

Kabelstudie Schweiz

Datum 3. Februar 2025
Verfasst von Swissgrid, Business Unit Market

Inhalt

1	WP 1 – Blindleistungskompensation	3
1.1	Anwendungsbereich und Ziele	3
1.2	Wirk- und Blindleistung	4
1.3	Blindleistungskompensation in Verkabelungsprojekten	8
1.4	Notwendige Ausgleichselemente in allen drei Szenarien	10
1.4.1	Szenario 1	10
1.4.2	Szenario 2	13
1.4.3	Szenario 3	17
1.4.4	Zusammenfassung des Bedarfs an Reaktivitätskompensation	22
1.5	Geschätzter Platzbedarf für die BLK in Szenario 3	23
1.6	Kostenberechnung der Ausgleichselemente der drei Szenarien	27
2	WP 2 – EMT-Studien auf der Ebene von Systemen und Geräten	28
2.1	Executive Summary	28
2.1.1	Studien zu Frequenz-Scans	28
2.1.2	Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen	29
2.1.3	Zeitstudien (Einschalten von grossen Transformatoren)	30
2.1.4	Spannungsänderungen aufgrund von Kabelverbindungen und oder des Verlusts einer Kompensationseinrichtung	31
2.2	Studien zu Frequenz-Scans	32
2.2.1	Methodik	33
2.2.2	Ergebnisse und Diskussionen	35
2.2.3	Fazit	56
2.3	Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen	57
2.3.1	Methodik	59
2.3.2	Ergebnisse und Diskussionen	61
2.3.3	Schlussfolgerungen	80
2.4	Zeitstudien	82

2.4.1	Theoretischer Hintergrund	83
2.4.2	Methodik	85
2.4.3	Ergebnisse und Diskussionen	87
2.4.4	Fazit	108
2.5	Spannungsänderungen durch das Verbinden oder Trennen von Kabeln und Ausgleichsvorrichtungen	110
2.5.1	Spannungsänderungen, die durch das Verbinden/Trennen eines Kabels verursacht werden	110
2.5.2	Spannungsänderungen, die durch die Trennung eines Ausgleichselements verursacht werden	114
3	WP 3 – Netzwiederaufbau nach einem Blackout	115
3.1	Einleitung	115
3.2	Netzwiederaufbau mit Kabeln	116
3.3	Rekonstruktionszelle Süd (OFIMA-OFIBLE)	116
3.4	Zentrale Aufbauzelle (KWO)	118
3.5	Schlussfolgerungen	122
4	Referenzen und Anhänge	123
4.1	Referenzen WP 1	123
4.2	Referenzen WP 2	123
4.3	WP 3 – Referenzen	124
4.4	Anhänge WP 2	125
4.4.1	Untersuchte Szenarien	125
4.4.2	Netzwerkmodellierung in EMTP	129
4.4.3	Frequenz-Scans für Szenario 3	150
4.4.4	Verstärkungsfaktoren für die 3 Szenarien und die verschiedenen Oberschwingungseinspeisepunkte	176

Alle Rechte, insbesondere das Vervielfältigen und andere Eigentumsrechte, sind vorbehalten.
Dieses Dokument darf in keiner Weise gänzlich oder teilweise vervielfältigt oder Dritten zugänglich gemacht werden ohne eine ausdrückliche schriftliche Genehmigung seitens Swissgrid AG.
Swissgrid AG übernimmt keine Haftung für Fehler in diesem Dokument.

1 WP 1 – Blindleistungskompensation

1.1 Anwendungsbereich und Ziele

Die Zahl der Projekte für Kabelverbindungen im Schweizer Übertragungsnetz ist in den letzten Jahren enorm gestiegen. Die Kabel, um die es in dieser Studie geht, sind unterirdische XLPE-Stromkabel. Nachfolgend wird zur besseren Lesbarkeit das Wort «Kabel» verwendet.

Bisher wurde jedes neue Projekt und seine Auswirkungen auf das Netz einzeln analysiert. Studien für Verkabelungsprojekte wie das Gotthard-Projekt haben gezeigt, dass Kabel einen erheblichen Einfluss auf die Funktionsweise des Netzes haben.

Die wichtigsten Auswirkungen sind folgende:

- Erhöhung des Spannungspegels aufgrund der Blindleistungserzeugung durch die Kabel.
- Beobachtung von Resonanzphänomenen durch die Abnahme der Resonanzfrequenzen aufgrund des erhöhten Kabelanteils.
- Erhöhung des Oberschwingungsgehalts im Netz, da die Kabel wie ein Verstärker wirken.
- Da diese Effekte bereits bei den derzeit geplanten Kabeln zu beobachten sind, ist zu erwarten, dass die Auswirkungen dieser Phänomene mit zunehmender installierter Kabellänge noch stärker ausfallen werden. In dieser Situation ist es ratsam, einen Schritt weiter zu gehen und mehr Informationen über die Auswirkungen einer deutlichen Zunahme der Anzahl von Kabelprojekten zu sammeln. Somit ist es möglich, Herausforderungen zu antizipieren und Projekte nachhaltig zu planen.

Zu diesem Zweck wurde beschlossen, eine Vergleichsstudie mit drei Szenarien in verschiedenen Zeithorizonten durchzuführen:

1. Das erste Szenario umfasst die derzeit vorhandenen Kabel.
2. Das zweite Szenario enthält die Kabel aus dem ersten Szenario plus die bereits geplanten oder im Bau befindlichen Kabel. Der Zeithorizont ist nicht festgelegt, da er noch ungewiss ist, aber als Richtwert können wir das Jahr 2040 in Betracht ziehen.
3. Das dritte Szenario ist ein hypothetisches Szenario mit einer grossen Anzahl von Kabeln. Dies ist ein Schlüsselszenario in der Vergleichsanalyse, da es die Auswirkungen auf das Netzwerk zeigt und mit den beiden vorherigen Szenarien verglichen wird. Die Positionierung der neuen Kabel wurde unter Berücksichtigung der Leitungen gewählt, die in den kommenden Jahren in den Sachplan aufgenommen werden. Die Kabel für das zweite Szenario sind ebenfalls darin enthalten. Da es sich um ein völlig hypothetisches Szenario handelt, wird kein Zeithorizont angegeben.

Obwohl die Zeithorizonte der Szenarien unterschiedlich sind, wurde für alle drei Szenarien die gleiche Netztopologie verwendet, die dem Startnetz des letzten strategischen Netzes SN2040 entspricht. Der Grund dafür ist, dass alle anderen Parameter konstant bleiben müssen, um die Auswirkungen der Kabel analysieren zu können. Andernfalls wäre es schwierig zu erkennen, ob die Veränderungen auf eine höhere Anzahl von Kabeln oder auf eine Änderung der Netztopologie zurückzuführen sind. Die betrachtete Netztopologie ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abb. 1-1: Startnetz Strategisches Netz SN2040

Die drei oben genannten negativen Auswirkungen wurden für alle drei Szenarien analysiert. Die Ergebnisse wurden dann verglichen, um Schlussfolgerungen über die Auswirkungen der Kabel auf das Netz zu ziehen.

Die in diesem Work package vorgestellten Analysen zielen darauf ab, den Bedarf an Blindleistungskompensation in den drei Szenarien zu quantifizieren. Die Auswirkungen auf die Resonanzfrequenz und den Oberschwingungsgehalt werden in eigenen Work packages analysiert.

1.2 Wirk- und Blindleistung

Blindenergie ist ein elektrisches Phänomen, das zwar keine nützliche Arbeit verrichtet wie die Wirkenergie, aber eine grundlegende Funktion für den Betrieb vieler elektrischer Systeme hat. Im Gegensatz zur Wirkenergie, die sich in Licht, Wärme oder Bewegung umwandelt, ist die Blindenergie mit dem Aufbau und der Aufrechterhaltung von magnetischen Feldern verbunden, die für den Betrieb von Geräten mit Spulen oder Motoren erforderlich sind, z. B. Transformatoren, Aufzüge oder Haushaltsgeräte wie Waschmaschinen oder Kühlschränke. Obwohl es nicht im herkömmlichen Sinne verbraucht wird, ist es für das Starten und Funktionalisieren dieser Geräte unerlässlich.

Die Spannung, die in unseren Häusern ankommt, ist eine Wechselspannung, was bedeutet, dass sie zeitlich sehr schnell zwischen zwei Werten schwankt, wie man auf dem Bild sehen kann.

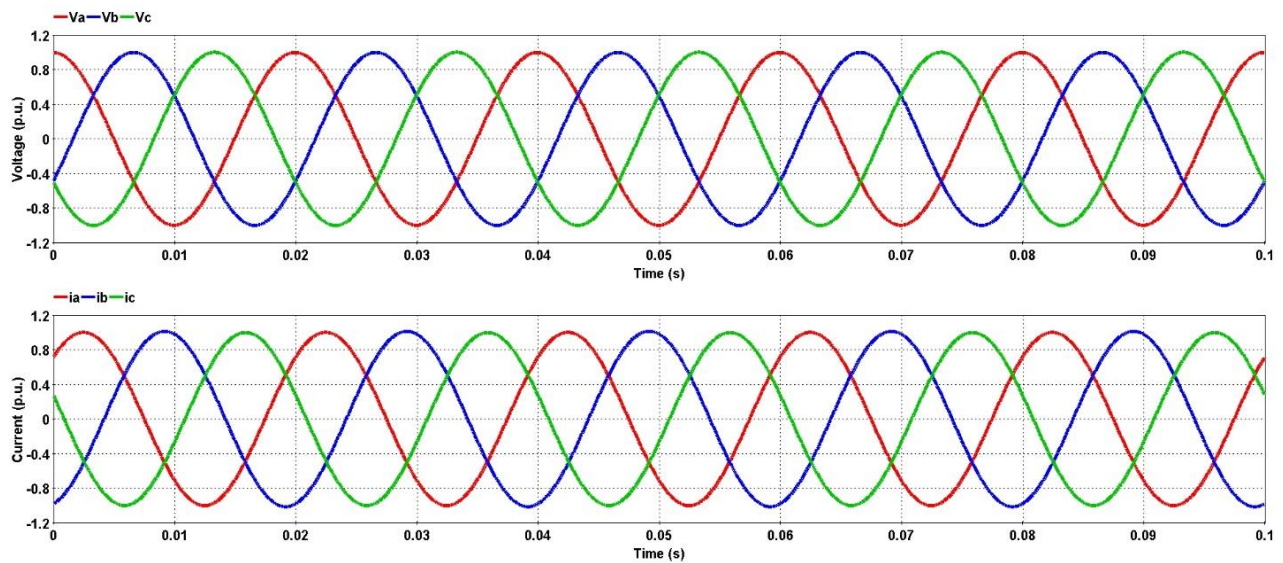


Abb. 1-2: Spannung (voltage) und Strom (current)

Folglich ist der Strom ebenfalls Wechselstrom, aber je nach angeschlossener Last ist er mehr oder weniger phasenverschoben zur Spannung.

