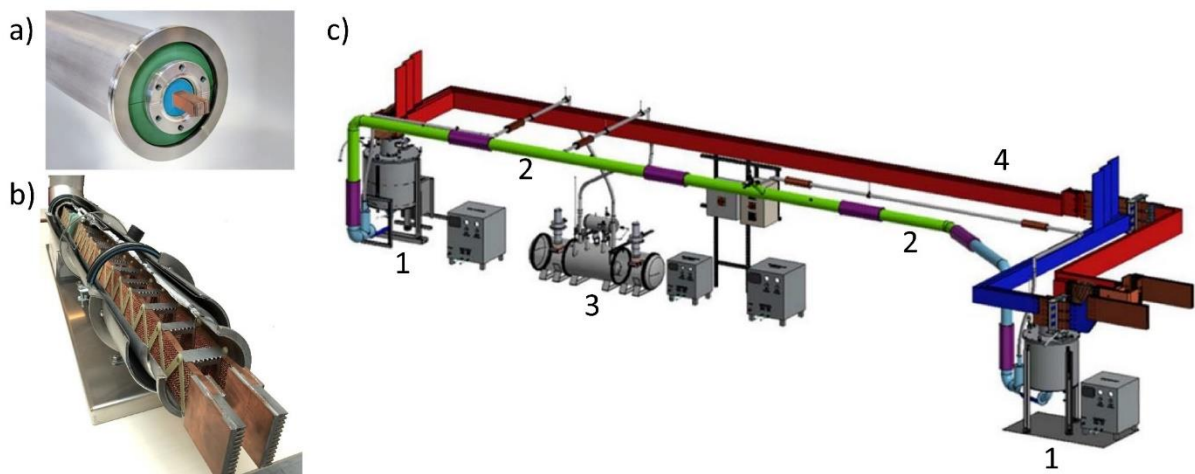


Abbildung 3: a) Modul einer supraleitenden Stromschiene (Quelle: VESC GmbH), b) Einblick in das Innere der Stromschiene (Quelle: eigene Aufnahme, ZIEHL 2020), c) Modell des Aufbaus einer HTS-Stromschiene im Projekt 3S bei der BASF, 1) Stromzuführung, 2) Stromschiene, 3) Kälteversorgung mit LN₂-Kreislauf, 4) in Rot überbrückte konventionelle Stromschiene [1]

Einsatzgebiete für supraleitende DC-Stromschienensysteme können für Industrien in Anwendungen mit Stromstärken von mehr als 10 kA unter Gesichtspunkten von Effizienz und Wirtschaftlichkeit attraktiv sein. Dabei können Strecken im Längenbereich von einigen Metern bis zu Kilometern überbrückt werden. Für Gleichstromanwendungen wird dieser Nutzen derzeit in industriellen Anlagen mit hohem kontinuierlichen Strombedarf als besonders hoch eingeschätzt. Dadurch werden gegenwärtig Anwendungen in den folgenden Branchen diskutiert [13, 14]:

- Chloralkalielektrolyse
- Kupfer- und Zinkelektrolyse
- Aluminiumverhüttung
- Graphitisierungsanlagen
- Rechenzentren und große Serveranlagen
- Netzanbindung von Wind- und Photovoltaikparks

Das gemeinsame Merkmal dieser Anwendungen ist die Notwendigkeit, hohe Ströme bei relativ niedrigem Spannungswert möglichst verlustfrei zu transportieren. Tabelle 1 gibt hierzu einen Überblick zu typischen Stromstärken und Leitungslängen innerhalb des Einsatzortes.

Tabelle 1: Ausgewählte Einsatzgebiete, typischer Strombedarf und Längen von Stromschienen in der Industrie [15].

Einsatzgebiet	Typischer Strombedarf / kA	Längen / m
Chloralkalielektrolyse	~ 20	30 - 300
Rechenzentren	15 - 40	40 - 500
Kupferelektrolyse	40 - 80	200 - 400
Zinkelektrolyse	(120 - 200)	100 - 300
Aluminiumhütten	200 - 350 (500)	100 - 1200

2.3. Kühlung von HTS-Stromschienen

Die Kühl- und Kältetechnik einer supraleitenden Stromschiene wird in zwei Teilsysteme unterteilt:

- die Kühlung beim Übergang zwischen der Stromzuführung des normalleitenden Stromnetzes und dem bei -200 °C betriebenen Supraleiter und
- die Rückkühlung des flüssigen Stickstoffes, der den Supraleiter im kryogenen Versorgungsleitungsverbund (Reservoir, Kühler, Stromschiene) auf seiner Arbeitstemperatur bei ca. -200°C hält.

Mehrstufige Kühlung bis -200 °C

Die Verbindung zwischen dem normalleitenden Stromnetz und dem Supraleiter ist ein wesentlicher Bestandteil aller supraleitender Anwendungen. Es werden dabei Temperaturdifferenzen von annähernd 300 °C überbrückt. Der Aufbau der Stromzuführung hat dabei einen signifikanten Einfluss auf die Investitions- und Betriebskosten.

Die Auslegung und Konstruktion einer Stromzuführung für supraleitende Stromschienensysteme von 20 - 200 kA erfolgte in einem gemeinsamen Forschungsprojekt von VESC und der TU Kaiserslautern im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand des BMWi [3]. Für einen DC-Strom von 20 kA kann mit einem Wärmeeintrag von 500 W pro Stromzuführung gerechnet werden [1]. Die Stromzuführung verursacht bei

kurzen Stromschiene, wie z.B. dem Demonstrator der 3S-Suprastromschiene, den größten Anteil der Wärmelast. Dabei entfallen 80 % des thermischen Verlusts auf die Kopplung des HTS-Systems mit der konventionellen Stromzuführung. Die apparative Umsetzung der gekühlten Stromzuführungen erfolgt daher mehrstufig. Dabei werden vier Kühlstufen eingesetzt, um das kryogene Temperaturniveau von ca. -200 °C zu erreichen [1]. Zunächst wird eine Wasserkühlung mit einer Zieltemperatur von 10 °C verwendet. In einer zweiten Stufe kühlen handelsübliche Kompressionskältemaschinen auf -30 °C ab. Anschließend wird eine Joule-Thomson-Gemischkältemaschine angewandt, um die Temperatur auf -120 °C abzusenken. Die Abschließende Kühlstufe wird dann durch eine Direktkühlung mit flüssigem Stickstoff bewirkt werden. Hierdurch kann die Zieltemperatur der Kühlkette von ca. -200 °C (65-77 K) erreicht werden. Dabei wird verdampfender Stickstoff mit einem Kryokühler in dem geschlossen betriebenen System erneut verflüssigt. Die mehrstufig-gekühlte Stromzuführung kann gegenüber einer konventionellen leitungsgekühlten Stromzuführung der gleichen Leistungsklasse etwa 22 Prozent Energie einsparen. [1]

Rückkühlung des flüssigen Stickstoffes im kryogenen Versorgungsverbund

Der modulare Aufbau der supraleitenden Stromschiene ermöglicht eine leichte Skalierbarkeit der Stromschienenarchitektur. Dabei ist der Supraleiter in einer Kälteanlage eingekapselt und so von der Umgebung abgeschirmt. Kryogene Transferleitungen verbinden die Komponenten der Kälteanlage miteinander. Das Kühlmittel ist flüssiger Stickstoff. Es wird durch den Kühlkreislauf der Stromschiene gepumpt. Für die Kühlung des flüssigen Stickstoffs (77 K → 65 K) werden weitere Kryokühler benötigt.

