

Factsheet

Kabelstudie Schweiz: Technische und betriebliche Limiten von Erdkabeln im Schweizer Übertragungsnetz

Datum 9. April 2025

1 Ausgangslage

1.1 Wachsender Erdkabelanteil im Schweizer Übertragungsnetz

Der Neubau von Erdkabeln im Schweizer Übertragungsnetz ist nur noch in sehr beschränktem Umfang möglich. Das zeigt die Kabelstudie von Swissgrid. Als innovatives Unternehmen steht Swissgrid neuen Technologien offen gegenüber und prüft bei Netzprojekten sowohl Freileitungs- als auch Verkabelungsvarianten. Ob ein Leitungsabschnitt als Erdkabel oder als Freileitung realisiert wird, entscheidet der Bundesrat im Sachplanverfahren. Aktuell sind im Schweizer Übertragungsnetz 42 Kilometer Erdkabel gebaut. Die Realisierung von weiteren rund 250 Kilometern ist bereits behördlich festgelegt, beispielsweise die neue Kabelleitung in der zweiten Röhre des Gotthard-Strassentunnels.

1.2 Kabelstudie zeigt Auswirkungen im Betrieb und im Störfall

Swissgrid weist seit Längerem auf die technischen und betrieblichen Herausforderungen hin, welche die Zunahme von Erdkabeln im Höchstspannungsnetz mit sich bringt. Um die Diskussion zur Technologiewahl zu versachlichen und die Belastbarkeit der Entscheidungsgrundlagen zu stärken, hat Swissgrid eine detaillierte, auf Szenarien basierende Kabelstudie erarbeitet. Die Studie wurde durch die Firma RTEinternational validiert und mit dem Bundesamt für Energie (BFE) und der Eidg. Elektrizitätskommission (EiCom) gespiegelt. Zudem wurden die Studienresultate im Auftrag des BFE durch die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) bestätigt.

Die vorliegende Kabelstudie zeigt: Ein zu hoher Erdkabelanteil im Übertragungsnetz wirkt sich negativ auf die Netzstabilität und die Versorgungssicherheit der Schweiz aus. Grund dafür sind die spezifischen physikalischen Eigenschaften von Erdkabeln, die sowohl den Betrieb des Übertragungsnetzes wie auch die Störungsbehebung deutlich erschweren. Da diese physikalischen Eigenschaften mit zunehmender Spannung überproportional steigen, sind die technischen und betrieblichen Herausforderungen einer zunehmenden Verkabelung im Höchstspannungsnetz (380 und 220 Kilovolt) besonders gross. Auf niedrigerer Spannungsebene (bis 145 Kilovolt) sind sie hingegen deutlich kleiner.

2 Technische und betriebliche Limiten im Überblick

2.1 Zuverlässiger und stabiler Netzbetrieb: Spannungshaltung

Eine konstante Spannung ist für das zuverlässige Funktionieren des Schweizer Übertragungsnetzes fundamental. Erdkabel erhöhen die Spannung aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften stärker als Freileitungen. Ausserdem reduzieren lange Erdkabel entweder die effektive Leistung einer Leitung (Wirkleistung) oder

sie erfordern Anlagen zur Kompensation der Blindleistung. Diese Herausforderung verstärkt sich proportional zur Länge einer Erdkabelleitung.

Die Spannung wird hauptsächlich von Generatoren in Kraftwerken geregelt, welche die elektrische Energie direkt ins Übertragungsnetz einspeisen. Ist mehr Blindleistung im Netz, als die Kraftwerke absorbieren können, drohen Überspannungen. Damit wächst die Gefahr, dass störende Schwingungen und Schwingungsverstärkungen Instabilitäten von Kraftwerken und des Netzbetriebs verursachen. Dies kann zu Netzausfällen und Schäden an Anlagen oder die Auslösung von Schutzeinrichtungen und damit zum Abschalten von Netzkomponenten führen. Bereits heute gibt es Situationen, bei denen das Potenzial von Kraftwerken, Blindleistung zu absorbieren, nicht ausreicht, um die Spannung in allen Regionen innerhalb der zulässigen Limiten zu halten. Swissgrid plant deshalb bereits heute Investitionen in zusätzliche Anlagen zur Blindleistungskompensation.

