

Beilage 3

Freileitungen und Kabelleitungen im Übertragungsnetz

Stärken und Schwächen unterschiedlicher Bauarten

Autor: Sandro Dinser

Version: 1.0



Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	5
1.1. Aufgabe der Swissgrid	5
1.2. Ziel dieses Dokuments	5
2. Wer legt fest, wo eine Freileitung und wo eine Kabelleitung zu bauen ist?	7
2.1. Infrastruktur und betroffene Parteien	7
2.2. Die Suche nach der Lösung mit der höchsten Akzeptanz	8
3. Wie funktioniert ein elektrisches Netz?	11
3.1. Das elektrische Netz	11
3.2. Drehstrom	11
3.3. Bau, Betrieb und Instandhaltung von Leitungen	11
4. Freileitung	13
4.1. Funktionsprinzip	13
4.2. Komponenten	13
4.3. Bau von Freileitungen	14
4.4. Netzbetrieb und Instandhaltung der Leitungen	16
4.4.1. Netzbetrieb	16
4.4.2. Instandhaltung	16
5. Kabelleitung	17
5.1. Funktionsprinzip	17
5.2. Komponenten	18
5.2.1. Kabel	18
5.2.2. Muffen	20
5.3. Bau von Kabelleitungen	23
5.3.1. Einleitung	23
5.3.2. Rohrblock	24
5.3.3. Infrastrukturkanal	26
5.3.4. Horizontal-Spülbohr-Verfahren	30
5.3.5. Mikrotunneling	32
5.3.6. Klassischer Tunnel- und Stollenbau für lange Strecken	34
5.4. Vergleich der Bauarten	36
5.5. Netzbetrieb und Instandhaltung der Kabelleitungen	37
5.5.1. Netzbetrieb	37
5.5.2. Instandhaltung der Kabelleitungen	37
6. Übergangsbauwerk	38

7. Technische Aspekte	39
7.1. Verfügbarkeit	39
7.2. Kompensation der Blindleistung	40
7.2.1. Grundlagen der Elektrotechnik	40
7.2.2. Ein Wasserwerk als Analogie zu einem elektrischen Netz	41
7.3. Verluste	44
7.3.1. Einführung und Übersicht	44
7.3.2. Klassifizierung der Verlustkomponenten	44
7.3.3. Beispiel: 1.5 km lange Leitung mit 380 kV	44
7.4. Elektrische Schwingung	45
8. Kostenvergleich von Leitungen	46
8.1. Lebenszyklus	46
8.2. Barwertmethode	46
9. Schlussbemerkungen	47
10. Literaturverzeichnis	48
11. Anhang	49
11.1. Glossar	49
11.2. Abkürzungsverzeichnis	50
11.3. Rechtsgrundlagen im Bereich Stromversorgung und Elektrizität	51

1. Einführung

1.1. Aufgabe der Swissgrid

Swissgrid ist die Betreiberin des Schweizer Übertragungsnetzes. Sie ist zusammen mit den Kraftwerken und den Verteilnetzbetreibern verantwortlich für eine sichere Versorgung aller Stromkonsumenten. Swissgrid hat die Aufgabe, eine Verbindung zwischen den grossen Schweizer Kraftwerken und den Verteilnetzen sicherzustellen. Weiter sorgt sich Swissgrid darum, dass das Schweizer Übertragungsnetz gut mit den ausländischen Netzen verknüpft ist. So kann die Schweiz je nach Bedarf Strom im- oder exportieren. Im Stromversorgungsgesetz (kurz StromVG) ist dieser Auftrag definiert.

Swissgrid erfüllt eine wichtige Aufgabe für die Schweizer Volkswirtschaft und alle Privatpersonen. Jede Minute ohne Strom führt zu Produktionsausfällen in der Industrie und reduziert das Wohlbefinden aller Personen. Ein Abendessen bei Kerzenlicht ist zwar romantisch. Wenn jedoch nur kaltes Essen auf den Tisch kommt und kein warmes Wasser zum abwaschen oder duschen aus dem Hahn kommt, wünscht man sich den Strom zurück.

Die Schweizer Wohnbevölkerung wächst bisher stetig. Damit verbunden ist auch ein Anstieg des Stromkonsums. Gleichzeitig verändert sich die Anzahl und die Grösse der Kraftwerke. Es entstehen immer mehr kleinere Kraftwerke wie zum Beispiel Kleinwasser-, Biomasse- und Solarkraftwerke. Weiter hat die Schweizer Stimmbevölkerung im Mai 2017 beschlossen, keine neuen Kernkraftwerke zu bauen. Der steigende Strombedarf und die Entwicklung des Kraftwerksparks verändern die Anforderungen an das Schweizer Übertragungsnetz. Swissgrid muss ihr Netz laufend den neuen Gegebenheiten anpassen. Dies bedeutet, dass das Netz unter anderem ausgebaut werden muss.

Nebst dem Ausbau des Netzes erneuert Swissgrid laufend ihr Netz. Das heisst, dass sie bestehende Leitungen totalsaniert. Anstatt eine bestehende Leitung 1:1 zu ersetzen, kann Swissgrid die Transportleistung einer bestehenden Leitung erhöhen. Damit kann Swissgrid auf den Bau einer neuen Leitung in einer anderen Region verzichten.

1.2. Ziel dieses Dokuments

Dieses Dokument richtet sich an Personen, welche sich bisher nur wenig mit elektrischen Netzen auseinandergesetzt haben. Dementsprechend betrifft dies einen grossen Teil der Schweizer Bevölkerung. Denn bei verschiedenen Umfragen war die häufigste Antwort auf die Frage, woher der Strom kommt: „Aus der Steckdose“. Es wird oft vergessen, dass eine grosse Infrastruktur notwendig ist, um den Strom von den Kraftwerken zu den Steckdosen zu bringen.

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten, den Strom von A nach B zu übertragen: oberirdische *Freileitungen* und unterirdische *Kabelleitungen*. Freileitungen beeinträchtigen das Landschaftsbild stärker als Kabelleitungen. Deshalb fordern viele Personen, dass neue Leitungen als Kabelleitung gebaut werden. Neben dem Einfluss auf das Landschaftsbild gibt es weitere Faktoren, welche bei der Wahl der Bauart zu berücksichtigen sind. Dieses Dokument zeigt die wesentlichsten Unterschiede von Frei- und Kabelleitungen auf. Dazu werden zu Beginn die wichtigsten Fachbegriffe und das notwendige Wissen vermittelt.

Ein weiterer Teil dieses Dokuments ist der Weg zum Entscheid für die eine oder andere Bauart oder eine Kombination von beiden. Wer entscheidet in der Schweiz, welche Bauart zu verwenden ist? Und wie wird in der Schweizer Demokratie sichergestellt, dass alle Interessen und Rechte berücksichtigt werden? Darauf geht dieses Dokument als erstes ein.

Ziel dieses Dokuments ist es, dass der Leser versteht, wie die Variantenentscheide gefällt werden. Damit wird es einfacher, die Entscheide nachzuvollziehen. Ein besseres Verständnis hilft, die Akzeptanz der Leitungen zu erhöhen.

2. Wer legt fest, wo eine Freileitung und wo eine Kabelleitung zu bauen ist?

2.1. Infrastruktur und betroffene Parteien

Eine gut ausgebaute Infrastruktur ist wichtig für die Entwicklung und den Wohlstand eines Landes. Das Verkehrsnetz als grösste Infrastruktur, sowohl Strassen- als auch Schienennetz, ist notwendig für eine leistungsfähige Wirtschaft und die Versorgung der Bevölkerung. Weiter braucht es Infrastrukturanlagen für Wasser, Strom und Gas. Und immer wichtiger wird eine leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur. Ein Leben ohne Internet kann sich heute fast niemand mehr vorstellen.

Infrastrukturanlagen haben nicht nur einen Nutzen. Sie beeinflussen die Umwelt in vielerlei Hinsicht. So beeinträchtigt das Verkehrsnetz das Landschaftsbild unweigerlich. Weiter führt der Verkehr zu grossen Lärm- und Schadstoffemissionen. Die anderen Infrastrukturanlagen für Wasser, Strom¹, Gas und Kommunikation sind mehrheitlich unterirdisch verlegt. Dies hat den Vorteil, dass diese Infrastrukturanlagen kaum wahrnehmbar sind.

Die Leitungen des Schweizer Übertragungsnetzes sind mehrheitlich oberirdisch als Freileitungen gebaut. Das Landschaftsbild wird dadurch beeinflusst. Weiter können die Flächen bei den Masten nicht landwirtschaftlich genutzt werden. Und schliesslich schränken Übertragungsleitungen, wie alle linearen Infrastrukturanlagen (unter anderem Strasse und Eisenbahn), die Raumentwicklung ein.

Beim Bau einer Übertragungsleitung sind verschiedene Parteien betroffen. Primäre Partei ist der Netzbetreiber (Swissgrid). Aufgrund des Verlaufs der Leitung sind viele Grundstückseigentümer betroffen. Weiter gibt es Privatpersonen, welche in der Nähe der Leitung wohnen oder ihre Freizeit dort verbringen. Auch betroffen sind die Umwelt und die Raumentwicklung. Interessenvertreter, meist Verbände oder Behörden, setzen sich für Umwelt und Raumentwicklung ein.

Als Netzbetreiberin erfüllt Swissgrid eine Vielzahl von Vorgaben. Diese bestehend hauptsächlich aus technischen und wirtschaftlichen Vorgaben sowie den Gesetzen für Umweltschutz und Raumentwicklung. In Anhang 11.3 sind alle Vorgaben aufgelistet. Die Genehmigungsbehörde prüft, ob alle gesetzlichen Vorgaben eingehalten sind. In der Schweiz ist das Eidgenössische Starkstrominspektorat (ESTI) die Genehmigungsbehörde für elektrische Anlagen. Bei komplexen Bauprojekten mit Interessenkonflikten und Einsprachen übernimmt das Bundesamt für Energie (BFE) die Rolle der Genehmigungsbehörde.

¹ Knapp 80% des Schweizer Stromnetzes ist unterirdisch verlegt. Quelle: VSE

2.2. Die Suche nach der Lösung mit der höchsten Akzeptanz

Jede Leitung, ob Freileitung oder Kabelleitung, beeinflusst Raumentwicklung und Umwelt auf unterschiedliche Art und Weise. Und aus Netzsicht unterscheiden sich Leitungen bei den technischen Eigenschaften und den Kosten.

Bezüglich Raum- und Siedlungsplanung ist zu beachten, dass der zulässige seitliche Abstand von Gebäuden zu Freileitungen grösser ist als zu Kabelleitungen. Das Landschaftsbild als ein Teil der Umwelt wird durch Freileitungen stärker beeinträchtigt als durch Kabelleitungen. Wald und Biotope sind geschützt und dürfen nur in Ausnahmefällen gerodet oder beeinträchtigt werden. In der Regel sind Freileitungen günstiger als Kabelleitungen. Die beim Stromtransport entstehenden Verluste sind in der Regel grösser bei der Freileitung als bei der Kabelleitung. Hingegen erhöhen Kabelleitungen die Spannung stärker als Freileitungen und damit auch den Aufwand, um die Spannung zu reduzieren. Dies sind nur wenige Beispiele für die Unterschiede zwischen Frei- und Kabelleitungen.

Abbildung 1 zeigt die vier Aspekte Raumentwicklung, Umwelt, Kosten und Technik. In der Mitte sind drei Glühbirnen gezeichnet, welche drei unterschiedliche Varianten für eine Leitung von A nach B symbolisieren. Sie unterscheiden sich in ihrer Linienführung und der Bauart. Damit haben sie unterschiedliche Einflüsse auf die vier Aspekte. Diese Einflüsse sind mit den farbigen Punkten angedeutet.

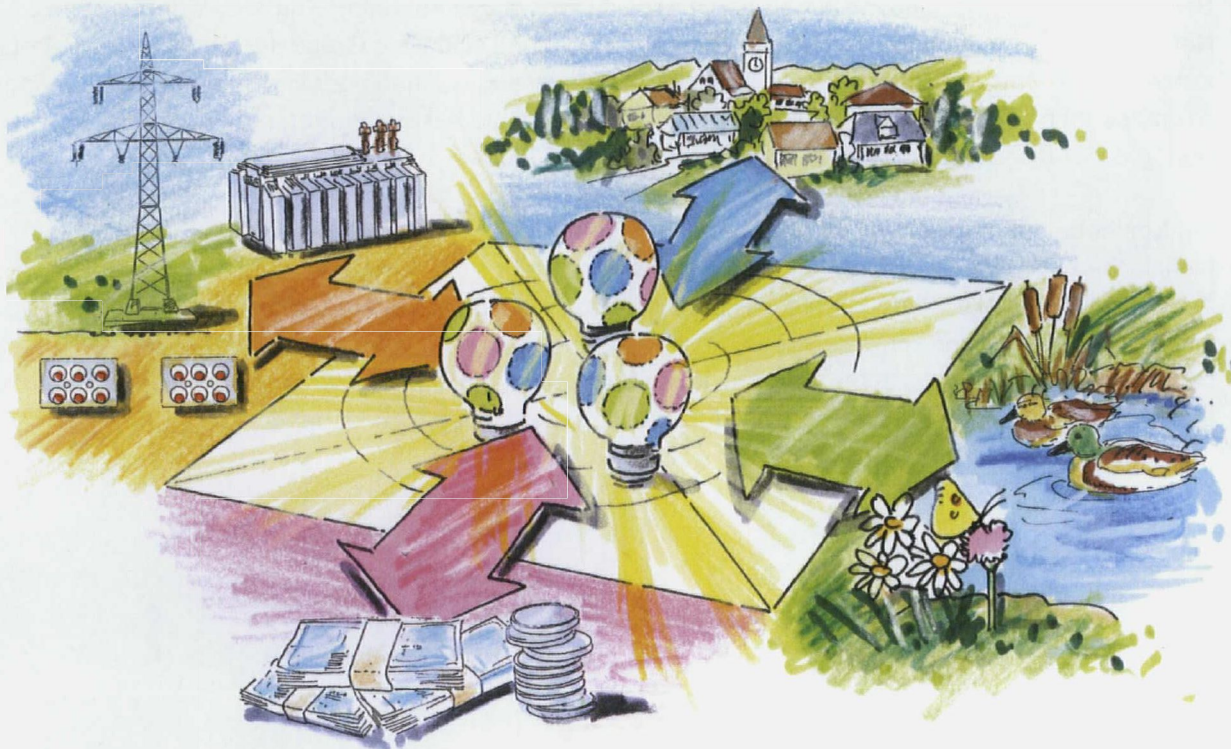


Abbildung 1: Vier Aspekte – im Uhrzeigersinn von der Mitte oben: Raumentwicklung, Umwelt, Kosten und Technik – definieren einen Lösungsraum für Leitungsvarianten. Drei Glühbirnen symbolisieren drei für ein Projekt geeignete Leitungsvarianten. Wegen unterschiedlicher Leitungsführung und Bauart sind die Einflüsse auf die vier Aspekte unterschiedlich. Dies zeigen die farbigen Punkte der Glühbirnen.

Vorgaben definieren für jeden der vier Aspekte, was machbar ist und was nicht. Die Summe aller Vorgaben legt einen Lösungsraum fest. Dort sind überall Lösungen beziehungsweise Leitungsvarianten möglich. Jede Lösung beeinflusst aber die vier Aspekte unterschiedlich stark. Die drei ausgewählten Varianten stellen Lösungen dar, welche für ein konkretes Projekt geeignet sind. Doch welche Variante eignet sich am besten?

Bei jedem einzelnen Leitungsbauprojekt müssen die lokalen Gegebenheiten genau untersucht werden. Welche Schutzinteressen sind vorhanden? Wie gut eignet sich der Boden für eine Kabelleitung? Gibt es Möglichkeiten, eine Freileitung entlang eines Hügelzugs oder an einem Waldrand zu führen? So wäre sie weniger gut sichtbar. Wie ist die Entwicklung des Raums geplant und was steht im kantonalen Richtplan?

Es gilt dann, geeignete Varianten zu entwickeln und ihre Einflüsse auf die vier Aspekte zu untersuchen. Wenn die Einflüsse ermittelt sind, so braucht es eine gesamtheitliche Abwägung aller Interessen. Dabei könnten sich folgende Fragen stellen: Ist es legitim, mehr Geld auszugeben, um dafür die räumliche Ausdehnung einer Siedlung nicht einzuschränken? Kann eine Spannungserhöhung akzeptiert werden, um eine Landschaft von nationaler Bedeutung nicht zu beeinträchtigen? Wofür sollen zusätzliche CHF 50 Mio. ausgegeben werden? Für eine geringere Beeinträchtigung der Raumentwicklung oder der Umwelt?

Für die gesamtheitliche Abwägung braucht es eine gemeinsame Diskussion mit allen Interessenvertretern. Nur so kann ein Entscheid gefällt werden, der eine hohe Akzeptanz genießt. Leider wird es wohl keine Lösung geben, welche keine der vielen Interessen verletzt. Dies muss allen Interessenvertretern bewusst sein. Nur so ist eine konstruktive Diskussion möglich. Die Suche nach der Lösung mit der höchsten Akzeptanz gestaltet sich so einfacher.