Vorteile von HTS-Stromschienen

Supraleitende Stromschienen sind eine energieeffiziente Alternative zu konventionellen Stromschienen aus Kupfer oder Aluminium. Neben dem Vorteil von nahezu verlustfreien Stromtransport ohne Leitungswiderstände gibt es weitere Faktoren, die sich im industriellen Umfeld positiv auswirken. Da HTS-Stromschienen weder Magnetfelder noch Wärme emittieren, stellen Sie einen interessanten Beitrag zum Anlagen- und Arbeitsschutz dar. Die Leiterstränge der HTS-Systeme sind trotz der Systemkühlung verhältnismäßig dünn, gegenüber konventionellen Systemen. HTS-Stromschienen können daher mit einem sehr geringen Raumbedarf installiert werden. Hierdurch wird auch die Montage der Stromversorgungsleitungen deutlich vereinfacht. Weiterhin stellen die Materialien der HTS-Systeme eine kaum nennenswerte Brandlast dar, was einen Sicherheitstechnischen Vorteil darstellt.

3. Marktkontexturierung

3.1. Anbieter von HTS-Leitern und Industriestromschienen

Weltweit gibt es einige Hersteller von HT-Supraleitern [11]. Dabei handelt es sich um Produzenten von HTS-Bandleitern, Stromschienen und anderen leittechnischen Anwendungen (z.B. Strombegrenzern):

- SuperPower Inc (USA)
- American Superconductor (USA)*
- Bruker (D)*
- Deutsche Nanoschicht (D)*
- InnoST (CN)
- Shanghai University (CN)
- Shanghai Superconductors (CN)
- Fujikura (JP)
- Sumimoto Electric (JP)
- SuNAM Co. Ltd. (KR)
- Superconductor Technologies Inc. (USA)
- SuperPower Inc (USA)
- SuperOx (Rus)
- Theva Dünnschicht (D)
- Vision Electric Superconductors (D)

*... kein offener Vertrieb von HTS-Leitern oder eingestellter oder unbekannter Status der Geschäftstätigkeit

Eine Besonderheit für das deutsche Innovationssystem stellt die Vision Electric GmbH dar. Diese verfügte über eine langjährige Erfahrung mit konventionellen Stromschienen aus Aluminium oder Kupfer. Diese Systeme wurden weltweit verkauft und installiert. Unter anderem wurde ein wassergekühltes Sammelschienensystem aus Aluminium für den Teilchenbeschleuniger DESY in Hamburg geliefert. Durch seine herausragende Leistungsfähigkeit in Bezug auf Qualität und im Engineering-Service sowie der Herstellung und Montage von Kupfer- und Aluminium-Sammelschienensystemen konnte das Unternehmen international viele namenhafte Kunden gewinnen. Im Jahr 2014, erfolgte die Gründung des Start-Ups, Vision Electric Superconductors, um die erste modulare supraleitende Stromschiene für die Industrie zu entwickeln. Die Vision Electric Superconductors arbeitet dabei mit Partnern aus dem Bereich der Supraleiter-Materialherstellung und der Wissenschaft (siehe Innovations-system) zusammen, um das Produkt der supraleitenden Industriestromschiene zur Marktreife zu entwickeln und neue Applikationen zu erschließen.

3.2. Potentielle Anwenderindustrien

In elektrochemischen Prozessen erfolgt die Herstellung von Produkten (z.B. Chlor oder Aluminium) stöchiometrisch. Für jede Produktionseinheit dieser Stoffe ist daher eine äquimolare Menge an Elektronen heranzuführen. Die Gesamteffizienz der Verfahren hängt dann von der Performance der elektrochemischen Zellen und den Leistungsverlusten der

Versorgungsleitungen ab. Der Verlust der elektrischen Versorgung hängt dabei von dem ohmschen Leitungswiderstand der eingesetzten Leiter (z.B. Kupfer oder Aluminium) ab. Diese Verluste werden direkt im Leiter in Wärme umgesetzt und stehen dem Produktionsprozess nicht mehr zur Verfügung. Die Stromverluste steigen mit der Menge des im Produktionsprozess eingesetzten Stroms, der proportional zur produzierten Stoffmenge ist und mit der Länge der Leitungsinfrastruktur zunehmen. Hierdurch ergeben sich interessante Effizienzpotenziale, welche bei der Versorgung stromintensiver Prozesse durch HTS-Stromschienen realisiert werden könnten.

Chlorproduktion

Die elektrischen Verluste in einem Betrieb zur elektrolytischen Chlorherstellung betragen bei einer jährlichen Produktionskapazität von 275.000 Tonnen Chlor und einem Leitungsverlust von ~270 kW im Jahr insgesamt ~ 2,4 Mio kWh [15]. In Abbildung 4 sind die Sammelschienen des Betriebs in einer Top-Down-Aufnahme in Rot und Blau eingezeichnet. Sie verbinden Transformator/Gleichrichter-Einheiten (gelb eingerahmt) mit den Elektrolyseeinheiten zur Produktion von Chlor, Natronlauge und Wasserstoff. Zwei Elektrolyseeinheiten (graue Rechtecke) sind dabei jeweils in Reihe geschaltet.

