Supraleiter – Ein Beitrag zum Klimaschutz

Materialien – Anwendungsbereiche – Stand der Technik

Interessenverband Supraleitung e.V.

– ivSupra –

Agrippinawerft 6

50678 Köln

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis 4

Tabellenverzeichnis 5

Abbildungsverzeichnis 6

Vorbemerkung 7

1. Einleitung – Supraleiter: Effizienztechnologie für den Klimaschutz 8

2. Energietechnik 10

2.1. Netztechnik 12

2.1.1. Supraleitende Kabel 13

2.1.2 Modulare Supraleiterkabel / Stromschienen 15

2.1.3 Fehlerstrombegrenzer 16

2.1.4 Supraleitende Schwungmassenspeicher 17

2.1.5 Supraleitende Transformatoren 18

2.2. Erneuerbare Energien 21

2.2.1. Windkraft 21

2.2.2 Wasserkraft 23

2.2.3 Anbindung von Wind- und Solarparks 24

2.2.4 Weitere 24

2.3. Fazit 25

3. Mobilität 27

3.1. Straßenverkehr: Ausbau des Ladenetzes für E-Mobilität 28

3.2. Schiffsantriebe 30

3.3. Klimaverträgliches Fliegen 32

3.4. Supraleitende Schwebebahn-Konzepte 34

3.5. Fazit 36

4. Digitalisierung / Datencenter 38

5. Industrie 42

5.1. Supraleitende Antriebe 43

5.2. Stromschienen 43

5.2.1 Großelektrolyse 43

5.2.2 Inselnetze 43

5.3. Automatisierung 43

6. Medizin & Analytik 45
7. Forschung 46
8. Ausblick – Potentiale der Supraleiterindustrie in Deutschland 47
Anhang 48
Die Geschichte der Supraleitung? 48
Supraleitende Materialien im Überblick 48

Inhaltsverzeichnis (Alle Verzeichnisse werden am Schluss erstellt)

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
°C	Grad Celsius
GB	Gigabyte
HTS	Hochtemperatursupraleiter
K	Kelvin
kV	Kilovolt
li.	links
M.	Mitte
MW	Megawatt
re.	rechts
S.	Seite
s.	siehe
TRL	Technical Readiness Level
Vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der verschiedenen Leitungstypen.....15

Tabelle 2: Beeinträchtigungen durch die verschiedenen Leitungstypen.....16

Tabelle 3: Vergleich von Kupfer, Aluminium und keramischen Supraleitern 48

Tabelle 4: Vergleich von metallischen und keramischen Supraleitern.....48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Stromnetzes 12
Abbildung 2: Verlegung des Supraleiterkabels in Essen 13
Abbildung 3: Vergleich der verschiedenen Leitungstypen: Freileitung, Erdkabel und Supraleiterkabel 14
Abbildung 4: Fehlerstrombegrenzer des AmpaCity-Projekts in Essen 17
Abbildung 5*: Flywheel – Schwungmassenspeicher* 18
Abbildung 6: Größenvergleich: Permanentmagnet-Generator (li.) und Supraleitergenerator (re.). 22
Abbildung 7: Größenvergleich: 4MW-Supraleitergenerator (li.), 4MW Permanentmagnet-Generator (m.), 4 MW Kupfergenerator (re.) 22
Abbildung 8: Effizienzvergleich verschiedener Generatoren 23
Abbildung 9: Elektromobilität ist nicht neu: Schon Oma Duck fuhr einen Detroit Electric 26
Abbildung 10: Ladestationen in den Randlagen der Ballungsgebiete sind nicht die Lösung. © John K. Thorne 28
Abbildung 11: Ladestationen wie hier in Berlin sind immer noch die Ausnahme. © AVDA-Foto 29
Abbildung 12: Elektra, der erste emissionsfreie Schlepper Deutschlands verkehrt zwischen Berlin und Hamburg. Doch konventionelle Technik stößt bald an ihre Grenzen… © Georgfotoart 30
Abbildung 13: 36,5 MW HTS-Schiffsmotor während eines Vollasttests auf dem Teststand. © AMSC 31
Abbildung 14: Das erste Flugzeug mit Supraleitermotor – allerdings bewegt dieser nicht allein das Flugzeug – startete im August 2021 in Russland. 32
Abbildung 15: Transrapid in Shanghai, Abfahrt aus dem Flughafen 34
Abbildung 16: JR Maglev © Yosemite 35
Abbildung 17: Rechenzentrum von 1und1 Internet SE 38
Abbildung 18: Kühlwasserleitung im Rechenzentrum Frosinone © Seeweb 39

Vorbemerkung

Dieses White Paper gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden die Anwendungsfelder und einzelnen Anwendungen der Supraleitertechnologie dargestellt. Im zweiten Teil, dem Anhang, finden sich vertiefende Informationen.

Wenn in diesem Papier von „Supraleitern“ die Rede ist, sind in der Regel keramische Supraleiter, sogenannte Hochtemperatursupraleiter, gemeint. Andernfalls wird ausdrücklich von metallischen bzw. von Tieftemperatursupraleitern gesprochen.

1. Einleitung – Supraleiter: Effizienztechnologie für den Klimaschutz

Supraleiter übertragen Strom effizienter als alle konventionellen Leiter und zwar mit geringstem Materialverbrauch.

Supraleiter sind Materialien, die auf einem **geringen Leitungsquerschnitt hohe Strommengen** transportieren können. Gleichzeitig haben sie bei der Übertragung von Gleichstrom keine und bei der Übertragung von Wechselstrom nur äußerst geringe elektrische Verluste. In der Folge sind supraleitende Maschinen und Anlagen sowohl **extrem energieeffizient** wie auch **ressourcensparend**.

Wenn diese Materialien gekühlt werden – wie im Übrigen auch viele konventionelle Komponenten z.B. Kupfer- und Aluminiumkabel gekühlt werden müssen –, entwickeln sie bei Erreichen der sogenannten **Sprungtemperatur** schlagartig supraleitende Eigenschaften. Es werden zwei Materialgruppen unterschieden:

- **Metallische** Supraleiter, sogenannte **Tieftemperatursupraleiter**, bei denen die Supraleitereffekte erst nahe dem absoluten Nullpunkt bei 4K (= -269°C) eintreten. Hierzu gehören Niob-Titan (NBTi) und Niob-3-Zinn (Nb_3Sn). Magnesiumdiborid (MgB_2) stellt in dieser Gruppe eine Besonderheit dar, da es bereits bei 39 K zum Supraleiter wird.
- **Keramische** Supraleiter, auch **Hochtemperatursupraleiter** genannt, werden bereits bei Temperaturen von ca. 77K (= -196°C) supraleitend. Meist handelt es sich um Seltenerden-Barium-Kupferoxid-Varianten[1] wie Yttrium-Barium-Kupferoxid (YBCO) oder Gadolinium-Barium-Kupferoxid (GdBaCuO).

Metallische Supraleiter werden seit über 50 Jahren in Deutschland hergestellt. Keramische Supraleiterbänder werden in Deutschland seit 2015 industriell hergestellt. Durch sie eröffnet sich ein breites Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten in der Energie- und Netztechnik ebenso wie in der Industrie.

Die Ressourcen- und Energieeffizienz von Supraleitern sowie ihr Potential für technische Innovationen machen diese Technologie zu einer **Zukunftstechnologie** für den **Wirtschaftsstandort Deutschland**. Die deutsche Supraleiterbranche bildet die **gesamte Wertschöpfungskette** von der Materialherstellung über die Anwendungsentwicklung und -produktion über die Kühltechnik bis hin zur begleitenden und evaluierenden Forschung. Dies ist einzigartig in Europa. Getragen wurde und wird diese gesamte Entwicklung in der Regel von kleinen und mittleren Unternehmen, die das Risiko für diese Innovationen tragen. Hier ist es erfolgskritisch, diese Unternehmen zu unterstützen, um die zu erwartenden Arbeitsplatz- und Steuereffekte in Deutschland zu realisieren.

[1] Oft auch als Rare-Earth-Barium-Kupferoxid oder REBCO bezeichnet.

Energietechnik

2. Energietechnik

- **Supraleiterkabel – TRL 8-9**[2]
  - benötigen nur extrem schmale Trassen.
  - reduzieren die Netzverluste um 30 – 50%.
  - haben weder thermische noch elektromagnetische Emissionen.
  - ermöglichen den Transport großer Strommengen auf einer niedrigeren Spannungsebene als konventionelle Kupfer- oder Aluminiumleiter.
  - verkürzen potenziell die Genehmigungszeiten, da sie eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz haben.

Supraleiter bieten in der Energietechnik – abgesehen von der Ressourceneffizienz – aufgrund ihrer hohen Stromtragfähigkeit interessante Alternativen zu konventioneller Technik.

- **Modulare Supraleiterkabel und Supraleiterschienensysteme – TRL 6-7**
  - haben dieselben Vorteile wie Supraleiterkabel und darüber hinaus
  - machen sie die aufwändige Kabellogistik unnötig und können auf normalen LKW transportiert werden
  - ermöglichen sie 90°-Winkel bei der Verlegung

- **Supraleitende Fehlerstrombegrenzer – TRL 8**
  - schützen die Netze vor Überlasten. Sie reagieren in Millisekundenschnelle und kehren nach der Behebung des Fehlers automatisch in den Normalzustand zurück
  - ermöglichen zudem die Nutzung von Sicherheitsreserven und eine engere Vermaschung der Netze
  - erleichtern die Einbindung fluktuierender Energiequellen und verlängern die Lebensdauer anderer netztechnischer Komponenten, da diese vor Überlasten geschützt werden.

- **Supraleitende Flywheel-Speicher – TRL ??**
  - sind eigensicher
  - speichern überzähligen Strom in Sekundenschnelle und speisen ihn bei Bedarf ebenso schnell wieder ins Netz ein

- **Supraleitende Transformatoren – TRL ??**
  - die gleichzeitig strombegrenzende Wirkung haben und somit das Netz stabilisieren

- **Supraleitergeneratoren – TRL 7**[3]
  - Sind wesentlich leichter und kompakter als konventionelle oder PM-Generatoren
  - sind besonders im Teillastbetrieb hocheffizient
  - sind extrem überlastfähig

[2] Die Einteilung in die verschiedenen technischen Reifegrade (TRL) orientiert sich an dem TRL-Modell der EU.
[3] Anne Bergen et al., Design and in-field testing of the world's first ReBCO rotor for a 3.6 MW wind generator, in Superconductor Science and Technology 32, 2019, S. 12.

Netztechnik
© Simon Koopmann

2.1. Netztechnik

In der Netztechnik minimieren Supraleiter die Übertragungsverluste substantiell und ermöglichen Netzreserven zu nutzen, da sie die Netze schützen und stabilisieren.

