



**Supraleiter auf Autobahn-Mittelstreifen für die Strom-
Fernübertragung**
als Game-Changer für die Energiewende

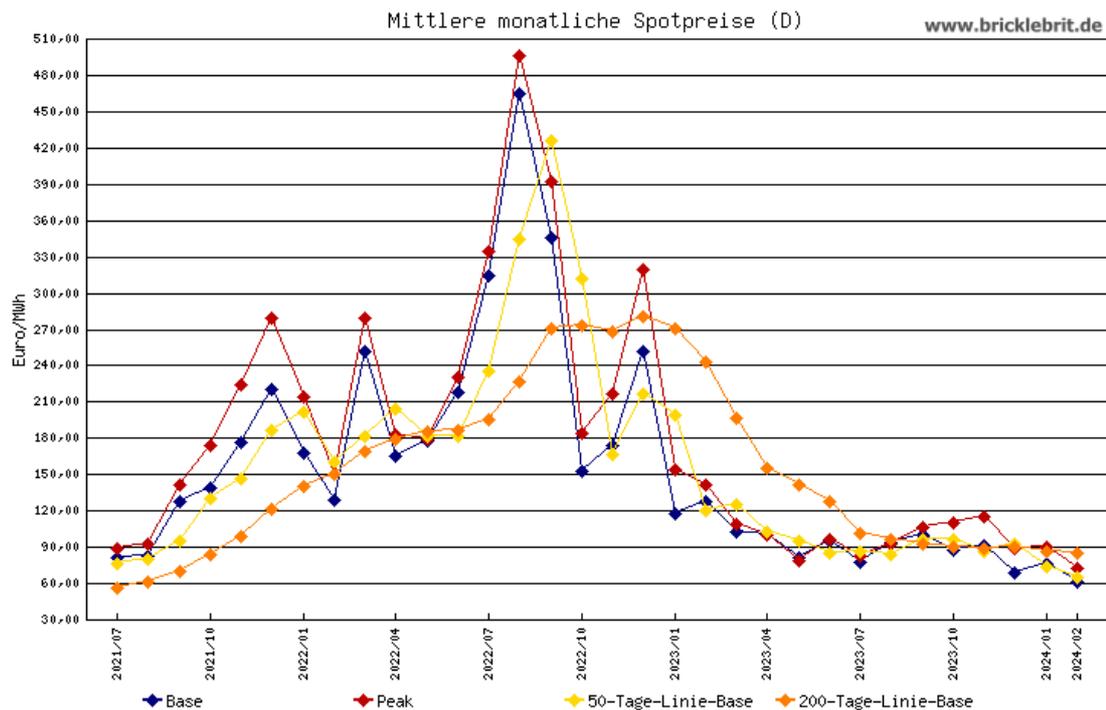
München, den 24.2.2024



Aktuelle Entwicklung bei den Strommarktpreisen und Netzgebühren

In 2022 ist der Strompreis in Deutschland im Rahmen des Ukrainekriegs durch hohe Gaspreise sowie durch zahlreiche aus technischen Gründen abgeschalteten französischen AKW in die Höhe geschossen. Seitdem hat sich der Spotmarktpreis an der Leipziger Strombörse wieder sehr deutlich entspannt.

Leipziger Strombörse (Spotmarkt D)



*Entwicklung des Börsestrompreises (Spotmarkt) von Mitte 2021 bis jetzt
(www.bricklebrit.com/stromboerse_leipzig.html)*

Mit Ausbauplan und Gesetzesänderungen der Bundesregierung für Windkraft und Photovoltaik ist man hinsichtlich der Stromerzeugung auf einem guten Weg. Aufgrund der derzeit tendenziell noch fallenden Gesamtstromverbräuche - aktuell wurden in 2023 nur noch 480 TWh (ohne Eigenverbrauch) am Markt gehandelt, während es 2007 noch 630 TWh waren, und dem absehbaren weiterhin starken Zubau von Windkraft und vor allem Photovoltaik dürften die Preise weiterhin tendenziell weiter leicht nach unten zeigen, so dass auf dem Gebiet der Stromproduktion für die Energiewende Entwarnung gegeben werden kann.