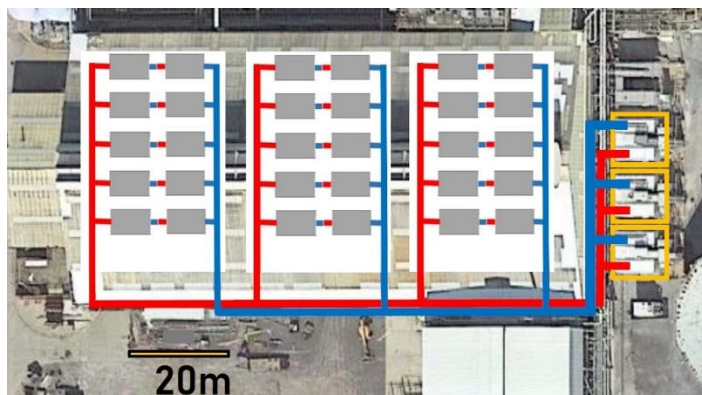


Abbildung 4: Chlorelektrolyse-Anlage, Stromschienen in roter und blauer Darstellung verbinden die Elektrolyseeinheiten mit den Gleichrichtern/Transformatoren rechts in Gelb (Quelle: Huw er, modifiziert) [15]

Im Jahr 2018 betrug die Chlorproduktion in Deutschland 3,8 und in Europa 9,4 Millionen Tonnen [16, 17]. In Europa entfielen dabei 83 Prozent der Chlorproduktionskapazitäten der Chloralkali-Elektrolyse auf das Membranverfahren [17]. Bei einem typischen Energiebedarf des Membranverfahrens von 2200-2600 kWh pro Tonne Chlor [18], kann ein Strombedarf der Chlorproduktion auf 35,6 PJ/a für Deutschland und 88 PJ/a für Europa abgeschätzt werden. Für die Chlorelektrolyse werden große Mengen an Gleichstrom mit hohen Stromstärken eingesetzt. Zu diesem Zweck muss Wechselstrom vom Mittelspannungsnetz über Transformatoren und Gleichrichter angepasst werden. Der Wirkungsgrad für die Umwandlung liegen zwischen 94 bis 98 Prozent. [19] Nach Schätzungen von Schmittinger et al. liegen die Umwandlungsverluste hierfür bei 108 bis 144 MJ/t Chlor [20]. Die Übertragung des Gleichstroms vom Transformator zu den Elektrolysezellen erfolgt über Industriestromschienen. Die dabei auftretenden Widerstandsverluste sind Abhängig von Material, Ausführung und der Länge der zu überwindenden Strecke.

Primäraluminiumherstellung

Deutschland verfügt über vier aktiven Aluminiumhütten. Diese werden von TRIMET (Essen, Hamburg, Voerde) und von Reinwerk/ Norsk Hydro (Neuss/Norf) betrieben. Die Produktion von Rohaluminium in Deutschland lag im Jahr 2018 bei rund 1.29 Millionen Tonnen. Davon wurden 41 Prozent als Primär- oder Hüttenaluminium hergestellt [21]. Ausgehend vom Aluminiumerz Bauxit, welches im Bayer-Verfahren zu Aluminiumoxid (Al_2O_3) aufgeschlossen wird, kann im Hall-Héroult-Prozess durch Schmelzflusselektrolyse bei Spannungen von 4 bis 4,5 Volt und Stromstärken von bis zu 400.000 Ampere Rohaluminium hergestellt werden [22]. Dabei werden an der Kathode die Aluminiumionen der Schmelze zu Aluminium reduziert. Die gebildete Menge des Leichtmetalls ist nach dem Faradayschem Gesetz proportional zur geflossenen elektrischen Ladung. Der spezifische Stromverbrauch beträgt dabei 12,4-15 kWh/kg_{Aluminium} [22]. Daraus ergibt sich mindestens ein Stromverbrauch von 23,6 PJ für die deutsche Produktion.

Rechenzentren

Die Fläche des größten deutschen Rechenzentrums dem Hetzner Datacenter-Park in Falkenstein im Vogtland beträgt 100.000 m² [23]. Der kumulierte Stromverbrauch von Rechenzentren in Deutschland betrug im Jahr 2017 etwa 48 PJ/a [24]. Das Fraunhofer IZM prognostiziert, dass der elektrische Energiebedarf der Rechenzentren einschließlich der Server-, Speicher- und Netzwerktechnik sowie wesentlicher Infrastruktursysteme bis zum Jahr 2025 auf ca. 59 PJ/a ansteigen wird [25]. Rechenzentren verfügen dabei über eine Leistungsaufnahme von 10 bis 40 MW bei einem Nennstrom von 25 kA. Die Versorgung mit diesen großen Strömen könnte über supraleitende Stromschienen erfolgen. Ein zusätzlicher Vorteil liegt in der möglichen Reduzierung von AC/DC-Umwandlungsschritten und den dabei auftretenden Verlusten von ca. 15 Prozent [26]. Zusätzlich würden die reduzierten Verlustleistungen auch zu niedrigeren Kosten für Kühlung und Klimaanlage führen und den damit die operativen Kosten senken.

4. Energietechnische und Energiewirtschaftliche Bewertung

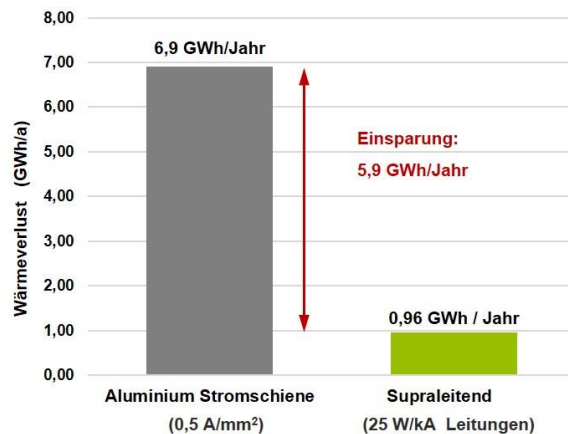
4.1. Energietechnische Bewertung

Vergleich der thermischen Stromverluste verursacht durch ohmsche Widerstände

Die rein leitungsbezogenen Verluste sind anhand eines Beispiels in Abbildung 5 vergleichend dargestellt. Ein konventionelles Aluminiumsystem wird einer supraleitenden Stromschiene gegenübergestellt. Beide Systeme sind für die Übertragung von jeweils 100 kA Gleichstrom über 500 Meter und den Zeitraum von einem Jahr (8760 Stunden) ausgelegt. Der Wärmeverlust, d.h. die Menge an Strom, die im Leiter durch den ohmschen Widerstand verloren geht, ist in der konventionellen Al-Stromschiene um mehr als 5,9 GWh höher als im supraleitenden Vergleichssystem. Hinsichtlich der applikationsspezifischen Einsparung ergibt sich hierdurch eine Verlustreduzierung um 86 %. Wird zusätzlich der Energiebedarf der Kühl- und Kältetechnik berücksichtigt, kann das gesamte Energieeinsparpotential auf ca. 60 % gegenüber konventionellen Stromschienen abgeschätzt werden. [27]

Verlustvergleich:

100.000 A Gleichstrom, über 500 m für 8760 Stunden (1 Jahr)



Kostenersparnis bei 3 Cent/kWh: 178.000 € / Jahr

Abbildung 5: Vergleich widerstandsbedingter Stromverluste in einer konventionellen und einer supraleitenden Stromschiene [27].