Die Stromnetze sind heute wesentlich höheren Anforderungen ausgesetzt als bei ihrem Bau: Gründe hierfür sind das Bevölkerungswachstum und der seitdem gestiegene Strombedarf – vor allem in der Industrie. Im Jahr 2017 lag Deutschland mit 539 TWh auf Platz 6 der Länder mit dem höchsten Stromverbrauch[4]. Es gilt also Strom möglichst effektiv zu transportieren und die Netzverluste zu reduzieren. Sie lagen bei ca. 5,13%, d.h. es gingen 27,2 TWh verloren[5]. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass die Zahlen im zweiten Quartal sicher aufgrund der Corona-Pandemie niedriger als üblich ausfallen.

Außerdem hat sich die Einspeise- und Entnahmestruktur in den Stromnetzen grundlegend gewandelt: Wurde bei Bau der Netze der Strom in großen Kraftwerken produziert, auf Höchstspannungsebene eingespeist und in der Regel auf der Niederspannungsebene entnommen – wird heute Strom auf den verschiedensten Ebenen eingespeist und entnommen.

Höchstspannungsebene: 220 – 380 kV

➔**Stromeinspeisung:** Kraftwerke

🡐 **Stromentnahme:** Regionale Stromversorger, z.B. Großindustrie, Europäischer Stromverbund

Hochspannungsebene: 60 – 110 kV

➔**Stromeinspeisung:** Private Anbieter, große und mittlere Windparks

🡐 **Stromentnahme:** z.B. größere Industrieanlagen, Schienenverkehr

Mittelspannungsebene: 6 – 60 kV

➔**Stromeinspeisung:** große Photovoltaikanlagen, Blockheizkraftwerke, Kraft-Wärme-Kopplung

🡐 z.B. mittlere Industrieanlagen sowie u.a. größere Gewerbebetriebe, größere Wohnkomplexe, Büro- und Warenhäuser, Krankenhäuser etc.

Niederspannungsebene 230 – 400 V

➔**Stromeinspeisung:** dezentrale, kleine Photovoltaikanlagen, Blockheizkraftwerke, Kraft-Wärme-Kopplung

🡐**Stromentnahme:** Kleinbetriebe, Landwirtschaft, kleinere Städte, Haushalte

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Stromnetzes[6]

[4] Bundesamt für Statistik: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151356/umfrage/stromverbrauch - ausgewaehlter-laender-weltweit/ abgerufen am 9.02.2022
[5] Bundesnetzagentur, Monitoringbericht 2021, Stand 1.12.2021, S. 35.
[6] Vgl. Hermann-Friedrich Wagner, Welt der Physik, 20.8.2017

Hinzu kommt, dass die einzelnen Netzabschnitte immer mehr miteinander „vermascht“, d.h. verbunden werden. Ziel ist ein europäischer Stromverbund. Dies birgt aber auch die Gefahr großflächiger Stromausfälle, wie etwa am 4.11.2006, als zwei Hochspannungsleitungen über der Ems abgeschaltet wurden, um die Ausschiffung eines Kreuzfahrtschiffes zu ermöglichen und in der Folge, in Teilen Deutschlands, Frankreichs, Belgiens, Italiens, Österreichs und Spaniens bis zu 120 Minuten der Strom ausfiel, da die übrigen Leitungen überlastet wurden[7]. Um solche Stromausfälle zu verhindern, müssen die Stromnetze möglichst gut abgesichert und durch reaktionsschnelle Speicher gepuffert werden. Die Superleitungstechnologie bietet hierfür eine ganze Palette technischer Innovationen.

2.1.1. Supraleitende Kabel

Unsere **Stromnetze** stoßen an ihre **Leistungsgrenzen**: Der hohe Strombedarf, die Einbindung volatiler Energiequellen auf unterschiedlichen Netzebenen, die Schaffung des europäischen Stromnetzverbundes – all das sind Anforderungen, die beim Bau des Stromnetzes nicht bekannt waren. Zugleich steigen die Anforderungen an die Sicherheit und **Zuverlässigkeit** der **Stromversorgung**. Der Ausbau der der Übertragungs- wie auch Verteilnetze ist unumgänglich. Dennoch stößt der **Netzausbau** vielerorts auf **Widerstand** – zum einen aufgrund der Zerstörung der Natur, zum anderen aus Angst vor elektromagnetischen Emissionen und ihren möglichen Folgen.

Die hohe Stromtragfähigkeit von Supraleitern ermöglicht kompakte Kabel in schmalen Trassen ohne jegliche Emissionen, die viel Strom auf niedrigeren Spannungsebenen transportieren und Netzverluste wesentlich minimieren.

Abbildung 2: Verlegung des Supraleiterkabels in Essen

[7] Vgl. Bericht der Bundesnetzagentur über die Systemstörung im deutschen und europäischen Verbundsystem am 4. November 2006, Bonn, Feb. 2007

Supraleiterkabel können die **Akzeptanz** für den Netzausbau erhöhen und damit die Genehmigungsverfahren erheblich verkürzen: da sie **keine elektromagnetischen Emissionen** haben, ist ihre Verlegung in Siedlungsnähe problemlos. Es gibt auch keine Interferenzen mit Datenleitungen und GPS-Steuerungen moderner landwirtschaftlicher Maschinen. Da sie **keine thermischen Emissionen** haben, verursachen sie keine Austrocknung der Böden. Außerdem ist ihre Stromtragfähigkeit um ein Vielfaches höher als die konventioneller Stromübertragungstechnik. So ersetzt ein einziges 10-kV-Supraleiterkabel fünf konventionelle 10-kV-Kabelsysteme bestehend aus je fünf Kabeln bzw. ein konventionelles 110-kV-Kabelsystem bestehend aus drei Kabeln. Dies bedeutet eine Trassenbreite von ca. einem Meter – die Bautrasse ist dann 5 Meter breit – statt bis zu 120 Metern bei Freileitungen bzw. bis zu 55 Metern bei Erdkabel für Wechselstrom oder bis zu 30 Metern für Gleichstromtrassen. Es bedeutet zudem, dass die **gleiche Menge Strom auf einer niedrigeren Spannungsebene** transportiert werden kann. Beides **senkt die Investitionskosten** erheblich, denn sowohl die Kosten für die benötigten Flächen, wie die für die Tiefbauarbeiten sowie auch die Kosten für die benötigte Netztechnik sinken auf diese Weise substantiell. Die **Energie für die Kühlung der Supraleiterkabel beträgt ca. die Hälfte der eingesparten Netzverluste**. Somit sind Supraleiter insgesamt gesehen **die effizienteste Übertragungslösung**

.

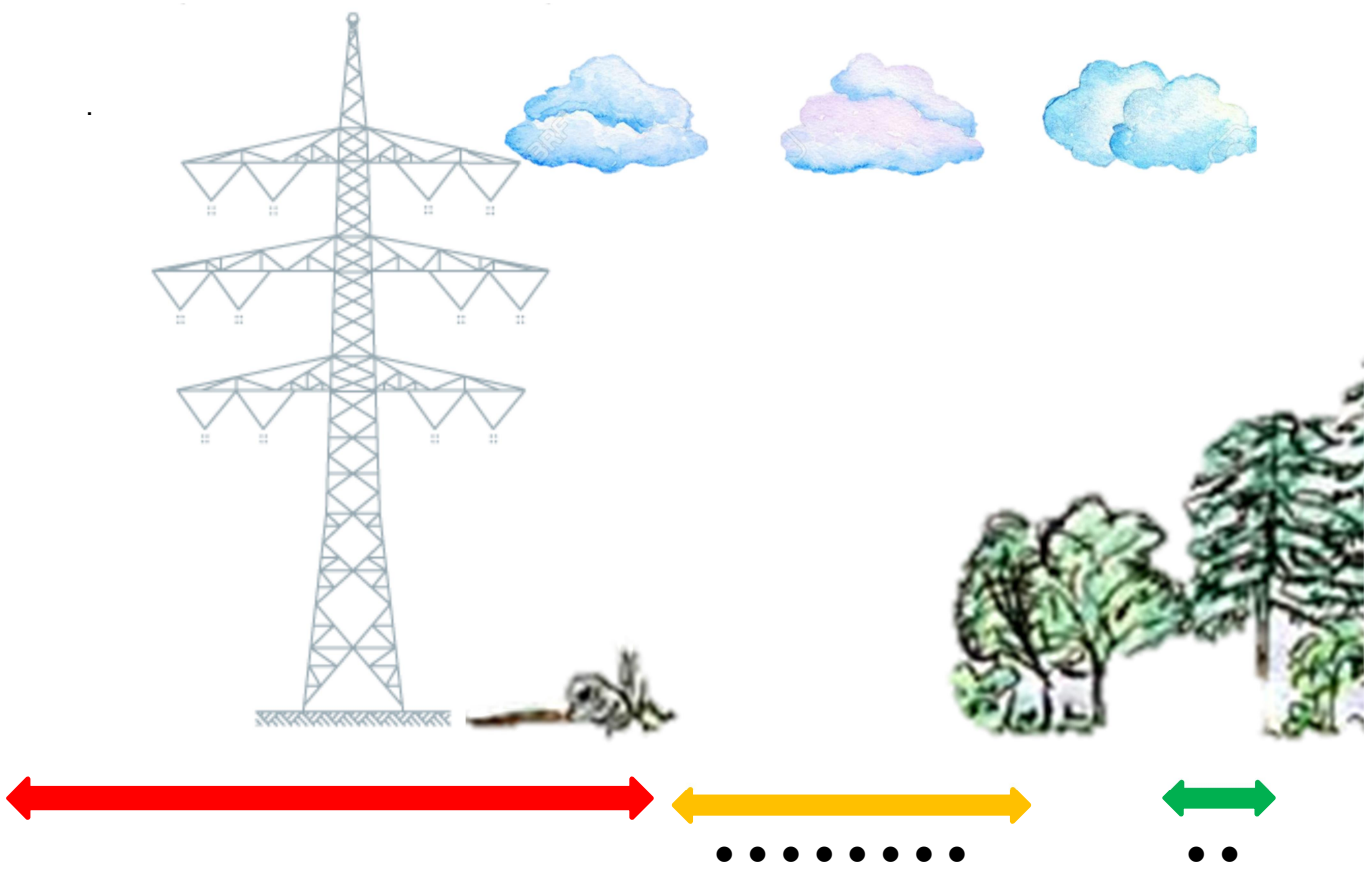


Abbildung 3: Vergleich der verschiedenen Leitungstypen: Freileitung, Erdkabel und Supraleiterkabel

	Freileitung	Erdkabel	Supraleiterkabel
Spannungsebene	Keine Angaben	Mittelspannung: 10 kV	Mittelspannung: 10kV
Übertragungsleistung		40 MVA	40 MVA
Anzahl der Leiter		5 x 3	1
Höhe		Entfällt	entfällt
Trassenbreite		12 – 55 m	0,4 – 5 m
Tiefe Graben / Fundament		1,5 – 2 m	0,7 – 1,5 m[8]
Kosten		0,43 Mio. € / km	Ca. 1,2 Mio. € / km[9]
	Freileitung	**Erdkabel**	**Supraleiterkabel**
Spannungsebene	Hochspannung: 110 kV	Hochspannung: 110 kV	Hochspannung: 110 kV
Übertragungsleistung	260 MVA[10]	200 – 290 MVA	500 MVA
Anzahl Leiter	3[11]	3	1
Höhe	Ca. 40 m[12]	Entfällt	Entfällt
Trassenbreite	40 – 50 m	Ca. 9 m (bei 2 x 110 kV)	Ca. 0,8 – 5 m
Tiefe Graben / Fundament	1,2 – 35 m[13]	Ca. 2 m	0,8 – 2[14] m
Kosten	0,3 – 0,5 Mio. € / km	1,3 – 2 Mio. € / km	Ca. 2 Mio. € / km[15]

Tabelle 1: Vergleich der verschiedenen Leitungstypen

2.1.2 Modulare Supraleiterkabel / Stromschienen

Modulare Kabel ohne Kabellogistik können auch in 90°- Kurven verlegt werden.