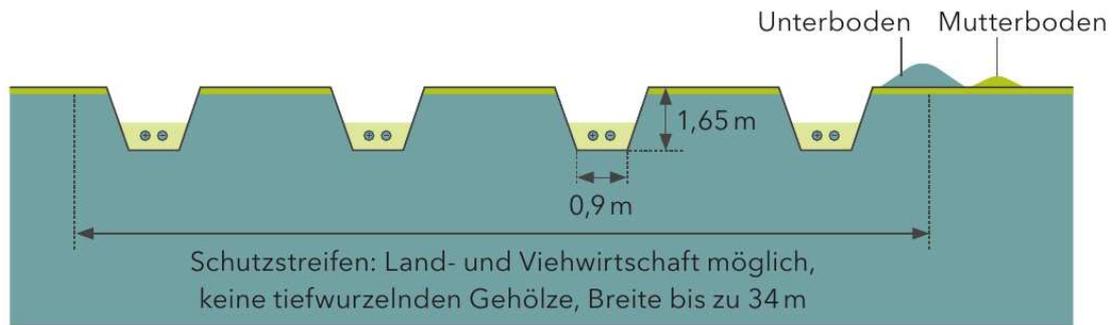


Lediglich beim Thema zeitliche Verteilung des Stroms besteht noch ein Handlungsbedarf. Mit dem forcierten Einbau von Smartmetern und dynamischen Stromtarifen ist aber auch hier eine gewisse Abhilfe in Sicht, auch wenn es hier auf politischer/gesetzlicher Ebene noch Raum nach oben gibt. (Ein anderes VR-Papier beschäftigt sich mit dem Thema Dynamisierung von Netzgebühren im Rahmen von dynamischen Strompreisen.)

Bei den Netzkosten ist leider eine gegenläufige Tendenz zu beobachten. Die Problematik wurde bis Ende 2023 verdeckt, da 3,4 Cent pro kWh aus dem Staatshaushalt für die Stromnetze zugeschossen wurde. Dieser Zuschuss wurde Anfang 2024 gestrichen, mit dem Effekt, dass die Netzentgelte von 3,1 um 3,4 auf 6,5 Cent sich fast verdoppelt haben. Die Netzentgelte müssen nicht nur die zunehmende Ausbauaktivität des Netzes tragen, sondern auch den exponentiell zunehmenden "Redispatch", der aufgrund zu geringer Leitungskapazität bei einem gemeinsamen deutschen Strommarkt zu bezahlen ist. Der Redispatch lässt sich nur zum einen durch eine bessere Lastverteilung (Steuerung der Nachfrage durch dynamische Strompreise) und zum anderen durch einen Netzausbau kompensieren, der aber wiederum Geld kostet. Unterschiedliche Strompreiszonen wie etwa in Norwegen, Schweden oder Italien würden zwar den Redispatch buchhalterisch weitgehend vermeiden, aber das physikalische Problem der unterschiedlichen räumlichen Angebots- und Nachfrageverteilung nicht aus der Welt schaffen.

Herkömmliche HGÜ-Freileitungen und Erdkabel

Bislang kann elektrische Energie über große Entfernungen entweder mit Freileitungen übertragen werden oder mittels Erdkabel. Beides bezeichnet man als HGÜ Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung. Erdkabel sind in der Anschaffung im Vergleich zu Freileitungen sehr teuer und erfordern eine breite Schneise durch die Landschaft, ähnlich wie eine 6-spurige Autobahn, nur dass nach Ende der Bauarbeiten bis auf einen Wartungsweg die ursprüngliche Landnutzung weitgehend wieder hergestellt werden kann. Je größer die Übertragungskapazität, desto breiter die Schneise, denn es müssen mehrere Kabel wegen der Abwärme mit großen Abständen zueinander verlegt werden.