Abschätzung der Energieeinsparpotenziale

Eine Abschätzung des deutschen Energieeinsparpotentials durch HTS-Industriestromschienen kann mit Hilfe der Netzbilanz 2018 abgeleitet werden [28]. Dabei werden die Netzverluste der Verteilnetzbetreiber, siehe Tabelle 2, als Grundlage verwendet.

Tabelle 2: Netzverluste der Verteilnetzbetreiber nach Spannungsebenen [28].

Spannungsebene	Verlust (TWh)
Höchstspannung HöS	0,1
Hochspannung HoS	3,3
Mittelspannung MS	5,7
Niederspannung NS	8,5

Da ausschließlich Anwendungen von HTS-Stromschienen für den industriellen Einsatz betrachtet werden, ergibt sich der Anteil der industriellen Verteilnetzverluste aus der Entnahmen der Verteilnetze mit 443 TWh der Industrie und 124,6 TWh der Haushalte zu 78 % [28]. Die Verteilnetzverluste stellen hierdurch 3,1 % der Gesamtentnahme dar. Für die Einschätzung des Energieeinsparpotentials von HTS-Industriestromschienen werden zunächst nur die Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsverluste berücksichtigt. Bei der Substitution der konventionellen Stromversorgung wird für diese Abschätzung eine pauschale Verlustreduzierung um 60% angenommen. Damit wird auch der energetische Aufwand der benötigten Kühl- und Kältetechnik berücksichtigt. Abschließend muss das technologische Substitutionspotential der HTS-Industriestromschienen abgeschätzt werden. Da es sich hierbei um eine stark applikationsspezifische Charakteristik handelt, wird eine Abschätzung auf 70 % getroffen. Demnach könnten sieben von zehn Installationen der industriellen Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsversorgungen durch HTS-Systeme ersetzt werden. Eine Validierung dieser Festlegung ist aufgrund fehlender

Metadaten gegenwertig nicht möglich. Als Ergebnis dieser Abschätzung ergibt sich ein Energieeinsparpotential von 2,98 TWh/a bzw. 10,73 PJ/a für Deutschland. Diese Angabe gibt dabei die Größenordnung der realisierbaren Energieeinsparungen wieder. Wichtig ist hierbei, dass aufgrund der eingesparten elektrischen Endenergie eine verhältnismäßig hohe Reduzierung des resultierenden Primärenergieverbrauchs und des THG-Emissionsaufkommens vorliegt.

4.2. Energiewirtschaftliche Betrachtung

Einflussfaktoren auf operative und Investitionskosten

Die Investitionskosten supraleitender Industriestromschienen setzen sich aus den Beiträgen für den Supraleiter, die Stromzuführung, die Kälteerzeugung, die Kryotechnik sowie die Basisinvestitionen zusammen.

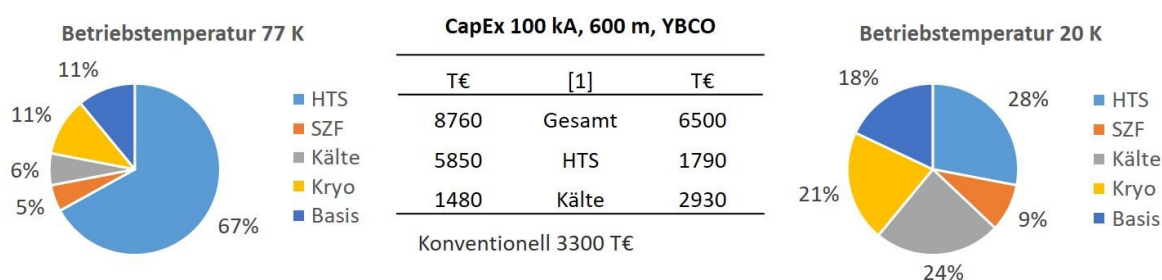


Abbildung 6: Investitionskostenanteile von supraleitenden Stromschienen in Abhängigkeit von zwei Betriebstemperaturen [26]

Ein wichtiger Parameter für die Investitionskostenabschätzung eines Systems ist die Betriebstemperatur. In Abbildung 6 ist ihr Einfluss auf die Investitionskosten bei sonst gleichen Parametern, wie einer Stromtragfähigkeit von 100.000 A und einer Länge von 600 m mit YBCO Bandleiter dargestellt.

Es wird deutlich, dass bei 77 K der Hauptanteil der Investitionskosten von zwei Dritteln auf den HT-Supraleiter entfällt. Bei einer Betriebstemperatur von 20 K kann ein Strom von 100 kA von weniger Bandleiter transportiert werden. Deswegen wäre der Investitionskostenanteil des HTS-Bandleiters in diesem Fall nur 28 Prozent. Je niedriger die Betriebstemperatur desto höher sind allerdings auch die operativen Kosten, um die Arbeit bei dieser Temperatur von z.B. 20 K zu gewährleisten. Deswegen handelt es sich beim Parametersatz von 77 K um das wahrscheinlichere Betriebsszenario.

Für die Materialkosten der HTS-Bandleiter wird eine Kostenreduzierung mit zunehmender Produktionskapazität erwartet. Die sinkenden Preise sollten dann auch einen positiven Einfluss auf die weitere Nachfrageentwicklung bewirken. Eine Möglichkeit um mittelfristig Produktionskapazitäten für HTS-Bandleiter zu installieren und weiter zu entwickeln stellen große Projekte der Energietechnik bzw. große F&E-Projekte dar:

- 1) Das SPARC-Experiment des MIT Plasma Science und Fusion Centers hat für seine erste Projektphase 500 km REBCO-Bandleiter bestellt und erhalten [29]. In den folgenden Phasen 2 und 3 des Projektes werden dann 10.000 bzw. 20.000 km Suprabandleiter benötigt. Dabei arbeitet das MIT mit der Privatwirtschaft zusammen, um die weltweit leistungsfähigsten Magneten für Fusionsenergie zu bauen [30].