Modulare Supraleiterkabel haben im Vergleich zu anderen Supraleiterkabeln zusätzlich den Vorteil, dass für die Verlegung **keine** aufwändige **Kabellogistik** notwendig ist, denn Module können auf ganz normalen LKW transportiert werden. Dies bedeutet auf geringere Kosten und erheblich weniger Schwerlastverkehr auf der Baustelle, wodurch der **Boden weniger verdichtet** wird.

Für das Verbinden der Module sind keine Spezialkenntnisse nötig. Ein weiterer Pluspunkt ist, dass die modulare Lösung **90°-Winkel** ermöglicht, die mit Kabeln nicht möglich sind. Dies ist bislang gerade in beengten Platzverhältnissen ein Problem. Somit eignen sich modulare Supraleiterkabel insbesondere für hochsensible ökologische Gebiete und platzkritische städtische Gebiete.

[8] Die Trassentiefe in Städten ist für jede Spannungsebene definiert und kann je nach Stadt variieren. Wenn nichts dagegen spricht, werden diese Kabel in einer Tiefe von 0,7 m verlegt.
[9] Preis pro km basierend auf den Supraleiter-Drahtpreisen von Oktober 2020. Der Preis wird sinken sobald in der Produktion Skaleneffekte erreicht werden.
[10] Prof. Heinrich Brakelmann: Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel? Duisburg 2004, S. 9-12, Erdkabel und Freileitung.
[11] Quelle für Höhe, Trassenbreite und Kosten von Freileitung und Erdkabel: Netze BW, Drüber oder drunter? Freileitungen und Erdkabel im Vergleich.
[12] TenneT, Freileitungen im Bau, Bayreuth, Februar 2016, S. 6-9 – auch Angaben zu 110 kV.
[13] 50Hertz, TenneT: SuedOstLink – BBPlG Vorhaben Nr. 5 -„Höchstspannungsleitung Wolmirstedt – Isar; Gleichstrom“ Bundesfachplanung gemäß § 8 NABEG – Technische Vorhabenbeschreibung Abschnitt A/FL, S. 12-14 – auch Angaben zu 110 kV. Die Fundamentierung hängt vom Untergrund ab.
[14] Die Trassentiefe in Städten ist für jede Spannungsebene definiert und kann je nach Stadt variieren. Ansonsten werden die Kabel in 1 – 1,5 Metern Tiefe verlegt.
[15] Preis pro km basierend auf den Supraleiter-Drahtpreisen von Oktober 2020. Der Preis wird sinken sobald in der Produktion Skaleneffekte erreicht werden.

	Freileitung	Erdkabel	Supraleiterkabel
Bodenerwärmung	entfällt	Ja	Nein
Bodenverdichtung	Ja, durch intensiven Schwerlastverkehr	Ja, durch intensiven Schwerlastverkehr	Je nach System weniger Schwerlastverkehr – insbesondere bei den modularen Kabeln
Elektromagnetische Emissionen	Ja Beeinträchtigung GPS-gesteuerter landwirtschaftlicher Maschinen. Beeinträchtigungen der Gesundheit	Ja Beeinträchtigung GPS-gesteuerter landwirtschaftlicher Maschinen. Beeinträchtigungen der Gesundheit	Nein
Beeinträchtigung der Fauna	Ja, z.B. Verletzung von Vögeln.	Ja, durch Bodenverdichtung, Erwärmung und Austrocknen der Böden	Nein
Beeinträchtigung der Flora	Auf gesamter Trassenbreite bis zu 120 m durch Einschränkung des Bewuchses und Bodenverdichtung	Auf gesamter Trassenbreite bis zu 55 m Bodenverdichtung, Austrocknen der Böden und Einschränkungen des Bewuchses	Auf gesamter Trassenbreite bis zu 5 m durch Bodenverdichtung und Einschränkung des Bewuchses

Tabelle 2: Beeinträchtigungen durch die verschiedenen Leitungstypen

2.1.3 Fehlerstrombegrenzer

Veränderte Lastflüsse in den Stromnetzen durch einen höheren Stromverbrauch, die dezentrale Einspeisung und eine zunehmende Vermaschung von Netzen führen im Störungsfall zu höheren Kurzschlussströmen[16]. Dies bedeutet, dass in vielen Netzabschnitten vorzeitig teure Schaltanlagen und Transformatoren ausgetauscht werden müssen, um den neuen Anforderungen zu genügen.

Selbsttätige, hocheffiziente Netzschutzanlagen ermöglichen die Nutzung von Netzreserven sowie eine engere Vermaschung der Netze und erleichtern die Einbindung erneuerbarer Energiequellen.

Durch die Installation supraleitender Strombegrenzer können Kurzschlussströme in Millisekunden begrenzt und damit die nachgeschaltete Netztechnik wirksam geschützt werden. Dadurch wird es möglich, die vorhandenen Netzreserven zu nutzen sowie Netze enger zu vermaschen und somit den notwendigen Netzausbau zeitlich deutlich zu entzerren. Auch die Einbindung der meist volatilen regenerativen Energiequellen wie Windkraft- oder Photovoltaikanlagen wird so erleichtert.

Hinzu kommt, dass supraleitende Strombegrenzer nicht nur selbsttätig und eigensicher Überströme begrenzen, sie sind im Normalbetrieb des Netzes praktisch unsichtbar, d.h. sie haben keinen ohmschen Widerstand – anders als konventionelle Drosseln, die Strom verbrauchen – und sie kehren nach der Behebung des Fehlers automatisch wieder in den

[16] Vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH, dena-Studie Systemdienstleistungen 2030.Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien, S. 150.

Normalzustand zurück – anders als z.B. Sprengkapseln, die nach dem Auslösen erneuert werden müssen. Sie sichern so eine unterbrechungsfreie Stromversorgung.

Abbildung 4: Fehlerstrombegrenzer des AmpaCity-Projekts in Essen

2.1.4 Supraleitende Schwungmassenspeicher

Durch die Zunahme regenerativer Energiequellen in der Stromerzeugung, nehmen die Schwankungen in der Stromproduktion kontinuierlich zu. Um die Stromnetze und Stromkunden vor Schäden durch Überlastungen zu schützen müssen diese Schwankungen praktisch ohne jede zeitliche Verzögerungen ausgeglichen werden.

Supraleiter ermöglichen extrem reaktionsschnelle Speicher, die die Netze stabilisieren und eine effizientere Nutzung regenerativer Energiequellen erlauben.

Supraleitende Schwungmassenspeicher, sogenannte **Flywheel-Speicher**, erfüllen diese Anforderungen: In **Sekundenschnelle** können diese eigensicheren Schwungmassenspeicher Überlasten aufnehmen und bei Bedarf ebenso schnell wieder ins Netz einspeisen. Dadurch werden die Netze stabilisiert und eine effizientere Nutzung erneuerbarer Energiequellen wie Photovoltaik und Windkraft ermöglicht, insbesondere in Kombination mit trägerer Speichertechnologie wie etwa Batterien, Power-to-X oder Pumpspeichern.

Abbildung 5*: Flywheel – Schwungmassenspeicher*

Supraleitende Flywheel-Speicher sind deutlich sicherer als konventionelle Anlagen, da die Schwungmasse eigensicher, passiv gelagert wird. Hinzu kommt, dass ihr **Platzbedarf** und **Wartungsaufwand äußerst gering** sind.

2.1.5 Supraleitende Transformatoren

Die **Transformatoren** sorgen in unseren Stromnetzen sorgen für den notwendigen Wechsel des Stroms zwischen den verschiedenen Spannungsebenen. Doch gleichzeitig stellen sie **zusammen mit den Leitungsverlusten die größte Quelle der Netzverluste** dar[17]. Um die Netzverluste nachhaltig zu reduzieren, müssen abgesehen von den Leitungsverlusten auch die Transformatorverluste reduziert werden.

Hocheffiziente supraleitende Transformatoren mit strombegrenzenden Eigenschaften tragen zur Leistungssteigerung und Stabilisierung der Stromnetze bei.

Supraleiterbasierte Transformatoren reduzieren nicht nur die Netzverluste um mindestens die Hälfte[18], sondern **stabilisieren** die Stromnetze durch ihre strombegrenzenden Eigenschaften. Hinzu kommt, dass sie wesentlich überlastfähiger sind, weniger Platz benötigen und ihr Bau weniger Rohstoffe verbraucht. Im Gegensatz zu der Kühlung konventioneller Transformatoren, die oft mit Öl erfolgt, werden supraleitende

[17] Vgl. Sebastian Bothor, Prognose von Netzverlusten, Stuttgart 2019, S. 24
[18] Vgl. André Berger, Entwicklung supraleitender, strombegrenzender Transformatoren, Karlsruhe 2011, S. 125.

Transformatoren mit Stickstoff gekühlt und können so **bedenkenlos** in **ökologisch sensiblen Gebieten** wie Wasserschutzgebieten eingesetzt werden. Sie stellen außerdem auch **keine Brandgefahr** dar.

Da supraleitende Transformatoren über den Spannungswechsel hinaus auch Fehlerströme begrenzen und so die Netze und die entsprechend nachgelagerten Betriebsmittel schützen, führen sie zu einer substantiellen **Reduktion** notwendiger **Investitionen**[19]. Darüber hinaus ermöglichen sie die Vermaschung von Netzabschnitten, die vorher technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht sinnvoll waren[20], da sie größere Investitionen in Netzschutztechnik erfordert hätten.

[19] Vgl. Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe, Institut für Technische Physik „Supraleitung in der Energietechnik: Welche Perspektiven eröffnen sich?“ DPG 2014, S. 33
[20] Vgl. Sebastian Hellmann, Research and Technology Development on Superconducting Current Limiting Transformers, Karlsruhe 219, S. 159.

Erneuerbare Energien

2.2. Erneuerbare Energien

Supraleiter steigern die Effizienz von Wind- und Wasserkraft und erleichtern die Integration erneuerbarer Energiequellen in das Stromnetz.