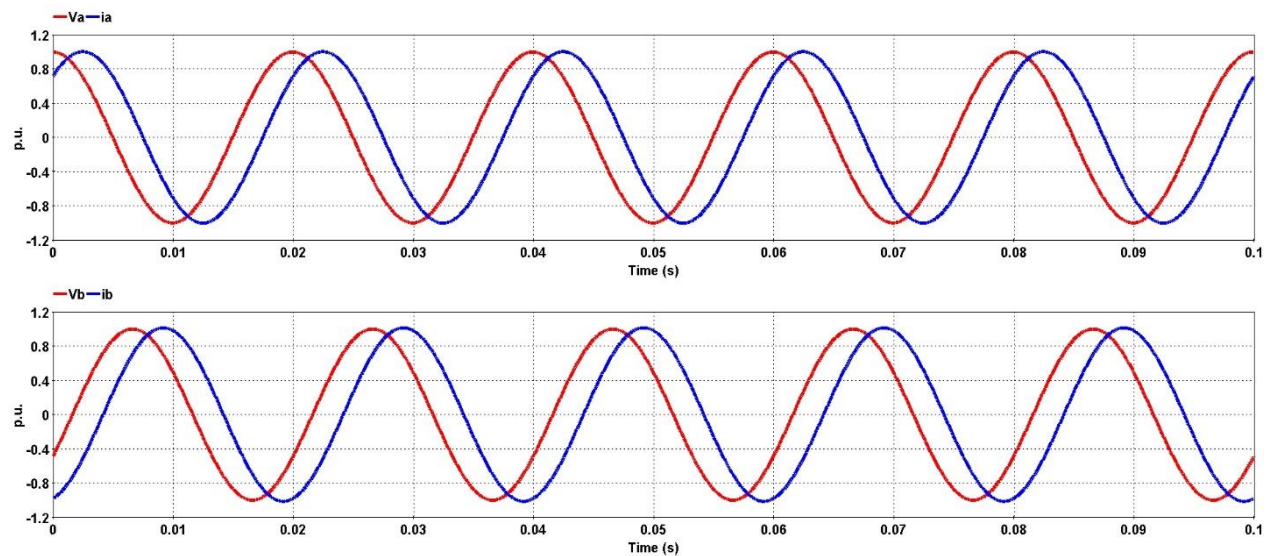


Abb. 1-3: Offset zwischen Spannung (rot) und Strom (blau) bei induktiver Last

Rein resistive Lasten verbrauchen nur Wirkenergie, dabei fallen Spannungs- und Stromspitzen zeitlich zusammen.

Die meisten Lasten haben jedoch eine induktive oder kapazitive Komponente, die für die Blindenergie verantwortlich ist. Bei Vorhandensein von Blindenergie sind Strom und Spannung phasenverschoben und die Spitzen fallen zeitlich nicht zusammen. Daher ist bei Vorhandensein von Blindenergie die Gesamtleistung, die durch die Leitung fließt, höher. Deshalb sagt man, dass ein Überschuss an Blindenergie die Leitungen überlastet.

Ein weiterer unerwünschter Effekt von zu viel Blindleistung, wenn sie kapazitiv ist, ist die Erhöhung der Spannungen. Das Netz verfügt über einen Spannungsbereich, in dem es problemlos funktionieren kann. Wenn die Spannungen die Maximalwerte überschreiten, können die Netzkomponenten beschädigt werden.

Es gibt verschiedene Methoden, um Spannungen zu senken:

- Schalten Sie Leitungen und/oder Kabel ab, die momentan wenig Strom führen, da wenig belastete Leitungen mehr kapazitive Blindleistung produzieren. Diese Methode ist jedoch gefährlich, da sie die Redundanz, die Vermaschung und die Sicherheit des Netzes verringert.
- Verringern Sie die Soll-Spannungswerte der Generatoren. Die Generatoren nehmen dann Blindleistung auf und entziehen sie dem Netz. Der Nachteil dieser Methode ist, dass sie einen sehr niedrigen Grenzwert hat. Generatoren können nur eine sehr begrenzte Menge an Blindleistung aufnehmen. Ab einem bestimmten Absorptionsniveau haben Änderungen der Sollspannung keine Auswirkungen mehr, da der Generator an seine Betriebsgrenzen stösst.
- Bei Transformatoren mit Längsregelung kann die Spannung auch um eine bestimmte Spannungsebene gesenkt werden (mit umgekehrter Wirkung auf die andere Spannungsebene). Sie haben jedoch praktisch keine Auswirkungen auf die Menge an Blindleistung, die vom Netz erzeugt oder aufgenommen wird.
- Installieren Sie Elemente, die in der Lage sind, Blindleistung zu absorbieren. Es gibt verschiedene Arten von Blindleistungskompensationen auf dem Markt, z. B. Blindleistungskompensationsanlagen (BLK), SVCs und STATCOMs. Die einfachste der drei sind die BLK und es handelt sich um eine Induktivität, die das kapazitive Verhalten des Netzes ausgleicht.

Die folgenden Abbildungen zeigen Bilder der beiden Haupttypen von Kompensationsspulen, öl- und luftisoliert.



Abb. 1-4: Dreiphasige BLK 420 kV, 50–250 Mvar (Länge 18,7 m, Breite des Tanks 4 m, Breite 7,6 m, Höhe des Tanks 4,5 m, Höhe 11,1 m, Transportgewicht 219 000 kg, Betriebsgewicht 361 000 kg). Quelle [1.1]

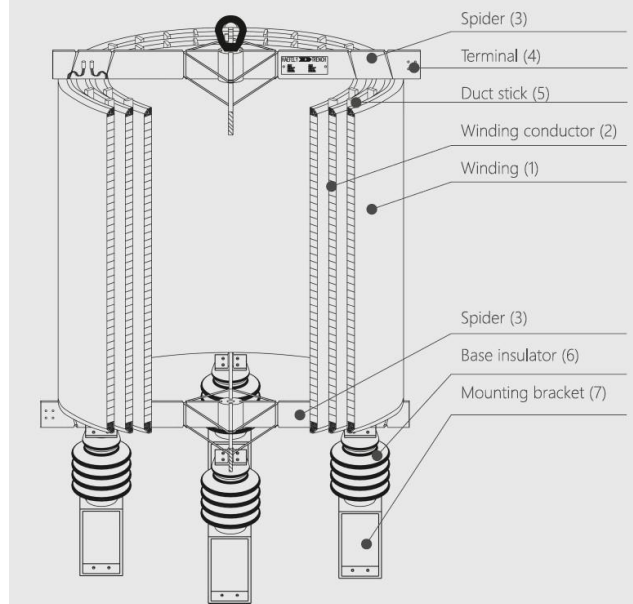
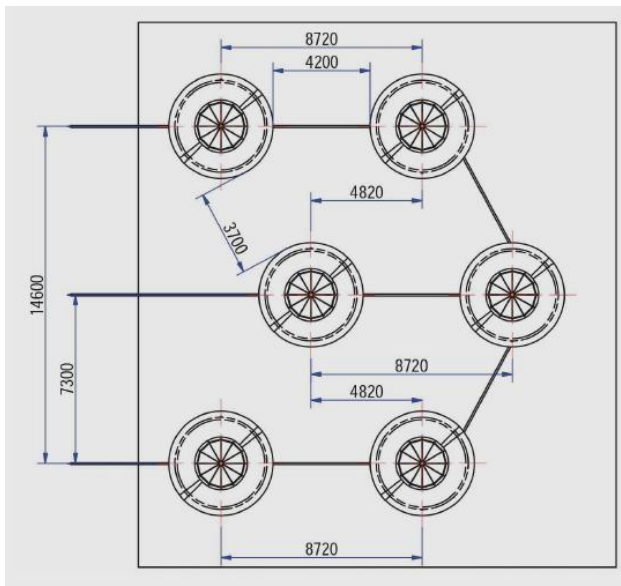
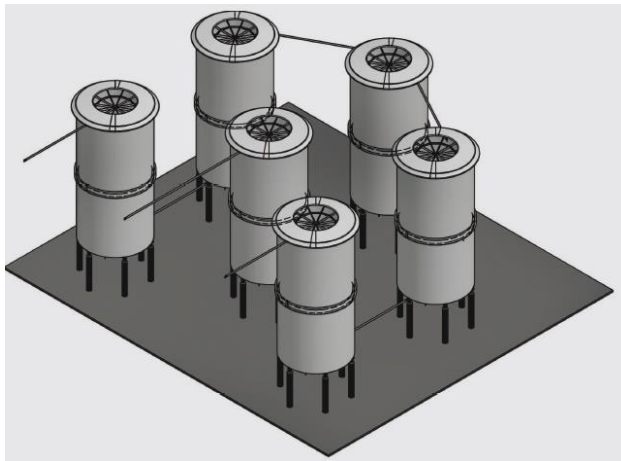


Abb. 1-5: Anordnung einer dreiphasigen luftisolierten BLK. Oben/unten links: Anordnung für eine 420 kV-BLK, 120 Mvar (ca. 400 m²), oben rechts 345 kV, 20 Mvar-BLK, unten rechts: Aufbau einer luftisolierten BLK (teilweise) Quelle [1.1]

Auch zu niedrige Spannungen führen zu Problemen, auf die wir hier nicht näher eingehen wollen. Denn Netzwerke mit hohem Kabelanteil sind kapazitiv, was zu hohen und nicht zu niedrigen Spannungen führt.

Die aktuelle Situation in der Schweiz mit den Kabeln aus Szenario 1 ist bereits kritisch, was die Spannungen betrifft. Die Betreiber stehen oftmals ohne Mittel da, um die Spannungen zu senken. Manchmal überschreiten die Spannungen die Grenzen, selbst wenn alle Kraftwerke Blindleistung mit ihrer maximalen Möglichkeit aufnehmen. Ohne reaktive Ausgleichselemente bleibt keine andere Wahl, als darauf zu warten, dass die Spannungen von selbst sinken.

Daher gibt es bei der zunehmenden Anzahl von Kabeln keine andere Wahl, als 100% ihrer Blindleistungserzeugung zu kompensieren.

1.3 Blindleistungskompensation in Verkabelungsprojekten

Es ist allgemein bekannt, dass die elektrischen Eigenschaften von Wechselstromkabeln erhebliche Unterschiede zu denen von Freileitungen aufweisen. Einer der wichtigsten elektrischen Unterschiede ist der

kapazitive Ladestrom, der in einem Kabel wesentlich höher ist als in einer Freileitung der gleichen Länge und Übertragungsleistung. Ein Kabel behält immer das Verhalten eines Kondensators bei, während eine Freileitung bei zunehmender Belastung von einer weniger ausgeprägten kapazitiven Eigenschaft zu einem induktiven Verhalten übergeht, indem sie einen reaktiven Nullpunkt passiert (man spricht dann von der natürlichen Leistung der Leitung).