- 2) Große Kabelprojekte von Energieversorgern, wie z.B. AMPACITY (1 km) [31, 32] oder SWM SuperLink (12 km) [33] können bei positivem Projektverlauf ein Türöffner für supraleitende Kabeltechnik in der großstädtischen Energieversorgung sein, die ebenfalls zu einer erhöhten Nachfrage und dem zukünftigen Ausbau der Produktionskapazitäten beitragen. „Das SWM SuperLink-Projekt legt dabei den Grundstein für den weltweit größten und bedeutendsten Einsatz eines HTS-Kabelsystems zur die Absicherung der Energieversorgung einer Metropole“ [33].

5. Technologiezyklusanalyse

Zur besseren Einordnung der supraleitenden Stromschienen-Technologie in den Technikzyklus bzw. zur Bestimmung des Technologiereifegrades (TRL) wurden Patentanalyse durchgeführt.

Patentanalyse

Die Analyse wurde mit der englischsprachigen Datenbank World Patents Index (WPI) durchgeführt, weil diese besonders effizient bei Stichwortrecherchen ist. Sie deckt Patentanmeldungen an etwa 50 Patentämtern weltweit ab.

Die einfache Recherche ohne weitere Spezifikationen führt dazu, dass die Suchmengen von Inlandsanmeldungen dominiert werden und unterschiedliche Patentsysteme gemischt werden. Als probates Mittel hat sich daher die Analyse transnationaler Patentanmeldungen erwiesen, bei denen Anmeldungen am Europäischen Patentamt oder aber bei der internationalen Patentorganisation WIPO (ohne Doppelzählungen) betrachtet werden. Es handelt sich dabei um Patentanmeldungen, die jeweils in mehreren Ländern angemeldet werden. Dort sind die Anmeldekosten hoch und es wird durch die internationale Anmeldestrategie ein besonders hoher Ertrag erwartet. Es geht damit um besonders wertvolle Patente und in der Statistik sind Länder miteinander vergleichbar.

Für die Analyse supraleitender Stromschienen wurde mit Stichworten und der Patentklasse zu supraleitenden Leitern recherchiert. Im Ergebnis wurden die folgenden Schritte durchgeführt: Zur Patentanalyse für die Periode 2000 bis 2017 wurde nachfolgende Suchstrategie mit Bezug zu HTS-Stromschienen genutzt (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Suchalgorithmus Patentanalyse (File 'WPINDEX' entered at 02.12.2019) [34]

Suchlauf	Suchalgorithmus	Gesamtanzahl der gefundenen Patente
L1	35 S H01B0012/IPC AND (BUS BAR OR BUSBAR)	11
L2	12 S L1 AND (EP OR WO)/PC	

Ein Patenttreffer wurde nach einer Analyse ausgeschlossen, da er sich mit der Herstellung supraleitender Strombegrenzer beschäftigt. Bei den gemeinsamen Patenten von Sumitomo Electric Industries und Int Superconductivity Technology Cent (Siehe Tabelle 4, Zeile 2) handelt es sich um Grundpatente zum Herstellungsverfahren von supraleitendem Dünnschichtmaterial und Ausrüstung daraus, welches sich jedoch nicht spezifisch auf die

Herstellung von Hochstromschienen bezieht. Die Patente von American Telephone & Telegraph und Chromerics sind mehr als 30 Jahre alt und nehmen daher keinen Bezug auf HT-Supraleiter der zweiten Generation. Auch die Patente von Hitachi Cable und Council Sci & Ind Res India haben keinen ausschließlichen Bezug auf supraleitende Stromschienen. Es bestehen daher gegenwärtig nur sehr wenige internationale Patente im Kontext von HTS-Industriestromschienen.

Tabelle 4: Patentanmelder mit transnationalen Patenten zu supraleitenden Leitungsbussen

Anmelder	Jahr	Publikationsnummer
Vision Electric Super Conductors GmbH (D)	2013	EP2675029,
	2017	WO2017144518
	2018	WO2018202845
KIT (D)	2018	WO2018202845
Sumitomo Electric Industries (JP)	1993	EP556837
	2008	WO2007094146
	2008	WO2007094147
Int Superconductivity Technology Cent (JP)	2008	WO2007094146
	2008	WO2007094147
Council Sci & Ind Res India (IN)	2008	WO2008093354
Hitachi Cable (JP)	1997	EP791937
American Telephone & Telegraph (US)	1990	EP395314
Chromerics Inc (US)	1988	EP278611

Die Entwicklung von supraleitenden Industriestromschienen ist im Forschungs- und Applikationsfeld der Hochtemperatursupraleitung bisher (erst) eine Nischenanwendung, die mit einer starken Fokussierung auf die spezifischen Produkte ausschließlich durch Vision Electric Superconductors angestrebt wird. Wie bereits im Kapitel Marktkontexturierung beschrieben ist, wurden für die Technologie zwei bekannte Demonstrator-Projekte (3S-Suprastromschiene und DEMO 200) in industriellem Umfeld durchgeführt. Ziel dieser Forschungsprojekte war es u.a. die technische und wirtschaftliche Machbarkeit zum industriellen Einsatz zu erbringen. Wichtige Aspekte im Rahmen dieses Aufgabenfelds sind die CE-Kennzeichnung, um den produktspezifisch geltenden europäischen Richtlinien zu entsprechen sowie die strenge Risikobewertung im Umfeld einer (chemischen) Industrieanlage zu erfüllen. Die Ergebnisse aus den Forschungsprojekten 3S-Suprastromschiene und DEMO 200 sind daher wichtige Meilensteine, um auftretende Schwierigkeiten und Anforderungen im industriellen Umfeld zu erkennen, zu adressieren und ihnen mit innovativen Lösungen zu begegnen. Nach einer erfolgreichen Demonstration in verschiedenen Branchen mit den verschiedenen Strombedarfen im zwei und dreistelligen Kiloamperebereich ist damit zu rechnen, dass in kurzer Zeit eine aktive und erfolgreiche Vermarktung auf nationaler und internationaler Ebene durch die VESC GmbH erfolgt. Sicherlich können dabei die vorhandenen Kontakte zu Bestandskunden mit konventionellen Systemen von Vorteil sein. Gegenwärtig wird der Technologiereifegrad für industrielle DC-

Stromschienensysteme für Hochstrom-Anwendungen von 20 bis 200 kA im Bereich von TRL5 bzw. TRL6 abgeschätzt. Im Rahmen des Technologiezyklus wären die HTS-Industriestromschienen daher der Position „Entdeckung und Entwicklung“ zuzuordnen und befinden sich damit vor der ersten Markterschließung.