„Im EEG 2021 wird das Ziel verankert, dass der gesamte Strom in Deutschland vor dem Jahr 2050 treibhausgasneutral ist.“[21] Dieses Ziel der Bundesregierung bezieht sich sowohl auf den Strom, der in Deutschland produziert wird, wie auch auf den importierten Strom[22]. Ziel für 2030 ist, dass 65% des erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch aus regenerativen Energiequellen stammt.[23] 2019 kamen 42% und 2020 bereits 45,4% des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen, wobei die Zahlen für 2020 aufgrund des gesunkenen Energiebedarfs während der Corona-Pandemie so hoch sind[24]. In 2021 sank dann der Anteil der Erneuerbaren an der Stromproduktion – wie erwartet – wieder auf 42%.[25] Entsprechend sollen **Wind**- und **Solaranlagen** in Deutschland **ausgebaut** werden.

Die Nutzung der **Wasserkraft** unterliegt dem Artenschutz, d.h. Anlagen werden nur genehmigt, wenn gewährleistet wird, dass die Fische an der Wasserkraftanlage unbeschadet vorbeikommen. Der Fokus liegt auf der Nutzung bzw. Reaktivierung bestehender Anlagen[26].

Eine grundlegende Voraussetzung hierfür ist der **Netzausbau** und insbesondere die **Integration** der erneuerbaren Energiequellen in die Stromnetze.

Supraleiterbasierte Technologien ermöglichen signifikante **Effizienzsteigerungen** bei der der Nutzung der der Wind- und Wasserkraft, erleichtern die **Netzanbindung** von Wind- und Solarparks und erschließen **neue technische Möglichkeiten** zur Nutzung von Energiequellen wie Wellenkraft.

2.2.1. Windkraft

Supraleitende Windkraftanlagen sind deutlich kleiner und leichter als konventionelle Generatoren sowie effizienter und überlastfähiger.

Bei der Stromgewinnung aus erneuerbaren Energiequellen hat die Windkraft mit fast 53%[27] den größten Anteil. Das erklärt die Änderungen des EEG 2021 in diesem Bereich: Der Einspeisevorrang für ausgeförderte Windkraftanlagen bleibt bestehen[28]. Zusätzlich müssen die Netzbetreiber den Strom aus kleineren Anlagen zum Marktpreis abzüglich einer Vermarktungsgebühr bis Ende 2027 übernehmen[29], wenn keine Direktvermarktung

[21] Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften, vorgelegt von der Bundesregierung am 19.10.2020, S. 1
[22] Ebd., S. 11
[23] Ebd., S. 11
[24] Bundesumweltamt (Hrsg.), Erneuerbare Energien in Deutschland 2020, 02/2021, S. 6.
[25] https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/deutlich-weniger-erneuerbarer-strom-im-jahr-2021 abgerufen am 9.2.2022.
[26] https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/wasserkraft-317778, abgerufen am 7.1.2021
[27] https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/die-corona-pandemie-ein-stuermischer-februar-lassen abgerufen am 7.1.2021.
[28] Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften, vorgelegt von der Bundesregierung am 19.10.2020, S. 4

gewünscht ist. Gleichzeitig werden Anreize gesetzt, die Leistung vorhandener Standorte zu erhöhen[30].

Supraleitende Windkraftgeneratoren sind **optimal** für ein **Repowering** bestehender Anlagen, da sie besonders **kompakt** und **leicht** und gleichzeitig gerade im Teillastbereich **hocheffizient** sind. Anders als Permanentmagnet-Generatoren brauchen sie nur eine sehr geringe Menge Seltenerden (2 kg statt 250 kg pro MW).

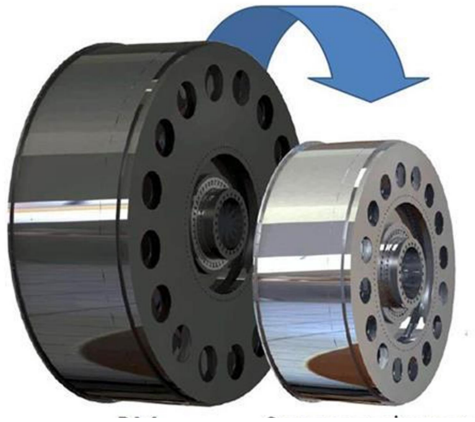


Abbildung 6: Größenvergleich: Permanentmagnet-Generator (li.) und Supraleitergenerator (re.).

Supraleitergeneratoren sind ca. **50 % kleiner** als Permanentmagnet-Generatoren und ihr **Gewicht** beträgt zudem nur **Hälfte**[31]. So kann ein 3,6-MW-Supraleitergenerator mit einem Durchmesser von vier Metern als Ganzes über die Straße zu seinem Installationsort transportiert werden und das geringe Gewicht reduziert die Kosten für Transport und Installation. Das ermöglicht auch leistungsstärkere Generatoren auf vorhandene Turbinentürme zu setzen und so die Leistung zu erhöhen, vorausgesetzt, dass auch der Einbau größerer Rotorblätter möglich ist. Aber auch durch den Einbau von Generatoren der gleichen Leistung erhöht sich der Energiegewinn, da Supraleitergeneratoren im Teillastbetrieb effizienter als konventionelle Systeme sind.

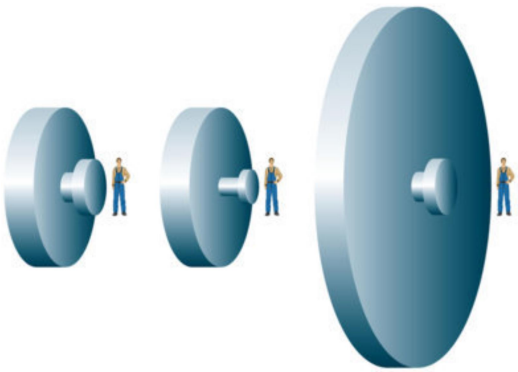


Abbildung 7: Größenvergleich: 4MW-Supraleitergenerator (li.), 4MW Permanentmagnet-Generator (m.), 4 MW Kupfergenerator (re.)

[29] Ebd., S. 119
[30] Ebd., S. 120
[31] https://www.chemistryworld.com/news/world-first-as-wind-turbine-upgraded-with-high-temperature-superconductor/3009780.article, abgerufen am 9.2.2022

Der Größenvergleich zeigt, dass mit der Supraleitertechnologie eine **neue Leistungsklasse** von **10-MW-Windturbinen** erschlossen werden kann, die gerade im **Off-Shore-Segment** eine deutliche Steigerung der Energiegewinnung mit sich bringen wird.

2.2.2 Wasserkraft

Bestehende Wasserkraftwerke können mit Supraleitergeneratoren und moderner Turbinentechnik ihre Stromerträge substantiell steigern.

Wasserkraft ist eine der ältesten Energiequellen der Menschheit. Im Jahr 2015 stammten 15,9% des weltweit generierten Stroms aus Wasserkraft[32] und damit ca. 2/3 gesamten Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen[33]. In Deutschland betrug 2019 der Anteil der Wasserkraft am Bruttostromverbrauch 3,5% bzw. 8,3 % der Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen[34]. Deutschland verfügt über ca. 7.300 Wasserkraftanlagen – davon 6.900 Kleinwasserkraftwerke mit einer Leistung bis 1 MW. Zu den großen Anlagen gehören 31 Pumpwasserspeicher, von denen 28 in Betrieb sind[35]. Die meisten der deutschen Wasserkraftanlagen sind weit über 50 Jahre alt, viele stehen unter Denkmalschutz.

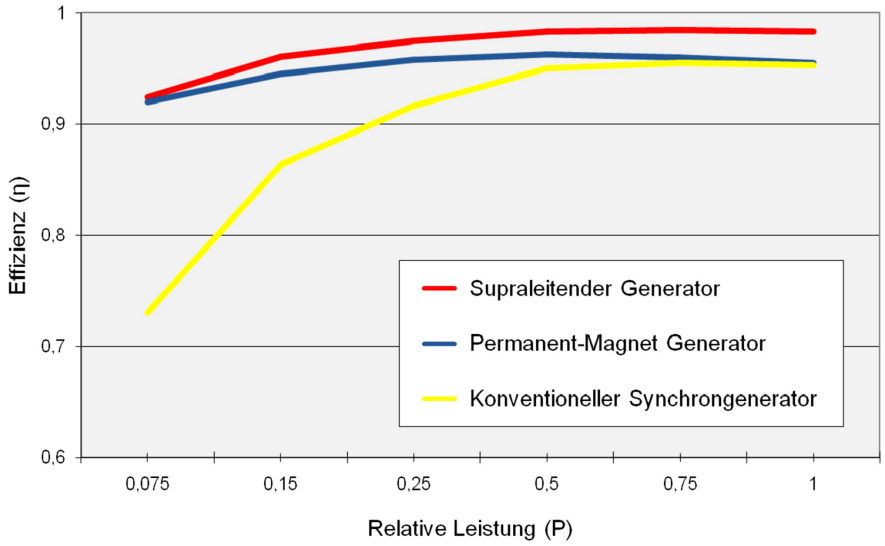


Abbildung 8: Effizienzvergleich verschiedener Generatoren[36]

Supraleiter ermöglichen den Einbau leistungsstärkerer Generatoren auf gleichem Platz und damit eine Leistungssteigerung ohne die Baudenkmäler zu schädigen: Gerade im Teillastbereich sind Supraleitergeneratoren besonders effizient. Hinzu kommt, dass sie auch sehr robust bezüglich Überlasten sind. Aufgrund des geringen Platzbedarfs wäre es auch

[32] https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=EG.ELC.HYRO.ZS#, Electricity production from hydroelectric sources (% of total), abgerufen am 9.02.2022
[33] https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=EG.ELC.RNEW.ZS#, Renewable electricity output (% of total electricity output), abgerufen am 9.02.2022
[34] https://www.wasserkraft-deutschland.de/wasserkraft/wasserkraft-in-zahlen.html, abgerufen am 9.02.2022
[35] Ebd.
[36] Daniel Schmickler, Hocheffiziente supraleitende Generatoren zur Ertragssteigerung von Laufwasserkraftwerken, Vortrag auf dem 5. Braunschweiger Supraleiterseminar, 24.06.2010, S. 26.

möglich, die Generatoren zu standardisieren, statt – wie es bei dem Bau von Wasserkraft-Generatoren früher üblich war – sie für das jeweilige Wasserkraftwerk individuell auszulegen.

2.2.3 Anbindung von Wind- und Solarparks

Die Anbindung neuer oder modernisierter Wind- und Solarparks an die bestehenden Stromnetze kann nur an leistungsfähigen Einspeisepunkten im Netz erfolgen. Doch diese sind nicht immer in der Nähe verfügbar, so dass bis zu zehn Kilometer zum nächsten Einspeisepunkt überbrückt werden müssen.

Die Supraleitertechnik erleichtert die Einbindung von Wind- und Solarparks in das Stromnetz.