Blindleistungseigenschaften Freileitung und Kabel ($U_p = 410 \text{ kV}$)

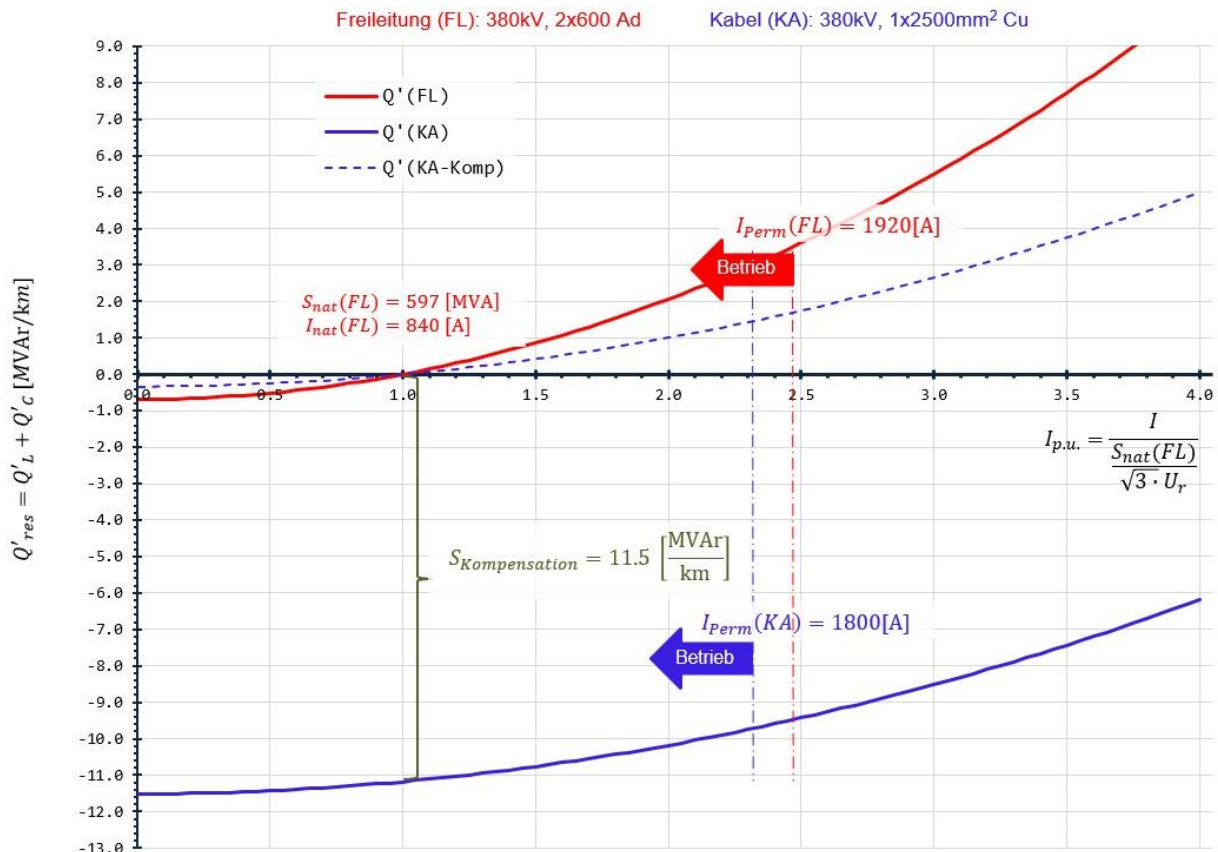


Abb. 1-6: Blindleistungsverhalten einer Freileitung (rot) und eines 380-kV-Kabels (blau) Quelle [1.1]

Die von den Kabeln erzeugte Blindleistung führt zu einem Anstieg der Spannung im Netz und zu einer zusätzlichen Belastung der Leiter. Deshalb muss die Blindleistung durch den Anschluss von BLK an den Kabelenden kompensiert werden. Diese fallen in der Verlustbilanz stark ins Gewicht: bei 220 kV etwa 10 kW pro km Kabel, bei 380 kV das Dreifache dieses Wertes, weil die Blindleistung mit dem Quadrat der Spannung steigt. Die Abmessungen von Unterwerken oder Übergangsbauwerken müssen erheblich vergrößert werden, da die Installation einer BLK die Abmessungen eines Fussballfeldes erfordert.

Die Gesamtmenge der zu kompensierenden Blindleistung Mvar ist proportional zur installierten Kabellänge. Es ist zu beachten, dass sich bei zwei parallel geschalteten Systemen oder zwei Kabeln pro Phase die Blindleistungsproduktion verdoppelt. In einigen Fällen ist es notwendig, an beiden Kabelenden zu kompensieren, entweder weil die Länge der Kabelverbindung ca. 20 km beträgt oder weil die Grösse der benötigten Kompensation zu gross ist. Wenn das Kabel zwei Systeme hat und wir an einem Ende, an dem es kein Unterwerk gibt, kompensieren müssen, muss in jedem System eine BLK installiert werden. Kabel mit einer Länge von weniger als 3 km müssen nicht unbedingt direkt beim Kabel kompensiert werden, aber ihre Blindleistungsproduktion wird berücksichtigt, um die Grösse der benachbarten Kompensationen entsprechend zu

erhöhen. Diese und ähnliche Überlegungen führen dazu, dass die Gesamtzahl der ausgeglichenen Mvar nicht genau der Gesamtzahl der Kabelkilometer entspricht.

Verschiedene Kompensationslösungen sind womöglich für ein und dasselbe Projekt geeignet. Die Optimierung dieser Lösungen hängt weitgehend von einer guten Planung und der Kenntnis der geplanten Kabelprojekte ab. Nur so ist es möglich, den Kompensationsbedarf nachhaltig zu planen. So wäre es zum Beispiel schade, eine kleine Kompensation in einem Unterwerk zu planen, um kurz darauf den zusätzlichen Kompensationsbedarf durch weitere Kabelprojekte in der Umgebung zu entdecken. Aus diesem Grund ist es nicht ratsam, Kompensationen pro Projekt zu planen, sondern vielmehr pro Projektgruppe.

Für jedes der drei untersuchten Szenarien wurde eine Ausgleichslösung berechnet. Ziel dieser Analyse ist es, die Anzahl der benötigten Ausgleichselemente, ihre Kosten und den Platzbedarf zu vergleichen. Die Schlussfolgerungen werden im nächsten Abschnitt näher erläutert.

1.4 Notwendige Ausgleichselemente in allen drei Szenarien

Der Ausgleichsbedarf wurde durch BLK in vier verschiedenen Grössen gedeckt: 50, 100, 120 und 150 Mvar. Es ist üblich, dass die Betreiber Standardgrössen für BLK festlegen, um die Prozesse zu vereinfachen. In Fällen, in denen die erforderliche Kompensation zwischen zwei Werten lag, wurde normalerweise der höhere Wert gewählt. Andererseits war es in einigen Fällen, in denen die Kompensation direkt an dem Kabel erfolgte, notwendig, den Kompensationswert zu verringern, um Probleme mit der Nulldurchgangsverzögerung zu vermeiden. Dieses Problem tritt bei Kabeln auf, die zu mehr als 50% kompensiert sind, wenn die Kompensation gleichzeitig mit dem Kabel angeschlossen wird. Bei Kompensationen, die mit dem Unterwerk verbunden sind, besteht dieses Problem nicht, da eine sequenzielle Verbindung möglich ist.

1.4.1 Szenario 1

Derzeit haben alle verlegten Kabel eine Länge von weniger als 7 km. Unter ihnen befinden sich die 380-kV-Kabel zwischen den Kraftwerken Linth – Limmern und NdD, die 4,54 km bzw. 5,96 km lang sind. Im 220-kV-Bereich die Kabelverbindung Bavona – Peccia mit 6,1 km und das 2,5 km lange Kabel zwischen Grimsel und Gerstenegg. In der Region Zürich gibt es die Kabel von Riniken und Spreitenbach mit 1,47 bzw. 2,33 km Länge.

Bisher wurde die Blindleistungsproduktion der bestehenden Kabel nicht kompensiert. Die Blindleistungsproduktion von ca. 100 Mvar der Linth-Limmern-Kabel und ca. 130 Mvar der NdD-Kabel wird von diesen und den benachbarten Kraftwerken absorbiert.

Im Schweizer Übertragungsnetz gibt es nur eine einzige BLK mit einer Leistung von 60 Mvar, die mit 16 kV an das Tertiärsystem des 380/220-kV-Transformators Breite angeschlossen ist.

Da die Anzahl der Kabelprojekte und ihre Länge zunehmen, wird es notwendig, BLK zu installieren, um die Spannungen in akzeptablen Grenzen zu halten.

Da das Ziel dieser theoretischen Analyse darin besteht, die Grösse und Anzahl der erforderlichen Kompensationsanlagen zu vergleichen, wurden für alle drei Szenarien die gleichen Kriterien verwendet. Daher sind die Kompensationen Linth-Limmern und NdD in diesem ersten Szenario enthalten, auch wenn sie derzeit nicht installiert sind.

Für die Berechnungen wurde die Blindleistung jedes Kabels auf den nächsten Zehner gerundet. Anschliessend wurde eine BLK in Standardgrösse gewählt, um den Bedarf an Blindleistung vollständig zu decken.

Die in diesem ersten Szenario betrachteten Kabel und ihre Blindleistungsproduktion sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. Kabel mit einer Länge von weniger als 1 km sind im Modell enthalten, aber ihre Blindleistungsproduktion wird beim Vergleich nicht berücksichtigt und erscheint nicht in den Tabellen.

Projekt	Betriebsspannung (kV)	Kabelquerschnitt (mm ²)	Kabellänge (km)	Parallelsysteme	Kabel pro Phase	Q _{cable} (Mvar)	Unterwerk
220 kV Niederwil – Regensdorf (Spreitenbach)	235	1200	2,33	1	2	17,79	
220 kV Beznau – Birr (Riniken – Gäbihübel)	235	2500	1,47	1	2	15,66	
380 kV Beznau – Mettlen (Riniken – Gäbihübel)	410	2500	1,47	1	2	37,26	
380 kV Châtelard – Nant de Drance	410	1600	5,96	1	2	125,90	380 kV Châtelard
380 kV La Bâtiatz – Le Verney	410	1000	1,23	1	2	23,29	
380 kV Limmern – Tierfehd	410	1600	4,54	1	2	95,90	380 kV Tierfehd
150 kV Manno – Mendrisio (Brusino – Morcote)	150	800	2,85	2	1	8,90	
150 kV Manno – Pian Scairolo	150	800	5,59	2	1	17,46	
Total						342,17	

Tabelle 1-1: Ausgleichslösung für Szenario 1

Um zu kleine und unrealistische Kompensationen zu vermeiden, wurden nur die längsten Kabel, d. h. die Kabel von Nant de Drance und Limmern kompensiert. Der Ausgleichsbedarf für andere Kabel wird in Szenario 2 berücksichtigt. Die Gesamtkompensation in diesem Szenario beträgt 230 Mvar. Um 100% dieser Blindleistung zu kompensieren und gleichzeitig die oben vorgeschlagenen Grössen einzuhalten, werden für Châtelard und Tierfehd jeweils eine Kompensation von 100 Mvar und eine von 150 Mvar gewählt, was insgesamt 250 Mvar Kompensation ergibt.