6. Innovationssystemanalyse

Die Akteure des Innovationssystems können in vier Gruppen eingeteilt werden. Die Gruppen und wichtige Vertreter des deutschen Innovationssystems werden in Tabelle 5 aufgeführt. Dabei sind industriellen Anwender von HTS-Systemen, sowie Materialhersteller und Anlagenbauer zu verzeichnen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass neben den spezialisierten Unternehmen der HTS-Ausrüster auch maßgeschneiderte Lösungen der Kühl- und Kältetechnik benötigt werden. Weiterhin werden wichtige Forschungsaktivitäten an Forschungseinrichtungen und Universitäten durchgeführt. Hierbei erfolgen Untersuchungen an grundlagenorientierten Fragestellungen und im Bereich der Applikationsforschung. Zudem besteht eine aktive Verbandsarbeit im Bereich der HTS-Systeme, welche es ermöglicht, aktuelle Entwicklungen und Erkenntnisse zu kommunizieren und themenübergreifend zu vernetzen. Der vierte Akteur des Innovationssystems ist die öffentliche Forschungsförderung. Innerhalb der letzten Jahre konnten sechs größere Verbundprojekte mit Bezug zu HTS-Leitern in Deutschland verzeichnet werden. Die Vorhaben verfügten über Laufzeiten von drei bis vier Jahren und wurden von Konsortien aus industriellen und akademischen Partnern ausgeführt. Hinsichtlich des Innovationssystem muss zudem vermerkt werden, dass der Bereich der HTS-Industriestromschienen nur einen kleinen Anwendungsbereich der HTS darstellt. Durch die aktive Verbandsarbeit und die Aktivitäten im Forschungsfeld „Hochtemperatursupraleitung“ des Forschungsnetzwerks „Energie in Industrie und Gewerbe“ besteht jedoch ein reger Austausch zu zahlreichen anderen Applikationen. Hierdurch werden Weiterentwicklungen im Bereich der HTS-Stromschienen direkt durch einen großen Kreis von Ausrüstern anderer HTS-Produkte und potentiellen Anwendern wahrgenommen.

Tabelle 5: Akteure des deutschen Innovationssystems für HTS-Industriestromschienen.

<p><u>Industrielle Anwender</u></p> <p>Chloralkali-Elektrolyse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • BASF SE <p>Aluminiumindustrie:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Trimet Aluminium SE 	<p><u>Ausrüster</u></p> <p>Materialhersteller Deutschland</p> <ul style="list-style-type: none"> • Theva Dünnschichttechnik GmbH • Bruker HTS GmbH <p>Anlagenbauer</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vision Electric Super Conductors GmbH <p>Kühltechnik:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Messer Group GmbH • DEMACO
<p><u>Forschungsinstitute & Verbände</u></p> <p>Universitäre Einrichtungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Institut für technische Physik, Karlsruher Institut für Technologie • FB Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Kaiserslautern • Institut für Angewandte Physik, Uni Tübingen <p>Verbände:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ivSupra 	<p><u>Öffentlich geförderte Forschung</u></p> <p>Forschungsprojekte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verbundprojekt „3S-SupraStromSchiene: Supraleitendes Hochstromsystem für DC-Anwendungen“ (2015-2018) • Verbundprojekt DEMO200 (2019-2021) • Kooperationsprojekt „Industrielle Grundlagenforschung und Entwicklung einer DC-Stromzuführung von 20 - 200 kA für supraleitende Stromschienensysteme“ • Verbundprojekt Highway (2008-2011) • Verbundprojekt Supratech (2011-2015) • Verbundprojekt HTS-NextGEN (2017-2020)

7. Ableitung möglicher Entwicklungsziele

Basierend auf den technologischen Vorteilen von HTS-Stromschienen bestehen wichtige Herausforderungen, welche zur Markteinführung und -verbreitung von HTS-Industriestromschienen zu lösen sind. Diese werden anhand expliziter Forschungsempfehlungen und übergeordneter Trends und Themen dargestellt.

7.1. Forschungsempfehlungen

Hinsichtlich der gegenwärtig verfügbaren HTS-Materialien sollten Verbesserungen der Stromtragfähigkeit, der Lötbarkeit und reduzierter Sprungtemperaturen angestrebt werden. Dabei muss eine Kostensenkung der HTS-Materialien als wichtiger Aspekt bei der Materialauswahl und berücksichtigt werden. Diese Optimierung würde sich auch auf die Preise der resultierenden HTS-Bandleiter und Stromschienen auswirken. Als Zielpreis sollte dabei eine Größenordnung von 25 bis 30 €·kA/m (derzeit ≈ 100 €·kA/m) angestrebt werden. Hierdurch wären die Systeme selbst bei zusätzlichen Aufwendungen für die Kühl- und Kältetechnik kompetitiv in Bezug auf ihre Investitionskosten. Darüber hinaus müssen herstellungsspezifische Eigenschaften der Bandleiter weiterhin optimiert werden. Hierzu zählen die Homogenität der kritischen Stromdichte im Einzelband und eine Minimierung lokaler Einbrüche in den Einzelbändern. Gleichzeitig sollte dabei natürlich auch ein Scaleup der Bandleiterfertigung betrachtet werden. Die eingesetzte Kryotechnik benötigt innovative Lösungen, um effektive Kopplungen der kryotechnischen HTS-Komponenten mit den Leitersträngen der konventionellen Stromzuführung zu ermöglichen.

Für HTS-Industriestromschienen besteht ein ausgeprägter Bedarf an Demonstrationen. Demnach sind marktfähige technische Lösungen bereits verfügbar, wie gegenwertig am Beispiel des Infrastrukturprojekts Superlink gezeigt wird. Dabei erfolgt die Installation einer HTS-Trasse mit einer Länge von 12 km mit einer Übertragungsspannung von 110 kV in München [35]. Um die Vorteile von HTS-Industriestromschienen aufzuzeigen, sollten gezielt Demonstrationsanwendungen initiiert werden. Diese könnten in der Eisen- und Stahlindustrie, dem Bereich der Nichteisen-Metalle und der Grundstoffchemie installiert werden. Bereits erfolgte und bestehende Modellprojekte (Demo200, 3S) könnten als Vorbild dieser Aktivitäten dienen. Zusätzlich muss eine ausreichende Langlebigkeit von HTS-Systemen aufgezeigt werden. Hierfür existieren gegenwertig keine ausreichenden Erfahrungen bei den industriellen Anwendern. Bei Amortisierungszeiten von mehr als 10 Jahren und dem gegenwertig längsten dokumentierten Dauerbetrieb einer HTS-Stromschiene von 8 Jahren durch das Projekt AmpaCity [36], ist das Aufzeigen einer langwierigen Beständigkeit essentiell. Da die Erhebung dieser Betriebserfahrungen zeitlich anspruchsvoll ist, sollten entsprechende Untersuchungen zeitnah initiiert werden.