Im Vergleich zu Freileitungen erzeugen Erdkabel mehr Blindleistung. Grund dafür ist ihre kompakte Bauweise: Ihre Leiter liegen viel dichter beieinander als bei Freileitungen, und sie sind von einem dicken Isolationsmantel umhüllt. Damit erhöht sich ihre Kapazität – vereinfacht gesagt ihre Fähigkeit, elektrische Ladung aufzunehmen und zurückzugeben – und damit auch ihre Blindleistung. Mit weiter zunehmender Verkabelung des Übertragungsnetzes würde der Bedarf an Kompensationsanlagen deshalb nochmals massiv ansteigen. Dies würde die Komplexität des Betriebs und damit auch die Fehleranfälligkeit des Übertragungsnetzes erhöhen. Ausserdem benötigen Kompensationsanlagen viel Platz, welcher bei den Unterwerken – den dafür geeignetsten Standorten – häufig fehlt, und sie verursachen Lärmemissionen. Die Kabelstudie zeigt, dass die zusätzlich notwendigen Kompensationsanlagen mit grossmehrheitlicher Erdverkabelung Kosten von rund 1,4 Mrd. Franken verursachen würden. Generell gilt, dass Erdkabel über den gesamten Lebenszyklus betrachtet zwischen 2- und 10-mal so teuer sind wie gleich lange Freileitungen. Diese Mehrkosten für Erdkabel müssen von allen Stromkonsumentinnen und -konsumenten bezahlt werden.

2.2 Zuverlässiger und stabiler Netzbetrieb: Resonanzen

Jede technische Infrastruktur hat eine so genannte Eigenfrequenz, mit der sie, einmal «angestossen», von selbst «schwingt» – ähnlich einer Schaukel, die nach dem Anschubsen von selbst in ihrer Eigenfrequenz hin und her pendelt. Auch elektrische Netze haben Eigenfrequenzen, die als Resonanzfrequenzen bezeichnet werden. Damit es im Übertragungsnetz nicht zu Störungen kommt, müssen dessen Resonanzfrequenzen einen möglichst grossen Abstand zu den Frequenzen jener Schwingungen haben, die störend auf die Leitungen einwirken können. Dazu gehören die im Netz vorhandenen, sogenannten Oberschwingungen. Sie entstehen durch das Zusammenspiel vieler unterschiedlicher elektrischer nichtlinearer Verbraucher oder Leistungselektronik wie Gleichrichter, Frequenzrichter oder Motorsteuerungen.

Ein Erdkabel im Höchstspannungsnetz hat, wie oben erwähnt, aufgrund seiner kompakten, massiven Bauweise grundlegend andere physikalische Eigenschaften als eine Freileitung. So ist auch die Resonanzfrequenz von Netzen mit Erdkabeln deutlich tiefer als jene von Netzen, die ausschliesslich aus Freileitungen bestehen – vergleichbar mit einer Stimmgabel, die «tiefer summt», je grösser ihre Masse ist. Doch je tiefer die Resonanzfrequenz von Netzen ist, desto näher liegt sie an der Frequenz der potenziell störenden Fremdeinwirkungen. Damit besteht bei Erdkabeln das Risiko von gefährlichen Schwingungsverstärkungen – vergleichbar mit dem Effekt von Soldaten, die im Gleichschritt über eine Brücke gehen: Wenn sich die Frequenz ihrer Schritte der Eigenfrequenz der Brücke angleicht, können Schwingungsverstärkungen die Brücke zum Einsturz bringen.

Steigt die Anzahl Erdkabelkilometer im Übertragungsnetz einer bestimmten Region, sinkt dessen Resonanzfrequenz insgesamt ab. Damit wächst das Risiko potenziell störender Resonanzen und Schwingungsverstärkungen – und damit die Gefahr von Netzausfällen oder Schäden an Netzkomponenten und elektrischen Geräten. Die physikalischen Phänomene, die zu Resonanzproblemen führen, können – im Unterschied zur Blindleistung – nicht mit Kompensationsanlagen gedämpft werden. Dazu sind nur sogenannte Filter in der Lage. Deren Einführung in das Netz ist jedoch riskant, da sie je nach Zustand des Netzes helfen oder stören können. So kann es zum Beispiel vorkommen, dass ein Filter keine Dämpfung bietet oder sogar Schwingungen verstärkt, wenn bestimmte Leitungen ausser Betrieb sind.