3. Wie funktioniert ein elektrisches Netz?

3.1. Das elektrische Netz

Ein elektrisches Netz besteht aus einer Vielzahl von Elementen. Das sichtbarste Element ist die Leitung. An den Enden der Leitungen befinden sich Kraftwerke und sogenannte *Unterwerke*. Dort vereinen sich mehrere Leitungen mit derselben Spannung und können zusammengeschaltet werden. In Unterwerken befinden sich weiter Transformatoren, welche zwei Netze mit unterschiedlichen Spannungen verknüpfen. So fliesst Strom vom Übertragungsnetz zum Verteilnetz oder umgekehrt. Das Verteilnetz verbindet alle Verbraucher mit dem Übertragungsnetz.

Die wichtigste Aufgabe eines Netzbetreibers ist die Versorgungssicherheit. Das bedeutet, dass die Unterwerke jederzeit versorgt werden müssen. Aus diesem Grund sind Unterwerke immer mit mindestens zwei Leitungen angeschlossen. So kann eine Leitung ausfallen und das betroffene Unterwerk ist immer noch mit einer oder mehreren Leitungen versorgt.

3.2. Drehstrom

Für die Übertragung von elektrischer Energie hat sich weltweit die Drehstromtechnik mit einer Frequenz von 50 Hz und 60 Hz durchgesetzt. Beim Drehstrom mit 50 Hz ändert sich die Spannung 50 Mal in der Sekunde. Wie eine Pendeluhr, bei der das Pendel nach links und nach rechts ausschlägt, schwingt die Spannung zwischen einem positiven Höchstwert und demselben negativen Wert auf und ab. Dabei ist die Spannung für kurze Zeit auch genau null. Beim Drehstrom werden drei leitende Elemente benötigt, bei welchen die Spannung zwischen den beiden Werten auf- und abschwingt. Die leitenden Elemente werden vereinfacht auch *Leiter* genannt. Bei den Freileitungen sind die Leiter die *Leiterseile* und bei den Kabelleitungen die Kabel. Mehr Infos zu diesen Komponenten werden in den folgenden Kapiteln vermittelt.

Die Spannung der drei Leiter schwingt zwischen denselben Werten auf und ab. Hingegen beginnt die Schwingung zeitlich versetzt. Im Vergleich zur Schwingung des Leiters 1 beginnt die Schwingung des Leiters 2 erst dann, wenn der Leiter 1 einen Drittel einer Schwingungsperiode hinter sich hat. Leiter 3 beginnt auch erst wiederum dann, wenn der Leiter 2 einen Drittel einer Schwingungsperiode hinter sich hat. Dieses Verhalten führt dazu, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt die drei Leiter unterschiedliche Spannungen haben.

Drei Leiter mit drei unterschiedlichen Spannungen bilden zusammen ein sogenanntes Drehstromsystem oder vereinfacht System. Ein solches System ermöglicht den Transport von elektrischer Energie. Im Zusammenhang mit Leitungen wird anstelle von *System* auch oft von *Strang* gesprochen.

3.3. Bau, Betrieb und Instandhaltung von Leitungen

Der Bau von Leitungen dauert wenige Jahre. Danach sind die Leitungen mehrere Jahrzehnte in Betrieb. In dieser Zeit braucht es verschiedene Arbeiten, um die Leitung instand zu halten. Hier wird kurz gezeigt, was Betrieb und *Instandhaltung* von Leitungen beinhaltet:

Der Bau einer Leitung beinhaltet die Planung, die Beschaffung aller notwendigen Materialien sowie die Errichtung der Leitung. Falls für den Bau temporäre Installationsplätze notwendig sind, müssen diese nach der Errichtung der Leitung rückgebaut werden.

Eine Leitung ist Teil eines elektrischen Netzes. Das Netz wird als Gesamtes betrieben. In einer Leitstelle überwachen sogenannte Netzoperateure das Netz und stellen sicher, dass keine zu hohen Ströme auf den Leitungen fliessen und dass die Spannung nicht zu hoch oder zu tief ist.

Das Ziel der Instandhaltung einer Leitung ist, dass die Leitung einen sicheren Betrieb ermöglicht und jederzeit bereit ist, Strom zu transportieren. Dazu wird die Leitung regelmässig kontrolliert. Die Arbeiter prüfen visuell, ob an der technischen Einrichtung alles in Ordnung ist. Sie prüfen auch, ob das Leitungstrasseee frei ist. Wenn Sträucher oder Bäume zu gross werden, werden diese zurückgeschnitten.

In regelmässigen Abständen gibt es detailliertere Kontrollen und bei Defekten auch Reparaturen.

Die verschiedenen Arbeiten, welche für den sicheren Betrieb von Freileitungen und Kabelleitungen notwendig sind, werden in den Kapiteln 3.3 und 4.4 beschrieben.

4. Freileitung

4.1. Funktionsprinzip

Freileitungen nutzen die Luft als Isolator, um elektrische Energie zu transportieren. Die sogenannten *Leiterseile*, welche in der Schweiz zum grössten Teil aus der Aluminiumlegierung Aldrey bestehen, führen den Strom von Mast zu Mast und so von Unterwerk zu Unterwerk und vom Kraftwerk bis zum Verbraucher.

4.2. Komponenten

Abbildung 2 zeigt einen Masten mit den wichtigsten Komponenten. Auf der Mastspitze befindet sich das sogenannte *Erdseil* (1). Es schützt die Leiterseile vor Blitzeinschlägen. Weiter sind im Erdseil Lichtwellenleiter enthalten. Diese nutzen die Netzbetreiber für die Kommunikation zwischen ihrer Leitstelle und den Unterwerken. Der Mast hat seitliche Auskragungen, die *Ausleger*. Daran sind Isolatoren (2) befestigt, welche die Leiterseile (3) mit dem Mast verbinden. Die rechte Seite von Abbildung 2 zeigt das Grössenverhältnis zwischen einem Isolator und einer Person.

In der Schweiz befinden sich auf den Hochspannungsmasten meist zwei Systeme: auf beiden Mastseiten je eins. Mit (5) ist das linke System markiert. Die drei leitenden Elemente oder auch *Phasen* genannt sind mit einem Kreis markiert. (4) zeigt eine der drei Phasen. Bei Freileitungen bilden Leiterseile die leitenden Elemente. Pro Phase kann es mehrere Leiterseile haben. Der grösste Teil der Schweizer Leitungen verwendet ein sogenanntes 2er-Bündel: die Phase besteht dort aus 2 Leiterseilen. So entstehen weniger elektrische Verluste und die Geräuschemissionen sind geringer.

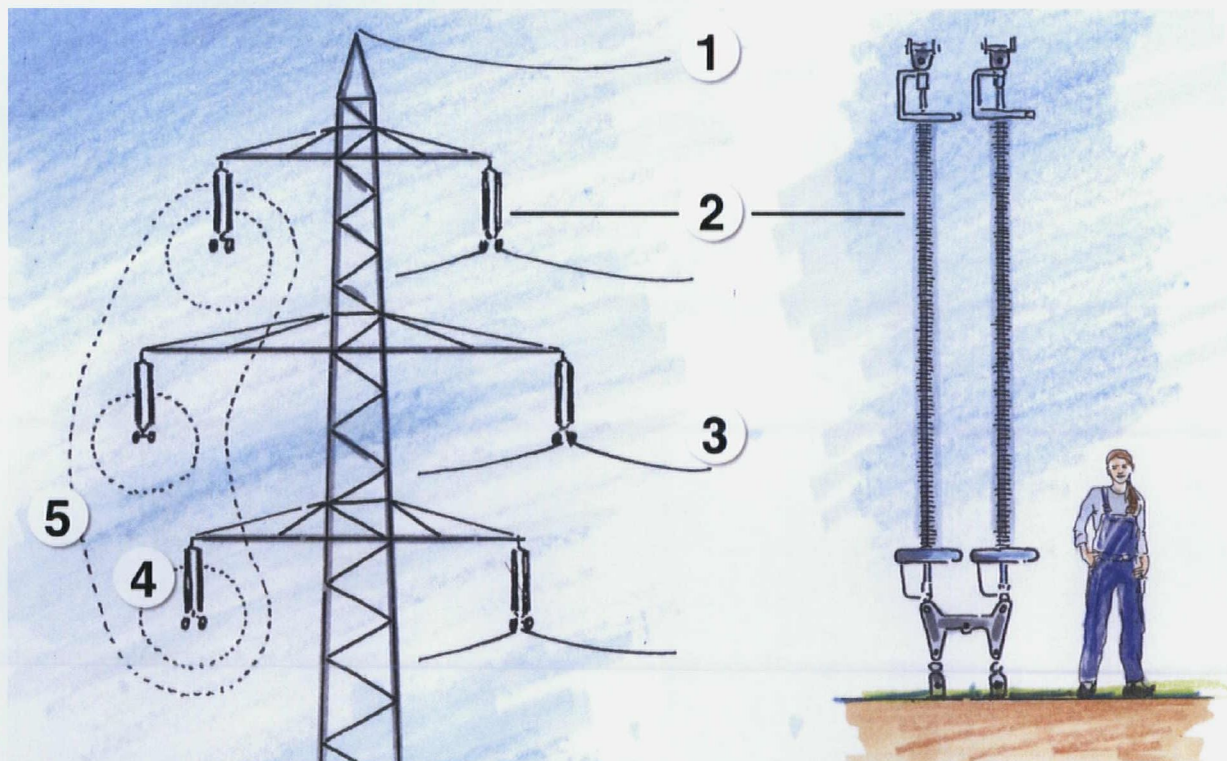


Abbildung 2: Der Kopf eines Freileitungsmastes mit den wichtigsten Komponenten: 1: Erdseil, 2: Isolator, 3: Leiterseile, 4: Phase, 5: (Drehstrom)System. Auf der rechten Seite steht eine Frau neben einem Isolator. So ist die Länge von ca. 4 m ersichtlich.

4.3. Bau von Freileitungen

Swissgrid hält sich an die Wegleitung des Eidgenössischen Departements des Innern aus dem Jahr 1980: „Wegleitung für die landschaftsschonende Gestaltung von Übertragungsanlagen für elektrische Energie und Nachrichten“ [1]. Diese enthält Gestaltungsgrundsätze zur gross- und kleinräumigen Linienführung, zu Gestaltungsmitteln und zu landschaftsspezifischen Besonderheiten. Im Folgenden wird gezeigt, wie die Höhe und Anzahl der Masten gewählt werden kann und welche Masttypen Swissgrid verwendet.

Die Physik gibt die Hauptregel vor: Damit es keinen elektrischen Überschlag auf den Boden, Flora oder Fauna gibt, muss ein Mindestabstand zwischen Leiterseil und Boden eingehalten werden. Durch diesen Mindestabstand und den Abstand der einzelnen Masten untereinander ergibt sich die Höhe der Masten.

Abbildung 3 zeigt zwei Leitungen, welche dieselbe *Transportkapazität* aufweisen, sich aber in der Masthöhe und der Anzahl Masten unterscheiden. Je nach Gelände wird die Masthöhe und der Abstand zwischen den Masten angepasst. Die Leitung kann so gebaut werden, dass sie aus der Ferne und über mehrere Spannweiten kaum wahrnehmbar ist. Dies kann aber gleichzeitig dazu führen, dass dieselbe Leitung bei den direkt betroffenen Personen weniger Akzeptanz findet, weil sie z.B. näher an ihren Grundstücken vorbeiführt.

Ein weiterer Aspekt bei der Wahl des Trassees ist das Gelände. In gebirgigem Gelände wählt Swissgrid insbesondere die Maststandorte gut aus. Denn diese müssen auf einem stabilen Grund stehen und sicher vor Murgängen und Lawinen sein. Im Mittelland steht die Sichtbarkeit der Masten inklusive der Seile im Vordergrund. Die Masten werden so platziert und die Höhe so gewählt, dass die Freileitung möglichst gut ins Landschaftsbild passt und dieses so wenig wie möglich stört.

Neben Masthöhe und Anzahl Masten kann auch das Mastbild verändert werden. Abbildung 4 zeigt die Mastbilder, welche in der Schweiz verwendet werden: Tonnenmast, Donaumast, Einebenenmast und Portalmast. Je grösser die Anzahl der Auslegerebenen², umso höher werden die Masten. Der am wenigsten hohe Mast, der Einebenenmast, hat jedoch den Nachteil, dass Leitungen mit diesem Mastbild wie eine Wäschehänge wirken. Einigen Betrachtern der Landschaft fällt eine solche Leitung deutlicher auf.

Die Anzahl der Seile und deren Querschnitte ergeben die Transportkapazität. Je mehr Seile und je grösser deren Querschnitt, umso mehr Strom kann über die Leitung fließen.

² Ausleger sind die „Arme“, welche die Leiterseile tragen

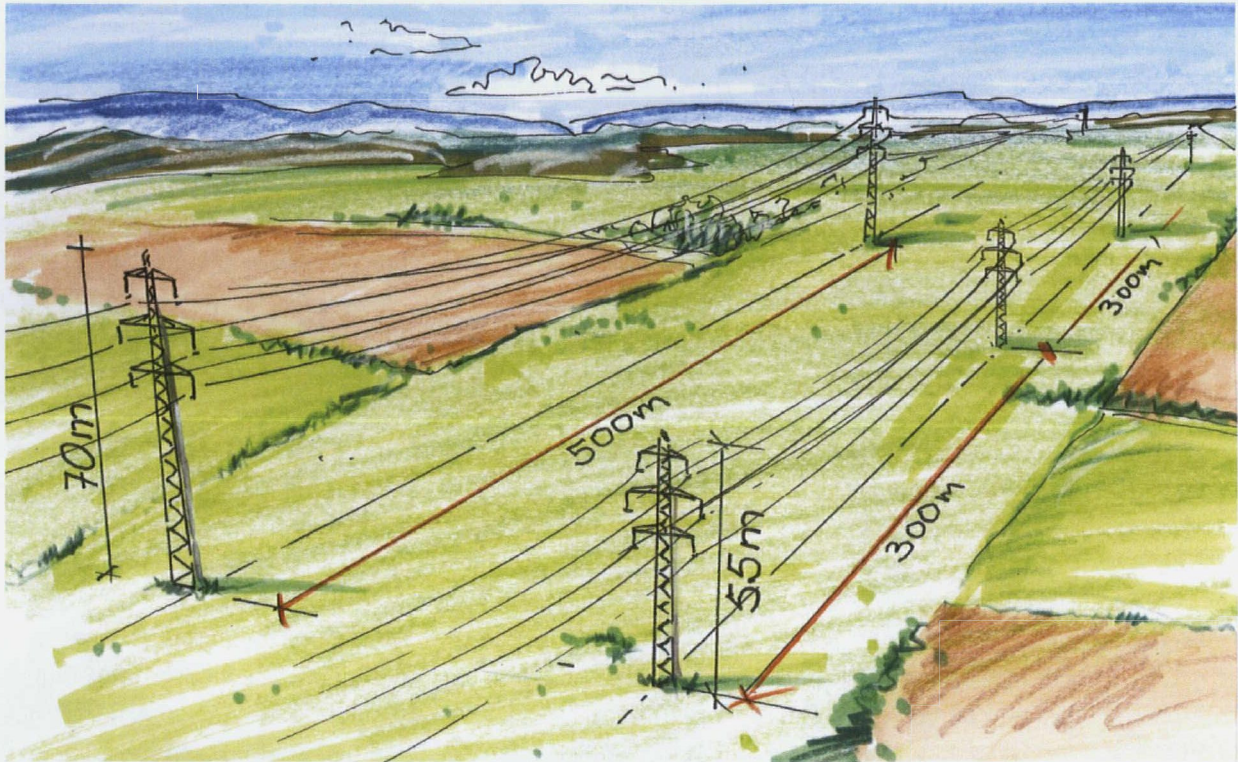


Abbildung 3: Zwei Freileitung mit derselben Transportkapazität. Die Leitung links besteht aus hohen Masten und weist grosse Abstände zwischen den Masten auf. Die rechte Leitung hat kleinere Masten. Dies erfordert eine grössere Anzahl an Masten.