7.2. Übergeordnete Trends und Themen

Neben den expliziten und themenspezifischen Forschungsempfehlungen bestehen übergeordnete Themen und Trends, welche einen wichtigen Einfluss auf die Markterschließung von HTS-Industriestromschienen besitzen. Hierzu zählt die Entwicklung applikationsspezifischer Lösungen. HTS-Stromschienen entwickeln sich hinsichtlich ihrer Bandleiterstruktur zu standardisierten Produkten, bezüglich der zu installierenden Gesamtsysteme müssen jedoch maßgeschneiderte Lösungen für jede Applikation individuell entwickelt werden. Es besteht daher ein relevanter Bedarf an Kapazitäten der

Applikationsentwicklungen für HTSL-Lösungen im industriellen Umfeld. Da es sich bei den HTS-Stromschienen um eine technische Versorgungsinfrastruktur handelt, wird ein hohes Maß von Betriebssicherheit und Langzeitstabilität von den industriellen Nutzern gefordert. Der Nachweis einer entsprechenden Performance kann jedoch nur in Langzeittests unter betriebsähnlichen Bedingungen erfolgen. Hierfür werden im besonderen Testinfrastrukturen benötigt, welche eine langwierige Untersuchung der Stromschienen zulassen. Gegenwärtig verfügt Deutschland über unzureichende Kapazitäten von Forschungsstrukturen in diesem Bereich. Eine besondere Bedeutung könnte sich zudem aus einer Synergie der HTSL mit dem Transport von kryogenem Wasserstoff ergeben. Dabei kann das Temperaturniveau des verflüssigten Wasserstoffs (20 K) zur Temperierung von HTS-Stromschienen genutzt werden. Dies ermöglicht den gleichzeitigen Transport von Wasserstoff und Elektrizität an industrielle Großverbraucher.

8. Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen

Als bestehende Markthemmnisse zur Einführung von HTS-Stromschienen können die hohen Preise für supraleitende Materialien und fehlende Scale-up-Erfahrungen bei deren Produktion angesehen werden. Zudem besteht ein Kommunikationsdefizit, welches die Verfügbarkeit von geeigneter Kühltechnik betrifft. Trotz bereits etablierten Lösungen, sehen industrielle Anwender die Beschaffung und den Betrieb entsprechender Einrichtungen als Herausforderung an. Weiterhin muss eine technologische Konkurrenz zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) bedacht werden. Die HGÜ hat sich im Bereich der Netztechnik etabliert und wird auch im deutschen Netzentwicklungsplan als innovative Technologie angesehen [37]. Obwohl HTS-Stromschienen über vorteilhafte technische Eigenschaften verfügen, stellt die Verbreitung der HGÜ und die damit verbundenen Betriebserfahrungen einen klaren Vorteil im technologischen Vergleich dar. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass Versorgungsinfrastrukturen für langfristige Nutzungsdauern installiert werden. Reinvestition zugunsten von HTS-Systemen, werden sich daher aufgrund von gegenwärtigen HGÜ-Installation langfristig verschieben.

9. Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen

Für die Etablierung von HTS-Stromschienen können Policy-Empfehlungen im Bereich der Technologie- und Forschungsförderung formuliert werden. Demnach wären Anreizprogramme zur Installation von HTS-Stromschienen denkbar. Hierbei könnten neben industriellen Applikationen auch Priorisierungen und Förderungen von Netzinfrastrukturen in kommunalen und überregionalen Versorgungen vorgesehen werden. Um die Investition in ein HTS-System durch sekundäre Effekte attraktiver zu gestalten wäre es zudem denkbar, Installationen bei der Zertifizierung von Energiemanagement-Systemen besonders zu würdigen. Alternativ könnten für stromintensive Produktionsprozesse die Prüfung von HTS-Optionen, beispielsweise im Rahmen einer Energie- und Umweltmanagementzertifizierung, als Grundlage für eine Reduzierung der EEG-Beiträge herangezogen werden.

Gleichzeitig wäre die Initiierung von geförderten Forschungsvorhaben in Betracht zu ziehen. Dabei sollten vorrangig applikationsspezifische Aspekte untersucht werden, welche sich aus dem Einsatz in der Betriebsumgebung ($TRL \geq 5$), zum Beispiel der Langlebigkeit von HTS-Systemen, ergeben. Eine Besonderheit für den Bereich der HTS stellt der Bedarf an Suprabandleitern durch internationale Großprojekte dar. Diese können im Zusammenhang mit der Entwicklung von Fusionsreaktoren stehen [38]. Alternativ wäre auch eine Integration von HTS-Stromschienen in aktuelle Vorhaben im Bereich der Wasserstoffherzeugung denkbar. Hierbei müssen großskalige Elektrolyseanlagen versorgt werden. Initiativen wie H2Giga oder die Reallabore des BMWi mit der Ausrichtung auf die nachhaltige Wasserstoffherstellung (Energiepark Bad Lauchstädt, H2-Whylen, NRL und Westküste100) könnten daher auch zum Einsatz von HTS-Technik genutzt werden. Darüber hinaus wäre eine Berücksichtigung von HTS-Aktivitäten im Rahmen des europäischen Green Deals denkbar. Der Bedarf an HTS-Bandleitern durch initiierte Projekte würde dabei die Installation von Produktionskapazitäten und Lieferketten ermöglichen. Die Etablierung dieser Fertigungs-Infrastrukturen könnte durch eine Technologie-Förderung unterstützt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Klier, W. Reiser, M. Noe, *Vorhabenbezeichnung: 3S-SupraStromSchiene: Supraleitendes Hochstromsystem für DC-Anwendungen Gemeinsamer Abschlussbericht zur Veröffentlichung Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2015 - 31.10.2018 Berichtszeitraum: 01.05.2015-31.10.2018*, Vision Electric Super Conductors GmbH (VESC) **2018**.
- [2] enArgus Projektdatenbank, *DEMO200 - Supraleitendes Hochstromsystem für 200 kA DC mit modularem Aufbau: FKZ: 03ET1670 A-C*, <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/26?op=enargus.eps2&m=0&v=10&p=0&s=0&q=03ET1670>.
- [3] Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand des BMWi, AiF Projekt GmbH, *Projekt: „Industrielle Grundlagenforschung und Entwicklung einer DC-Stromzuführung von 20 - 200 kA für supraleitende Stromschienensysteme“: 05/2014-07/2016, FKZ: KF327930RR3*.
- [4] Zenergy Power GmbH, *ELSA - Entwicklung innovativer Supraleiter mit Schichtarchitektur für die Energietechnik Schlussbericht; Veröffentlichung der Ergebnisse; Berichtszeitraum: 01.06.2007 - 30.06.2010: FKZ: 0327433A*, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek **2010**.
- [5] W. Goldacker, *Optimierte ReBCO-Bandleiter für Stark- und Wechselstromanwendungen Abschlussbericht; Berichtszeitraum: 01.01.2009 - 31.12.2011*, KIT, Karlsruhe **2012**.
- [6] M. Bauer, *Supraleiter für energietechnische Anwendungen SupraTech Teilvorhaben: Entwicklung zuverlässiger PVD-Produktionstechnologie für Bandleiter Abschlussbericht Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2011-30.6.2015*, THEVA Dünnschichttechnik GmbH **2015**.
- [7] J. Kunert, B. Wojtyniak, M. Bäcker, R. Feenstra, J. Bennewitz, M. Falter, *SupraTech - Supraleiter für energietechnische Anwendungen Schlussbericht Laufzeit: 01.07.2011-30.06.2015*, [Deutsche Nanoschicht GmbH] **2015**.
- [8] enArgus Projektdatenbank, *Fertigungstechnologie für HTS-Bandleiter der nächsten Generation (HTS-NextGEN): FKZ: 03ET1497A*, <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/26?op=enargus.eps2&m=0&v=10&p=0&s=0&q=HTS-NextGEN+>.
- [9] W. Buckel, R. Kleiner, *Supraleitung*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany **2012**.
- [10] D. Larbalestier, *WTEC panel on power applications of superconductivity in Japan and Germany: Final report*, International Technology Research Institute; Loyola College, Baltimore **1997**.
- [11] THEVA Dünnschichttechnik GmbH (Bauer, M.), *Supraleiter für die Energietechnik - Überblick Technologie und Stand der Technik*, ZIEHL VII - Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatursupraleitern, Berlin **2020**.
- [12] Datenblatt, *Theva Pro-Line Product Overview*, Ismaning **2019**.
- [13] P. Seidel, *Applied Superconductivity*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany **2015**.
- [14] ivSupra, *HTS Industrieanwendungen Hochstromschienen*, <https://ivsupra.de/produkte/hochstromschienen/>.
- [15] S. Huwer, *Kompakte und effiziente Hochstromverbindungen in Industrieanlagen*, ZIEHL VII - Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatursupraleitern, Berlin **2020**.