Beispiel für Regelprofil: Stammstrecke - zwei Verbindungen

Erdverkabelung mit bis zu 34 m Trassenbreite
Grafik: Transnet BW, Gleichstrom-Erdkabel Südlink

Sowohl bei Freilandleitungen als auch bei Erdverkabelung muss die elektrische Energie auf Höchstspannung (525 kV) hochtransformiert werden, um den Materialbedarf der Kupferkabel in Grenzen halten zu können. Bei den mittlerweile vorherrschenden verlustarmen Gleichstromleitungen muss der Wechselstrom am Anfang der Leitung von Wechsel- auf Gleichstrom und am Ende wieder von Gleichstrom zu Wechselstrom gewandelt werden, man spricht hier von Konvertern. Vor allem der Weg vom Gleich- zu Wechselstrom ist aufwendig und erst mit der heutigen Leistungselektronik finanziell darstellbar. Vor allem bei der Höchstspannung sind die Konverter sehr teuer und platzintensiv. Sie benötigen ca. 18 m hohe Hallen.

Die Rolle leistungsfähiger Stromnetze als Speicher-Ersatz bei der Energiewende

In der Öffentlichkeit wenig verstanden wird der Zusammenhang, dass die Notwendigkeit der Speicherung volatiler erneuerbarer Energien umso geringer ist, je größer und leistungsfähiger ein Netz ist. Wenn man als Gedankenexperiment die gesamte Welt sich als verlustfreie Kupferplatte vorstellt, dürfte mit einem weltweiten Stromhandel gar kein Speicherbedarf bestehen, denn die Sonne scheint und der Wind weht immer irgendwo, gegessen und geschlafen wird auch immer irgendwo auf der Welt. Die Verteilung von Strom ohne Speicherung ist grundsätzlich der Speicherung erst einmal vorzuziehen, da die Speicherung mit Batterien und Pumpspeicherkraftwerken sowohl zeitlich als auch hinsichtlich Speicherkapazität nur in Grenzen möglich ist. Die Speicherung via Wasserstoff ist zwar in großer Menge technisch möglich, doch die Elektrolyse und die Wasserstoff-Gaskraftwerke weisen einen im Vergleich zu Netzen schlechten Wirkungsgrad von bestenfalls 50% auf, während in Netzen nur wenige Prozent des Stroms "hängenbleiben".



Eine weltweite Verteilung ist natürlich nicht realistisch, aber auf europäischer Ebene ist ein solches Verbundnetz eher denkbar und in Ansätzen schon Realität. Um jedoch in der Zukunft bei geschätzt 80% volatilen Energien (100% abzüglich Wasserkraft und Biomasse) einen ernsthaften europaweiten Ausgleich von Angebot und Nachfrage zu bekommen, dürfte eine Verzehn- bis Verfünfzehnfachung der Fern-Übertragungskapazitäten erforderlich sein.

Leitungen statt Speicher - Vom Regen unter die Traufe?

Eine Studie der ETH Zürich und des Imperial College London rechnet vor, dass man den Windstrom in Europa so gleichmäßig verteilen könnte, dass europaweit praktisch vernachlässigbare 20 GW an Schwankungsbreite übrig blieben.

(www.spiegel.de/wissenschaft/natur/europa-wie-windstrom-gleichmaessiger-fliessen-koennte-a-1158584.html)

Geht man davon aus, dass die Hälfte des europäischen Strombedarfs an Regelleistung werktags von ca. 800 GW von 2045 über Windkraft erzeugt wird und bei diesem sehr groben Modellansatz der Strom über durchschnittlich 1000 km transportiert werden muss, so wären - entsprechend der Kosten bei SüdLink - bei 5 Mrd EUR pro Gigawatt und 1000 km zwei Billionen EUR erforderlich. Die hier unterstellten Windkraftanlagen für eine Durchschnittsleistung von 400 GW und 2500 EUR/kWh kosten dagegen "nur" rund 1 Billion EUR.