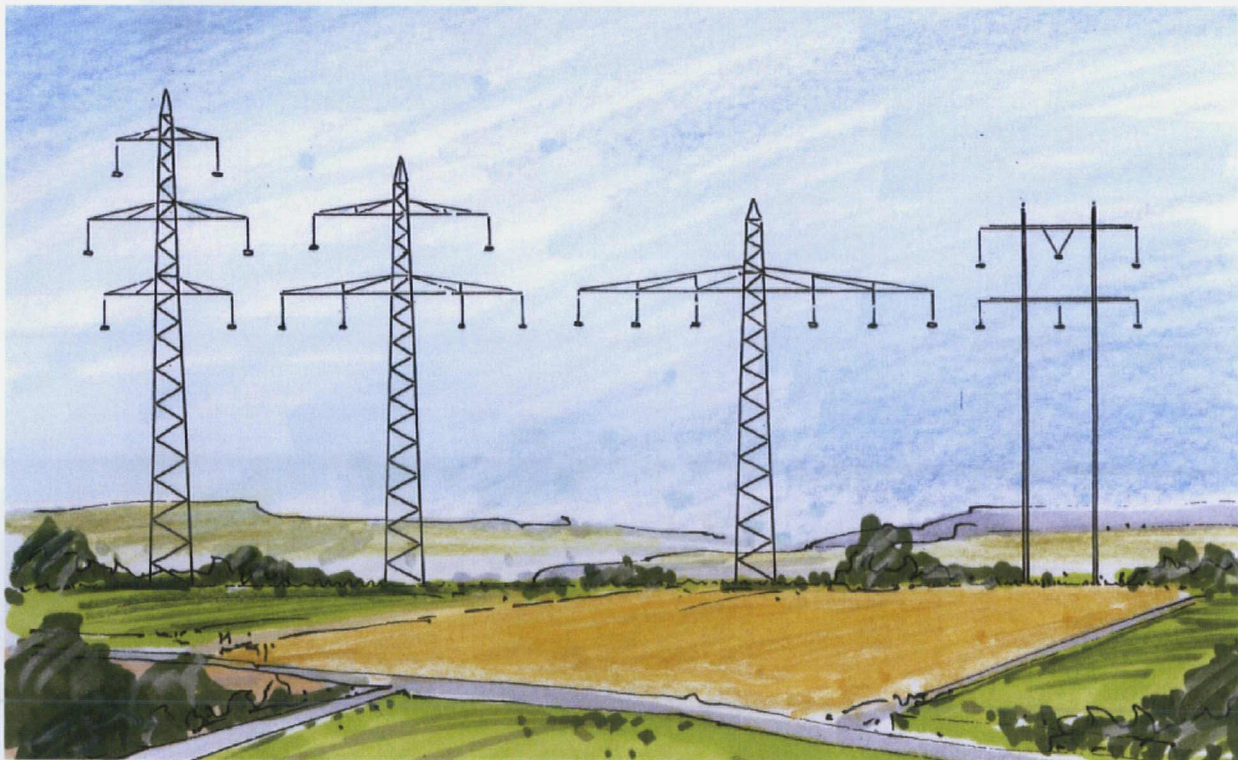


Abbildung 4: Verschiedene Mastbilder von Freileitungsmasten, die in der Schweiz eingesetzt werden. Von links nach rechts: Tonnenmast, Donaumast, Einebenenmast, Portal-Mast. Die ersten drei Typen bestehen aus einem Stahl-Fachwerk. Der Portal-Mast ist in der Regel aus Stahlbeton.

4.4. Netzbetrieb und Instandhaltung der Leitungen

4.4.1. Netzbetrieb

Freileitungen stellen seit über hundert Jahren ein wichtiges Element des elektrischen Netzes dar. Dank ihren elektrischen Eigenschaften lassen sie sich jederzeit ein- und ausschalten. So werden sie bei Störungen automatisch vom Netz getrennt. Sobald keine Spannung an der Leitung vorliegt, verschwindet in der Regel die Störung. Beispielsweise erlischt ein Lichtbogen zwischen Leiterseil und Baum, sobald keine Spannung mehr vorliegt. Bereits nach wenigen Zehntelsekunden kann die Leitung wieder eingeschaltet werden.

4.4.2. Instandhaltung

Während der Nutzungszeit kontrollieren Arbeiter regelmässig die Freileitungen. Dabei untersuchen sie, ob Masten und Fundamente in Ordnung sind. Sie schauen auch, wie stark Bäume und Sträucher gewachsen sind.

Die häufigste Tätigkeit ist das Zurückschneiden von Sträuchern und Bäumen. Bei den Stahlmasten erneuern die Arbeiter den Schutzanstrich dort, wo die Farbe abblättert. Der Schutzanstrich schützt den Stahl vor Rost. Bei Betonmasten können kleine Betonmengen abplatzen. Diese Abplatzungen füllen die Arbeiter mit neuem Beton auf. Bei Blitzeinschlägen in das Erdseil oder ein Leiterseil können einzelne Drähte beschädigt werden. Damit nicht weitere Drähte brechen, wird eine sogenannte Reparaturspirale angebracht. Diese presst alle Drähte zusammen und schützt sie so.

Grössere Arbeiten fallen nach ein paar Jahrzehnten an. Bei Stahlgittermasten muss der gesamte Schutzanstrich von Zeit zu Zeit erneuert werden. Dies ist eine aufwändige Arbeit. Sie ist aber sehr wertvoll. Denn damit kann sichergestellt werden, dass die erwartete Lebensdauer von mindestens 80 Jahren bei Freileitungen erreicht wird.

5. Kabelleitung

5.1. Funktionsprinzip

Kabelleitungen sind primär unterirdische Bauanlagen. Sie bieten die Möglichkeit Strom zu transportieren, ohne dass das Landschaftsbild wesentlich beeinträchtigt wird. Die heute eingesetzten elektrischen Hochspannungskabel verwenden einen speziellen Kunststoff als elektrischen Isolator. Die einzelnen Abschnitte eines Kabels werden mit sogenannten Muffen verbunden.

Kabel haben eine Lebensdauer von ca. 40 Jahren. Danach müssen sie ersetzt werden. Bei allen Bauarten braucht es deshalb die Möglichkeit, das Kabel zu entfernen und ein neues einzuziehen. In der Regel wird dazu ein Kabelschutzrohr aus Kunststoff verwendet. Das Kabel lässt sich mit wenig Aufwand in ein solches einziehen und später auch wieder ausziehen.

In der Abbildung 5 ist anhand der Bauart *Rohrblock* gezeigt, welche Elemente für den Stromtransport notwendig sind und welche Elemente ein (Drehstrom)System bilden. (1) ist das Kabel, welches sich in einem Kunststoffrohr (2) befindet. Eine Phase besteht meist aus zwei Kabeln. Denn die Transportkapazität eines Kabels genügt oft nicht den Anforderungen. Eine von drei Phasen ist mit (3) markiert. In diesem Beispiel bilden die 6 Kabel ein System (4).

Parallel zu den Stromkabeln gibt es weitere Kabel für die *Erdung* (5) und die Kommunikation (6).

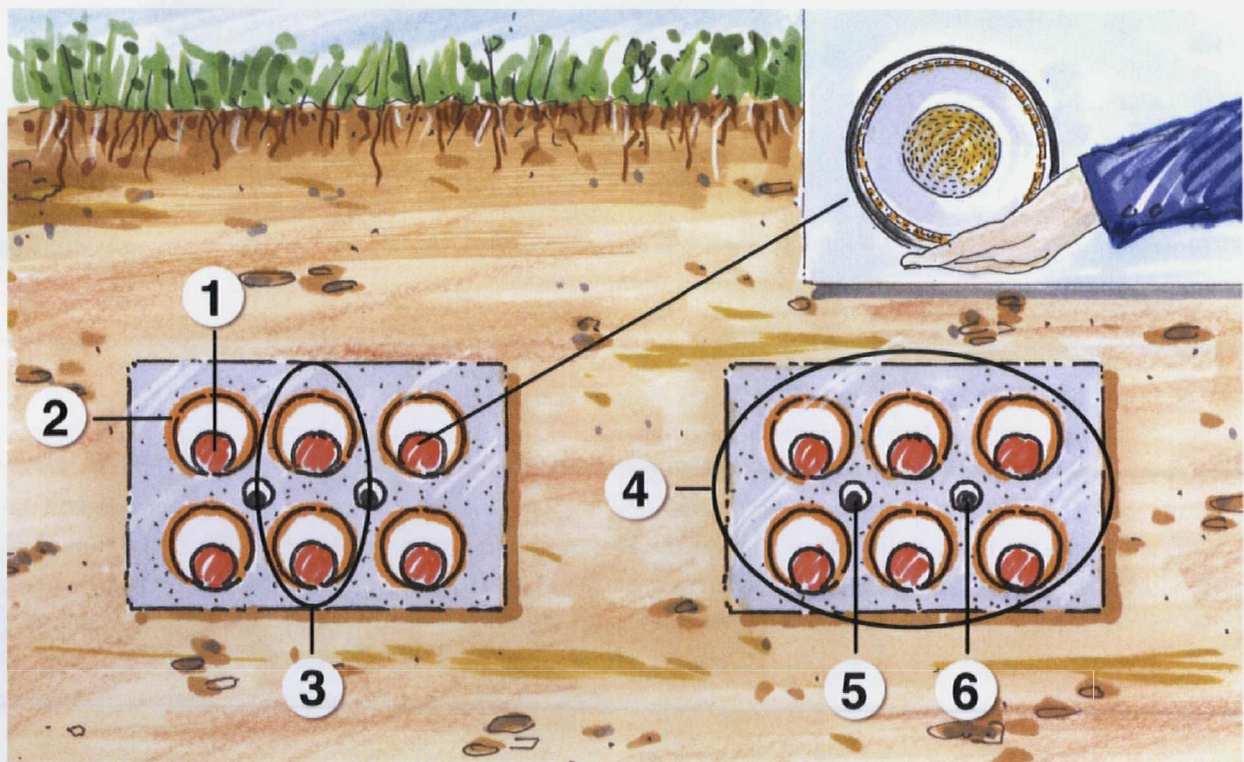


Abbildung 5: Die wichtigsten Komponenten bei einer Kabelleitung. (1) Stromkabel, (2) Kunststoffrohr, (3) Phase, (4) System, (5) Erdungskabel, (6) Kommunikationskabel. Links und rechts befindet sich je ein System mit derselben Funktionalität.

5.2. Komponenten

5.2.1. Kabel

Elektrische Hochspannungskabel bestehen aus mehreren Schichten. Abbildung 6 zeigt ein Kabel mit den verschiedenen Schichten. Im Inneren befindet sich der Leiter. Das verwendete Material ist Kupfer oder Aluminium. Direkt auf den Leiter folgt ein dünnes Band, welches aus einem *Halbleiter* besteht. Es sorgt für eine glatte Oberfläche des Leiters und eine gleichmässige elektrische Spannung. Anschliessend folgt eine dicke Kunststoffschicht aus vernetztem Polyethylen³. Diese Schicht hat die Aufgabe, den Leiter elektrisch zu isolieren. Bei der Freileitung entspricht die Luft der Kunststoffschicht. Die Luft isoliert elektrisch die Leiterseile von den anderen Leiterseilen, dem Masten und der Erde.

Über der Kunststoffschicht befinden sich weitere Schichten mit unterschiedlichen Aufgaben: Eine Schicht sorgt wiederum für eine glatte Oberfläche zwischen Kunststoff und den äusseren Schichten, die nächsten Schichten dienen dazu, dass eindringendes Wasser sich innerhalb des Kabels nicht ausbreiten kann, eine Schicht, der sogenannte *Schirm*, leitet bei einem Kurzschluss den Strom ab und die letzten Schichten schützen das Kabel vor mechanischen Einflüssen.

Der Schirm besteht in der Regel aus einzelnen Kupferdrähten. Er sammelt bei einem Kurzschluss zwischen Leiter und Erde den Strom, welcher ohne Schirm über das Erdreich zum Kraftwerk fliessen würde. Damit verhindert der Schirm, dass der Strom bei einem Kurzschluss unkontrolliert durch verschiedene Stellen im Erdreich fliesst. Dies würde technische Anlagen beeinträchtigen und stellt eine Gefahr für Mensch und Umwelt dar.

Ein Kurzschluss entsteht zum Beispiel dann, wenn ein Bagger das Kabel so stark beschädigt, dass die Isolation ihre Funktion nicht mehr erfüllt. Es können aber auch Materialfehler im Kabel selbst oder bei den Muffen zu Kurzschlüssen führen.

Die äusseren Schichten schützen das Kabel beim Einzug in den Rohrblock und bei der Montage auf Stützelementen. Ebenso braucht es einen Schutz während der Betriebszeit. Es kann Wasser zum Kabel gelangen und dabei Kies oder andere Materialien mitschwemmen.

Die Querschnittsfläche des Leiters beträgt bis zu 2'500 mm². Dies entspricht einem Durchmesser von 5.6 cm⁴. Das gesamte Kabel hat einen Durchmesser von bis zu 14.5 cm. Das Gewicht eines Kupferkabels kann bis zu 50 kg pro Meter betragen. Bei zwölf Kabeln sind dies 600 kg oder ein halbes Auto pro Meter.

Das hohe Gewicht des Kabels führt dazu, dass keine beliebig langen Kabel eingebaut werden können. Ein Grund liegt darin, dass nicht beliebig schwere Kabel transportiert werden können. Ein anderer liegt bei der Montage. Je länger das Kabel ist, umso grössere Kräfte braucht es, um das Kabel in das Rohr einzuziehen. Auch hier gibt es eine Grenze. Denn ab einer bestimmten Zugkraft leidet das Kabel bei der Montage.

³ Oder in Englisch: cross-linked polyethylene (XLPE)

⁴ Ein einziger Lieferant stellt Kabel mit 3'200 mm² Querschnittsfläche her.

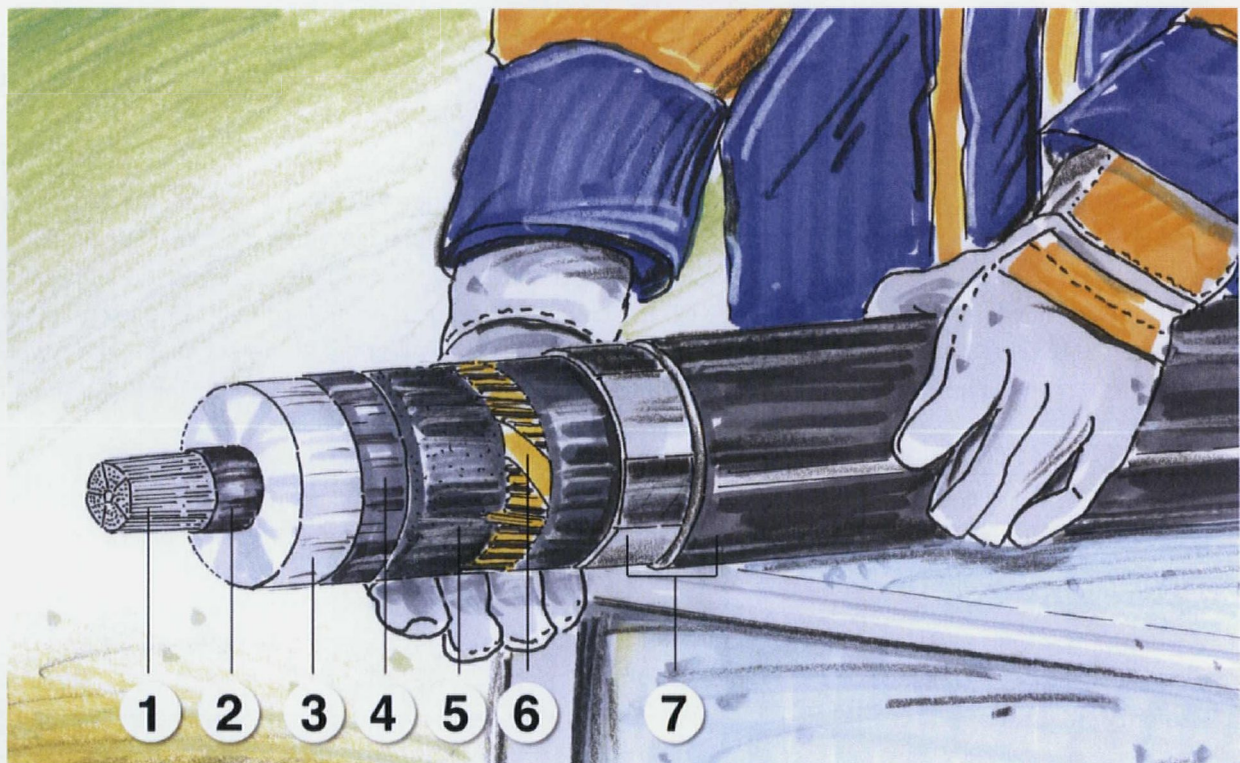


Abbildung 6: Ein Kabel mit den verschiedenen Schichten: 1) Leiter, 2) Innerer Halbleiter, 3) Isolation, 4) Äusserer Halbleiter, 5) saugfähiges Flies, 6) Schirm, 7) diverse Schichten für den mechanischen Schutz

Sobald ein Kabel unter Spannung steht und/oder Strom fliesst, wandelt sich ein Teil des Stroms oder der Spannung in Wärme um. Man spricht auch von elektrischen Verlusten. Denn beim Transport der Energie geht ein Teil der elektrischen Energie „verloren“. Diese Wärme erwärmt das Kabel. Doch die Isolation darf nicht zu heiss werden. Bei hohen Temperaturen isoliert das Material weniger gut als bei tiefen Temperaturen und das Material altert schneller. Die Wärme des Kabels fliesst über das Schutzrohr, den Beton und das Erdreich an die Erdoberfläche.

5.2.2. Muffen

Muffen verbinden einzelne Kabel miteinander. Sie werden maschinell hergestellt und vor Ort von Hand montiert. Abbildung 7 zeigt fertig montierte Muffen in einem Kabeltunnel.

Die Hauptaufgabe der Muffe ist es, die beiden Leiter in der Mitte des Kabels miteinander zu verbinden. Dies ist vergleichbar mit der Verbindung zweier Wasserrohre. Weiter muss die Muffe die elektrische Isolation sicherstellen. Wie beim Kabel selbst ist das eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Das verwendete Material darf keine Verunreinigungen enthalten und alle Oberflächen müssen glatt sein. Wenn einzelne Fremdpartikel sich im Material befinden oder eine Oberfläche eine Delle aufweist, so altert die Muffe schneller. Nach wenigen Jahren kann in solchen Fällen eine Muffe einen Defekt erleiden. Dies führt zu einem Ausfall der gesamten Kabelleitung.