Der Einsatz **modularer Supraleiterkabel** vermeidet Transportverluste und **erhöht** die **Effizienz** der **Wind- und Solarparks**. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Strom der einzelnen Windkraftanlagen bzw. Solarmodule auch mittels Supraleiterkabeln zusammengeführt wird. Die Supraleiter leiten den Gleichstrom **ohne ohmsche Verluste** auf einer niedrigen Spannungsebene zum Einspeisepunkt, wo der gesamte Strom zentral mit einem einzigen Umrichter mit Netzfrequenz synchronisiert werden kann. Mit solchen Konzepten lassen sich die **Wechselrichter-, Trafo- und Leitungsverluste deutlich reduzieren**. Selbst bei den heute noch hohen Preisen gibt es Anwendungsfälle, den die **Supraleiterlösung wirtschaftlicher** als konventionelle Technik ist.

2.2.4 Weitere

Der niedrige Raumbedarf, die große Effizienz im Teillastbereich und die hohe Überlastfähigkeit von Supraleitergeneratoren eröffnen auch Perspektiven im Bereich der **Wellen**- und **Gezeitenkraftwerke**.

Weitere innovative Lösungen auf Supraleiterbasis sind zu erwarten.

Darüber hinaus, kann etwa die **Herstellung** von **Silizium-Einkristallen** für Photovoltaik mittels Supraleitermagneten **optimiert** werden.

Es ist davon auszugehen, dass gerade in der Energietechnik noch eine Reihe neuer Anwendungen auf Basis von Supraleitern entwickelt werden.

2.3. Fazit

Die physikalischen Eigenschaften von Supraleitern machen sie zu einer der Zukunftstechnologien der Energiewende durch

- die **verlustfreie** Übertragung von **Gleichstrom**,
- die **hocheffiziente** Übertragung von **Wechselstrom**,
- die **Stabilisierung** der bestehenden Stromnetze durch innovative **Netzschutz**- und **Speichertechnik**,
- die leichtere **Integration erneuerbarer** Energiequellen durch die Freisetzung von **Netzreserven**.,
- der einfachere **Ausbau** der Stromnetze durch eine Stromübertragungstechnik, die nur **schmalste Trassen** benötigt und **weder thermische noch elektromagnetische** Emissionen hat und
- die **Steigerung** der Stromgewinnung von **Wind**- und **Wasserkraft** durch das **Repowering** mit leistungsstärkeren Supraleitergeneratoren

Supraleiter öffnen in der Energietechnik neue Wege: in der Netztechnik, der Stromübertragung, der Stromproduktion und der Speichertechnik.

Jetzt gilt es diese Potenziale zu heben und durch **langfristige Verbundprojekte** die Betriebserfahrung zu stärken und die Technik zu optimieren. Durch solche größer angelegte Projekte wird zudem die Produktion des Supraleiterdrahts verstetigt und damit erste Skaleneffekte erreicht.

Wichtig ist außerdem, dass **Anreize** geschaffen werden, die neue Technologie einzusetzen. Gerade beim Netzausbau gibt es schon heute Situationen, in denen Supraleiterkabel die wirtschaftlich günstigste Lösung darstellen. Da sie keine thermischen und elektromagnetischen Emissionen haben und nur geringste Trassenbreiten benötigen, ist ihre **Akzeptanz** in der Bevölkerung auch höher als die konventioneller Kabel. Dementsprechend weniger Klagen sind bei dem Netzausbau mit Supraleiterkabel zu erwarten. Es ist also davon auszugehen, dass sie zu einer Beschleunigung des Netzausbaus beitragen können. Deswegen schlagen wir vor, dass bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht nur Materialien, Bauaufwand und Flächen eingepreist werden, sondern auch die Kosten für Verzögerungen, Umplanungen und Prozesse sowie das Maß, in dem in bestehende Ökosysteme eingegriffen wird / werden muss.

Diese Maßnahmen können dazu beitragen, die Energiewende in Deutschland zum Erfolg zu machen und gleichzeitig den Wirtschaftsstandort Deutschland stärken.

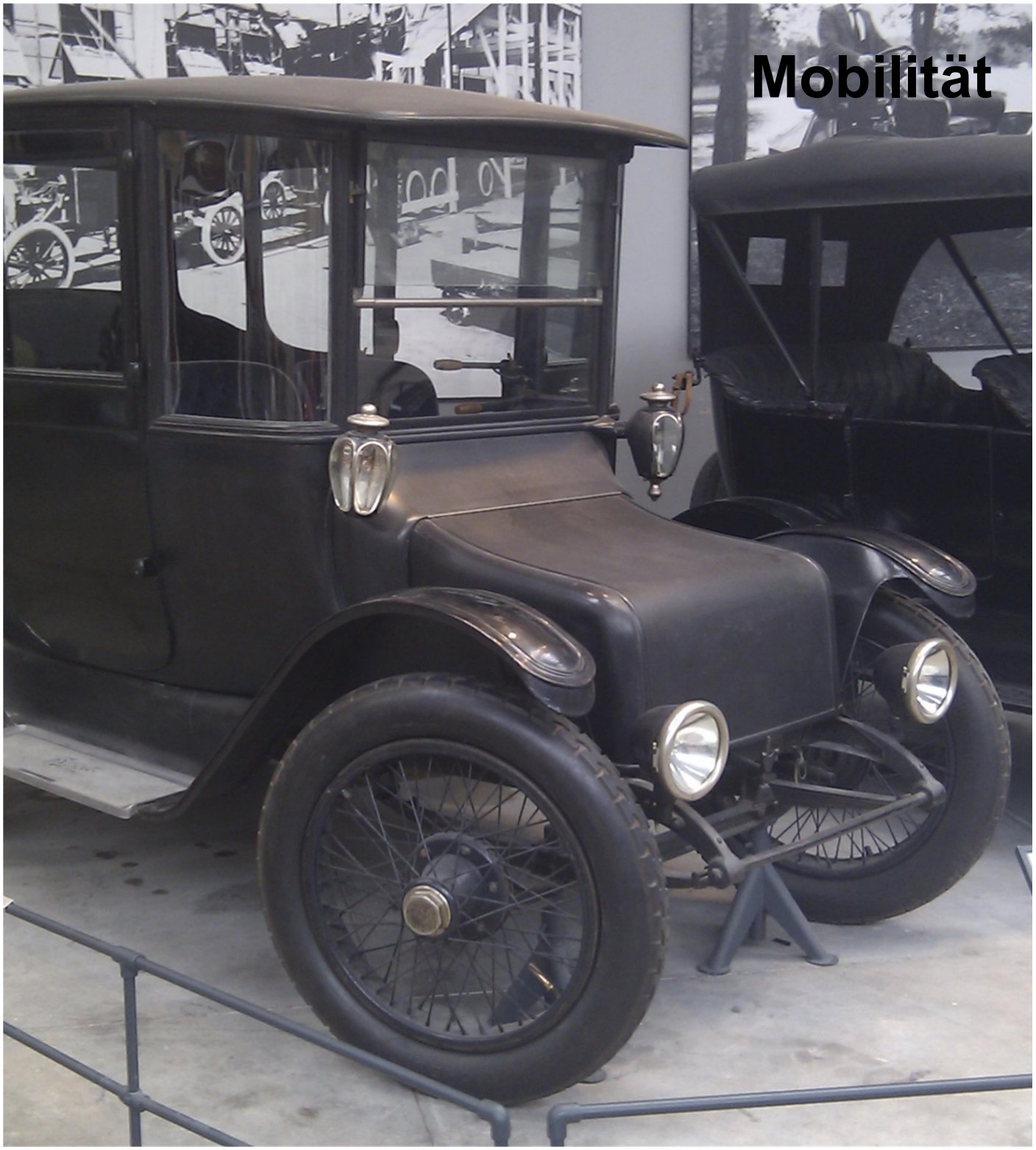


Abbildung 9: Elektromobilität ist nicht neu: Schon Oma Duck fuhr einen Detroit Electric

3. Mobilität

Supraleiter können substantiell zum Gelingen der Verkehrswende beitragen.

Um einen **wirksamen Klimaschutz** zu betreiben muss es nicht nur eine Energiewende, sondern auch eine **Verkehrswende** geben. Der Verkehrssektor war im Jahr 2018 weltweit für 25% der CO_2-Emissionen verantwortlich[37]. Den größten Anteil an diesen Emissionen, nämlich 18% hat der Straßenverkehr, der als „Klimasünder Nummer eins“ bezeichnet wird.[38] Demgegenüber emittieren Schifffahrt und Luftverkehr je nur um die 3% des weltweiten CO_2-Ausstoßes.[39] Letztere haben aber – abgesehen vom CO_2-Ausstoß noch andere ökologische Auswirkungen, die nicht minder gravierend sind.

Dementsprechend ist ein **Paradigmenwechsel** insbesondere im **Straßenverkehr** erfolgskritisch. Supraleiter bieten eine Reihe innovativer Lösungen für das Gelingen der Verkehrswende:

- **Supraleiterkabel (TRL 8-9) und modulare Supraleiterkabel (TRL 6-7) für den Ausbau der Ladeinfrastruktur für die E-Mobilität im Straßenverkehr**
  - Verlustfreie und emissionsfreie Stromübertragung
  - Schmalste Trassen
  - Ressourceneffizient
- **Supraleiterbasierte Schiffsantriebe (TRL 6)**
  - Sind nur halb so groß wie konventionelle Motoren
  - Wiegen nur etwa ein Drittel
  - Sind deutlich effizienter trotz des Kühlungsaufwandes
- **Supraleitende Flugzeugantriebe (TRL ??)**
  - Sind hocheffizient
  - Sind klein und leicht, was für Flugzeuge unabdingbar ist
  - Sind zudem sehr leise
- **Supraleitende Schwebebahnkonzepte (TRL 6-7)**
  - Emittieren keine Treibhausgase
  - Sind weniger laut
  - Haben das Potential Inlandsflüge und innereuropäische Flüge zu ersetzen
  - Eröffnen völlig neue Mobilitätslösungen – auch innerhalb von Gebäuden

[37] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167957/umfrage/verteilung-der-co-emissionen-weltweit-nach-bereich/, veröffentlicht im Oktober 2020, abgerufen am 9.02.2022.
[38] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/317683/umfrage/verkehrsttraeger-anteil-co2-emissionen-fossile-brennstoffe/ veröffentlicht von Martin Kords am 20.01.2022, abgerufen am 9.02.2022.
[39] ebd.

3.1. Straßenverkehr: Ausbau des Ladenetzes für E-Mobilität

Um die CO_2-Ziele im Verkehrsbereich zu erreichen, strebt die Bundesregierung an: *„Der Verkehrssektor muss seine Emissionen bis 2030 um 40 bis 42 Prozent im Vergleich zu 1990 mindern – oder von 164 auf 98 bis 95 Millionen Tonnen CO2. Im Jahr 2019 betrugen die Verkehrsemissionen etwa 163,5 Millionen Tonnen CO2… Bis 2030 sollen sieben bis zehn Millionen Elektrofahrzeuge in Deutschland zugelassen sein...“*[40] Das Bundesverkehrsministerium spricht sogar von 14 Millionen E-Fahrzeugen[41]

Supraleiter erleichtern den flächendeckenden Aufbau einer Ladeinfrastruktur für die erfolgreiche Umstellung auf E-Mobilität im Straßenverkehr, besonders in den Innenstädten.