Wenn man eine installierte Leistung von 400 GW ohne große Fernleitungen und mit Wasserstoff-Gaskraftwerken vor Ort überbrückt, dann fallen für 400 GW Kraftwerkskapazität "lediglich" rund 0,5 Billionen EUR an.

Somit ist das Konzept der Verteilung der Windenergie über Fernstromleitungen mit Erdverkabelung wirtschaftlich nicht darstellbar.

Noch nicht betrachtet ist hierbei die Zeitschiene, was die Genehmigungsprozesse von Erdverkabelung und erst recht Freileitungen angeht. Nach den einschlägigen deutschen Gesetzen muss für Höchstspannungsleitungen (größer 110 kV) eine Planfeststellung mit Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt werden. Somit wird man immer hinter dem tatsächlichen Bedarf herhinken. Die Zeitschiene für die großen Stromleitungen ist deutlich länger als die für den Bau von Gaskraftwerken und Windkraftanlagen, für Photovoltaik ohnehin. Somit können Fernstromleitungen der bisherigen Bauart keinen grundlegenden Beitrag zur Entschärfung der Volatilität leisten, obwohl dies aus technischer Sicht möglich und angesichts des hohen Wirkungsgrades auch sinnvoll wäre.

Entwicklung der Supraleitung

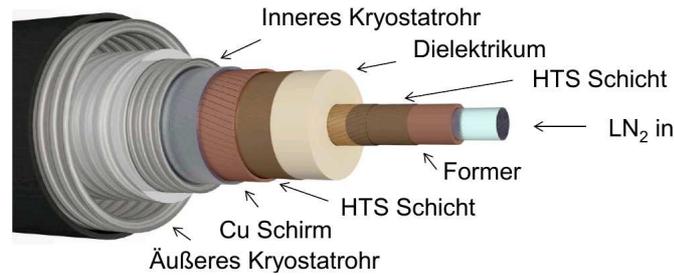


1986 entdeckte der deutsche Forscher Georg Bednorz, dass bestimmte Materialien bei tiefen, aber deutlich höheren Temperaturen als beim absoluten Nullpunkt verlustfrei Strom leiten. 1987 erhielt er hierfür den Nobelpreis. Bei der Supraleitung geht es nicht nur um einen geringen Widerstand, sondern der Widerstand beträgt wirklich Null. Dies eröffnet die Möglichkeit, mit einer Dicke von wenigen Atomlagen des Materials mehrere Gigawatt an Leistung zu übertragen. Nach der Entdeckung konnte man schon nach einigen Jahren die sog. Sprungtemperatur, also die Temperatur, ab der das Material supraleitend wird, so weit nach oben treiben, dass der in Industrie oder z. B. Krankenhäusern weit verbreitete flüssige Stickstoff schon für die Kühlung ausreichend ist. Doch es dauerte noch Jahrzehnte, bis aus den erfolgreichen Labortests ein marktfähiges Produkt entstand, denn die Produktion des spröden Materials mit erforderlichen Genauigkeiten im Nanometerbereich ist extrem anspruchsvoll. Vor allem die Materialeigenschaften, vor allem die geforderte Elastizität für ein einfach zu verlegendes Kabel, waren lange ein Problem.

Der aktuelle Stand ist, dass mehrere Kabel mit Längen von rund 1 km seit ca. 2010 im Einsatz sind. In München gibt es das Projekt "SuperLink", bei dem zwei Umspannwerke mit einem 15 km langen Supraleitungskabel (3-phasig 110 kV 0,5 GW) durch bestehende Kabelschächte verlegt werden soll. Das 200 m Testkabel ist mittlerweile schon produziert worden und wird derzeit in einem Umspannwerk für einige Monate getestet.