2.3 Wiederinbetriebnahme von Leitungen nach Störungen oder geplanten Abschaltungen

Regional begrenzte Störungen in der Stromversorgung können zum Beispiel durch Naturereignisse (z.B. Blitzeinschlag, Eisbehang, umstürzende Bäume) ausgelöst werden. Im Übertragungsnetz mit Abstand am häufigsten sind von Swissgrid geplante Leitungsabschaltungen, um Wartungsarbeiten durchzuführen oder um Netzausbauprojekte realisieren zu können. In all diesen Fällen ist ein rasches und möglichst reibungsloses (Wieder-)Einschalten der Leitungen wichtig. Dabei entstehen elektrische Schwingungen.

Da Netze mit Erdkabeln im Höchstspannungsnetz wie oben beschrieben eine tiefere Resonanzfrequenz aufweisen, ist das Verstärkungs- und Schadenspotenzial dieser Schwingungen deutlich grösser. Bei jeder Wiederinbetriebnahme von Erdkabeln nach Störungen oder nach geplanten Abschaltungen drohen deshalb Schäden. Dabei fällt zusätzlich ins Gewicht, dass Erdkabel bei Beschädigungen oft Wochen bis Monate ausser Betrieb bleiben, da ihre Reparatur durch die Verlegung im Boden deutlich aufwändiger und teurer ist als jene von Freileitungen.

2.4 Netzwiederaufbau nach einem Blackout

Unter Blackouts werden grossräumige Störungen der Stromversorgung verstanden, welche durch den gleichzeitigen Ausfall mehrerer Netzelemente des Übertragungsnetzes ausgelöst werden. Im Unterschied zu regional begrenzten Störungen oder geplanten Abschaltungen sind Blackouts sehr selten. Hinsichtlich ihrer Auswirkungen können sie aber dramatisch sein. Deshalb ist ein rascher und möglichst reibungsloser Netzwiederaufbau nach einem grossflächigen Blackout für die Versorgungssicherheit der Schweiz existenziell. Für dieses Szenario hat Swissgrid das Schweizer Übertragungsnetz in vier Netzwiederaufbauzellen aufgeteilt. Jede dieser Zellen umfasst ein Gebiet mit sogenannten «schwarzstartfähigen» Kraftwerken. Diese können nach dem Blackout mit Hilfe ihrer eigenen Stromproduktion die nötige Frequenz, Spannung und Leistung aufbauen und damit umliegende Netze sukzessive wiederaufbauen und mit elektrischer Energie versorgen.

Die Kabelstudie Schweiz zeigt, dass die Resonanzeffekte je nach Länge der Kabel und der Nähe zu schwarzstartfähigen Kraftwerken die Fähigkeit einer Zelle zum Netzwiederaufbau nach einem grossflächigen Blackout komplett verunmöglichen können.

3 Blick in die Zukunft

Das Stromsystem befindet sich in der grössten Transformation seiner Geschichte. Vor diesem Hintergrund befasst sich Swissgrid auch mit den übergeordneten Entwicklungen im Bereich der Höchstspannungs-Übertragungstechnologie. Als innovatives Unternehmen steht Swissgrid neuen Technologien offen gegenüber. Für die Planung der laufenden Projekte setzt Swissgrid auf geprüfte und bewährte Technologien, beobachtet aber den Technologiemarkt und beteiligt sich an Innovationsprozessen und Pilotprojekten. Dafür steht Swissgrid im engen Austausch mit den europäischen Netzbetreibern und führt einen fachlichen Dialog mit Behörden, Forschung und Industrie. Mit Blick auf die Herausforderungen von Erdkabeln im Schweizer Übertragungsnetz ist aber klar festzuhalten: Die in der Kabelstudie aufgezeigte Problematik erfordert im Sinne einer nachhaltigen und sicheren Netzentwicklung zwingend – und schnell – entsprechende Rahmenbedingungen für Verkabelungen.

Die Kabelstudie zeigt, dass der Anteil an Erdkabeln im Übertragungsnetz aus technischer und betrieblicher Sicht tief gehalten werden muss. Eine unkontrollierte Verkabelung nach dem Prinzip «first come, first served» hat negative Auswirkungen auf die Netzstabilität und die Versorgungssicherheit der Schweiz. Bei künftigen Netzprojekten ist daher aus einer gesamtheitlichen Perspektive sorgfältig abzuwägen, an welchen Stellen im Übertragungsnetz eine Erdverkabelung eine notwendige und akzeptable Umsetzungsvariante darstellt.