Es gibt unterschiedliche Typen von Muffen. Einerseits unterscheiden sie sich in ihrer Bauweise, andererseits haben sie unterschiedliche Funktionen. Ein Unterschied betrifft die Verbindung der Kabelschirme:

Verbindungs-muffen:	Sie verbinden die beiden Kabelschirme miteinander.
Verbindungs-muffen mit Erdanschluss:	Sie verbinden die beiden Kabelschirme miteinander und mit der Erde
Cross-Bonding Muffen:	Solche Muffen werden benutzt, um die Schirme der beiden Kabel nicht direkt miteinander zu verbinden, sondern mit dem Schirm eines benachbarten Kabels. Dies reduziert die Verluste im Schirm.

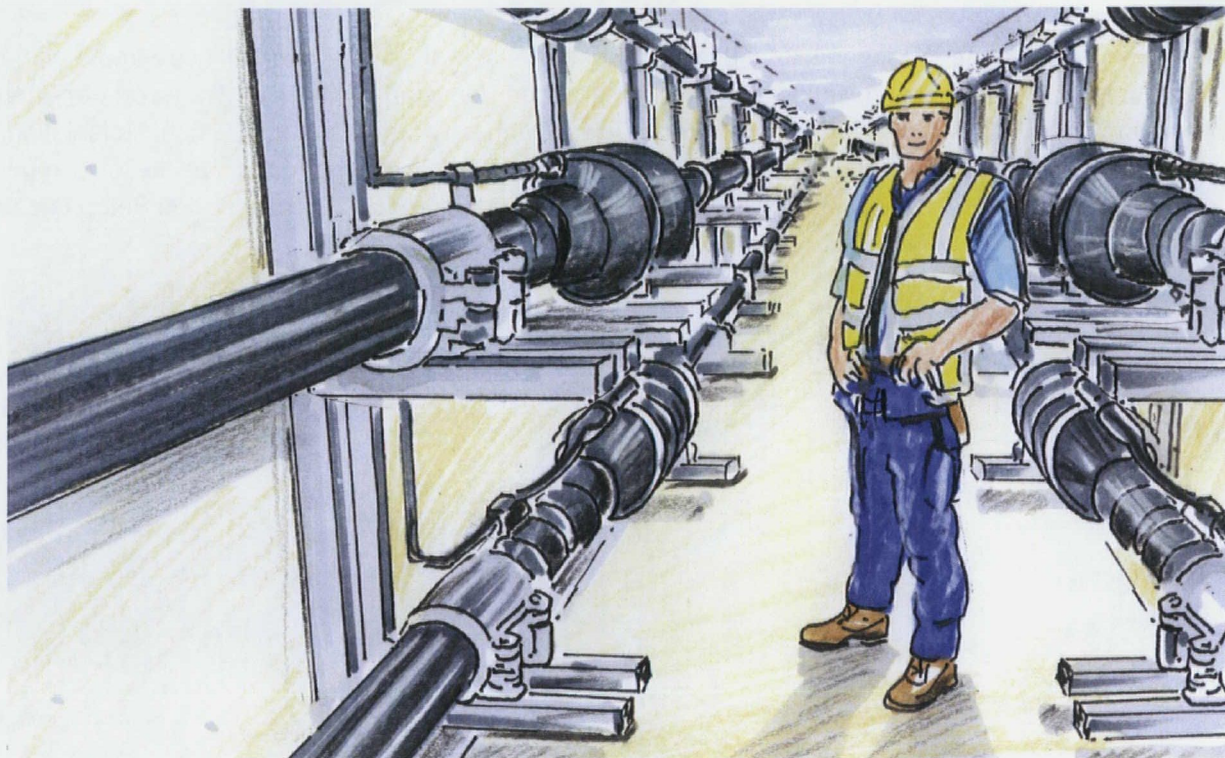


Abbildung 7: Cross-Bonding Muffen in einem Kabelkanal. Dargestellt sind vier von sechs Muffen. Sie befinden sich links und rechts des Arbeiters. Die Muffe haben einen viel grösseren Durchmesser als die Kabel und sind bis zu 2.5 m lang.

Die Muffen befinden sich meist in sogenannten Muffenschächten. Dies sind unterirdische Bauwerke. Darin gibt es genügend Platz, um die Muffen zu montieren und regelmässig zu kontrollieren.

Abbildung 8 zeigt einen Muffenschacht für eine Kabelleitung, bei welcher sich die Kabel in einem Rohrblock befinden. Mehr zum Thema Rohrblock findet sich im Abschnitt 5.3.2. Zusätzlich zum Muffenschacht ist das Fundament eines Masten abgebildet. So kann das Grössenverhältnis gezeigt werden. Der Muffenschacht ist ungefähr so gross wie eine Doppelgarage. Die Grösse des Mastfundaments hängt unter anderem von der Höhe des Masts und den Abständen zu den benachbarten Masten ab.

Swissgrid beabsichtigt die Muffenschächte, welche die Crossbonding Muffen enthalten, regelmässig zu begehen und zu prüfen, ob Schäden aufgetreten sind. Diese Muffenschächte brauchen einen Zugang von aussen und sind deshalb von aussen erkennbar. Die anderen Muffenschächte müssen nicht regelmässig begangen werden. Dort ist es möglich, den Muffenschacht zu überdecken. Falls eine Begehung trotzdem einmal notwendig sein sollte oder eine Störung auftritt, muss das Erdreich mit einem Bagger entfernt werden.

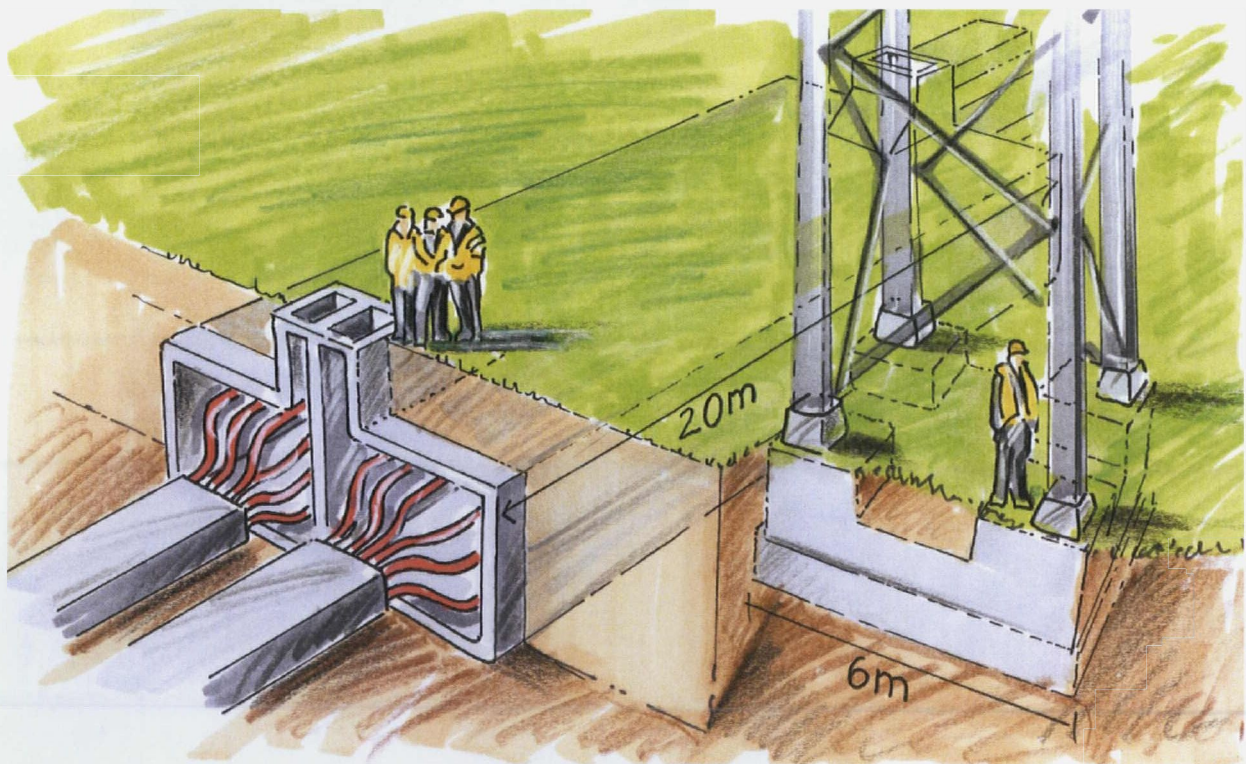


Abbildung 8: Vergleich eines Muffenschachts mit einem Mastfundament. Beim Muffenschacht ist der Zugang für das Betriebspersonal ersichtlich.

5.3. Bau von Kabelleitungen

5.3.1. Einleitung

Swissgrid verlegt die Kabel und die Muffen so, dass sie vor externen Einflüssen, wie zum Beispiel Grabarbeiten, geschützt sind. Bei der Planung der Kabelleitung muss darauf geachtet werden, dass das Kabel im Betrieb nicht zu warm wird. Ein kleiner Teil des elektrischen Stroms wandelt sich beim Transport in Wärme um. Diese muss vom Kabel über das Erdreich an die Luft abgegeben werden. Je tiefer das Kabel liegt, umso schlechter fliesst die Wärme ab und umso weniger Strom kann ein Kabel transportieren.

Die minimale Tiefe der Verlegung wird unter anderem durch die Verordnung über nicht-ionisierende Strahlung (NISV) vorgegeben. Denn direkt oberhalb der Leitung darf das Magnetfeld nicht zu hoch sein. Je höher der zu übertragende Strom ist, umso tiefer muss das Kabel verlegt werden, um die Grenzwerte einzuhalten. Dadurch sinkt jedoch die Transportkapazität der Kabel. Kabelleitungen mit einer hohen Transportkapazität besitzen zwei Kabel pro Phase. Dies erhöht die Kosten der Kabelleitung markant. Zudem erhöhen sich dadurch die dielektrischen Verluste. Mehr zu den Verlusten ist im Abschnitt 7.3 erklärt.

Es gibt weltweit ganz unterschiedliche Arten, wie die Kabel in den Boden verlegt werden. Am einfachsten ist es, die Kabel direkt ins Erdreich zu verlegen. Dies kann bei einfachen Bodenverhältnissen, wie zum Beispiel Sandboden, angewendet werden. Der Boden wird dazu aufgedigelt, die Kabel verlegt und der Aushub wird zum Überdecken der Kabel verwendet. Eine andere Möglichkeit besteht in der Verwendung eines Pflugs. Dabei wird der Boden mit dem Pflug geöffnet, das Kabel wird in die Öffnung eingelassen und hinter dem Pflug schliesst sich der Boden wieder. Damit wird die Struktur des Bodens nur wenig beeinträchtigt. Aus Sicht der Umweltschonung ist dies ein grosser Vorteil. Die Schweizer Bodenverhältnisse sind meist uneben und steinig. Deshalb eignen sich leider beide Varianten nicht.

Eine weitere Methode ist die Verwendung eines sogenannten *Flüssigbodens*. Dabei wird ein Teil des vorhandenen Erdreichs mit ein wenig Zement vermengt und als Deckmaterial rund um die einzelnen Kabel platziert. In Deutschland wird diese Methode angewendet. Die strengen Schweizer Umweltvorschriften erlauben die Verwendung der Zementmischung jedoch nicht.

Deshalb kommen in der Schweiz andere Methoden zur Anwendung. Die möglichen Bauarten sind in den folgenden Kapiteln beschrieben. Als erstes werden offene Verfahren gezeigt. Dabei wird die Bodenstruktur mit einem Graben gestört. Anschliessend geht dieser Bericht auf grabenlose Verfahren ein. Diese haben den Vorteil, dass es nur wenige Zugangsorte an der Erdoberfläche braucht. Dies reduziert den Eingriff in den Boden erheblich.

5.3.2. Rohrblock

Der Rohrblock ist die bevorzugte Bauvariante in der Schweiz. Jeder Rohrblock enthält ein Drehstromsystem. Die Trasseebreite für eine Leitung mit zwei Drehstromsystemen ist ungefähr 4.5 m. Der Rohrblock schützt die Kabel vor externen Einflüssen und ist kostengünstig. In der Bauphase ist eine grosse Fläche notwendig. Abbildung 9 zeigt die Grösse der Baustelle. Es braucht nicht nur einen Graben für den Rohrblock. Auf beiden Seiten der Leitung wird das Erdreich getrennt nach Bodenschicht zwischengelagert. Damit kann nach dem Bau der ursprüngliche Bodenaufbau wiederhergestellt werden. Weiter braucht es eine Baupiste, damit die Lastwagen Material wegfahren und Beton bringen können. Für den Bau eines Rohrblocks wird so eine Fläche mit einer Breite von ungefähr 25 m beansprucht.

Der Rohrblock selber hat eine Höhe von 0.8 m, eine Breite von 1.2 m und enthält keinen Stahl. Darin befinden sich in der Regel sechs grosse und zwei kleinere Rohre. In den grossen Rohren hat es je ein elektrisches Kabel. Die kleineren Rohre enthalten Kabel für die Kommunikation und die Erdung der Anlage.

Der Rohrblock muss mit mindestens 1 m Erdreich überdeckt sein. Dies ermöglicht eine landwirtschaftliche Nutzung der Fläche, zum Beispiel als Wiese, Weidefläche oder als Acker. Tiefwurzelnenden Pflanzen dürfen nur in einem bestimmten seitlichen Abstand zum Rohrblock gepflanzt werden. So wird sichergestellt, dass die Wurzeln den Rohrblock nicht beschädigen. Für eine Kabelleitung durch einen Wald bedeutet dies, dass nach dem Bau der Leitung eine Schneise bestehen bleibt.

Der Beton rund um die Rohre schützt nicht nur die Kabel. Er sorgt auch dafür, dass die Wärme der Kabel gut abgeleitet wird. Das Erdreich seitlich und oberhalb des Rohrblocks erwärmt sich, sobald die Kabelleitung genutzt wird. Der Temperaturunterschied ist in der Regel geringer als die natürliche Temperaturschwankung innerhalb eines Jahres.

Für besonders wichtige Leitungen ist der Rohrblock grösser. Er enthält dann zwei Reserverohre. In einem Rohr liegt bereits ein Kabel bereit für den Fall, dass ein anderes Kabel ausfällt. So erhöht sich die Verfügbarkeit der Kabelleitung.

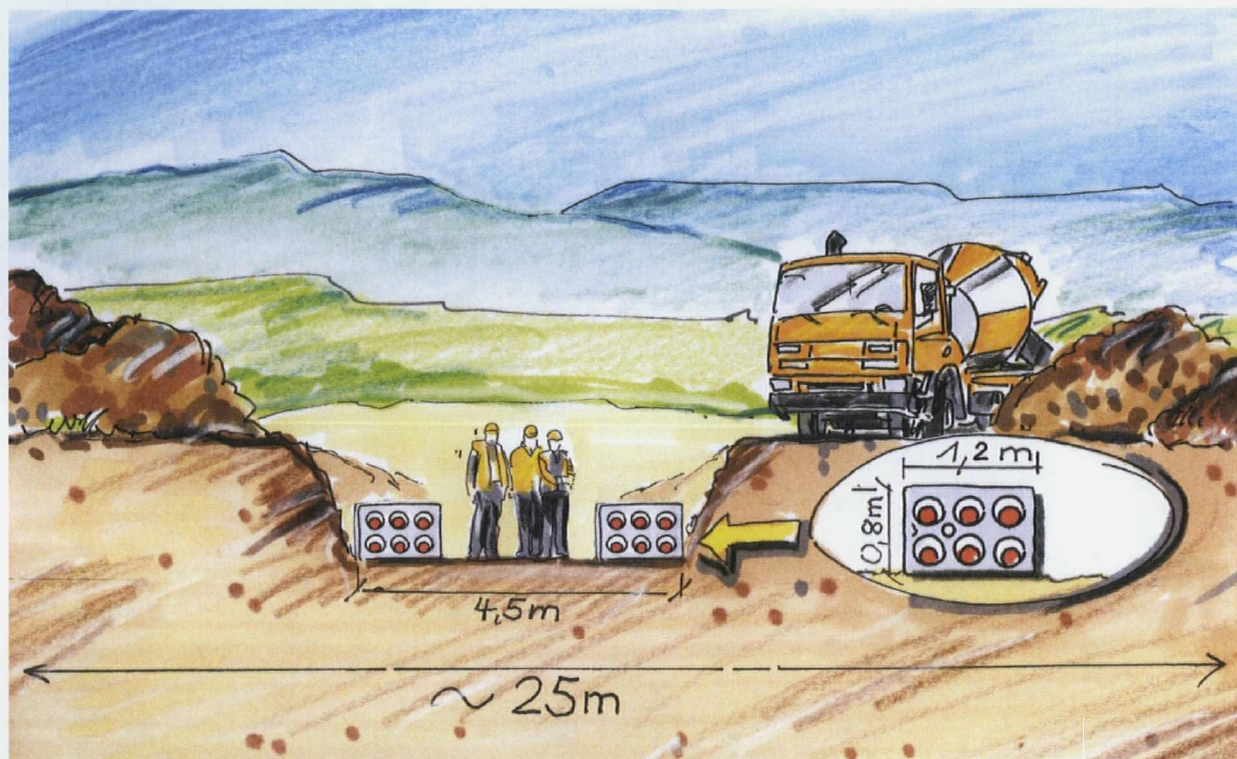


Abbildung 9: Platzbedarf für den Bau eines Rohrblocks. Links und rechts des Trassees braucht es Platz für die Zwischenlagerung der verschiedenen Bodenschichten. Die totale Breite der Baustelle beträgt damit ca. 25 m.