Supraleitungskabel, Aufbau und Vorteile

Ein Supraleitungskabel kann man sich stark vereinfacht vorstellen wie ein elastisches Leerrohr zum Verlegen von Kabeln aus dem Baumarkt, in dem der flüssige Stickstoff fließt, und das von einem dünn beschichteten Band umwickelt wird, vergleichbar mit einem alten Videoband (Trägermaterial Kunststofffolie, Beschichtung aus Metall) - nur dass es sich natürlich um ganz andere Materialien handelt. Um dieses Innere des Kabels wird wie bei einem herkömmlichen Stromkabel ein Isolator gewickelt und um den Isolator eine Isolationsschicht, um einen möglichst geringen Kälteverlust zu erzielen.



Aufbau eines Supraleitungskabels

Neben einpoligen Kabeln gibt es für die Wechselstromübertragung dreiadrige und für die Gleichstromübertragung (bislang noch nicht realisiert) zweiadrige Kabel.

Ein Supraleitungskabel lohnt sich vor allem bei großen zu übertragenden Leistungen, denn der Aufwand der Kühlung ist weitgehend unabhängig von der transportierten Strommenge. Pro Kabel wären bei 110 kV Spannung und 50.000 kA Strom sogar 5,5 GW möglich, doch laut Stromnetzbetreiber ist der Ausfall einer Leitung von mehr als 2 GW für die Netzstabilität kritisch zu sehen. Für eine Fernübertragung wird man somit ein einzelnes Kabel für 2 GW auslegen, wobei bei Gleichstrom der Plus- und Minuspol in einem gemeinsamen Kabel mit gemeinsamer Kühlung laufen kann.

Die technischen Vorteile gegenüber einer herkömmlichen Erdverkabelung sind zahlreich:

- Da der Strom widerstandsfrei fließen kann, entsteht keine Abwärme.
- Da keine Abwärme entsteht, können die Kabel beliebig nahe nebeneinander verlegt werden. Die umgebende Erde wird als Wärmeableiter nicht benötigt. Eine Beeinträchtigung landwirtschaftlicher Flächen (Austrocknung durch konstante Wärmezufuhr) findet nicht statt.
- Bei Wechselspannung entstehen keine elektromagnetischen Felder, da ein elektromagnetisches Feld nach dem Prinzip der Energieerhaltung nur bei einem Widerstand des Kabels entstehen kann. (Bei Gleichstromübertragung entstehen ohnehin keine Wechselfelder.)
- Im Havariefall muss das Kabel nicht extra vom Netz genommen werden, da bei der Beschädigung der äußeren Kabelschicht (Wärmeisolator) das Kabel selbst nach Überschreiten der Sprungtemperatur sofort zu einem Isolator wird.



- Die Materialkosten eines Supraleitungskabels sind praktisch vernachlässigbar, da das teure supraleitende Material nur mit der Dicke von wenigen Atomlagen aufgedampft wird. Kupfer wird zwar in Kombination mit anderen Metallen auch benötigt, aber nur als Trägermaterial in einer ebenfalls sehr dünnen Schicht.
- Den Verlusten durch den elektrischen Widerstand steht bei der Supraleitung zwar die durch die erforderliche Energie für das Kühlen gegenüber, doch ist dieser tendenziell Aufwand geringer, vor allem bei hohen Übertragungsleistungen.
- Die Abmessungen - ca. 18 cm Durchmesser für ein 2 GW Gleichstromkabel - und die nicht erforderlichen wärmebedingten Abstände der Kabel zueinander ermöglichen eine schmale Trasse für die Erdverkabelung - quasi ein Feldweg statt einer Autobahn.
- Die Supraleitungen benötigen keine Höchstspannungen. Im Prinzip reicht 50 kV Mittelspannung aus, aus Kompatibilitätsgründen mit dem bestehenden Verteilnetz wird man jedoch voraussichtlich meist 110 kV wählen. Dies verringert bei Gleichstrom den Aufwand für die Konverterstationen und verringert die Dicke der Isolatorschicht.
- Aufgrund der Gesetzeslage im deutschen öffentlichen Verwaltungsrecht ist durch die Begrenzung auf maximal 110 kV weder eine Planfeststellung noch eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich.

Bei Wechselstromkabeln benötigt die Supraleitung ca. alle 10 km, bei Gleichstrom ca. alle 30 km eine Kühlstation. Diese ist jeweils nicht viel größer als eine Doppelgarage.