Swissgrid strebt die Schaffung einer Systematik an, welche die technisch-betrieblichen Rahmenbedingungen für Verkabelungen definiert. Bei künftigen Netzbauprojekten müssen spätestens im Rahmen der Vorprojekte sowie im Sachplanverfahren fundierte Entscheidungsgrundlagen für die Berechnung der akzeptablen Kabellänge vorliegen – in Bezug zum Gesamtnetz wie auch zu anderen geplanten Netzprojekten. Diese sollen mit weiteren Rahmenbedingungen wie z.B. raumplanerischen Aspekten oder bestehenden

Infrastrukturverflechtungen zu einem umfassenden, auf die Erfordernisse des Gesamtsystems ausgerichteten Kriterienkatalog verknüpft werden.

Da sich Erdkabel nicht nur auf das lokale Netz, sondern auch auf weit entfernte Netzregionen auswirken können, ist eine Quantifizierung der maximal möglichen Kabellängen pro Region nicht möglich. Die Systematik soll aufzeigen, bei welchen Leitungen eine Verkabelung aus technisch-betrieblichen Gründen ausgeschlossen werden muss. Swissgrid wird die Systematik mit den Behörden abstimmen und den verschiedenen Anspruchsgruppen und der breiten Öffentlichkeit vorstellen.

4 Fazit

Im Schweizer Übertragungsnetz ist der Neubau von Erdkabeln nur noch in sehr begrenztem Umfang möglich. Die vorliegende Kabelstudie Schweiz bestätigt die grossen technischen und betrieblichen Herausforderungen einer zunehmenden Verkabelung im Höchstspannungsnetz, auf welche Swissgrid seit Längerem nachdrücklich hinweist. Diese Herausforderungen gründen in den spezifischen physikalischen Eigenschaften von Erdkabeln. Die Studie kommt zu folgenden Ergebnissen:

1. **Mehr Anlagen, höhere Komplexität und Kosten:** Erdkabel erzeugen deutlich mehr Blindleistung als Freileitungen. Um schädliche Überspannungen und Netzausfälle zu vermeiden, muss diese Blindleistung mit zusätzlichen Kompensationsanlagen absorbiert werden. Kompensationsanlagen erhöhen die Komplexität des Netzbetriebs, verursachen hohe Kosten, benötigen viel Platz und erzeugen Lärm.
2. **Erschwerter Netzwiederaufbau nach Blackout:** Erdkabel senken die Resonanzfrequenzen im Übertragungsnetz. Damit steigt das Risiko, dass nach einem Blackout aufgrund von Resonanzeffekten der Netzwiederaufbau ganzer Regionen verunmöglicht wird. Zudem erhöhen die Resonanzeffekte das Risiko von Schäden an Netzkomponenten und elektrischen Geräten.
3. **Je tiefer der Kabelanteil, desto stabiler der Netzbetrieb:** Aufgrund der in der Kabelstudie nachgewiesenen Phänomene muss der Anteil an Erdkabeln im Übertragungsnetz tief gehalten werden.
4. **Planung mit Weitsicht:** Eine unkontrollierte Verkabelung nach dem Prinzip «first come, first served» hat negative Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit der Schweiz. Swissgrid strebt in Abstimmung mit den Behörden eine Systematik an, um bei künftigen Netzprojekten aus einer gesamtheitlichen Perspektive abwägen zu können, an welchen Stellen im Übertragungsnetz eine Erdverkabelung eine notwendige und akzeptable Umsetzungsvariante darstellt.
5. **Längere Reparaturzeiten im Falle von Schäden:** Während Freileitungen bei einer Störung innerhalb weniger Minuten oder Stunden wieder verfügbar sind, kann es bei Erdkabeln Wochen bis Monate dauern. Denn die Störung eines Erdkabels ist meist mit einer Beschädigung verbunden.

Die Ergebnisse der Studie stützen das im Rahmen der Vernehmlassungsvorlage des Elektrizitätsgesetzes für den Um- und Ausbau der Stromnetze («Netzexpress») in die Diskussion eingebrachte Prinzip, wonach im Übertragungsnetz künftig ein Freileitungsgrundsatz gelten soll und Erdkabel nur geprüft werden müssen, wenn die entsprechenden Kriterien erfüllt sind.