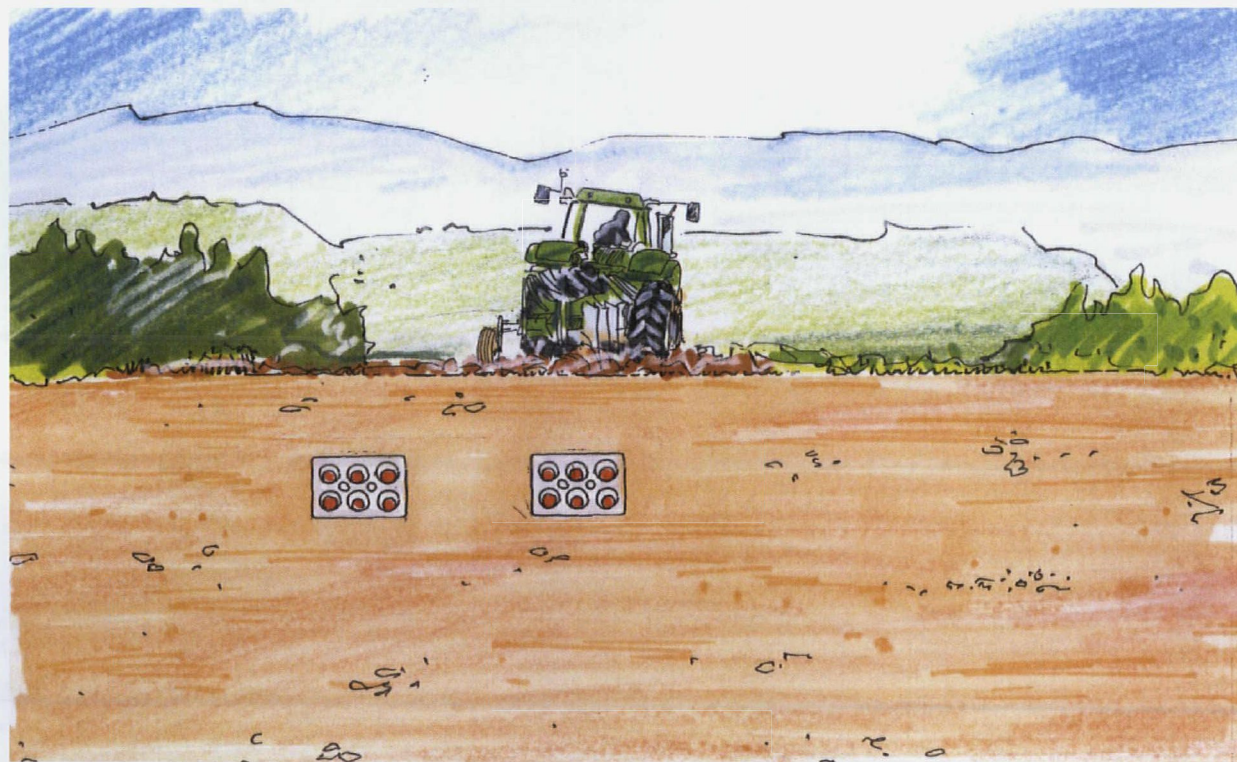


Abbildung 10: Situation nach dem Bau: Der Rohrblock ist mit mindestens 1 m überdeckt. Die Fläche oberhalb des Rohrblocks muss freigehalten werden. Es dürfen keine tiefwurzelnden Pflanzen wachsen. Für die Landwirtschaft bedeutet es keine Einschränkung.

5.3.3. Infrastrukturkanal

Ein Infrastrukturkanal ist ein begehbare Tunnel, der in Offenbauweise erstellt wird und aus Beton besteht. Die Anzahl der Systeme und Kabel definiert die Grösse des Infrastrukturkanals.

Es gibt zwei Arten, einen Infrastrukturkanal zu erstellen:

Variante Dupré: Das Betonbauwerk wird direkt vor Ort mit einer grossen Maschine erstellt. Dies ermöglicht eine schnelle Bauweise und ist kostengünstig. Das Gelände muss jedoch möglichst eben sein, der Boden sollte mit wenig Aufwand ausgehoben werden und der Bau erfordert viel Platz. Eine Visualisierung dieser Baumethode ist in Abbildung 11 gezeigt.

Klassische Variante: Die Betonstruktur wird wie im Hochbau mit Hilfe von Schalungselementen erstellt. Dies ist zeitaufwändig, ermöglicht aber den Bau in schwieriger Topologie. In Abbildung 12 ist eine Baustelle für eine klassische Bauweise gezeigt.

Der Vorteil eines Infrastrukturkanals ist, dass er begebar ist. Dies ermöglicht regelmässige Sichtkontrollen. Auch können die Muffenbauwerke ohne Zugang von oben gebaut werden. Im Vergleich zum Rohrblock braucht der Infrastrukturkanal einen grösseren Aushub. Der Eingriff in das Bodengefüge ist deshalb grösser.

Die Situation nach Abschluss der Bauarbeiten ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 gezeigt. Die Dupré-Variante hat eine halbrunde Decke, der klassische Infrastrukturkanal hat eine flache Decke.

Für die Teilverkabelung Gäbihubel im Kanton Aargau (früher bekannt unter dem Namen „Riniken“) sahen die Entscheidungsgrundlagen für das Bundesgericht einen Infrastrukturkanal nach der Dupré Variante vor. Bei der Planung des Projekts hat Swissgrid erkannt, dass die lokalen Gegebenheiten nicht geeignet sind für die Dupré Variante. Der Grund liegt im abschüssigen Gelände und dem felsigen Untergrund. Schweizer Gebiete, welche sich für die Dupré Variante eignen, sind rar. Selbst ebenes Gelände ist oft Schwemmland und hat einen hohen Grundwasserspiegel. Der Aushub des Bodens ist im Grundwasser sehr teuer. Deshalb ist hier der Rohrblock, der weniger Aushub erfordert als der Infrastrukturkanal, klar im Vorteil.



Abbildung 11: Bau eines Infrastrukturkanals nach der Methode Dupré

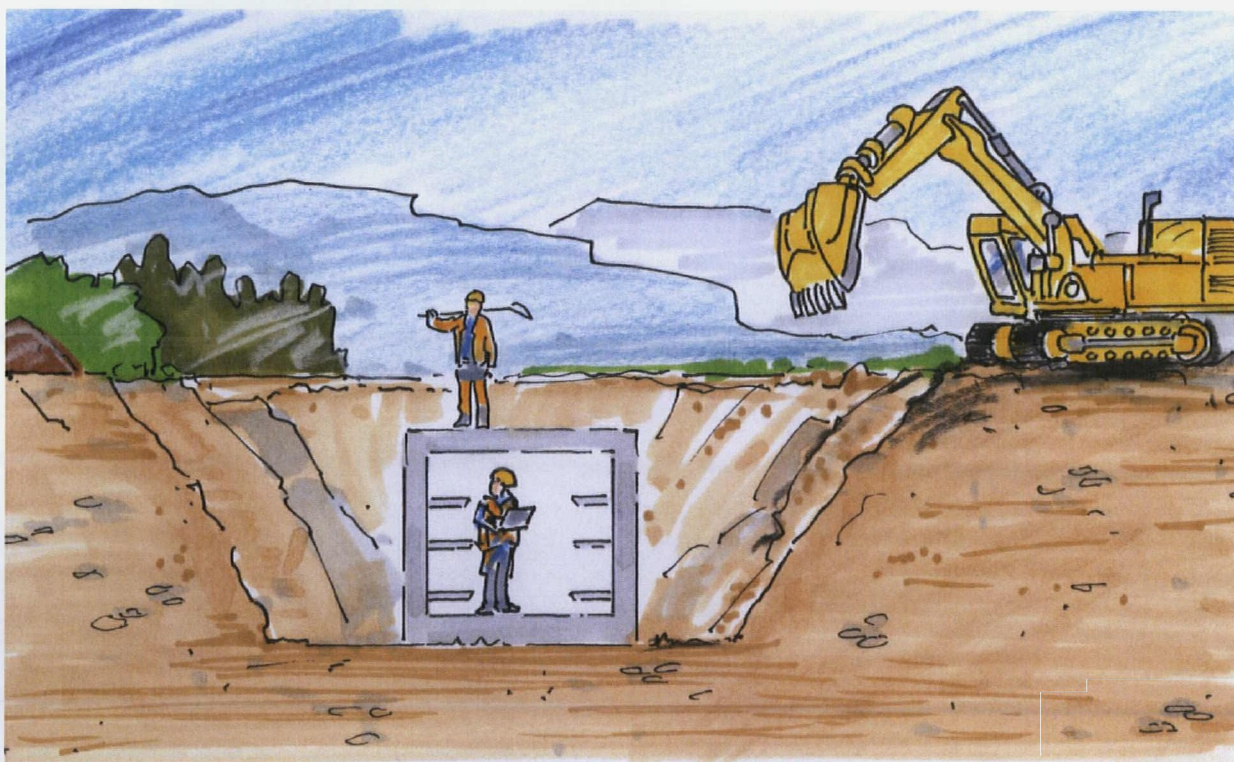


Abbildung 12: Bau eines Infrastrukturkanals in der klassischen offenen Bauweise



Abbildung 13: Situation nach dem Bau: Infrastrukturkanal nach der Methode Dupré



Abbildung 14: Situation nach dem Bau: Infrastrukturkanal in der klassischen Bauweise

5.3.4. Horizontal-Spülbohr-Verfahren

Eine Bauart mit einer geringen Beeinträchtigung des Erdreichs stellt das Horizontal-Spülbohr-Verfahren dar. Es wird genutzt, um Hindernisse zu bewältigen, welche keine Bauarbeiten an der Erdoberfläche erlauben oder wenn diese sehr anspruchsvoll und teuer wären. Mit diesem Verfahren kann zum Beispiel ein Fluss unterquert werden.

Für jedes Stromkabel braucht es ein eigenes Bohrloch. Beim Bohren kann die Richtung vorgegeben werden. Das heisst, es können auch Kurven gefahren werden. Doch die tatsächliche Bohrrichtung kann von der geplanten abweichen. Grund dafür sind anspruchsvolle Bodenverhältnisse, welche die geplante Bohrrichtung nicht ermöglichen. Damit die Rohre nicht zu nahe zueinander kommen, braucht es grosse Abstände zwischen den Bohrlöchern. Der Abstand hängt unter anderem von der Länge der Bohrung ab. Je länger die Bohrung, umso grösser der Abstand.

Beim Bohrprozess bohrt sich ein relativ kleiner Bohrkopf durch den Boden. Damit das Bohrloch hinter dem Bohrkopf nicht zusammenstürzt, wird eine Spüllösung reingepumpt. Nach der ersten vollständigen Bohrung, wird der Bohrkopf mit einem grösseren Bohrkopf ersetzt und durch die Bohrung zurückgezogen. Dabei vergrössert er das Loch. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis das Bohrloch genügend gross ist. Zum Schluss wird ein Leerrohr eingezogen, in welches später das Kabel zu liegen kommt.

Dieses Verfahren eignet sich für Böden mit einem hohen Grundwasserstand. Denn das Wasser stört bei der Bohrung nicht.

Bei diesem Bauverfahren stellen *Findlinge* (grössere Steine) ein Risiko dar. Falls die Bohrung auf einen Findling trifft und nicht weiterkommt, muss ein neues Bohrloch erstellt werden. Dies führt zu einer Zeitverzögerung und höheren Kosten. Im schlimmsten Fall ist gar keine erfolgreiche Bohrung möglich. Dann muss ein anderes Bauverfahren gewählt werden.

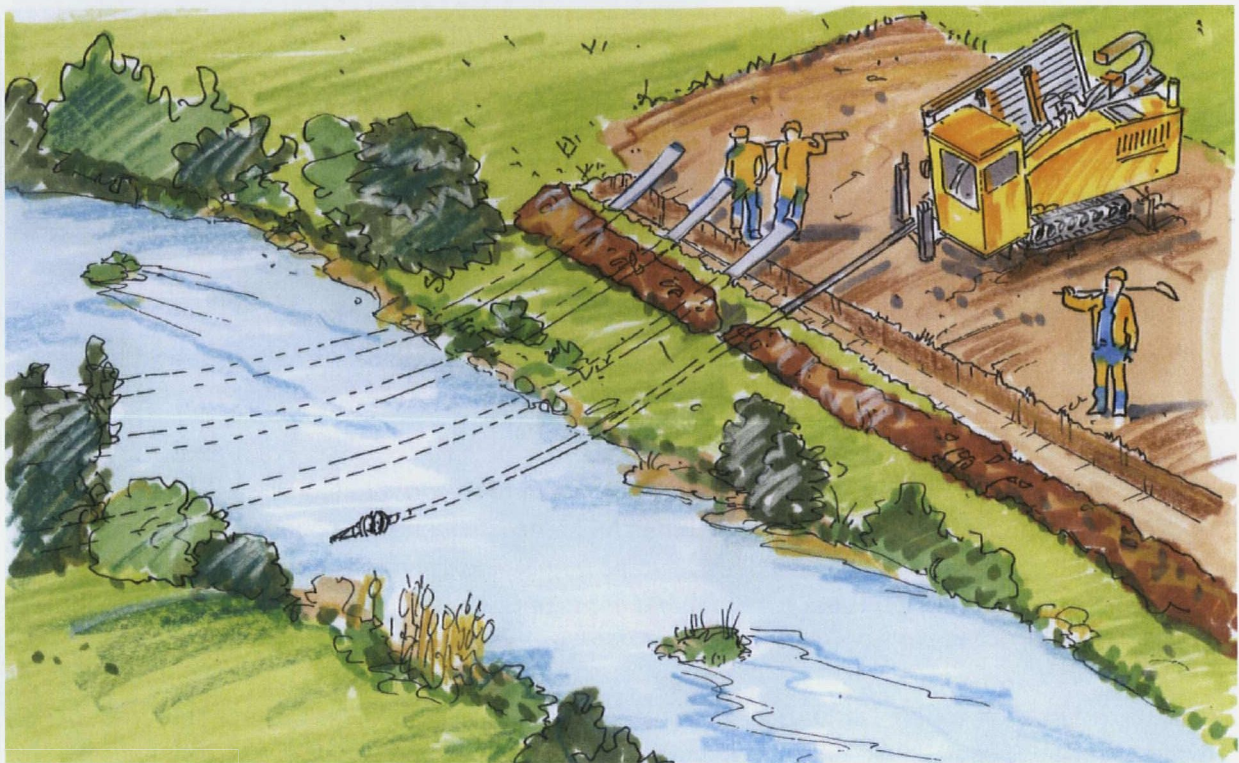


Abbildung 15: Bau einer Horizontal-Spülbohrung. Für jedes Kabel braucht es eine eigene Bohrung.



Abbildung 16: Situation nach dem Bau einer Horizontal-Spülbohrung. Für zwölf Kabel nebeneinander ist eine grosse Breite notwendig.

5.3.5. Mikrotunneling

Für kurze Strecken gibt es weitere grabenlose Verfahren. Diese werden unter dem Begriff „Mikrotunneling“ zusammengefasst. All diese Verfahren benötigen eine Start- und eine Zielgrube. Von der Startgrube aus werden unterschiedliche Rohre bis zur Zielgrube eingebracht. Die Länge dieser Verfahren ist typischerweise auf ungefähr 1'200 m beschränkt. Entscheidend für die Länge ist die Bodenbeschaffenheit. Die Rohre haben einen Durchmesser von bis zu 3 m.

Die Verfahren werden nach der Bohrart unterteilt:

- Rammvortrieb oder Schlagvortrieb
- Hammerbohren
- Pressbohren

In der Startgrube befindet sich eine Presse, welche Betonrohre oder Stahlrohre ins Erdreich drückt. Die eigentliche Bohrung erfolgt mit unterschiedlichen Methoden. In weichem Boden wird das Erdreich ausgespült. Bei härteren Böden befindet sich vorne eine kleine Tunnelbohrmaschine. Das Erdreich wird dann auch mit einer Spülung oder mit Förderbändern zur Startgrube befördert. In der Regel kann während der Bohrung die Richtung verändert werden.

Für kurze Strecken können kleine Bohrungen verwendet werden, welche nicht begehbar sind. Die Kabel werden in Kabelschutzrohren in das Rohr eingezogen und anschliessend wird das Rohr mit einer Zementmischung verfüllt. Für lange Strecken sind begehbare Verbindungen notwendig. So können die Kabel an den Wänden genau positioniert werden.

Eine typische Anwendung solcher Verfahren ist die Unterquerung einer Strasse, einer Bahnstrecke oder eines Flusses.

Abbildung 17 zeigt ein Beispiel eines Mikrotunnels. In der Startgrube werden Rohre in das Bohrloch eingepresst. Die Rohre werden in der Fabrik vorgefertigt und mit Lastwagen angeliefert. Die Startgrube braucht eine stabile Bodenplatte und ein grosses Widerlager. Das Einpressen des Rohrblocks verursacht eine grosse Kraft auf der Gegenwand. Vorne am Bohrkopf ist die Front einer kleinen Tunnelbohrmaschine zu sehen.

In der Abbildung 18 ist eine Unterquerung eines Flusses gezeigt. Dieser Tunnel ist begehbar und enthält 12 Kabel.