Abbildung 10: Ladestationen in den Randlagen der Ballungsgebiete sind nicht die Lösung. © John K. Thorne

Dies bedeutet nicht nur eine erhebliche Umstellung für die Automobilindustrie, es bedeutet auch eine Herausforderung für die Stromerzeuger und die Netzbetreiber. Die Voraussetzung für die Umstellung des Straßenverkehrs ist die Errichtung einer **flächendeckenden Ladeinfrastruktur** für die E-Mobilität. Angesichts des ständig steigenden Strombedarfs[42] und der Tatsache, dass die bestehenden Stromnetze insbesondere in den Ballungsgebieten schon jetzt an ihre Leistungsgrenzen stoßen, gilt es eine Vielfalt an Problemen zu lösen:

[40] https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896, abgerufen am 9.02.2022
[41] https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Elektromobilitaet/Ladeinfrastruktur/Ladeinfrastruktur.html abgerufen am 9.02.2022
[42] Die Bundesregierung hat ihre Schätzungen für den Strombedarf 2030 von 580 TWh auf 655 TWh hochkorrigiert. Vgl. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/07/20210713-erste-abschaetzungen-stromverbrauch-2030.html abgerufen am 9.02.2022.

- **Platzmangel** in den Ballungsräumen sind ein Hindernis für den Bau neuer Trassen
- Große Tiefbauvorhaben stoßen wegen der damit einhergehenden **Verkehrsbehinderungen** auf Widerstand in der Bevölkerung
- Eine reine Verlagerung der Ladestationen in die **Randbereiche** ist in Ballungszentren nicht praktikabel und würde die Attraktivität der E-Mobilität maßgeblich senken.
- Eine effiziente Nutzung des Stroms besteht auch darin, die Leitungs- und **Umrichterverluste** möglichst gering zu halten.

Supraleiterkabel oder modulare Supraleiterkabel eignen sich **optimal** für die Stromversorgung größerer **Schnellladestruktur-Einheiten im Innenstadtbereich** (z.B. in Parkhäusern), denn Supraleiter übertragen große Mengen Gleichstrom ohne elektrische Verluste auf kleinstem Leitungsquerschnitt. Da sie **weder thermische noch elektromagnetische Emissionen** haben können sie problemlos neben Datenkabeln etc. verlegt werden. Abgesehen von schmalen Trassen können modulare Supraleiterkabel auch auf eine aufwändige Kabellogistik verzichten. Zudem haben sie den Vorteil, dass eine Verlegung im 90°-Winkel unproblematisch ist. Sie können dementsprechend dazu beitragen, das Ziel der Bundesregierung zu verwirklichen, bis 2030 eine Million öffentlich zugängliche Ladestationen zu schaffen[43]. Vor dem Hintergrund, dass städtischen Netze schon heute an ihre Leistungsgrenzen stoßen, sind Supraleiterkabel eine nicht wegzudenkende Alternative.

Abbildung 11: Ladestationen wie hier in Berlin sind immer noch die Ausnahme. © AVDA-Foto

[43] https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896, abgerufen am 9.02.2022

3.2. Schiffsantriebe

Supraleiter können zur Effizienzsteigerung des Schiffsverkehrs beitragen und damit die Umwelt entlasten.

Etwa 90.000 **Schiffe** transportieren ca. 90% des weltweiten **Warenverkehrs**. In der EU erfolgen 90% des Außenhandels und ungefähr 40% des Binnenhandels auf dem Seeweg.[44] Der Schiffsverkehr ist in der EU für **3-4% der CO_2-Emissionen** verantwortlich.[45] Zu diesen CO_2-Emissionen kommt der Ausstoß großer Mengen **weiterer Luftschadstoffe** wie Ruß, Schwermetall-, Schwefel- oder Stickoxide, da die meisten Schiffe mit Schweröl fahren[46].

Erst in den letzten Jahrzehnten wurden international Maßnahmen gegen die Luftverschmutzung durch die Seeschifffahrt ergriffen. Mit dem **MARPOL Annex VI** hat die International Maritime Organzation ein Instrument geschaffen, dass in seit dem ersten Beschluss 1997 bereits mehrfach verschärft wurde.[47]

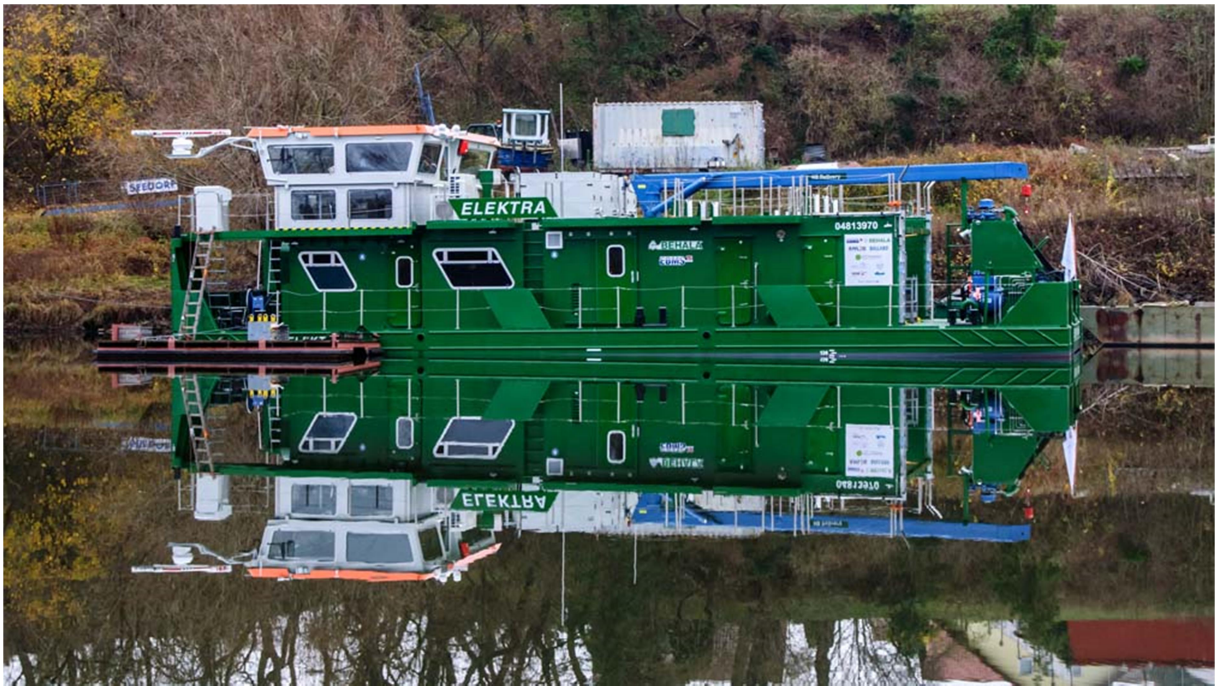


Abbildung 12: Elektra, der erste emissionsfreie Schlepper Deutschlands verkehrt zwischen Berlin und Hamburg. Doch konventionelle Technik stößt bald an ihre Grenzen… © Georgfotoart

Durch zunehmende Auflagen werden neue Schiffskonzepten auch wirtschaftlich immer attraktiver. Insbesondere die **Elektrifizierung** der Schifffahrt steht dabei im Fokus, denn die Bundesregierung strebt eine **schadstofffreie Schifffahrt** an. „Zielmarke ist perspektivisch das Null-Emissionen-Schiff.“[48] Dies ist umso dringlicher als das Volumen des Schiffsverkehrs jährlich wächst, wie die United Nations Conference on Trade and Development festgestellt

[44] https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-viele-schiffe-sind-weltweit-auf-den-meeren abgerufen am 9.02.2022
[45] 2020 Annual Report from the European Commission on CO2 Emissions from Maritime Transport, S. 5
[46] Vgl. https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/schifffahrt#luftverunreinigung abgerufen am 9.02.2022
[47] Vgl. https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx abgerufen am 9.02.2022
[48] Siebter Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung und Zukunftsperspektiven der maritimen Wirtschaft in Deutschland, S. 7.

hat.[49] Die vollständige Elektrifizierung des Schiffsverkehrs würde nicht nur den Schadstoffausstoß auf null reduzieren, sie würde auch den **Lärmpegel** drastisch **senken**.

Supraleitende Schiffsantriebe bieten in diesem Kontext eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber konventionellen Elektromotoren: Projekte von American Superconductors und Siemens haben gezeigt, dass supraleitende Schiffsantriebe u.a.

- mehr als **50% kleiner** sind als konventionelle Antriebe[50]
- im Vergleich mit konventionellen Antrieben nur etwa **ein Drittel wiegen**[51]
- deutlich **leiser** sind[52]
- einen **höheren Wirkungsgrad** haben bei einer höheren Dynamik und Geschwindigkeit[53]

Diese Eigenschaften ermöglichen nicht nur eine größere Flexibilität im Schiffsdesign[54], sondern zeigen vor allem neue Wege für einen nachhaltigen Schiffsverkehr auf.

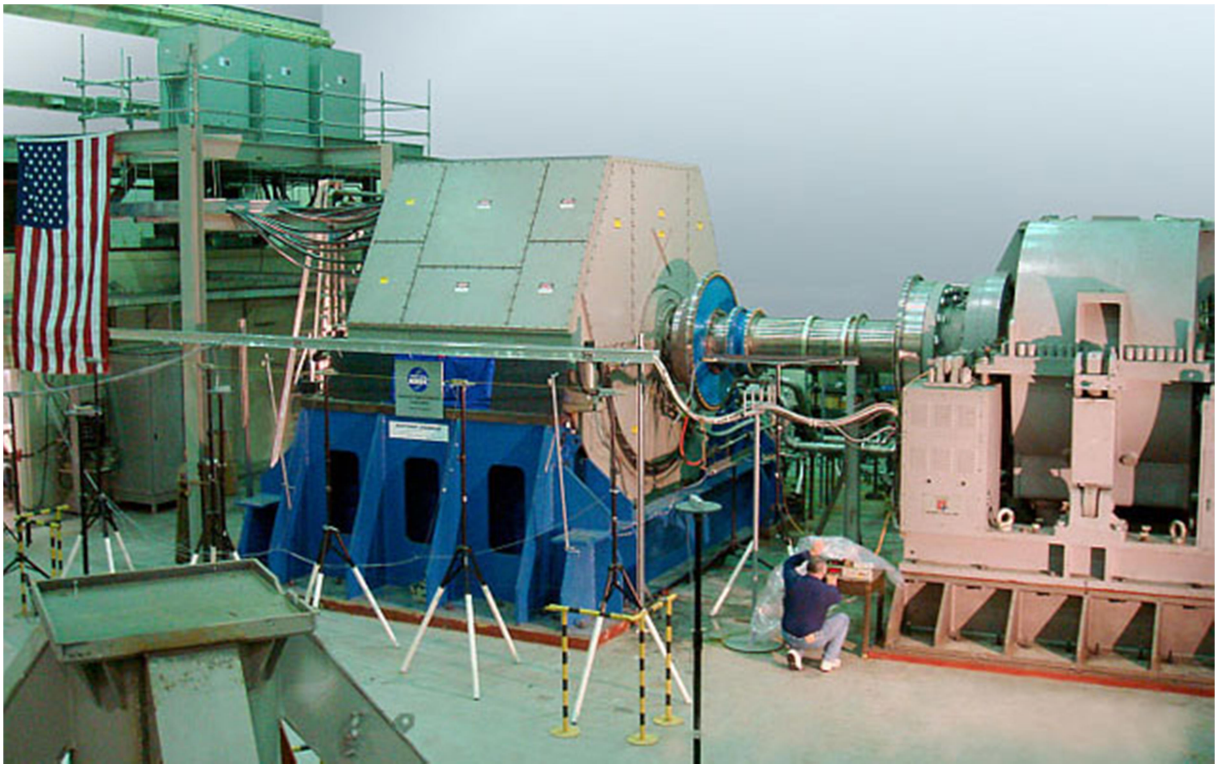


Abbildung 13: 36,5 MW HTS-Schiffsmotor während eines Vollasttests auf dem Teststand. © AMSC