Die Kabel und BLK für Szenario 1 sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

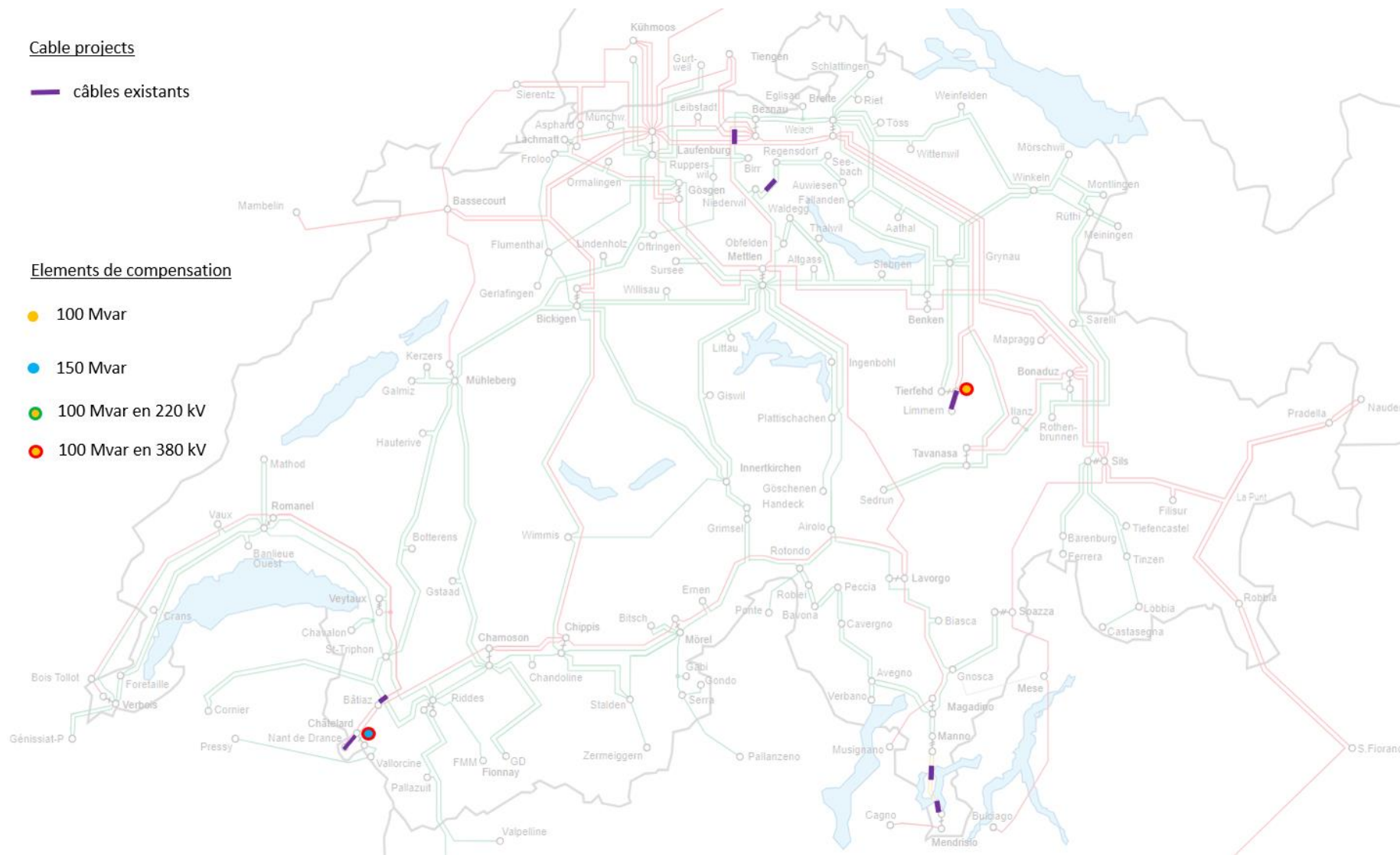


Abb. 1-7: Ausgleichslösung für Szenario 1

1.4.2 Szenario 2

In Szenario 2 werden die Kabel aus Szenario 1 beibehalten und mehrere neue, bereits geplante Projekte hinzugefügt, z. B. Gotthard, Innertkirchen – Ulrichen, Glaubenberg, Valle Maggia und mehrere Projekte in der Region Zürich.

Im Gegensatz zum vorherigen Szenario gibt es bereits recht lange Kabel, die etwa 20 km lang sind. Dadurch steigt der Bedarf an Blindleistungskompensation und es werden mehrere BLK für das gleiche Projekt benötigt.

In diesem Szenario wurde die geringe, aber nicht zu vernachlässigende Blindleistungsproduktion der Spreitenbach- und Riniken-Kabel aus Szenario 1 berücksichtigt und 40 Mvar zur Kompensation von 220 kV Niederwil hinzugefügt.

Die vorgeschlagene Ausgleichslösung für die Kabel Innertkirchen – Ulrichen ist höher als seine Blindleistungsproduktion. Grund dafür war die Notwendigkeit, zwei Kompensationen pro Unterwerk in Innertkirchen und Oberwald einzubeziehen, um einen Zwei-Knoten-Betrieb zu ermöglichen. In der Realität müssen lange Kabelleitungen wie diese unter Berücksichtigung einer gewissen Redundanzspanne für den Fall der Nichtverfügbarkeit einer BLK berechnet werden. Die Anforderungen an die Redundanz wurden in dieser Analyse nicht berücksichtigt, um einen lineareren Vergleich auf der Grundlage der installierten Kabelkilometer zu ermöglichen.

Die Position der Kompensation wird in jedem Fall angegeben. Wenn auf der Stelle «Kabel» steht, bedeutet dies, dass im Kabelweg ein Ausgleich installiert werden muss. Diese Tabelle listet nur neue Kabel auf, d. h. Kabel, die zu Szenario 1 hinzugefügt werden müssen, um Szenario 2 zu erhalten.

Projekt	Betriebsspannung (kV)	Kabelquerschnitt (mm ²)	Kabellänge (km)	Parallelsysteme	Kabel pro Phase	Q _{cable} (Mvar)	Unterwerk
220 kV Airolo – Mettlen (Gotthard)	235	2500	18,00	1	1	95,87	220 kV Airolo, Kabel
220 kV Innertkirchen – Handeck	235	2500	12,00	2	1	127,83	220 kV Innertkirchen, 220 kV Oberwald
220 kV Handeck – Grimsel	235	2500	6,50	2	1	69,24	220 kV Innertkirchen, 220 kV Oberwald
220 kV Grimsel – Seehalten	235	2500	5,30	2	1	56,46	220 kV Innertkirchen, 220 kV Oberwald
220 kV Innertkirchen – Mettlen (und Innertkirchen – Giswil)	235	2500	5,00	2	1	53,26	220 kV Innertkirchen
220 kV Innertkirchen – Wimmis	235	2500	5,00	1	1	26,63	220 kV Innertkirchen
220 kV Bickigen – Innertkirchen	235	2500	5,00	2	1	53,26	220 kV Innertkirchen
220 kV Innertkirchen – Mettlen (und Giswil – Littau)	235	2500	9,50	2	1	101,20	Kabel
220 kV Bavona – Peccia	235	1400	6,70	1	2	51,15	220 kV Peccia
220 kV Cavignon – Peccia	235	1400	7,40	1	2	56,49	220 kV Peccia
220 kV Avegno – Cavignon	235	1400	15,00	1	2	114,51	220 kV Avegno
220 kV Avegno – Magadino	235	1400	3,30	1	2	25,19	220 kV Avegno
220 kV Foretaile – Verbois	235	2500	4,80	1	2	51,13	220 kV Verbois
220 kV Niederwil – Obfelden	235	2500	4,50	1	1	23,97	220 kV Niederwil
380 kV Beznau – Mettlen (parallel zu Niederwil – Obfelden)	410	2500	4,50	1	1	57,03	380 kV Mettlen
220 kV Obfelden – Waldegg	235	2500	2,00	1	2	21,31	220 kV Waldegg
220 kV Thalwil – Waldegg	235	2500	10,00	2	1	106,53	220 kV Waldegg
Total						1091,06	

Tabelle 1-2: Ausgleichslösung für Szenario 2

Nach den Informationen in der vorstehenden Tabelle bedeuten die geplanten Kabel, dass eine Kompensation von 1091 Mvar erforderlich ist. Nachdem die erforderlichen Standard-BLK ausgewählt und die Kompensation für Szenario 1 hinzugefügt wurden, sind für Szenario 2 insgesamt 1670 Mvar an Kompensation erforderlich.

Die vorgeschlagene Ausgleichslösung für Szenario 2 ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

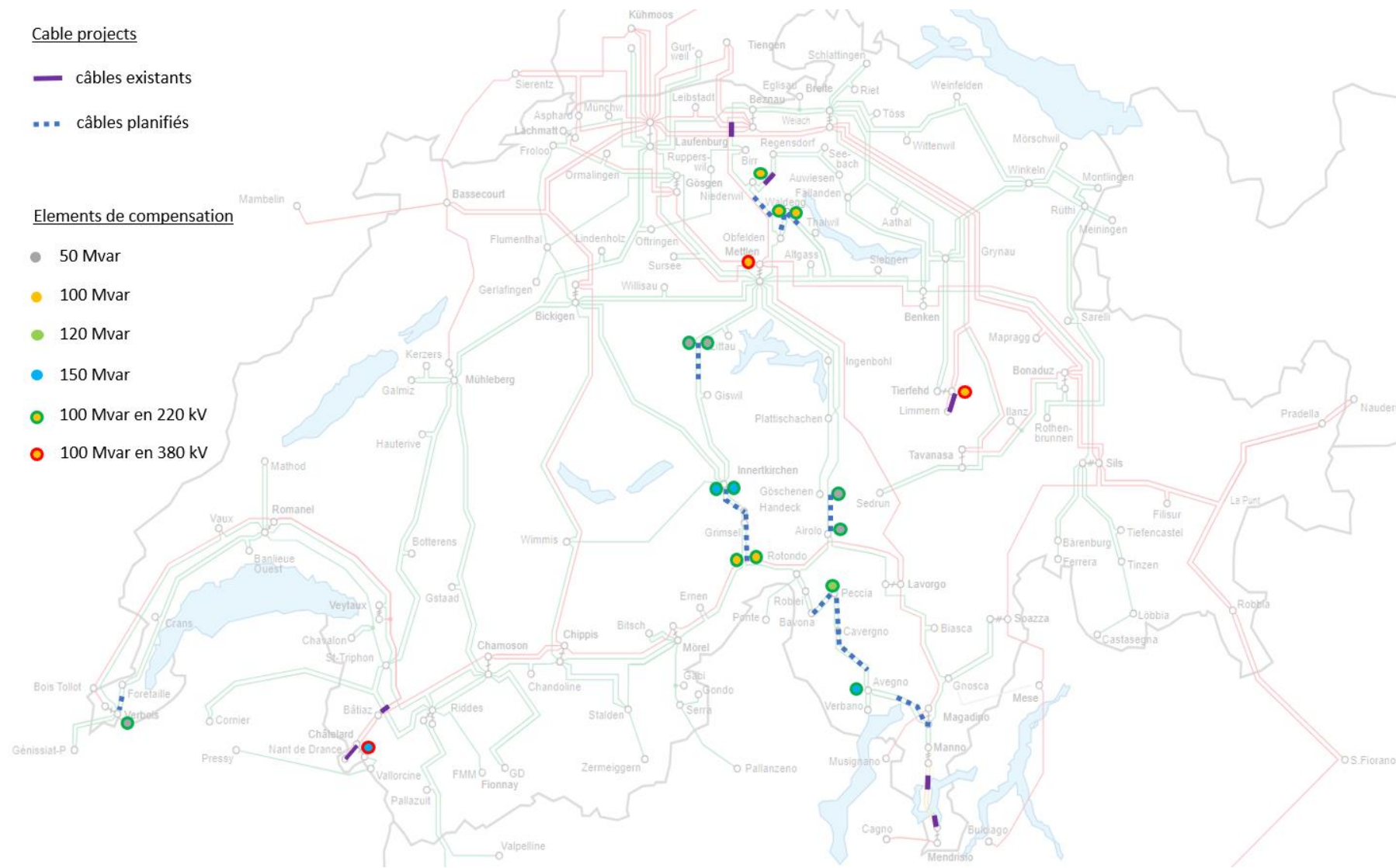


Abb. 1-8: Ausgleichslösung für Szenario 2

Die für Szenario 2 vorgeschlagene Ausgleichslösung umfasst insgesamt 17 BLK, davon 5 mit 50 Mvar, 7 mit 100 Mvar, 1 mit 120 Mvar und 4 mit 150 Mvar. Die maximale Leistung würde 1670 Mvar betragen.