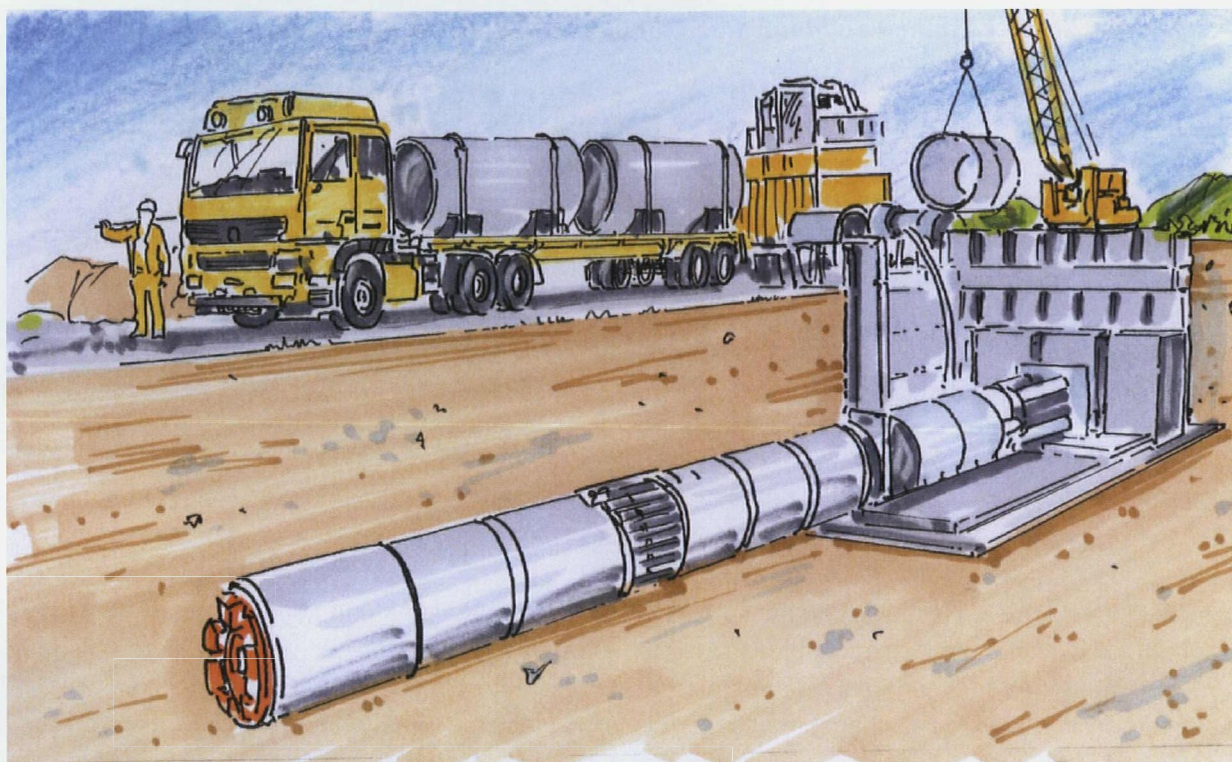


Abbildung 17: Mikrotunneling ist ein kabelloses Verfahren für kurze Strecken. Von einer Startgrube aus werden vorgefertigte Rohrelemente ins Erdreich eingebracht.



Abbildung 18: Darstellung einer Unterquerung eines kleinen Gewässers mit einem Mikrotunnel

5.3.6. Klassischer Tunnel- und Stollenbau für lange Strecken

In sehr anspruchsvollem Gelände wie den Alpen werden in der Regel Tunnel gebaut, in welche die Kabel verlegt werden. Diese Tunnel werden meist in klassischem *Sprengvortrieb* gebaut. Abbildung 19 zeigt den Bau eines kleinen Tunnels, wie er für eine Kabelleitung verwendet wird. Dies ermöglicht den Bau von komplexen Geometrien wie zum Beispiel enge Kurven. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Tunnel in der Länge nicht begrenzt sind.

Wasserkraftwerke, deren Kraftwerkszentralen sich im Berginnern befinden, verwenden seit längerer Zeit *Stollen*, um die elektrische Energie mittels Kabelleitung nach aussen zu führen. Stollen und Tunnel unterscheiden sich einzig dadurch, dass Stollen nur eine Öffnung zur Erdoberfläche haben und Tunnel eine Verbindung zwischen zwei Öffnungen zur Erdoberfläche darstellen.

Der grosse Nachteil von Tunneln und Stollen sind die hohen Kosten. Deshalb verwendet Swissgrid wenn immer möglich andere Bauweisen für Kabelleitungen.

In Siedlungsgebieten lassen sich ebenso Tunnel verwenden. In Berlin und London zum Beispiel, sind Tunnel für eine Kabelleitung mit einer Spannung von 380 kV erstellt worden. Die Schweizer Städte sind deutlich kleiner in ihrer Ausdehnung als die europäischen Grossstädte. So genügt das Verteilnetz, um die Städte zu versorgen. Die Swissgridleitungen führen nur bis in die Nähe der Stadtränder.

Die meist hohe Überdeckung der Tunnel führt zu einer geringen Wärmeableitung an die Erdoberfläche. Dies führt dazu, dass grössere Kabel notwendig sind. Sollte die Transportkapazität trotzdem nicht genügen, hilft eine künstliche Belüftung. Dabei wird Luft von der Erdoberfläche in den Tunnel eingeblasen, nimmt die Wärme auf und führt sie an die Erdoberfläche. Die notwendige Technik ist aufwändig und teuer. Zudem brauchen die Ventilatoren viel Strom.

Abbildung 20 zeigt einen Tunnel in alpinem Gelände. Für eine geringe Transportkapazität genügt ein Tunnel. Oft sind aber zwei Tunnel notwendig. Dies hat den Vorteil, dass bei einer Störung wie zum Beispiel einem Brand die Kabel in einem der beiden Tunnel weiterhin in Betrieb bleiben können.



Abbildung 19: Bau eines Tunnels für eine Kabelleitung. Zuerst werden Löcher gebohrt, mit Sprengladungen gefüllt und dann wird gesprengt. Im Anschluss an die Sprengung muss das ausgebrochene Material abtransportiert werden.



Abbildung 20: Ein Tunnel in alpinem Gelände für eine schwache Kabelleitung. Für eine Kabelleitungen mit einer hohen Transportkapazität sind zwei Tunnels notwendig.

5.4. Vergleich der Bauarten

Beim Bau einer Kabelleitung ist das Gelände massgebend für den Entscheid, welche Bauart verwendet werden kann. In diesem Abschnitt wird für verschiedene Geländearten gezeigt, welche Bauarten sich besser eignen und welche sich weniger eignen. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die Möglichkeiten. Es ist anzumerken, dass ein Tunnel grundsätzlich in jedem Gelände gebaut werden kann. Doch ein Tunnel ist die teuerste Variante. Deshalb wird wenn immer möglich darauf verzichtet.

Die einzelnen Stärken und Schwächen der verschiedenen Bauarten sind in Tabelle 1 beschrieben. Hierzu wird je nach Gelände angegeben, ob die Bauart geeignet, bedingt geeignet oder nicht geeignet ist.

Tabelle 1: Grobe Klassifizierung der Bauarten nach Bodentyp. Verwendet Klassen sind: geeignet, bedingt geeignet, nicht geeignet.

Gelände	Rohrblock	Infrastrukturkanal	Tunnel / Stollen	Horizontal-Spülbohrung	Mikrotunnel
Mittelland	Geeignet	Geeignet	Geeignet	Geeignet (nur kurze Längen)	Geeignet (nur kurze Längen)
Voralpen / Jura	Bedingt geeignet	Bedingt geeignet	Geeignet	Bedingt geeignet	Bedingt geeignet
Alpen	Bedingt geeignet	Bedingt geeignet	Geeignet	Bedingt geeignet	Bedingt geeignet
Siedlungsgebiet	Bedingt geeignet	Geeignet	Geeignet	Geeignet (nur kurze Längen)	Geeignet (nur kurze Längen)
Querung Strasse oder Eisenbahn	Nicht geeignet	Nicht geeignet	Geeignet	Geeignet	Geeignet
Querung Gewässer (Fluss)	Nicht geeignet	Nicht geeignet	Geeignet	Geeignet	Geeignet

Nebst den baulichen Möglichkeiten muss auch auf die Umweltschonung geachtet werden. So ist es zum Beispiel in Wasserschutzzonen sehr schwierig, eine Kabelleitung zu bauen. In Moorengebieten darf eine Kabelleitung nicht realisiert werden. Dort besteht das Risiko, dass die Kabelleitung eine Drainagewirkung hat und das Moor so austrocknet. Auch dürfen keine Grundwasserseen tangiert werden. Denn diese könnten miteinander verbunden werden. Dies muss verhindert werden.

5.5. Netzbetrieb und Instandhaltung der Kabelleitungen

5.5.1. Netzbetrieb

Kabelleitungen sind seit vielen Jahrzehnten Bestandteil der Verteilnetze. Verteilnetze haben eine deutlich tiefere Spannung als das Übertragungsnetz. Im Übertragungsnetz werden Kabel seit einigen Jahren bei Unterwerken verwendet. Mit einer Länge von bis zu wenigen 100 m sind diese Kabel kurz.

Das elektrische Verhalten der Kabel hängt von der Netzspannung im Quadrat und der Länge ab. Beim Ein- und Ausschalten von Kabeln im Übertragungsnetz fliessen kurzzeitig sehr hohe Ströme. Ebenso steigt die Spannung weit an. Wenn Strom und Spannung zu hoch werden, können Netzelemente Schaden nehmen. Ebenso kann es passieren, dass die Leitung nicht mehr ausgeschaltet werden kann. Dies ist besonders gefährlich, da dann mehrere Netzelemente gleichzeitig gefährdet sind.

5.5.2. Instandhaltung der Kabelleitungen

Bei Kabelleitungen stehen die Muffen und Endverschlüsse im Fokus der Kontrollen. Die Kabel selber sind sehr robust. Bei Infrastrukturkanälen und Tunneln wird kontrolliert, ob diese Bauwerke in Ordnung sind. Es besteht das Risiko, dass Risse entstehen oder Wasser eindringt.

Um die Muffen zu kontrollieren, steigen Arbeiter in die Muffenschächte. Sie schauen nach, ob keine Schäden an der Oberfläche der Muffen vorhanden sind. Weiter prüfen sie die Überspannungsableiter. Das sind kleine elektrische Komponenten, welche den Schirm des Kabels vor zu hohen Spannungen schützen. Bei einem Blitzeinschlag kann die Spannung sehr hoch werden. Es kann dann passieren, dass diese Überspannungsableiter einen Defekt erleiden und ausgetauscht werden müssen.

Bei den Übergangsbauwerken kontrollieren die Arbeiter ebenfalls kleinere elektrische Komponenten. Das Kabeltrasse muss bei Rohrblöcken frei von tiefwurzelnden Pflanzen sein. Deshalb müssen die Trassees wie die Freileitungen visuell kontrolliert werden.

Die Kabelproduzenten nehmen an, dass die Kabel mindestens 40 Jahre lang in Betrieb sein können. Danach müssen sie ersetzt werden. Dies ist ein grosser Aufwand. Die alten Kabel müssen aus den Rohren herausgezogen und die neuen Kabel eingezogen werden. Dies kann mehrere Wochen dauern.

Falls ein Kabel, eine Muffe oder ein Endverschluss einen Schaden nehmen, müssen diese Elemente so schnell wie möglich ersetzt werden. Kabel werden immer genau für ein Projekt dimensioniert und hergestellt. Swissgrid hat deshalb kein Ersatzteillager. Die Produktion der Ersatzteile auf Mass dauert mehrere Wochen.

Falls bei einem Rohrblock ein Bagger ein Kabel beschädigt, so ist der Aufwand für eine Reparatur gross. Es muss nicht nur das Kabel ersetzt werden. Auch der Rohrblock muss in den ursprünglichen Zustand gesetzt werden.

6. Übergangsbauwerk

Ein Übergangsbauwerk verbindet eine Freileitung mit einer Kabelleitung. Es braucht also eine Verbindung zwischen den Kabeln und den Leiterseilen. Diese wird mit einem sogenannten *Endverschluss* hergestellt. Ein Endverschluss kann vereinfacht als Kombination einer Muffe mit einem Isolator gesehen werden.

Die Kabel mit den Endverschlüssen werden auf einer ebenen Fläche in regelmässigen Abständen vertikal angeordnet. Die Abstände zwischen den einzelnen Endverschlüssen betragen ungefähr 5 m. Bei einer Leitung mit zwei Systemen und zwei Kabeln pro Phase ergibt dies eine Fläche von ungefähr 52 m Länge und 20 m Breite.

Abbildung 21 zeigt ein solches Übergangsbauwerk. Um die Grösse zu veranschaulichen, befindet sich das Übergangsbauwerk auf einem Fussballfeld. Angedeutet ist die unterirdische Einführung des Rohrblocks.

Ein Übergangsbauwerk ist gross und markant. Swissgrid sucht für Übergangsbauwerke deshalb Standorte, bei denen sie von weitem weniger gut sichtbar sind. Dies kann zum Beispiel ein Waldrand sein. Für das Projekt Gäbihübel wird das eine Übergangsbauwerk im Wald gebaut. Dafür muss Wald dauerhaft gerodet werden. Der Vorteil ist, dass so das Übergangsbauwerk von keiner Seite her einsehbar ist.

Für lange Kabelleitungen, je nach Kabeltyp ab ca. 20 km, braucht es Kompensationsanlagen. Auf das Thema Kompensation geht das Kapitel 7.2 näher ein. Für das elektrische Netz ist es von Vorteil, wenn diese Kompensationsanlagen direkt beim Übergangsbauwerk platziert werden. Damit wird noch mehr Platz benötigt. Zu berücksichtigen gilt es die Lärmemissionen von Kompensationsanlagen. Um die Lärmschutzverordnung einzuhalten, braucht es einen genügend grossen Abstand zum Siedlungsgebiet.

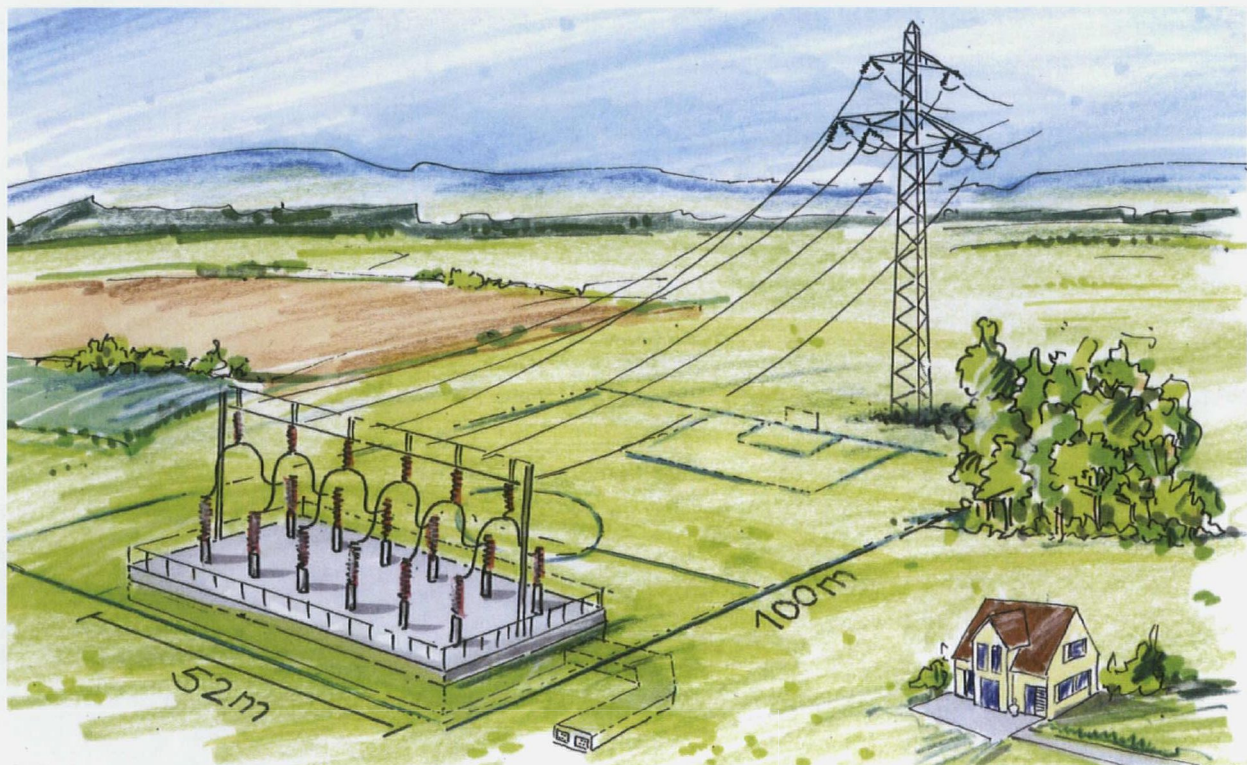


Abbildung 21: Beispiel eines Übergangsbauwerks für eine Leitung mit hoher Transportkapazität (Zwei Systeme und zwei Kabel pro Phase)

7. Technische Aspekte

7.1. Verfügbarkeit

Netzbetreiber haben die Aufgabe, eine möglichst hohe Versorgungssicherheit zu angemessenen Kosten sicherzustellen. Die Versorgungssicherheit wird bei den Netzkunden gemessen. Ihnen soll es möglich sein, zu jeder Zeit Strom nach Bedarf vom Netz zu beziehen. Einerseits muss das Netz ständig verfügbar sein, und andererseits muss das Netz in der Lage sein, genügend Leistung zu transportieren. Schliesslich müssen genügend Kraftwerke am Netz angeschlossen sein.