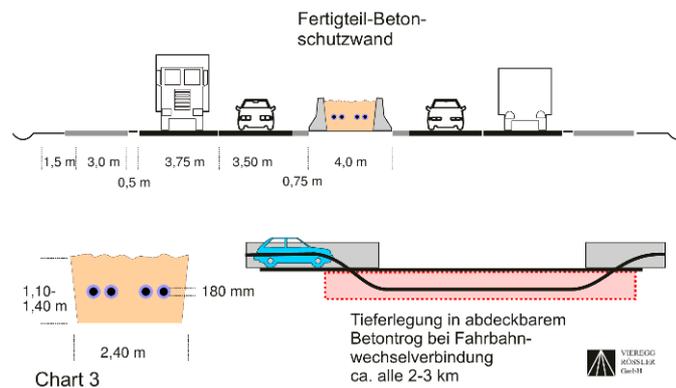
Trassierung des Supraleitungskabels

Bei der klassischen Erdverkabelung machen die Trassierungskosten ungefähr 70% aus, während 30% der Kosten für Kabel und Konverter anfallen. Mit einer Supraleitung wird die erforderliche Schneise deutlich kleiner. Doch das Problem der Beanspruchung von Privatgrund, im englischen Sprachraum treffend als (fehlender) "way of right" bezeichnet, bleibt weiterhin bestehen. Dadurch ist zu befürchten, dass auch Supraleitungskabel ähnlich lange für die Genehmigung benötigen, auch wenn am Ende dann der Bau mit deutlich weniger Eingriffen verbunden ist.

Weil die Supraleitungskabel hinsichtlich der Abmessungen so klein sind, ist die Idee nun, dass man bestehenden, im öffentlichen Eigentum befindlichen Verkehrsflächen folgen kann, also dort, wo die Öffentliche Hand heute

schon den "way of right" hat. Hierfür bieten sich vor allem anbaufreie kreuzungsfreie Verkehrswege an und hier besonders Autobahnen, während Landstraßen und Bahnlinien häufig durch beengtes bebautes Gebiet verlaufen. Während am Rand der Autobahnen immer wieder Hindernisse im Weg liegen (Abfahrten, Parkplätze, Brückenköpfe), bietet sich der Autobahnmittelstreifen für die Verlegung an, vor allem seitdem statt dem Grünstreifen mit Leitplanken aus Gründen der Verkehrssicherheit die sog. Betonschutzwände mit einem Erdwall dazwischen errichtet wurden. Der Betonschutzwand ist im Prinzip ausreichend groß, um mehrere Supraleitungskabel aufnehmen zu können. Der Erdwall läuft im Prinzip hindernisfrei durch Deutschland.

Im Bereich der Brücken - die meisten Autobahnbrücken sind in Deutschland Hohlkastenbrücken - können die Kabel in den begehbaren Hohlkästen verlegt werden. Dasselbe gilt für Tunnels, hier sind meist auch größere Kabelschächte oder freie Bereiche des Lichtraums vorhanden, die Supraleitungskabel noch aufnehmen könnten.



Supraleitungskabel im Autobahn-Mittelstreifen nach VR

Kostenvergleich Supraleitung - Erdverkabelung

In einer kleinen 11-seitigen Studie mit dem Titel "Vergleich Investitionskosten HGÜ-Erdkabel versus Supraleiter auf Autobahn-Mittelstreifen" haben VR einen Kostenvergleich unter heutigen Bedingungen aufgestellt. Als Ergebnis kam hierbei heraus, dass zwar das Supraleitungskabel gegenüber einem klassischen Erdkabel momentan noch deutlich teurer ist, jedoch unter Berücksichtigung des Löwenanteils der Kosten der Erdverkabelung, nämlich der Trassierung, schon heute ein leichter Kostenvorteil von ca. 20% besteht. Dies wird sich ändern, wenn die produzierten Längen des Supraleitungskabels größer werden, denn wie oben beschrieben bestehen die derzeit hohen Kosten aus den Produktionskosten und nicht aus den Materialkosten.