1.4.3 Szenario 3

In Szenario 3 werden die Kabel aus Szenario 2 beibehalten und eine Vielzahl neuer Projekte hinzugefügt. Die Positionierung der neuen Kabelabschnitte basiert auf den Leitungen, die in den kommenden Jahren erneuert werden. Für die Studie wird angenommen, dass bei Erneuerungsprojekten Teile von Leitungen oder ganze Leitungen auf Kabel umgestellt werden. Die Auswahl der zu erstellenden Kabelabschnitte basiert auf Annahmen. Auf keinen Fall sollten diese Kabel als zukünftige Projekte betrachtet werden. Die Erstellung dieses Szenarios dient ausschliesslich der vergleichenden Analyse.

Beachten Sie, dass die vorgeschlagenen Kabellängen ungefähre Angaben sind und auf den Längen der aktuellen Leitungen basieren. Es wurden keine Studien über den möglichen Verlauf der neuen Kabel durchgeführt.

In der folgenden Tabelle wird jeweils die Position des Ausgleichs angegeben. Wenn auf der Stelle «Kabel» steht, bedeutet dies, dass im Kabelweg ein Ausgleich installiert werden muss. Diese Tabelle listet nur neue Kabel auf, d. h. Kabel, die zu Szenario 2 hinzugefügt werden müssen, um Szenario 3 zu erhalten.

Projekt	Betriebsspannung (kV)	Kabelquerschnitt (mm ²)	Kabellänge (km)	Parallelsysteme	Kabel pro Phase	Q _{cable} (Mvar)	Unterwerk
380 kV Benken – Mettlen (zwischen Mettlen und Samstagern)	410	2500	20,0	1	1	253,49	380 kV Mettlen, Kabel
220 kV Altgass – Mettlen (zwischen Mettlen und Samstagern)	235	2500	17,1	1	1	91,13	220 kV Altgass
220 kV Altgass – Samstagern (zwischen Mettlen und Samstagern)	235	2500	14,6	1	1	77,55	220 kV Altgass
220 kV Grynau – Mettlen (zwischen Mettlen und Samstagern)	235	2000	20,0	1	1	97,16	220 kV Mettlen, Kabel
380 kV Beznau – Breite	410	1600	17,0	2	2	718,22	380 kV Breite, Kabel
220 kV Auwiesen – Regensdorf	235	2000	12,1	2	1	117,56	220 kV Auwiesen
220 kV Auwiesen – Fällanden	235	2000	6,0	1	1	29,15	220 kV Auwiesen
220 kV Breite – Fällanden und Fällanden – Grynau (Breite – Y/Fehraltorf)	235	2500	9,0	2	1	95,87	220 kV Fällanden
220 kV Benken – Fällanden	235	2500	37,0	2	1	394,14	220 kV Benken, 220 Fällanden, Kabel
220 kV Aathal – Breite und Fällanden – Grynau (Aathal – Y/Fehraltorf)	235	2500	8,0	2	1	85,22	220 kV Aathal
220 kV Aathal – Grynau	235	2500	22,0	2	1	234,36	220 kV Aathal, 220 kV Grynau

220 kV Grynau – Samstagern	235	2000	7,0	1	1	34,00	220 kV Grynau
220 kV Grynau – Winkeln	235	1600	9,0	2	2	156,15	220 kV Grynau, Kabel
220 kV Mörschwil – Winkeln (via Y 235 – St.Gallen)		2500	17,0	2	1	181,09	220 kV Mörschwil, 220 kV Winkeln
220 kV Rüthi – Winkeln	235	1600	12,0	1	2	104,10	220 kV Winkeln
220 kV Bonaduz – Rüthi	235	1600	15,0	2	2	260,24	220 kV Rüthi, Kabel
380 kV Bonaduz – Sils	410	1600	14,0	2	2	591,47	380 kV Bonaduz, 380 kV Sils
220 kV Bonaduz – Rüthi	235	1600	5,0	2	2	86,75	220 kV Rüthi
380 kV Benken – Sils (West)	410	2500	13,0	1	1	164,77	380 kV Sils
220 kV Benken – Sils (Ost)	235	2500	13,0	1	1	69,24	220 kV Sils
380 kV Lavorgo – Mettlen	410	1600	14,0	1	2	295,74	380 kV Lavorgo, Kabel
380 kV Sils – Soazza	410	1600	12,0	1	2	253,49	380 kV Soazza, Kabel
220 kV Löbbia – Tinzen	235	800	8,0	1	1	27,76	220 kV Tinzen
380 kV Lavorgo – Musignano	410	2000	13,0	1	2	302,07	380 kV Magadino, Kabel
Total						10 590,48	

Tabelle 1-3: Ausgleichslösung für Szenario 3

Der Bedarf an Blindleistungskompensation steigt in diesem Szenario enorm an. Insgesamt 10,59 Gvar sind erforderlich, um die Blindleistung zu kompensieren, die von den neuen Kabeln in Szenario 3 erzeugt wird. Nachdem die erforderlichen Standard-BLK ausgewählt und die Kompensation für Szenario 2 hinzugefügt wurden, sind für Szenario 3 insgesamt 13,11 Gvar an Kompensation erforderlich. Die Verteilung dieser Ausgleichszahlung in Standard-BLK ergibt 15 BLK zu 50 Mvar, 33 BLK zu 100 Mvar, 33 BLK zu 120 Mvar und 34 BLK zu 150 Mvar.

Die vorgeschlagene Ausgleichslösung für Szenario 3 ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

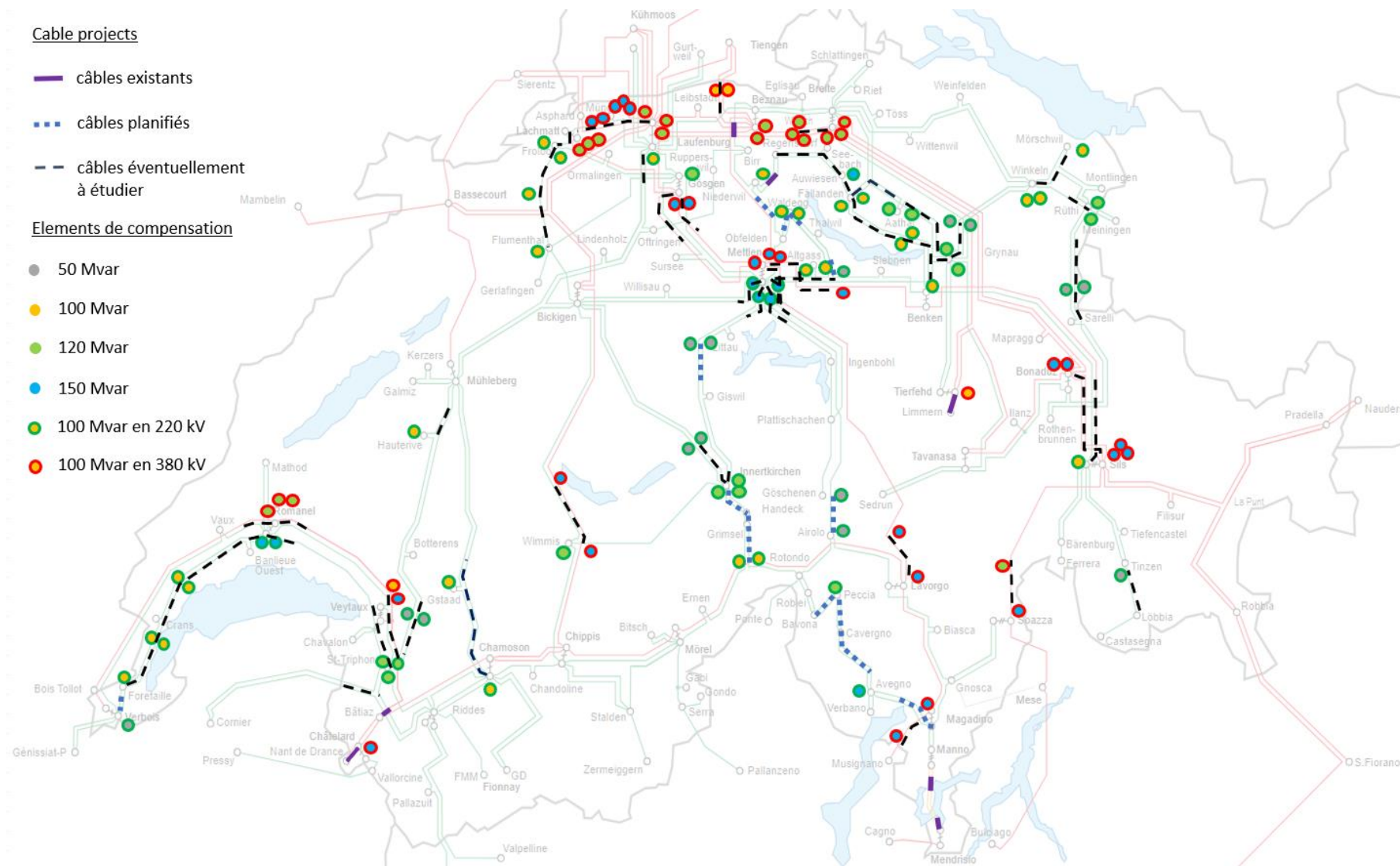


Abb. 1-9: Ausgleichslösung für Szenario 3

Aufgrund der grossen Anzahl von BLK in einigen Gebieten müsste die Grösse einiger Unterwerke erheblich erhöht werden. Um ein Beispiel zu nennen: In einem Unterwerk (Mettlen) werden bis zu 7 BLK benötigt und auch bis zu 11 BLK, die entlang eines Kabels verteilt sind (380 kV Lachmatt – Laufenburg). Dies würde die Errichtung neuer Unterwerke entlang der Kabelroute erfordern, um die Ausgleichselemente zu verbinden. Die Zwischenwerke würden ähnlich wie in der folgenden Abbildung aussehen.