Die Verfügbarkeit des Netzes hängt unter anderem von der Verfügbarkeit der einzelnen Leitungen ab. Da die Leitungen aufgrund von Instandhaltungsarbeiten oder Störungen nicht ständig verfügbar sind, gibt es im Netz zusätzliche Leitungen, welche die Aufgabe anderer Leitungen übernehmen können. Dies führt zu Ringnetzen und vermaschten Netzen.

Die Verfügbarkeit hängt von geplanten und ungeplanten Ausserbetriebnahmen ab. Leitungen werden geplant ausser Betrieb genommen, damit die Arbeiter für gewisse Tätigkeiten der Instandhaltung oder der *Instandsetzung* vor einem Stromschlag geschützt sind. Ungeplante Ausserbetriebnahmen erfolgen aufgrund von internen und externen Störungen. Bei Freileitungen können als externe Störungen zum Beispiel Blitzeinschläge, Berührungen mit Bäumen oder Vögel, welche vom Mast wegfiegen und die Leiterseile berühren, genannt werden. Bei Kabelanlagen können es Grabarbeiten sein, die zu einem Kurzschluss führen. In solchen Fällen wird die Leitung automatisch vom Netz getrennt. Meist kann eine Freileitung danach sehr schnell wieder in Betrieb genommen werden, da die Störung mit der Abschaltung der Leitung behoben wird. Diese Eigenschaft wird *selbstheilend* genannt. Eine Kabelleitung hat keine selbstheilende Wirkung. Deshalb führt ein Schaden immer zu einem längeren Ausfall der Leitung.

Als interne Fehler werden Materialfehler oder Störungen durch die Alterung bezeichnet. Ein Beispiel ist ein Isolator, der aufgrund der Sonneneinstrahlung seine Isolationsfähigkeit verloren hat. Oder eine Kabelmuffe, welche bei der Herstellung oder der Montage einen Schaden nahm oder durch Alterung im Betrieb Schaden nimmt.

Als Beispiel ist hier die neue Kabelleitung zum neuen Pumpspeicherkraftwerk Linth-Limmern im Kanton Glarus erwähnt. Die Leitung ist ca. 4 km lang und befindet sich in einem Stollen. Ende Januar 2017 gab es einen Defekt in einer Muffe. Die Leitung ist seitdem ausser Betrieb. Die Lieferzeit eines neuen Kabelstücks dauert mehrere Wochen bis zu mehreren Monaten. Die Reparatur und Wiederinbetriebnahme der Leitung ist für den Herbst 2017 geplant. Damit ist die Leitung für mindestens 9 Monate ausser Betrieb. Swissgrid hofft, dass dieser Defekt ein Einzelfall bleibt.

Bei Freileitungen können Isolatoren ebenfalls einen Defekt haben. Wenn der Zugang zur Leitung gewährleistet ist, ist ein Isolator schnell ersetzt. Schwieriger wird es in alpinem Gelände. Wenn hoher Schnee liegt und schlechtes Wetter herrscht, kann es mehrere Tage dauern, bis ein Helikopter die Arbeiter und den Ersatzisolator an den Einsatzort bringt.

7.2. Kompensation der Blindleistung

7.2.1. Grundlagen der Elektrotechnik

Freileitungen und Kabelleitungen haben unterschiedliche elektrische Eigenschaften. Beim *Stromtransport* führt das unter anderem dazu, dass die Spannung bei Freileitungen sich nur leicht ändert, bei Kabelleitungen hingegen stark steigt. In der Technik spricht man von Blindleistung, welche die Spannung beeinflusst.

Bei elektrischen Netzen ist genau definiert, in welchem Bereich sich die Spannung bewegen darf. Wenn der technisch zulässige Bereich nicht eingehalten wird, können Komponenten im Netz oder bei den Netzkunden Schaden nehmen. Weil Kabelleitungen die Spannung proportional zu ihrer Länge erhöhen, kann Swissgrid ohne Massnahmen zur Kompensation der Blindleistung keine beliebig langen Kabelleitungen betreiben. Die maximal mögliche Länge ohne Kompensationsmassnahmen hängt von der Netzspannung, der Kapazität der Leitung sowie des umliegenden Netzes ab und ist von Kabelleitung zu Kabelleitung unterschiedlich.

Um lange Kabelleitungen im Höchstspannungsnetz betreiben zu können, braucht es sogenannte Blindleistungs-Kompensationsanlagen (kurz Kompensationsanlagen). Es gibt verschiedene Typen von Kompensationsanlagen. Die Hauptkomponente der einfachsten Version ist eine Drossel. Eine Drossel ist ähnlich gebaut wie ein Transformator und verursacht ähnliche Geräuschemissionen. Kompensationsanlagen werden wenn möglich direkt beim Übergang von Kabel auf Freileitung platziert. Bei einer Kabelleitung, welche zwei Unterwerke miteinander verbindet, hat Swissgrid die Möglichkeit, die Kompensationsanlagen direkt in den Unterwerken zu bauen. Eventuell ist eine weitere Anlage in der Mitte der Kabelleitung notwendig.

Bei kürzeren Kabelleitungen und einem gesamthaft geringen Kabelanteil im Netz kann Swissgrid auf den Bau von Kompensationsanlagen verzichten. Nichtsdestotrotz muss die Spannung gesenkt werden. Dies machen die Schweizer Grosskraftwerke, welche sich nahe der Kabelleitung befinden. Den Kraftwerken entstehen dadurch Kosten. Swissgrid entschädigt sie deshalb für ihren Aufwand zur Einhaltung des Spannungsbands. Diese Leistungen gehören zum Kostenblock „Systemdienstleistungen“ auf jeder Stromrechnung. (vergleiche Kapitel 8.4.).

7.2.2. Ein Wasserwerk als Analogie zu einem elektrischen Netz

Die wesentlichen Elemente der Elektrotechnik, die Spannung und der Strom, sind sehr abstrakt. Um den oben beschriebenen Sachverhalt besser zu verstehen, wird hier eine Wasserversorgung als Analogie erklärt. Abbildung 22 zeigt einen künstlichen See, der ungefähr zu dieser Analogie passt. Die wesentlichen Elemente, die sich bei Wasserwerk und Swissgrid entsprechen sind folgende:

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| • Wasserwerk | Netzbetreiber (Swissgrid) |
| • Wasserstand des Sees | Netzfrequenz (50 Hz) |
| • Sauberkeit des Wassers | Netzspannung |
| • Pumpleistung der Pumpstationen | Leistung der Kraftwerke |
| • Reinigungsanlage | Kompensationsanlage für Blindleistung |

Analogie Wasserwerk

Ein künstlicher See dient als Speicher für Trinkwasser. Das Klima ist sehr trocken, die natürlichen Zuflüsse sehr gering. Der See wird mit Grundwasser gespeist. Mehrere Pumpstationen sind notwendig, um das Grundwasser in den See zu transportieren. Das Grundwasser ist in der Regel genügend sauber. Doch bei Bedarf können die Pumpstationen das Wasser auch reinigen.

Das Wasserwerk ist verantwortlich, dass der Wasserstand immer einen bestimmten Wert hat und das Wasser genügend sauber ist. Es macht deshalb genaue Vorgaben für Leistung und Reinigung an die Pumpstationen.

Rund um den See deckt ein Wald den grössten Teil der Fläche ab. An wenigen Orten wird Landwirtschaft betrieben. Die Bauern bewässern und düngen die Flächen. Der Teil der Fläche ist Weideland. Bei normalen Wetterverhältnissen ist der Einfluss des Düngers inklusive Mist auf die Wasserqualität des Sees und das Grundwasser vernachlässigbar. Bei starkem Regen jedoch wird der Dünger direkt in den See geschwemmt. In solchen Fällen gibt das Wasserwerk den Pumpstationen einen höheren „Reinheitsgrad“ vor. Im See vermischt sich der Dünger mit dem sauberen Wasser, so dass im Mittel die Wasserqualität wieder den Anforderungen entspricht.

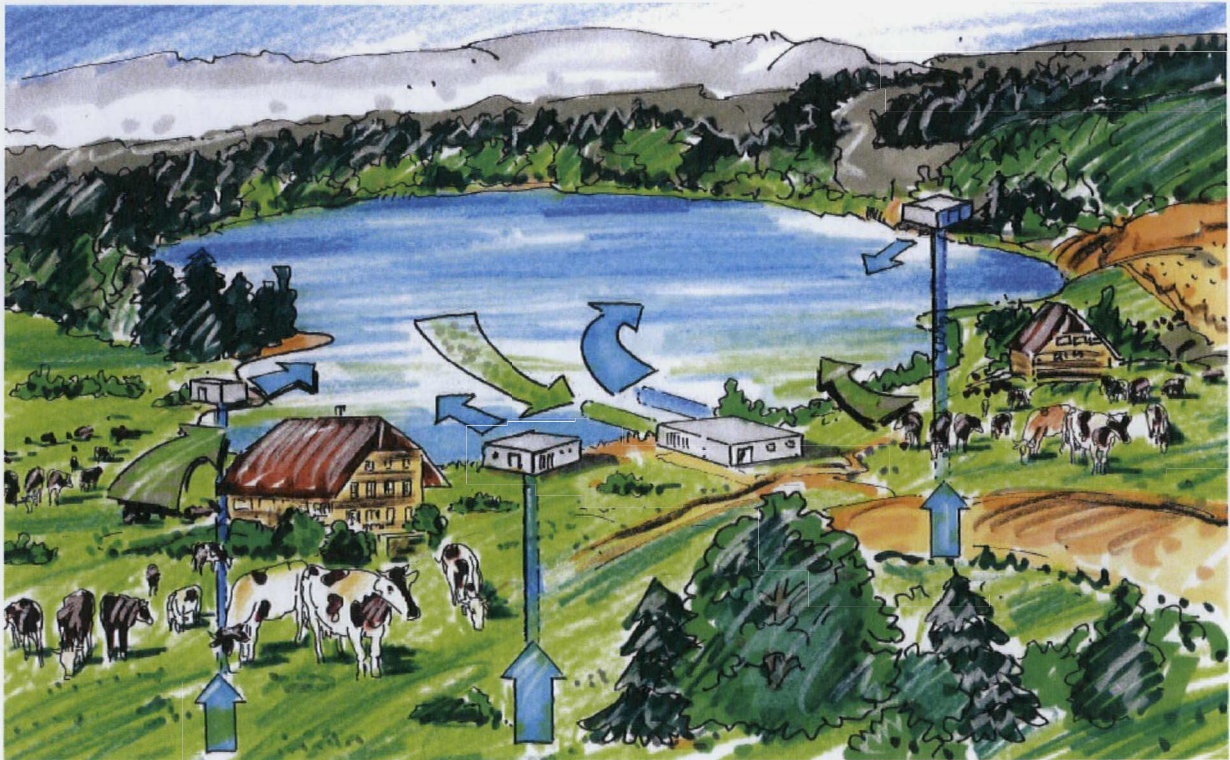


Abbildung 22: Wasseranalogie: Ein See dient als Trinkwasserspeicher. Pumpstationen fördern Grundwasser in den See. Bei Starkregen verunreinigt der Dünger auf den Landwirtschaftsflächen das Seewasser. Die Pumpstationen müssen das Grundwasser speziell reinigen. Doch mit zunehmender Landwirtschaft genügt dies nicht. Das Wasserwerk muss eine eigene Reinigungsanlage bauen, um den See genügend sauber zu halten.

Das Wasserwerk entschädigt die Pumpstationen für das geförderte Wasser und dessen Säuberung. So verursacht starker Regen beim Wasserwerk zusätzliche Kosten im Vergleich zu den normalen Wetterbedingungen.

Im Verlauf der Zeit siedeln sich immer mehr und mehr Bauern an und wandeln einen Teil der Waldfläche in Landwirtschaftsfläche um. Damit erhöht sich die Menge an Dünger, welcher bei Regen direkt in den See fließt. Die Kosten für die Reinigung des Wassers steigen. Doch irgendwann reicht die Kapazität der Pumpstationen nicht mehr, um genügend sauberes Wasser in den See zu pumpen. Der See ist nicht mehr genügend sauber. Das Wasserwerk muss nun an einem zentralen Ort oder direkt bei den Landwirtschaftsgebieten eine Reinigungsanlage bauen. Nur so bleibt das Wasser auch bei starkem Regen genügend sauber.

Die Frage, wann der Bau von Reinigungsanlagen erforderlich ist, ist nicht eindeutig zu beantworten. Folgende Aspekte muss das Wasserwerk berücksichtigen:

- *Wie stark können die Niederschläge werden?*
- *Wie oft treten solch intensive Niederschläge auf?*
- *Wie oft und wie intensiv düngen die Bauern ihre Nutzfläche?*
- *An wie vielen Stellen im See kann das Wasser verunreinigt werden?*
- *Wie kritisch ist die Sauberkeit des Wassers? Darf das Wasserkraftwerk in Kauf nehmen, dass das Wasser manchmal nicht genügend sauber ist? Genügt es, den Mittelwert des Sees zu berücksichtigen oder braucht es eine lokale Betrachtung?*

Das Wasserwerk muss all diese Aspekte untersuchen und Annahmen treffen. Unter der Berücksichtigung der Kosten fällt das Wasserwerk dann den Entscheid, wann es eine Reinigungsanlage baut.

Der vollständige Vergleich aller sich entsprechenden Elemente von Wasserwerk und Netzbetreiber ist hier aufgeführt:

- | | |
|---|---|
| • Wasserwerk | Netzbetreiber (Swissgrid) |
| • Landwirtschaftsfläche | Leitungen: Freileitung und Kabelleitung |
| • Grösse der Landwirtschaftsfläche | Länge der Leitungen |
| • Wasserstand des Sees | Netzfrequenz (50 Hz) |
| • Sauberkeit des Wassers | Netzspannung |
| • Pumpleistung der Pumpstationen | Leistung der Kraftwerke |
| • Reinigung des Wassers durch Pumpstationen | Blindleistung der Kraftwerke (Netzdienstleistung) |
| • Verunreinigung des Wassers durch Dünger | Blindleistung der Leitungen |
| • Reinigungsanlage | Kompensationsanlage |

7.3. Verluste

7.3.1. Einführung und Übersicht

Stromtransport führt zu elektrischen Verlusten. Die Leitermaterialien leiten den elektrischen Strom sehr gut. Doch ein kleiner Teil des Stroms wird in Wärme umgewandelt. Ebenso führt die Spannung zu Verlusten. Bei Freileitungen sind dies sogenannte „Korona-Verluste“. Bei den Kabeln ist es das Isolationsmaterial, welches einen kleinen Teil des Stroms leitet und so ebenfalls zu Verlusten führt.

Ein Kabel erzeugt Blindleistung, welche kompensiert werden muss. Die durch die Kompensation entstehenden Verluste haben dieselbe Grössenordnung wie die Leiterverluste des Kabels.

7.3.2. Klassifizierung der Verlustkomponenten

Die verschiedenen Verlustkomponenten können nach zwei unterschiedlichen Kriterien klassifiziert werden.

Die erste Klassifizierung orientiert sich an den Grössen, welche die Verluste verursachen: Strom und Spannung. Stromabhängige Verluste enthalten alle Verlustkomponenten, welche einzig vom Strom und damit vom Leistungsbezug der Verbraucher abhängen. Dies sind die Leiterverluste. Spannungsabhängige Verluste entstehen bereits bei der Bereitstellung der Versorgung und sind einzig durch die Spannung verursacht. Dies sind die dielektrischen Verluste sowie die Verluste durch die Kompensation der Blindleistung.

Die zweite Klassifizierung unterscheidet zwischen Verlusten, welche direkt im Kabel entstehen (Wirkleistungsverluste) und Verlusten, welche durch das Zusammenspiel von Kabel und Netz entstehen (Blindleistungsverluste). Tabelle 2 enthält eine Darstellung, welche die Zuordnung der einzelnen Verlustkomponenten zu den beiden Klassifizierungen enthält.

Tabelle 2: Klassifizierung der verschiedenen Verlustkomponenten mittels zweier Kriterien

	Wirkleistungsverluste	Blindleistungsverluste
Stromabhängige Verluste	Leiterverluste	
Spannungsabhängige Verluste	Dielektrische Verluste	Kompensationsverluste

7.3.3. Beispiel: 1.5 km lange Leitung mit 380 kV

Mit Hilfe eines Beispiels wird veranschaulicht, wie gross die Verluste in einer Freileitung und in einem Kabel sind. Als Beispiel wird die Teilverkabelung Gähubel verwendet. Die Verluste werden den Kategorien Wirk- und Blindleistungsverluste zugeordnet.

Folgende Grössen bilden die Grundlage für die Verlustberechnung: Mittlerer Strom: 800 A, Spannung: 410 kV⁵, Freileitung: Zweierbündel mit je 1'000 mm² Aldrey, Kabelleitung: 2 Kabel pro Phase mit je 2'500 mm² Aluminium.

⁵ Im Betrieb ist die Spannung höher als die Nennspannung von 380 kV. Im Schnitt beträgt die Spannung ungefähr 410 kV.

Die Resultate sind in Tabelle 3 dargestellt. Da die Kabel deutlich grössere Querschnitte haben als die Leiterseile, sind die Leiterverluste beim Kabel deutlich geringer als bei der Freileitung. Die dielektrischen Verluste sind beim Kabel jedoch deutlich höher als bei der Freileitung.