- [16] VCI, *Chemiewirtschaft in Zahlen 2019: Tab. 4a Ausgewählte Produktionszahlen*, 61st ed., Frankfurt am Main **2019**.
- [17] Euro Chlor, *Chlor-alkali-Industry Review 2018-2019*, Brussels **2019**.
- [18] J. Jörissen, T. Turek, R. Weber, *Chemie in unserer Zeit* **2011**, 45 (3), 172 – 183.
DOI: 10.1002/ciuz.201100545.
- [19] T. Brinkmann, G. Giner Santonja, L. Delgado Sancho, F. Schorcht, S. Roudier, *Best available techniques (BAT) reference document for the production of chlor-alkali: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*, EUR, Scientific and technical research series, Vol. 26844, Publications Office, Luxembourg **2014**.
- [20] P. Schmittinger, T. Florkiewicz, L. C. Curlin, B. Lüke, R. Scannell, T. Navin, E. Zelfel, R. Bartsch, in *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, Wiley. Chichester **2010**.
- [21] Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., *GDA Jahresbericht 2019: „GDA - Ein Verband, der verbindet“*, Düsseldorf **2020**.
- [22] F. Ostermann, *Anwendungstechnologie Aluminium*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2014**.
- [23] Dr. Web, The Digital Hub (Petereit, D.), *Data-Center-Riesen 2018: Die größten Rechenzentren Deutschlands*, <https://www.drweb.de/10-groessten-rechenzentren-deutschlands/> **2018**.
- [24] R. Hintemann, *Boom führt zu deutlich steigendem Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2017: Digitalisierung treibt Strombedarf von Rechenzentren*, Berlin **2018**.
- [25] FH IZM, Borderstep Institut, *Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland - Abschlussbericht: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie Projekt-Nr. 29/14*, Berlin **2015**.
- [26] Wolfgang Reiser, Vision Electric Super Conductors, *Industrieanwendungen von supraleitenden Stromschienen: 5. ZIEHL Tagung*, München **2016**.
- [27] B. Holzapfel, *Energieeffizienzsteigerung mit Supraleitung*, 7. Workshop des LVI Energieeffizienz Netzwerkes, Eggenstein-Leopoldshafen **2019**.
- [28] Bundesnetzagentur, *Monitoringbericht 2019* **2019**.
- [29] Walter, W. (Connectus), *Supraleitung International*, ZIEHL VII - Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatursupraleitern, Berlin **2020**.
- [30] MIT Plasma Science & Fusion Center, *Homepage Sparc-Experiment*, Cambridge, MA 02139, <http://www.psf.mit.edu/sparc> **2020**.
- [31] F. Merschel, *Verbundvorhaben: Ampacity - 10kV-Supraleiter-System für Hochenergiestrassen; Teilvorhaben: Implementierung und technische Evaluation des Kabelsystems Schlussbericht (Teil I + II) Berichtszeitraum: 1. September 2011 bis 29. Februar 2016*, RWE Deutschland AG (RWE) **2016**.
- [32] Stiller, M. (innogy), *Hochtemperatur Supraleiter AmpaCity - Betriebserfahrungen*, ZIEHL VII - Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatursupraleitern, Berlin **2020**.
- [33] Stadtwerke München (Michalek, P.), *Von der Hochspannungsfreileitung zum Supraleiter*, ZIEHL VII - Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatursupraleitern, Berlin **2020**.
- [34] U. Schmoch, *Bericht zur Patentanalyse "Supraleitende Stromschienen" in der Datenbank "World Patent Index (WPI)"*, Karlsruhe **2020**.

- [35] P. Koller, *Start frei für Münchens Super-Supraleiter*, <https://www.bayern-innovativ.de/seite/supraleiter-kabel-superlink> **2020**.
- [36] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, A. Hobl, in *2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD): 25 - 27 Oct. 2013, Beijing, China*, IEEE. Piscataway, NJ **2013**.
- [37] TransnetBW GmbH, *Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung | Netzentwicklungsplan*, <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/wissen/hochspannungs-gleich-strom-uebertragung> **2021**.
- [38] Walter, W. (Connectus), *Supraleitung International*, ZIEHL VII - Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatursupraleitern, Berlin **2020**.