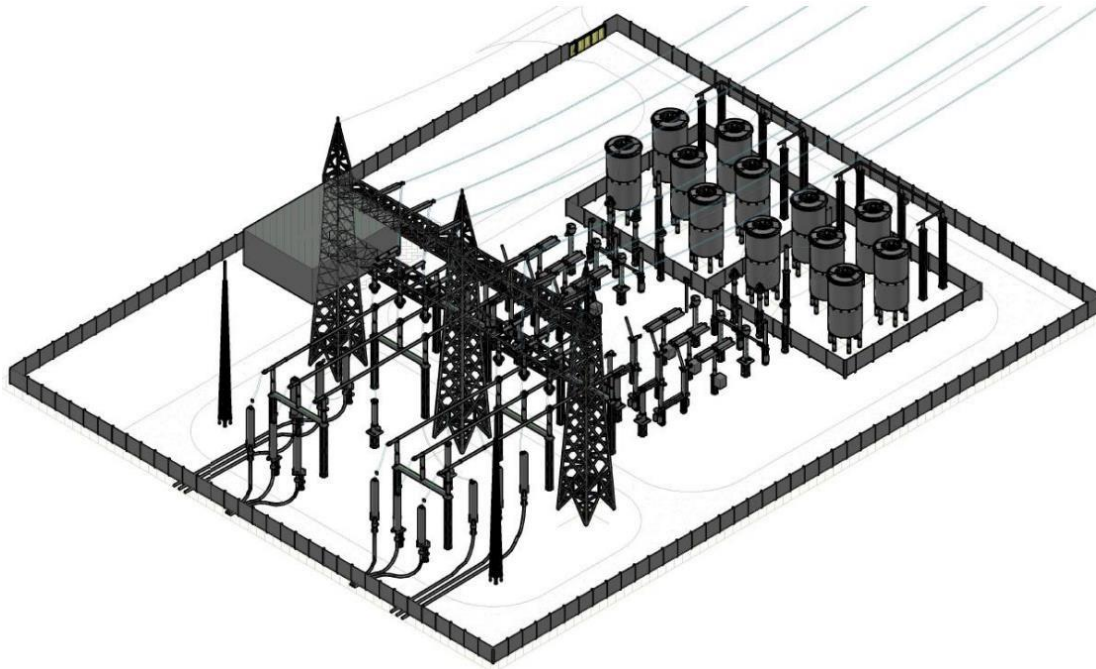


Abb. 1-10: Übergangunterwerk zwischen 420-kV-Freileitung und Kabel mit Kompensationsanlage mit eisenfreien Luftdrosselspulen (ca. 100 m × 70 m). Quelle [1.1]

Das Kernkraftwerk Leibstadt kann als Referenz für die Grössenordnungen herangezogen werden. Mit einer Leistung von 1220 MW kann das Kraftwerk bis zu 513 Mvar an Blindleistung aufnehmen. Ohne die Installation von BLK zum Ausgleich der Kabel wären 25 Kraftwerke wie Leibstadt erforderlich, um die gesamte im Szenario 3 erzeugte Blindleistung aufnehmen zu können. Dies ist nur ein Vergleich, um eine Vorstellung von den Grössenordnungen zu vermitteln. Eine solche Lösung wäre weder technisch machbar noch nachhaltig.

Eine Besonderheit der Blindenergie ist, dass sie dort kompensiert werden muss, wo sie entsteht. Andernfalls müsste sie über Leitungen und Kabel zum Absorptionspunkt transportiert werden. Dies würde das Netz überlasten und dazu führen, dass die Leitungen und Kabel überdimensioniert werden müssten. Aus diesem Grund sollte sich der für die Installation der BLK zu reservierende Raum neben den Kabeln befinden. Das bedeutet, dass die visuellen Auswirkungen einer Freileitung nicht beseitigt, sondern durch BLK teilweise ersetzt würden.

1.4.4 Zusammenfassung des Bedarfs an Reaktivitätskompensation

Um den Vergleich zwischen den drei Szenarien zu erleichtern, fasst die folgende Tabelle die erforderlichen Ausgleichselemente sowie die berücksichtigten Kabellängen zusammen. Der Spulentyp ist in Klammern angegeben. Die erste Zahl gibt die Anzahl der luftisolierten Spulen an, die zweite die Anzahl der ölisolierten Spulen. Die Kabellänge wird unter Berücksichtigung der Anzahl der Systeme und der Anzahl der Kabel pro Phase berechnet. Ein Kabel mit 2 Systemen und 2 Kabeln pro Phase wird in Länge mit dem Faktor 4 berücksichtigt.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Von den Kabeln erzeugte Q (Mvar)	342	1433	12 365
Q Ausgleich (Mvar)	250	1670	12 960
Anzahl der BLK mit 50 Mvar	0	5 (3/2)	15 (12/3)
Anzahl der BLK mit 100 Mvar	1 (0/1)	7 (0/7)	33 (9/24)
Anzahl der BLK mit 120 Mvar	0	1 (0/1)	33 (0/33)
Anzahl der BLK mit 150 Mvar	1 (0/1)	4 (0/4)	33 (0/33)
Gesamtzahl der BLK	2	17	114
Kabellänge (km)	51	268	1132

Tabelle 1-4: Anzahl der BLK nach Typ und Szenario

1.5 Geschätzter Platzbedarf für die BLK in Szenario 3

Die Grösse einer BLK entspricht unter Berücksichtigung des Platzbedarfs für die Isolierung und den Anschluss an das Netz etwa 3000 m². Dies ist ein Durchschnittswert für BLK zwischen 50 und 150 Mvar, die je nach Grösse und Spannungsniveau zwischen 2000 und 5000 m² benötigen können. Dieser Wert berücksichtigt die Fläche, die für den Anschluss der BLK an das Netz benötigt wird, sowie die Isolierung. Allerdings werden die Zugänge nicht berücksichtigt.

In der vorgeschlagenen Ausgleichslösung für Szenario 3 werden 114 BLK benötigt, was bedeutet, dass mindestens die Fläche von 342 000,00 m² mit BLK belegt werden müsste. Wenn man als bekannten Referenzwert den Platzbedarf für ein Fussballfeld (ca. 7200 m²) zugrunde legt, wären in unmittelbarer Nähe der neuen Kabel 48 Fussballfelder erforderlich, um die erforderliche Blindleistungskompensation zu installieren.

In einigen Unterwerken ist es bereits schwierig, Platz für die Installation neuer Elemente zu finden. Sollte ein Kabelprojekt in der Nähe dieser Unterwerke mit wenig Platz realisiert werden, müsste die Netzstruktur erheblich geändert werden. An anderer Stelle müssten neue Unterwerke gebaut werden, damit die BLK mit den Kabelenden verbunden werden können. Ausserdem müssten Unterwerke gebaut werden, um Kompensationen entlang bestimmter Kabeltrassen zu installieren. Dies würde erhebliche Änderungen an den derzeitigen Streckenführungen einiger Linien erfordern. Zusätzlich müssten zahlreiche Baugenehmigungsverfahren eingeleitet werden, wodurch sich die Gesamtzeit bis zur Fertigstellung der Projekte verlängern würde.

In Szenario 3 wäre ein mögliches Beispiel für diese Problematik das Unterwerk Lachmatt. Der verfügbare Platz ist bereits begrenzt und die Installation eines neuen 380/220-kV-Transformators sowie eines Ein-/Ausgangs der 380-kV-Leitung Asphard – Gösgen ist geplant. Die Installation eines 32 km langen 380-kV-Kabels Lachmatt – Laufenburg würde eine Kompensation bei 380 kV Laufenburg, mehrere BLK entlang des Kabels und ebenfalls bei 380 kV Lachmatt erfordern. Insbesondere würden bei 380 kV Lachmatt 3 BLK mit jeweils 120 Mvar benötigt. In einem Unterwerk, in dem bereits Platzmangel herrscht, würden weitere 9000 m² für die Blindleistungskompensation benötigt.

Die folgende Abbildung zeigt das Layout des Unterwerks Lachmatt unter Berücksichtigung des laufenden Projekts zur Installation der 380-kV-GIS, des neuen 380/220-kV-Transformators und des Ein-/Ausgangs der

380-kV-Leitung Asphard – Gösgen. Der Flächenbedarf für diese neuen Elemente wird auf 7850 m² geschätzt (in blauer Farbe).

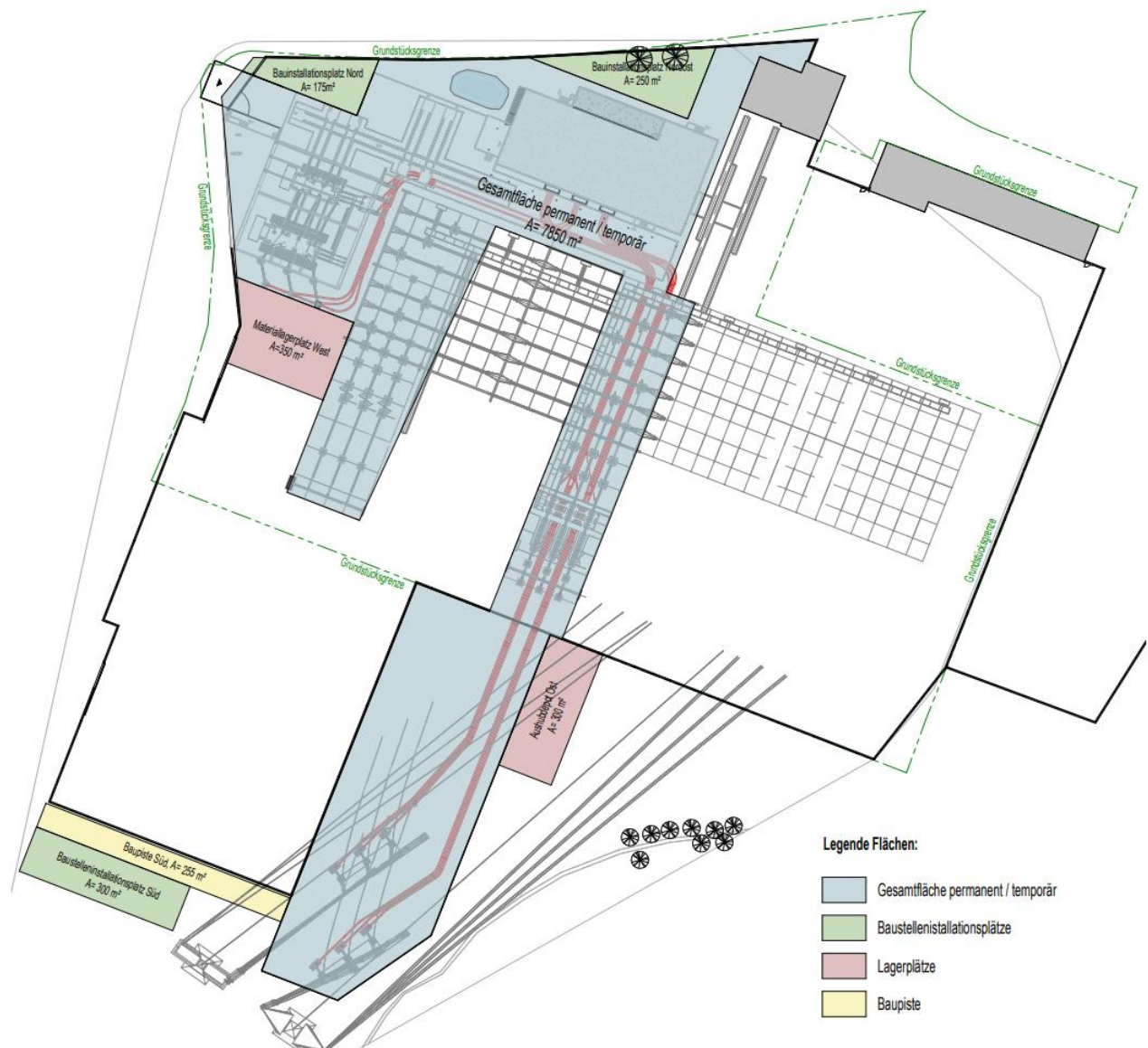


Abb. 1-11: Unterwerk Lachmatt

Sollte ein solches Projekt zur Installation eines 380-kV-Kabels zwischen Lachmatt und Laufenburg realisiert werden, wären bei 380 kV Lachmatt 3 Spulen mit 120 Mvar erforderlich. Die von diesen drei Spulen beanspruchte Fläche (ca. 9000 m²) wäre grösser als die Fläche, die für das gesamte Projekt zur Modernisierung des Unterwerks mit einer neuen GIS, einem Transformator und einer Ein-/Ausgangsleitung benötigt wird.

Wie die folgende Abbildung zeigt, ist es nicht möglich, das Unterwerk Lachmatt zu erweitern, um die Spulen zu positionieren.