In der Summe hat die Kabelleitung weniger Wirkleistungsverluste als die Freileitung. Sie betragen nur 56% der Wirkleistungsverluste der Freileitung. Bei den Blindleistungsverlusten sieht es anders aus: das Kabel verursacht im Netz sehr grosse Blindleistungsverluste. Die Freileitung im Gegensatz dazu führt zu sehr geringen Blindleistungsverlusten. Vergleicht man nun die totalen Verluste, zeigen sich deutlich höhere Verluste bei der Kabelleitung als bei der Freileitung: Die Kabelleitung weist 33% mehr Verluste auf als die Freileitung.

Tabelle 3: Verluste für eine Freileitung und eine Kabelleitung. Die Zahlen der Kabelleitung basieren auf der Teilverkabelung Gähühel und sind auf eine Leitungslänge von 1 km normiert. Für die Freileitungsanschlüsse verwendet Swissgrid ein Doppelbündel bestehend aus zwei 1'000-mm²-Aldrey-Seilen. Die Kabelleitung besteht aus zwei 2'500-mm²-Aluminium-Kabeln und die Verlustangaben stammen vom Kabellieferanten. Der Strom beträgt 800 A und die Betriebsspannung 410 kV. Für den $\tan \delta$ wird 0.0003 angenommen.

	Freileitung (2 x 1'000 mm ² Aldrey)	Kabelleitung (2 x 2'500 mm ² Aluminium)
Wirkleistungsverluste		
• Leiterverluste	34.5 kW/km	12.2 kW/km
• Dielektrische Verluste	2.86 kW/km	8.7 kW/km
Total Wirkleistungsverluste	37.4 kW/km	20.9 kW/km
Blindleistungsverluste im Netz		
• Verluste durch Blindleistungskompensation	0.1 kW/km	29.0 kW/km
Totale Verluste	37.5 kW/km	49.9 kW/km

Es ist schwierig, für Kabelleitungen allgemein gültige Aussagen zu den Verlusten zu machen. Denn unterschiedliche Kabeltypen weisen unterschiedliche Verlusteigenschaften auf. Dies gilt ebenso für die Kompensationsanlagen. Für die Berechnung in der Tabelle 3 wurden optimistische Annahmen getroffen. Werden konservative Werte verwendet, so betragen die totalen Verluste für die Kabelleitung selbst und das Netz 84.7 kW/km. Das sind 126% mehr als bei der Freileitung. In der Realität liegt für diesen Vergleich der Wert irgendwo zwischen 33% und 126%.

7.4. Elektrische Schwingung

Die Kombination von Kabelleitungen und Kompensationsanlagen führt zu Schwingungen im Netz. Elektrische Energie schwingt von der Kabelleitung zur Kompensationsanlage hin und her, wie das Pendel einer Uhr.

Je mehr Kombinationen von Freileitungen, Kabelleitungen und Kompensationsanlagen im Netz sind, umso grösser wird das Risiko, dass Schwingungen im Netz unbeherrschbar werden. Eine einfache Analogie sind Soldaten, welche im Gleichschritt über eine Brücke marschieren. Sie können dadurch eine Schwingung der Brücke anregen, welche die Brücke zum Einsturz bringt. Dies tritt nur ein, wenn die Brücke ungenügend dimensioniert ist. Das heisst, dass alle Schwingungen nicht zu stark werden dürfen.

8. Kostenvergleich von Leitungen

8.1. Lebenszyklus

Swissgrid berücksichtigt für den Kostenvergleich von Freileitungen und Kabelleitungen alle Kosten, welche über den gesamten Lebenszyklus anfallen. Dies beginnt bei der Planung, über die Beschaffung aller Komponenten, die Montage, den Betrieb der Leitung bis zu ihrem Rückbau. Die Summe aller Kosten wird Lebenszykluskosten genannt.

Swissgrid geht davon aus, dass eine Leitung ungefähr 80 Jahre genutzt wird. In dieser Zeit fallen die Kosten für Betrieb, Instandhaltung und Instandsetzung an. Weiter müssen einzelne Komponenten regelmässig ersetzt werden, da sie nicht 80 Jahre halten. Die teuerste dieser Komponenten sind die Kabel inklusive Garnituren (darunter Muffen, Endverschlüsse, Überspannungsleiter). Die Kabellieferanten schätzen, dass die Kabel 40 Jahre halten. In der Berechnung der Lebenszykluskosten ist deshalb nach 40 Jahren ein Ersatz der Kabel enthalten.

Ein wichtiger Aspekt sind die Verluste. Diese werden ebenfalls über die gesamte Lebensdauer berücksichtigt.

8.2. Barwertmethode

Wie vergleicht man eine Vielzahl von Kosten, welche zu unterschiedlichen Zeiten anfallen? Der grösste Teil der Ausgaben fällt zu Beginn an. Danach folgen jährliche Kosten. Es kann sein, dass eine Variante zunächst günstig im Bau ist, danach aber hohe Folgekosten aufweist. Bei einer anderen Variante kann es genau umgekehrt sein. Die einfachste Lösung ist, die Summe aller Kosten zu bilden. Mit diesem einfachen Vorgehen wird aber nicht berücksichtigt, dass der Wert des Geldes sich mit der Zeit verändert.

Viele Leute, die Rechnungen bezahlen, nutzen die volle Zahlungsfrist aus. Dies tun sie zum Teil, obwohl sie genügend Geld auf dem Konto haben und die Rechnung auch sofort bezahlen könnten. Denn für das Geld auf dem Konto erhalten sie Zins. Es spielt also einen grossen Unterschied, ob die Rechnung sofort bezahlt werden muss oder ob sie zum Beispiel erst in 40 Jahren zu begleichen ist. Denn in 40 Jahren gibt es einen grossen Zinseszins auf dem Geld, das heute auf dem Konto liegt.

Swissgrid verwendet die sogenannte Barwertmethode, um die Lebenszykluskosten verschiedener Varianten zu vergleichen. Die Barwertmethode bildet auch eine Summe. Doch die Kosten, welche in der Zukunft anfallen, werden nicht zu 100% mitgezählt. Je später sie anfallen, umso kleiner wird der Geldbetrag, der heute auf die Seite gelegt werden muss. Die Summe aller Kosten, welche mit der Zeit gewichtet werden, nennt sich Barwert.

Der Vorteil der Barwertmethode ist, dass pro Variante ein einziger Wert resultiert. So ist ein einfacher Vergleich der Kosten möglich.

9. Schlussbemerkungen

Frei- und Kabelleitungen haben verschiedene technische Eigenschaften. Dies führt zu einem unterschiedlichen technischen Verhalten der Leitung. Kabelleitungen weisen eine geringere Verfügbarkeit als Freileitungen auf, da sie nicht „selbstheilend“ sind. Weiter erzeugen Kabelleitungen Blindleistung, die kompensiert werden muss. Aufgrund ihrer Eigenschaften verursachen Kabelleitungen, zusätzlich zu den Wirkleistungsverlusten, hohe Blindleistungsverluste. Kabelleitungen haben deshalb insgesamt höhere Verluste als Freileitungen, obwohl Freileitungen beim Wirkleistungsanteil höhere Verluste aufweisen.

Eine Leitung ist immer Teil eines Netzes und kann nicht isoliert betrachtet werden. Es braucht eine gesamtheitliche Darstellung ihrer Funktion und Auswirkungen. Schlussendlich dient eine Leitung der elektrischen Versorgung. Und die elektrische Versorgung insgesamt hat unterschiedliche Einflüsse auf *Raumentwicklung* und Umwelt. Es lohnt sich unter Umständen nicht, mit der Gestaltung einer einzelnen Leitung an einer kleinen Schraube zu drehen, um lokale negative Aspekte zu verringern. Denn gleichzeitig kann ein grösserer Schaden an einer anderen Stelle im Netz entstehen.

Doch wie wird nun bei einem Leitungsbauprojekt ein Entscheid zugunsten einer Freileitung oder Kabelleitung gefällt? Wichtig zu betonen ist, dass es nicht nur zwei Varianten gibt. Meist kann die Leitung entlang unterschiedlicher Trassees gebaut werden. Je nach Trasseee eignet sich eine Freileitung oder eine Kabelleitung besser. Und dann gibt es immer die Möglichkeit einer Kombination von Freileitungs- und Kabelleitungsabschnitten.

Wichtig bei einem Entscheid ist, dass eine umfassende Prüfung aller vier Aspekte Raumentwicklung, Umweltschonung, Technik und Wirtschaftlichkeit stattgefunden hat. Zuerst gilt es, aus einer Vielzahl an möglichen Varianten diejenigen Varianten zu erarbeiten, welche sich für das Projekt besonders gut eignen. Im zweiten Schritt bewerten die Interessenvertreter gemeinsam die erarbeiteten Varianten. Dazu berücksichtigen sie die vier Aspekte Raumentwicklung, Umweltschonung, Technik und Wirtschaftlichkeit. Der dritte Schritt schlussendlich besteht darin, dass die Interessenvertreter alle Stärken und Schwächen der Varianten abwägen und sich für eine Variante entscheiden. Diese Variante sollte damit die höchste Akzeptanz geniessen.

10. Literaturverzeichnis

- [1] E. D. d. Innern, «Wegleitung für die landschaftsschonende Gestaltung von Übertragungsanlagen für elektrische Energie und Nachrichten,» Eidgenössisches Departement des Innern, Bern, 1980.
- [2] B. Jordi, «Der Waldboden - Ein optimaler Filter,» *"Umwelt" - Bundesamt für Umwelt BAFU*, pp. 32-35, 03 2005.

11. Anhang

11.1. Glossar

Begriff	Definition / Erklärung
Ausleger	Seitliche Auskragung an einem Freileitungsmasten. Daran sind die Isolator Ketten mit den Leiterseilen befestigt.
Endverschluss	Der Übergang von einem Kabel auf ein Leiterseil
Erdseil	Das oberste Seil auf der Freileitung. Es schützt die Leitung vor Blitzeinschlägen und verbindet alle Masten miteinander. So haben diese dasselbe elektrische Potential.
Erdung	Überall wo Strom fliessen kann, müssen leitende Materialien geerdet sein. Das heisst, es braucht eine elektrische Verbindung mit dem Erdbereich. So wird sichergestellt, dass keine gefährliche Spannungen entstehen.
Flüssigboden	Eine Mischung von Erde und Zement. Es leitet die Wärme gut. In der Schweiz verboten, da der Flüssigboden giftige Stoffe enthält.
Freileitung	Eine überirdische Hochspannungsleitung
Halbleiter	Ein Material, welches weder ein Leiter noch ein Nicht-Leiter ist. Es leitet den Strom praktisch nicht, gleicht aber die Spannung aus.
Instandhaltung	Kombination aller technischen und administrativen Massnahmen sowie Massnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Anlage zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie (die Anlage) die geforderte Funktion erfüllen kann (DIN 31051)
Instandsetzung	Reparatur einer Anlage, einer defekten Komponente oder eines Bauteils
Kabelleitung	Unterirdische Hochspannungsleitung
Leiter	Ein Material oder ein Bauteil, welches Strom leitet.
Leiterseil	Seile auf einer Freileitung, welche den Strom leiten.
Phase	Leitendes Element mit Spannung.
Schirm	Ein elektrischer Leiter, welcher sich in einem Kabel ausserhalb der Isolation befindet.
Selbstheilend	Eine Isolation wird als selbstheilend bezeichnet, wenn die Isolation nach einer Störung von alleine wieder funktionsfähig wird.
Sprengvortrieb	Eine Methode für den Bau von Tunneln. Mittels einzelnen Sprengungen wird der Fels abgetragen.
Stollen	Ein von der Erdoberfläche aus gebauter Gang in einen Berg
Strang	Bei Leitungen wird anstelle von (Drehstrom) System auch von Strang gesprochen.
Stromtransport	Elektrische Energie wird in Kraftwerken an unterschiedlichen Orten produziert und wird durch die Stromkonsumenten an unterschiedlichen Orten gebraucht. Mit Stromtransport wird der Transport der elektrischen Energie bezeichnet.
System	Kurz für Drehstromsystem: besteht aus drei leitenden Elementen, überträgt den Strom von A nach B
Transportkapazität	Die Leiterseile oder die Kabel werden durch eine Belastung mit Strom und Spannung warm. Da sie nicht zu heiss werden dürfen, ist die Transportfähigkeit begrenzt. Diese gibt an, wie viel Strom bei welcher Spannung transportiert werden kann.
Unterwerk	Eine Anlage, welche Leitungen miteinander verbindet. Oft werden auch und Netzen mit unterschiedlichen Spannungen verbunden.

11.2. Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Definition / Erklärung
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
EICom	Elektrizitätskommission
ESTI	Eidgenössisches Starkstrominspektorat
StromVG	Stromversorgungsgesetz
StromVV	Stromversorgungsverordnung
UW	Unterwerk

11.3. Rechtsgrundlagen im Bereich Stromversorgung und Elektrizität

Die verfahrensbestimmende Grundlage, nach der sich die Projektierung von Höchstspannungsleitungen richten muss, ist die **Verordnung über das Plangenehmigungsverfahren für elektrische Anlagen** (VPeA). Diese stützt sich auf das **Elektrizitätsgesetz** (EleG). Folgende Gesetze und Verordnungen sind bei der Projektierung von Höchstspannungsleitungen ebenfalls relevant: (Auflistung nicht vollständig)

- Energiegesetz EnG
- Stromversorgungsgesetz StromVG
- Stromversorgungsverordnung StromVV
- Verordnung über elektrische Leitungen LeV (Leitungsverordnung)
- Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung)

Raumplanungsgesetzgebung

Folgende Gesetze und Verordnungen müssen bei der Projektierung von Höchstspannungsleitungen berücksichtigt werden:

- Raumplanungsgesetz RPG
- Raumplanungsverordnung RPV

Umweltschutzgesetzgebung

Folgende Gesetze und Verordnungen müssen bei der Projektierung von Höchstspannungsleitungen berücksichtigt werden:

- Umweltschutzgesetz USG
- Verordnung zur Umweltverträglichkeitsprüfung UVPV
- Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung NISV
- Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz NHG
- Verordnung zum Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz NHV
- Verordnung über das Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler VBLN
- Verordnung über das Bundesinventar der schützenswerten Ortsbilder der Schweiz VISOS
- Verordnung über das Bundesinventar der historischen Verkehrswege der Schweiz VIVS
- Verordnung über den Schutz der Auengebiete von nationaler Bedeutung (Auenverordnung)
- Verordnung über den Schutz der Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung (Hochmoorverordnung)
- Verordnung über den Schutz der Flachmoore von nationaler Bedeutung (Flachmoorverordnung)
- Verordnung über den Schutz der Amphibienlaichgebiete von nationaler Bedeutung (Amphibienlaichgebietsverordnung)
- Verordnung über den Schutz der Moorlandschaften von besonderer Schönheit und von nationaler Bedeutung (Moorlandschaftsverordnung)
- Verordnung über die Pärke von nationaler Bedeutung (Pärkeverordnung)
- Verordnung über den Schutz der Trockenwiesen und –weiden von nationaler Bedeutung (Trockenwiesenverordnung)
- Bundesgesetz über den Wald WaG (Waldgesetz)
- Verordnung über den Wald WaV (Waldverordnung)
- Bundesgesetz über die Jagd und den Schutz wildlebender Säugetiere und Vögel JSG (Jagdgesetz)
- Verordnung über die eidgenössischen Jagdbanngebiete VEJ
- Verordnung über die Wasser- und Zugvogelreservate von internationaler und nationaler Bedeutung WZVV

- Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer GSchG (Gewässerschutzgesetz)
- Gewässerschutzverordnung GSchV
- Bundesgesetz über die Fischerei BGF
- Verordnung zum Bundesgesetz über die Fischerei VBGF

Vor allem während der Bauphase sind nebst den oben genannten Erlassen folgende Gesetze und Verordnungen zu beachten:

- Luftreinhalte-Verordnung LRV
- Lärmschutz-Verordnung LSV
- Verordnung über Belastungen des Bodens VBBo

Benachbarte Infrastrukturen

Folgende Gesetze und Verordnungen müssen bei der Projektierung von Höchstspannungsleitungen berücksichtigt werden:

- Bundesgesetz über die Nationalstrassen NSG
- Bundesgesetz über Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brenn- oder Treibstoffe RLG (Rohrleitungsgesetz)
- Verordnung über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen RLSV
- Bundesgesetz über den Wasserbau
- Verordnung über den Wasserbau WBV (Wasserbauverordnung)
- Bundesgesetz über die Luftfahrt LFG (Luftfahrtgesetz)

Kantonale Regelungen

Zur oben erwähnten Bundesgesetzgebung sind die entsprechenden kantonalen Ausführungsgesetze und –verordnungen zu berücksichtigen.

Weitere wichtige Regelungen und Arbeitshilfen

Folgende Weisungen und Arbeitshilfen sind bei der Projektierung von Höchstspannungsleitungen ebenfalls relevant:

- Bewertungsschema für Übertragungsleitungen, Bundesamt für Energie (BFE), 2013
- Handbuch zum Bewertungsschema Übertragungsleitungen, Bundesamt für Energie (BFE), 2013
- Sachplan Übertragungsleitungen (SÜL), Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 2001
- Elektrizitätsübertragung und Landschaftsschutz, Wegleitung des Eidgenössischen Departements des Innern von 1980
- Arbeitshilfe Umweltschutzmassnahmen beschreiben und darstellen, Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2008
- UVP-Handbuch: Richtlinie des Bundes für die Umweltverträglichkeitsprüfung, Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2009