[49] https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/electrified-ships/ abgerufen am 9.02.2022
[50] Swarn S. Kalsi, Design of MW-Class Ship Propulsion Motors for US Navy by AMSC, S. 13, Präsentation vom 15.07.2019
[51] Ebd.
[52] Ebd.
[53] Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe, Institut für Technische Physik „Supraleitung in der Energietechnik: Welche Perspektiven eröffnen sich?“ DPG 2014, S. 14
[54] Swarn S. Kalsi, Design of MW-Class Ship Propulsion Motors for US Navy by AMSC, S. 13, Präsentation vom 15.07.2019

3.3. Klimaverträgliches Fliegen

Supraleiter unterstützen die Entwicklung klima-neutraler Flugkonzepte.

Der **Flugverkehr** ist eine der **wachstumsstärksten** Sektoren im Verkehrsbereich. Er macht zwar nur etwa 2,5% der weltweiten CO_2-Emissionen aus[55], wächst aber gleichzeitig um etwa 4-5% pro Jahr[56]. 2017 betrug der Anteil der CO_2-Emissionen des Flugverkehrs am gesamten Verkehrsaufkommen der EU28 bereits 13,9%[57]. Effizienzsteigerungen in der Antriebstechnik sind nicht genug, um die Emissionen bei diesen Wachstumsraten zu senken[58]. Die **Europäische Union** hat sich ambitionierte **Ziele** im Flugverkehr gesetzt: Die **Reduktion** der **CO_2-Emissionen um 75%** und die von **Stickoxiden um 90%** sowie eine Reduzierung des **Lärms um 65%**.[59]

Abbildung 14: Das erste Flugzeug mit Supraleitermotor – allerdings bewegt dieser nicht allein das Flugzeug – startete im August 2021 in Russland.[60]

Um diese Ziele zu erreichen sind völlig **neue Antriebskonzepte** nötig. Supraleiter können hierbei eine entscheidende Rolle spielen, da Größe und Gewicht erfolgskritische Faktoren im

[55] Umweltbundesamt, Umweltschonender Luftverkehr, November 2019, S. 30
[56] Umweltbundesamt, Umweltschonender Luftverkehr, November 2019, S. 15 (4%), Airbus, Global Market Forecast 2021-2040, 11/2021, S. 22 (3,9%), BUND, Weniger ist mehr! Sieben Schritte für einen klima- und ressourcenschonenden Luftverkehr. S. 4. Diese Wachstumsraten gelten natürlich nicht während der Covid-Pandemie. Laut Airbus ist mit einer vollständigen Erholung des Luftverkehrs zwischen 2023 und 2025 zu rechnen, a.a.O., S. 3.
[57] Greenpeace, Zeit für eine klimaschonende Verkehrswende, 2020, S. 4
[58] European Aviation Environmental Report 2019, S. 22.
[59] Europäische Kommission, Flightpath 2050, Europe's Vision for Aviation, 2011, S. 17.
[60] https://www.flugrevue.de/flugzeugbau/hybrid-flugzeug-diese-jak-40-fliegt-mit-supraleiter-elektromotor/ abgerufen am 16.2.2022.

Flugzeugdesign darstellen. Studien haben gezeigt, dass durch den **Einsatz supraleitender Motoren** die erforderliche Leistungsdichte und Effizienz erreicht werden kann[61]

Erste Projekte wurden und werden in Europa bereits durchgeführt. Mit dem 2020 abgeschlossenen ASuMED-Projekt wurde nachgewiesen, dass ein vollständig supraleitender Motor, in dem sowohl der Stator wie auch der Rotor supraleitend sind[62], genügend Schubkraft besitzt, um in der Luftfahrt eingesetzt zu werden[63].

Mit dem Projekt ASCEND zielt Airbus auf einen Durchbruch für das elektrische Fliegen: Das dreijährige Projekt soll zeigen, dass ein elektrische oder hybrid-elektrisches Antriebssystem mit supraleitenden Komponenten zwei- bis dreimal leichter als eine konventionelle Lösung ist ohne die 97%ige Effizienz zu beeinträchtigen.[64]

In Russland wurde bereits ein erster supraleitender Motor in ein Flugzeug eingebaut, der eine Effizienz von 98% haben soll. Er ist allerdings nicht alleine für den Antrieb des Flugzeugs verantwortlich, sondern Teil eines hybriden Antriebssystems. Erste Starts waren erfolgreich. Es ist geplant die Testreihe bis 2022 fortzuführen.

Da der Luftverkehr ein unverzichtbarer Sektor unserer Gesellschaft und Wirtschaft ist, dem die EU und ihre Mitgliedstaaten allerhöchste Wichtigkeit beimessen[65], müssen diese Ansätze fortgeführt und gefördert werden.

[61] https://cordis.europa.eu/project/id/723119/de, abgerufen am 10.1.2022
[62] https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/aviation/asumed, abgerufen am 10.01.2022
[63] https://demaco-cryogenics.com/de/blog/asumed-ein-kryogener-motor-fuer-die-nachhaltige-luftfahrt/, abgerufen am 10.1.2022
[64] https://www.greencarcongress.com/2021/03/20210331-airbus.html abgerufen am 12.01.2022
[65] Europäische Kommission, Flightpath 2050, Europe's Vision for Aviation, 2011, S. 6.

3.4. Supraleitende Schwebebahn-Konzepte

Supraleiterbasiertes Schweben eignet sich für hocheffiziente und eigensichere Schnellbahnkonzepte und Nahverkehrssysteme.

Seit über hundert Jahren werden **Schwebebahnkonzepte** entwickelt – schwerpunktmäßig als Hochgeschwindigkeitszüge für den Fernverkehr. Ob Transrapid oder Maglev, die Faszination der schwebenden Fortbewegung ist groß. Viele sehen in diesen Magnetbahnen eine **Alternative** zum **nationalen** und **innereuropäischen Flugverkehr**[66]. Kritisiert wird oft allerdings, dass dieses Verkehrssystem eine eigenständige Infrastruktur benötigt[67] und das Schienensystem des in Deutschland favorisierten Transrapid durch die aufgeständerte Bauweise deutlich in das Landschaftsbild eingreift[68].

Abbildung 15: Transrapid in Shanghai, Abfahrt aus dem Flughafen

Schwebebahnkonzepte basierend auf **keramischen Supraleitern** haben gegenüber konventionellen Konzepten wie dem Transrapid oder dem auf metallischen Supraleitern basierenden japanischen JR-Maglev den Vorteil, dass eine ebenerdige Trassenführung möglich ist und **keine massiven** (**aufgeständerten**) **Schienenkonstruktionen** notwendig

[66] Vgl. z.B. https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-das-aus-des-transrapids-in-deutschland/25537900.html?ticket=ST-5504803-74OBTFOaCO15zFu4Dg1K-ap1 vom 20.2.2020 abgerufen am 2.2.2022, oder https://www.tuev-nord.de/explore/de/entdeckt/magnetisierter-wettlauf/ vom 16.12.2021 abgerufen am 2.2.2022.

[676767] https://www.spiegel.de/wirtschaft/transrapid-aus-vom-mythos-zum-milliardengrab-a-543791.html, abgerufen am 6.2.2022.

[68] Vgl. https://signalarchiv.de/Meldungen/10001015 abgerufen am 6.2.2022.

sind. Keramische Supraleiter ermöglichen es nämlich, das Magnetfeld auf einer bestimmten Position quasi einzufrieren. Dadurch entfällt auch die Notwendigkeit durch Führungsmagnete oder aufwändige Regelungstechnik die Züge auf Spur, also auf der Schiene zu halten, denn die Lagerung mit keramischen Supraleitern ist **eigensicher**. Die ebenerdige Schienenkonstruktion ist gerade im Falle von Weichen von Bedeutung, da bei den jetzigen Techniken jeweils die gesamte Betonkonstruktion verschoben werden muss, statt nur die Fahrschienen zu verschieben.

Abbildung 16: JR Maglev © Yosemite

Hinzu kommt, dass der **Energiebedarf** bei Magnetbahnkonzepten, die auf keramischen Supraleitern basieren, im Vergleich zu dem japanischen Konzept deutlich **geringer** ist und nur 0,5 W/kg statt 5-100 W/kg beträgt. Da die Geschwindigkeit bei diesen Konzepten für den Energiebedarf irrelevant ist, ist dieser technische Ansatz hocheffizient.

Auch bei neueren Magnetbahnkonzepten wie dem Transportsystem Bögl (TSB), das auf den Personen und Güternahverkehr abzielt, oder dem Hyperloop können keramische Supraleiter zu einer Effizienzsteigerung beitragen.

3.5. Fazit

Supraleiter können substantiell zur Reduzierung des CO_2-Austoßes im Verkehrssektor beitragen.