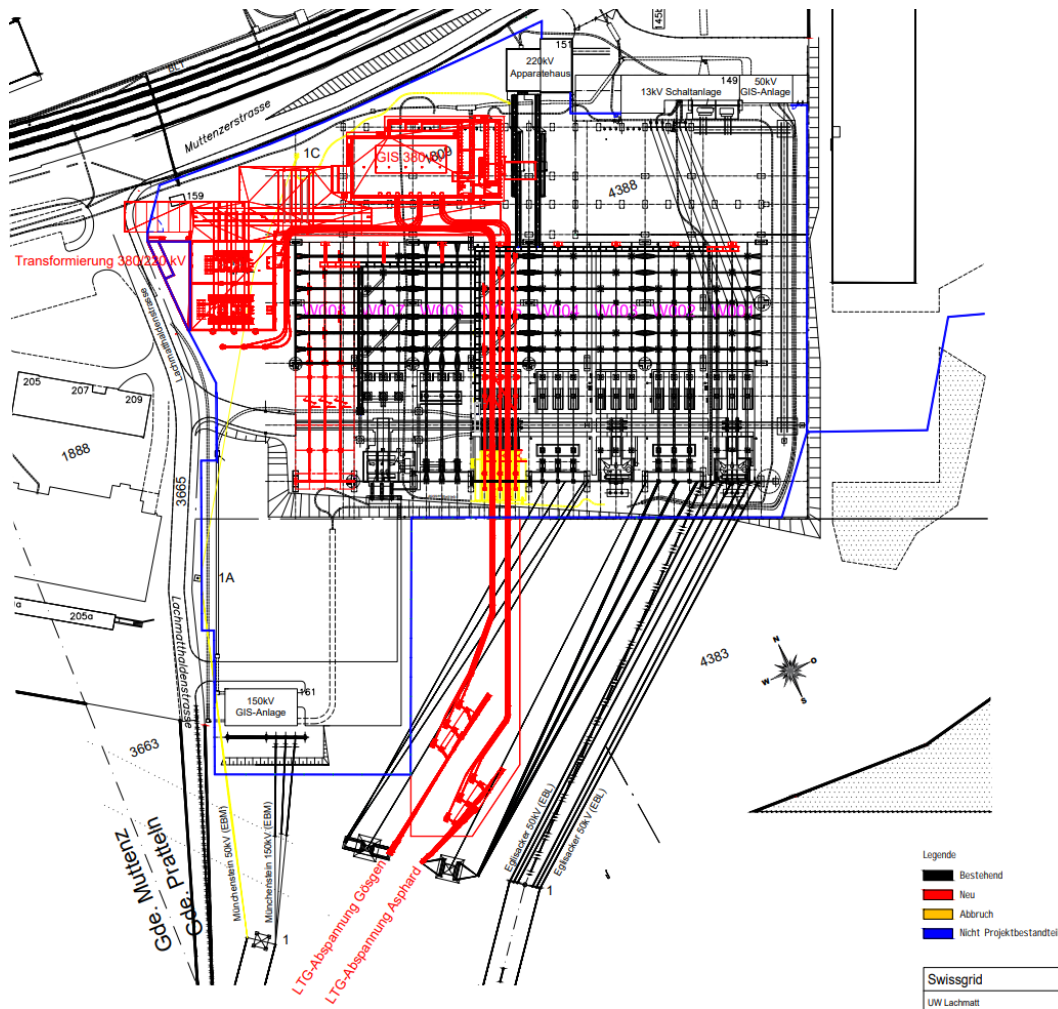


Abb. 1-12: Unterwerk Lachmatt

Die Lösung wäre, einen anderen Platz für die BLK in unmittelbarer Nähe des Unterwerks zu finden und sie mit einem Kabel zu verbinden. Oder ein neues, grösseres Unterwerk an einem anderen Ort in Lachmatt zu bauen.

Ein Ausschnitt der Abbildung Abb. 1-9 wird dargestellt, um zu sehen, wie viele BLK für das 380-kV-Kabelprojekt Lachmatt – Laufenburg benötigt werden.

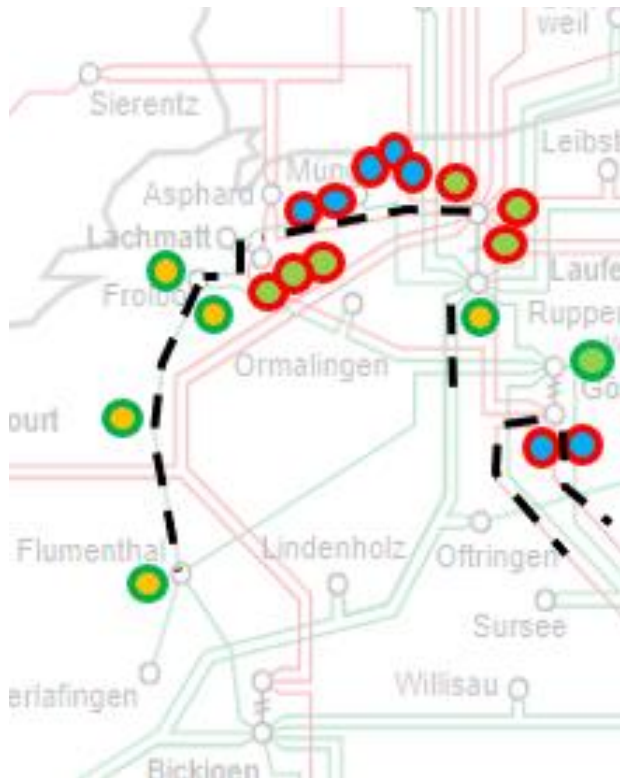


Abb. 1-13: BLK in Szenario 3 rund um Lachmatt

Zusätzlich zur Kompensation in Lachmatt wäre es auch notwendig, fünf 150-Mvar-BLK an ein oder mehrere Zwischenunterwerken entlang der Kabelroute anzuschliessen. Dies würde den Bau von Übergangsbauwerken erfordern, wie dasjenige auf der Abb. 1-11 zwischen Lachmatt und Laufenburg.

Um dieses Beispiel zu vervollständigen, wären auch 3 120-Mvar-BLK bei 380 kV Laufenburg erforderlich. Insgesamt 11 BLK, die mindestens 33 000 m² beanspruchen würden, um die 1470 Mvar aufzunehmen, die ein einziges Kabelprojekt erzeugt.

Folgt man demselben Gedankengang für andere Netzpunkte, kommt man schnell zu dem Schluss, dass die von vielen Kabeln umgebenen Unterwerke schnell zu klein werden würden, um die notwendigen neuen Kompensationen zu integrieren. Die Morphologie unseres Netzes könnte durch die Beschränkungen, die durch die Verkabelungsprojekte auferlegt werden, erheblich beeinträchtigt werden.

Die Grösse der bestehenden Unterwerke im Swissgrid Netz reicht von 743 m² in Robiei bis 137 924 m² in Laufenburg, mit einem Durchschnitt von 19 527 m² und einer Gesamtfläche von 2 460 435 m². Die 114 Spulen in Szenario 3 würden 342 000 m² benötigen, was 14% der Fläche entspricht, die derzeit von allen Unterwerken von Swissgrid beansprucht wird. Die für eine einzige BLK benötigte Fläche (3000 m²) ist mehr als dreimal so gross wie das kleinste bestehende Unterwerk. Eine einzige BLK entspricht 15% der Grösse eines durchschnittlichen Unterwerks. Wie aus Abb. 1-13 hervorgeht, würden viele Unterwerke in Szenario 3 einen Ausgleich benötigen. Mehrere Unterwerke würden zwei oder sogar drei BLK benötigen. Die Installation einer ähnlichen Anzahl von Kabeln wie in Szenario 3 würde die Fläche für Unterwerke um etwa 14% vergrössern. Dies ist eine optimistische Zahl, die davon ausgeht, dass alle notwendigen Unterwerke ausgebaut werden könnten, was, wie wir gesehen haben, bei weitem nicht der Fall ist.

1.6 Kostenberechnung der Ausgleichselemente der drei Szenarien

Es wurde eine Berechnung der Kosten für die Kompensation jedes untersuchten Szenarios durchgeführt. Die berücksichtigten Einheitspreise je nach Grösse, Spannungsebene und Art der Isolierung sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Sie umfassen die BLK, ein Fundament, ein Doppelsammelschienen-AIS-Feld, die Feldsteuerungstechnik, die Stationssteuerungstechnik, die Kommunikation, die Planung, Eigenleistungen und Verluste (die zum Zeitpunkt der Investition kapitalisiert werden) [1.2]. In den Kosten sind jedoch Parameter wie Platzmangel und die Notwendigkeit, neue Unterwerke zu bauen, nicht berücksichtigt. Auch Kabel sind nicht inbegriffen. Die Tabelle zeigt die Kosten pro Szenario, die sich auf 29,9, 182,2 und 1365,9 Mio. CHF für die Szenarien 1, 2 und 3 belaufen.

	Preis pro Einheit [Mio., von CHF]	Anzahl der BLK			Preise für BLK [Mio. von CHF]		
		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
50 Mvar luftisoliert 220 kV	4	0	3	12	0	12	48
50 Mvar ölisoliert 220 kV	8	0	2	3	0	16	24
100 Mvar luftisoliert 220 kV	5	0	0	7	0	0	35
100 Mvar ölisoliert 220 kV	11,3	0	5	22	0	56,5	248,6
120 Mvar ölisoliert 220 kV	12,4	0	1	15	0	12,4	186
150 Mvar ölisoliert 220 kV	14	0	3	8	0	42	112
50 Mvar luftisoliert 380 kV	5	0	0	0	0	0	0
50 Mvar ölisoliert 380 kV	9,7	0	0	0	0	0	0
100 Mvar luftisoliert 380 kV	6	0	0	2	0	0	12
100 Mvar ölisoliert 380 kV	13,4	1	2	2	13,4	26,8	26,8
120 Mvar ölisoliert 380 kV	14,5	0	0	18	0	0	261
150 Mvar ölisoliert 380 kV	16,5	1	1	25	16,5	16,5	412,5
Total		2	17	114	29,9	182,2	1365,9

Tabelle 1-5: Kosten für BLK nach Typ und Szenario

2 WP 2 – EMT-Studien auf der Ebene von Systemen und Geräten

2.1 Executive Summary

Die in diesem Bericht vorgestellten Analysen stellen das Work package 2 der Schweizer Verkabelungsstudie dar und sind den EMT-Simulationen für die drei im Anhang [4.4] dargestellten Szenarien gewidmet, die Gegenstand der Studie sind.

Die Kabel, um die es in dieser Studie geht, sind unterirdische XLPE-Stromkabel. Nachfolgend wird zur besseren Lesbarkeit das Wort «Kabel» verwendet.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden umfassende EMT-Studien auf System- und Geräteebene durchgeführt, um die Auswirkungen der in den drei Szenarien vorgeschlagenen Kabelsystemen auf das Frequenz- und Zeitverhalten des bestehenden Netzes zu bewerten.

Mit Schwerpunkt auf den Resonanzen und Oberschwingungen des Netzes wurden die Studien zu Frequenz-Scans in zwei Schritten durchgeführt: Frequenz-Scans und Verstärkung der Oberschwingungen. Mit Studien zu Frequenz-Scans sollen die Stellen im Netz ermittelt werden, die aufgrund der Kabelintegration anfällig für Resonanzen sind, sowie deren jeweilige Resonanzfrequenzen. Diese sind entscheidend, um potenzielle TOV-Risiken (temporäre Überspannung, engl.: temporary overvoltage) zu identifizieren, die während Netztransienten wie z.B. Einschalt-Ereignisse auftreten können. Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen andererseits sollen vorhersagen, inwieweit Oberschwingungen niedriger Ordnung in dicht verkabelten Gebieten verstärkt werden können, was zu Problemen mit der Energiequalität führt und verschiedene Arten von Netzbetriebsmittel stresst und sogar beschädigt.