Visiert man eine Verhundertfachung der Produktion an (nicht die für den Anfang beim genannten Kostenvergleich angenommenen 60 km, sondern 6.000 km), dann dürften die Gesamtkosten denen der Kosten einer Freileitung entsprechen. In europäischen oder weltweiten Maßstab, wo es um hunderttausende von Kabel-Kilometern geht, dürfte man die Kosten von Freileitungen dann sogar weit unterbieten - immer vorausgesetzt, die Kabel werden kostengünstig in den Mittelstreifen der Autobahn per Wanderbaustelle "eingepflügt". Dies wäre dann der Moment, wo die Energiewende aus ökonomischer Sicht auf ein ganz neues Niveau gehoben werden könnte, weil das Thema Stromleitungen als Voraussetzung für einen geringeren Speicherbedarf der volatilen Energien sowohl hinsichtlich Kosten als auch hinsichtlich Zeitschiene gelöst wäre.

Zeitschiene und Aufgaben für die nächsten Jahre

Mit dem Abschluss der Testphase des Kabels in München in wenigen Monaten kann man davon ausgehen, dass keine unlösbaren Probleme bei der Entwicklung weiterer Supraleitungskabel zu erwarten sind. Es wäre nun eine Pilotstrecke mit einer noch überschaubaren Länge von 60 bis 80 km auszuwählen. Für die Entwicklung und Spezifizierung/Genehmigung ist mit rund 3 Jahren zu rechnen, plus 1 Jahr Produktion und Testphase eines kurzen Abschnitts. Die eigentliche Verlegung auf dem Autobahnmittelstreifen wäre dann eher eine Frage von Wochen und Monaten. Größere Genehmigungszeiträume würden bei maximal 110 kV entfallen, während die Umsetzung eines Zwischen-Teilstücks einer der geplanten oder schon in Bau befindlichen großen Gleichstrom-Stromtrassen aufgrund der zu hohen Spannung weiterhin den üblichen Genehmigungsprozess erfordern würde. Aufgrund der geforderten Kürze der Pilotstrecke würde man somit ersteinmal ein Wechselstromkabel realisieren wollen.

In einem weiteren Schritt wäre dann die Spezifikation eines künftigen Standard-Gleichstromkabels für neue Großprojekte mit wahrscheinlich 110 kV und 2 GW Leistung anzugehen. Die deutschen Verwaltungsgesetze müssen hierfür nicht angepasst werden. Was allerdings erforderlich sein wird, sind Ausführungsbestimmungen im Verantwortungsbereich des für die Autobahnen zuständigen Bundesverkehrsministeriums. So müsste geklärt werden, unter welchen Voraussetzungen Netzbetreiber auf den Autobahnmittelstreifen "zugreifen" dürfen, wie die Anmeldung eines solchen Projektes ablaufen muss und wie sowie unter welchen Verantwortlichkeiten der Einbau des Kabels in Form einer Wanderbaustelle stattfinden wird.

Wenn der politische Wille vorhanden ist, dann sollten ein 2 GW Standard-Gleichstromkabel in wenigen Jahren verfügbar und die Bestimmungen zum Verlegen festgelegt worden sein. Ab dann lässt sich mit sehr kurzen Fristen

von ca. 1 bis 2 Jahren nahe am tatsächlichen Bedarf neue Fernleitungen durch Deutschland und hoffentlich auch bald durch ganz Europa ziehen.

Weitere VR-Papiere:

Vergleich Investitionskosten HGÜ-Erdkabel versus Supraleiter auf Autobahn-Mittelstreifen, 8.10.2022

Diskussionspapier zur Senkung der Strompreise sowie der Dynamisierung von Abgaben und Verwaltungskosten im Rahmen dynamischer Strompreise, 26.10.2023, überarbeitet 12.2.2024

Weiterführende Quellen zu Supraleitungskabel:

(???)