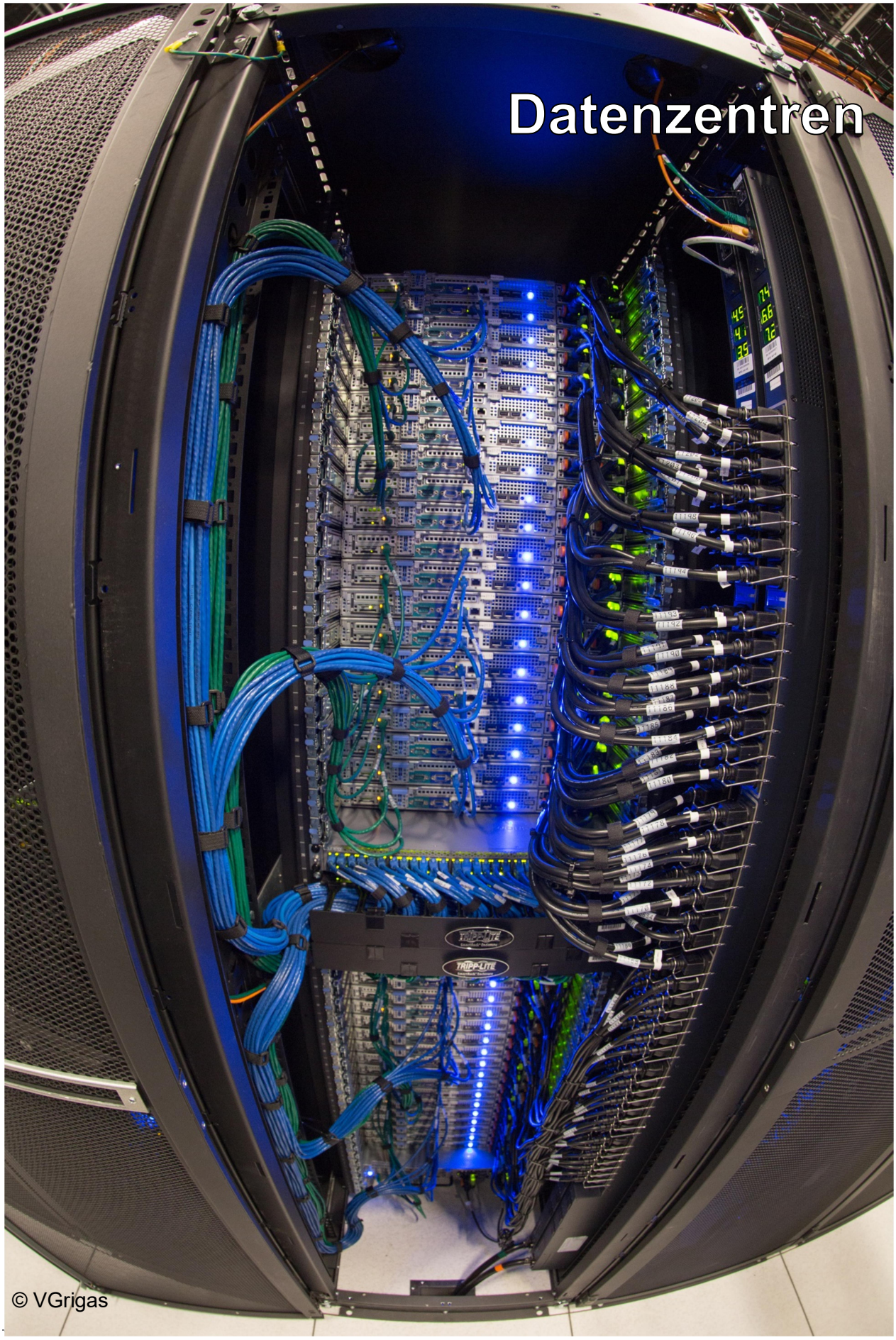
Im Zeitalter der **Globalisierung wächst der Verkehrssektor kontinuierlich**. Trotz der technischen Fortschritte der letzten Jahrzehnte, konnten in diesem Bereich – bis auf die pandemiebedingten Rückgänge – **bislang keinerlei Reduktion der CO_2-Emissionen** erreicht werden.[69] Um den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen, sind hier also grundlegende Änderungen notwendig: innovative Technologien und neue Konzepte sind auf allen Ebenen gefragt.[70]

In der Mobilität der Zukunft wird **E-Mobilität** eine zentrale Rolle spielen. Ob E-Busse, E-Bike, E-Auto oder E-Scooter, all dies wird nur mit einer engmaschigen Ladeinfrastruktur funktionieren. Gerade in den Ballungsräumen ist der Aufbau einer solchen **Ladeinfrastruktur** schwierig. Ein entsprechender Netzausbau ist oft schon aus Platzgründen problematisch. Mit **Supraleiterkabel** kann hier Abhilfe geschaffen werden.

Darüber hinaus eröffnet die Supraleitertechnologie neue Perspektiven für einen klimaneutralen Schiffs-, Flug- und Bahnverkehr.

Mobilität gilt heute vielen als ein **Grundbedürfnis**.[71] Um den Herausforderungen des Klimawandels in diesem Bereich erfolgreich zu begegnen, sind also **technische Innovationen** unabdingbar.

[69] Hrsg. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Verfasser: Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, AG 1, Wege für mehr Klimaschutz im Verkehr, 07/2021, S. 12.
[70] Vgl. z.B. https://home.kpmg/de/de/home/themen/2021/07/die-zukunft-der-mobilitaet.html, abgerufen am 7.2.2022; oder https://www.zukunftsinstitut.de/dossier/megatrend-mobilitaet/ abgerufen am 7.2.2022 oder https://www.zukunftsnetz-mobilitaet.nrw.de/, abgerufen am 7.2.2022.
[71] Bündnis sozialverträgliche Mobilitätswende, Wie wir das Klima schützen und eine sozial gerechte Mobilitätswende umsetzen können, 04/2021, S. 19.


Datenzentren
© VGrigas

4. Digitalisierung / Datencenter

Experten schätzen, dass sich das **Datenvolumen weltweit** von 33 Zettabyte[72] in 2018 auf 175 Zettabyte in 2025 steigern wird.[73] In Deutschland hat sich das Datenvolumen seit 2010 im Breitbandnetz von 3,4 Milliarden GB auf geschätzte 72 Milliarden GB im Jahr 2020 **erhöht**.[74] Parallel dazu ist natürlich auch der **Energieverbrauch** der Rechenzentren **gestiegen**: Der Strombedarf wuchs im Vergleich zu 2019 um **7%** auf 16 Milliarden kWh.[75] Insgesamt beträgt der Anteil der Rechenzentren am europäischen Energieverbrauch 3%.[76]

Supraleiter können den Rohstoff- und Energieverbrauch von Datenzentren maßgeblich senken und so zur Minderung des Energiebedarfs in einem der am schnellsten wachsenden Sektoren beitragen.

Abbildung 17: Rechenzentrum von 1und1 Internet SE

Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Strombedarf in Zukunft stärker ansteigt, denn Deutschland liegt bislang nur auf Platz 18 im internationalen Ländervergleich – technisch

[72] Ein Zettabyte entspricht einer Milliarde Bytes.
[73] International Data Corporation, Data Age 2025 The Digitization of the World From Edge to Core, 11/2018, S.3.
[74] Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags, Sachstand: Energieverbrauch von Rechenzentren, WD 8 - 3000 - 070/21, 24. August 2021, S. 4. Das Datenvolumen 2019 betrug 56 Mrd. GB und ist 2020 noch einmal aufgrund der Pandemie deutlich angestiegen.
[75] Hintermann, R. Borderstep Institut, 2020, Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an, https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/03/Borderstep_Rechenzentren2020_20210301_final.pdf
[76] Deutscher Bundestag, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Deutscher Aufbau und Resilienzplan, Drucksache 19/29682 vom 28.4.2021, S. 395.

gesehen sogar nur auf Platz 31[77]. Gleichzeitig werden vermehrt Anstrengungen unternommen, die Digitalisierung in Deutschland voranzutreiben – u.a. weil sie mit dazu beitragen soll, den Energieverbrauch in vielen Bereichen zu reduzieren.[78]

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, Rechenzentren so energieeffizient wie möglich zu betreiben, da Ziel ist, den Energieverbrauch zu senken, nicht ihn von einem Sektor in den anderen zu verschieben[79]. Diskutiert werden deshalb vor allem zwei Bereiche: Der Einsatz von **Gleichstrom**, wodurch die **Effizienz** in Rechenzentren um **5% – 10% gesteigert** würde[80] bei einer gleichzeitigen **Erhöhung** der **Systemverfügbarkeit**[81]. Hinzu kommt, dass so die Nutzung erneuerbarer Energiequellen wie Windkraft und Photovoltaik hocheffizient wäre. Der zweite Bereich ist die notwendige Kühlung. Diese machte 2020 27% des Stromverbrauchs von Rechenzentren aus[82].

Abbildung 18: Kühlwasserleitung im Rechenzentrum Frosinone © Seeweb

[77] https://worldcompetitiveness.imd.org/countryprofile/DE/digital, abgerufen am 10.02.2022.
[78] Vgl. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, Digitalisierung gestalten - Umsetzungsstrategie der Bundesregierung, 6. Überarbeitete Auflage 06/2021.
[79] Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.), Schwerpunktstudie Digitalisierung und Energieeffizienz, 11/2020, S. 10.
[80] Vgl. https://www.datacenter-insider.de/mehr-datacenter-effizienz-durch-gleichstrom-a-1075018/ vom 10.12.2021 abgerufen am 14.2.2022.
[81] Vgl. Bijen R. Shrestha et al, Efficiency and Reliability Analyses of AC and 380V DC Distribution in Data Centers, in: IEEE Access, Volume 4, 2016
[82] https://www.funkschau.de/datacenter-netzwerke/wie-kuehlung-die-energieeffizienz-verbessern-kann.189839/seite-2.html, abgerufen am 14.2.2022.

Supraleitende Stromschienen können erheblich dazu beitragen Rohstoff- und Energieverbrauch bei der Stromversorgung von Rechenzentren zu senken. Der Einsatz von Supraleitern wurde bereits vor über zehn Jahren in die Diskussion über die Energieeffizienz von Datenzentren eingebracht.[83]

Der Einsatz von **Supraleitern** zur Stromversorgung von Rechenzentren hat grundlegende Vorteile:

- Da die Stromtragfähigkeit von Supraleitern um ein Vielfaches höher ist als die konventioneller Leitermaterialien, brauchen Supraleiter wesentlich **weniger Platz** und sparen zudem **Rohstoffe**.
- Eine supraleitende Gleichstromversorgung hat keinerlei ohmsche Verluste und **senkt** dadurch den **Strombedarf**.
- Supraleitende Gleichstromschienen **erleichtern die Anbindung Erneuerbarer Energiequellen** an die Stromversorgung von Datenzentren.
- Sie ermöglichen **hohe Mengen Strom auf einer niedrigen Spannungsebene** zu transportieren, so dass beim Bau eines Rechenzentrums eine Vielzahl von Umrichtern und Transformatoren eingespart werden kann.
- Die supraleitende Stromversorgung ist thermisch gekapselt, so dass auch der **Kühlaufwand** für das Rechenzentrum **sinkt**.
- Die kompakten Supraleiterstromschienen, Einsparung von Umrichtern, Transformatoren und der geringere Kühlbedarf ermöglichen eine höhere Ausnutzung des Platzes im Rechenzentrum für Server.
- Darüber hinaus **verringert** sich auch die **Brandlast**, da Supraleiterstromschienen keine Kunststoffisolation haben.

Die Rechenzentren der Zukunft sollen laut dem Aktionsplan der Europäischen Kommission bis 2030 klimaneutral werden.[84] Supraleiter können hierzu einen substantiellen Beitrag leisten, da sie die Versorgung von Rechenzentren mit Gleichstrom technisch erleichtern und dadurch eine effizientere Konzeption von Rechenzentren ermöglichen.

[83] Vgl. Minervini, Joseph V., Superconducting Power Distribution for the Data Center, 03/2010, S. 17ff.
[84] European Commission, Shaping Europe's Digital Future, 2020, S. 11.