Zeitbereichsstudien für ein Wechselstromnetz decken in der Regel eine Vielzahl von transienten Ereignissen ab, einschliesslich, Einschalten von Transformatoren, Drosseln, Kondensatoren, Freileitungen, Kabeln, Kurzschlüssen und deren Beseitigung usw. Aufgrund der Besonderheiten dieses Projekts konzentrieren wir uns hauptsächlich auf Studien zum Einschalten grosser Transformatoren an sensiblen Stellen im Netz, die in den Studien zu Frequenz-Scans identifiziert wurden, um die TOV-Risiken zu bewerten, die mit den vorgeschlagenen Kabelprojekten in den verschiedenen Szenarien zu erwarten sind.

Ausserdem wird in einer Analyse die Beziehung zwischen dem Anschluss eines Kabels und dem Anstieg der Spannung im stationären Zustand dargestellt, der durch die Blindleistungszufuhr des Kabels an seinem Anschlusspunkt verursacht wird. Aus dieser Beziehung lässt sich zum einen die maximal zulässige Gesamtkabellänge an einem einzelnen Knoten in Abhängigkeit von seiner Kurzschlussleistung und zum anderen die maximale Grösse der Kompensationsanlagen bestimmen, um einen übermässigen Spannungsanstieg an einem Knoten zu vermeiden, wenn ein Kompensationselement verloren geht.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den durchgeführten Studien werden im Folgenden dargestellt:

2.1.1 Studien zu Frequenz-Scans

- In Szenario 3 wurden mehrere kritische Fälle von Parallelresonanz identifiziert.

Während der Frequenzgang an verschiedenen Stellen des Netzes unter verschiedenen Betriebsbedingungen in den Szenarien 1 und 2 eher unkritisch bleibt, wurden in Szenario 3 mehrere äusserst kritische Fälle von Parallelresonanzen festgestellt. Zusammen mit ernsthaften Risiken einer Parallelresonanz bei den Oberschwingungen 2 und 3 (d. h. 100 Hz und 150 Hz) würden diese Fälle zu stark verzerrten und schlecht gedämpften TOVs während der Transienten am Standort führen, was wiederum erhebliche thermische und dielektrische Belastungen der Netzbetriebsmittel oder sogar einen Ausfall der Ausrüstung zur Folge hätte. Diese Fälle finden sich hauptsächlich bei 380 kV Romanel und 380 kV Magadino.

Darüber hinaus könnten an anderen Orten, wie 220 kV Wimmis und 380 kV Lavorgo, potenzielle Risiken einer Parallelresonanz auf der dritten Oberschwingung auftreten, wenn diese Gebiete noch dichter verkabelt werden, als sie es in Szenario 3 sind.

- Die Antwort der Netzfrequenz kann sich in Szenario 4 mit einer noch höheren Anzahl von Kabelprojekten als in Szenario 3 weiter verschlechtern.

In einem zusätzlichen Szenario 4, in dem die Anzahl der Kabelprojekte höher ist als in Szenario 3, kann die Verschlechterung der Antwort der Netzfrequenz in Bereichen des Netzes bestätigt werden, in denen der Frequenzgang in den Szenarien 1, 2 und 3 nicht kritisch war. Bei 380 kV Nant de Drance, 380 kV Mörel, 380 kV Lavorgo, 380 kV Tierfehd, 380 kV Filisur und 380 kV Soazza werden zuvor unkritische Parallelresonanzen mit noch niedrigeren Frequenzen und einer höheren Impedanzamplitude kritisch. Zusätzlich werden in anderen Bereichen des Netzes neue Parallelresonanzspitzen bei Oberschwingungen niedrigerer Ordnung auftreten, was das Risiko kritischer TOVs während transients Netzereignisse birgt.

- Die Erhöhung der Anzahl der Kabelprojekte im Netz (von Szenario 1 zu Szenario 3) verschiebt die Frequenzen der parallelen Systemresonanzen zu niedrigeren Oberschwingungen, wodurch sich das TOV-Risiko erhöht.

Der Vergleich des Frequenzgangs an verschiedenen Stellen des Netzes zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 zeigt eine deutliche Verschiebung von der Parallelresonanz zu den niederrangigen Oberschwingungen. Insbesondere bewegen sich die Parallelresonanzfrequenzen für Szenario 3 an mehreren Stellen im Netz unterhalb der Oberschwingung 4 (d. h. 200 Hz), was das Netz aufgrund der Anregung der Oberschwingungsparellresonanz niedrigerer Ordnung während der Transienten einem erheblichen TOV-Risiko aussetzen würde, insbesondere unter ungünstigen Betriebsbedingungen wie geringer Kurzschlussleistung und Leitungsausfall.

- Die Kabelintegration wirkt sich auf das 380-kV-Netz stärker aus als auf das 220-kV-Netz, was auf die geringere Dämpfung des Systems im ersten Fall zurückzuführen ist.

Im Vergleich zum 220-kV-Netz ist das 380-kV-Netz deutlich weniger vermascht, mit weniger angeschlossenen Erzeugungsgruppen und Lasten, so dass die Dämpfung im 380-kV-Netz in der Regel niedriger ist als im 220-kV-Netz. Als Ergebnis ist die Impedanz bei Resonanzen im 380-kV-Netz höher. Die Integration der Kabel in das 380-kV-Netz hätte daher einen grösseren Einfluss auf die Gesamtleistung des Netzes und die Sicherheit der Anlagen als im 220-kV-Netz. Mit anderen Worten: Es wäre «sicherer», die Umsetzung von Verkabelungsprojekten im 220-kV-Netz in Betracht zu ziehen als im 380-kV-Netz.

2.1.2 Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen

- Die Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung wird schlimmer, wenn die Anzahl der Kabelprojekte im Netz steigt.

In einem Netz, das nur aus Freileitungen besteht, gibt es keine Gefahr der Verstärkung von Oberschwingungen. Durch die Integration von Kabelprojekten in ein Netz werden kapazitive Elemente eingeführt, wodurch sich das Risiko einer Verstärkung bestimmter niederrangiger Oberschwingungen erheblich erhöht. Generell gilt: Je mehr Kabelprojekte, desto grösser die Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen. Dies ist der Fall für die Verstärkung der Oberschwingung 7 in den Unterwerken 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel und 220 kV Vaux, wo die Verstärkung in Szenario 3 kritisch wird, während sie in den Szenarien 1 und 2 vernachlässigbar ist. In der Umgebung von Nant de Drance ist die Verstärkung der Oberschwingung 7 bereits in der Gegenwart vorhanden, nimmt aber in Szenario 3 merklich zu.

Es gibt jedoch Ausnahmen von dieser Regel, wie im Abschnitt 2.3.2.1.3 am Beispiel der Verringerung der Verstärkung der Oberschwingung 5 in Airolo in Szenario 3 gezeigt wird. Aus diesem Grund sollten bei jedem

neuen Kabelprojekt detaillierte Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen durchgeführt werden, um mögliche Probleme mit Oberschwingungsresonanzen bereits in der Planungsphase vorhersehen zu können.

- Eine hohe Kurzschlussleistung kann die Probleme mit der Verstärkung von Oberschwingungen abschwächen.

Es wurden Vergleiche der Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung an mehreren Stellen im Netz unter verschiedenen Kurzschlussleistungsbedingungen durchgeführt. Im Allgemeinen kann eine Erhöhung der Kurzschlussleistung des Netzes die Probleme mit der Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen mildern, indem die Oberschwingungsresonanzfrequenz zu höheren Frequenzen verschoben und die Oberschwingungsresonanz auf den verschiedenen Oberschwingungspfaden gedämpft wird. Dies gilt für die Verstärkung der Oberschwingungen 5 und 7 in Airolo in Szenario 2, wo die Verstärkung unter der Bedingung niedriger Kurzschlussleistung bis zum 11-fachen betragen könnte. Es werden jedoch wieder Ausnahmen von dieser Regel entdeckt. In der Umgebung von Nant de Drance werden höhere Verstärkungen bei niedriger Kurzschlussleistung für Szenario 2 beobachtet. In Szenario 3 sind die Verstärkungen der Oberschwingungen bei hoher Kurzschlussleistung jedoch höher. Dieser Fall wird in den Abschnitten 2.3.2.2.2 und 2.3.2.2.3 ausführlich erläutert.

- Ein einziges Verkabelungsprojekt in einem dicht verkabelten Netz kann sich stark auf die Verstärkung von Oberschwingungen in abgelegenen Gebieten auswirken.

Die Fragen der Verstärkung von Oberschwingungen werden immer komplexer, je mehr Kabel in das Netz integriert werden. In einem dicht verkabelten Netz hätte die Verkabelung eines bestimmten Netzabschnitts, entweder mit Freileitungen oder mit Kabeln, nicht nur Auswirkungen auf die Verstärkung von Oberschwingungen im lokalen Bereich, sondern könnte auch erhebliche Auswirkungen auf die Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung in einem entfernten Bereich haben. Beispielsweise hätte der 220-kV-Abschnitt Altgass – Samstagern einen Einfluss auf die im Tessin beobachteten Verstärkungsfaktoren.

Insgesamt kann die Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung während der Kabelintegration (insbesondere bei intensiver Kabelintegration) ein heikles Thema sein, das unbedingt detaillierte Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen erfordern würde, um Risiken zu identifizieren, bestimmte Betriebsprinzipien festzulegen und Entscheidungen über die Gestaltung und Installation von Filtern zu treffen.

2.1.3 Zeitstudien (Einschalten von grossen Transformatoren)

- Kritische TOVs sind während des Einschaltens der Transformatoren an Stellen zu erwarten, die für Parallelresonanzen in Szenario 3 empfindlich sind (z. B. 380 kV Romanel und 380 kV Magadino).

In Szenario 3 können beim Einschalten der grossen Transformatoren 380 kV Romanel und 380 kV Magadino unter bestimmten Topologien und Netzkonfigurationen strenge und schwach gedämpfte TOVs beobachtet werden. Mit einer TOV-Amplitude von mehr als 1,5 pu in einigen Fällen können diese TOVs zu erheblichen dielektrischen und thermischen Belastungen der in der Nähe befindlichen Netzausrüstung führen, was eine vorzeitige Alterung der Ausrüstung oder sogar ihren Ausfall zur Folge hat.

Dennoch wird auch beobachtet, dass bei Szenario 2 mit deutlich weniger Kabelprojekten die gleichen Netztopologien und -konfigurationen zu sehr abgeschwächten TOVs führen würden, so dass es keinen Grund zur Sorge um die Stabilität und Sicherheit des Netzbetriebs gibt.

Insgesamt lässt sich sagen, dass eine intensive Kabelintegration wie in Szenario 3 das Risiko kritischer TOVs an mehreren Stellen des Netzwerks bei vorübergehenden Ereignissen am Standort erheblich erhöhen würde.

- Die Kurzschlussleistung einer Netzstelle spielt eine wichtige Rolle bei den Auswirkungen der Kabelintegration in der Nachbarschaft. Weitere Studien wurden durchgeführt, um diese These zu belegen.

Die Auswirkungen der Kabelintegration sind von Knoten zu Knoten unterschiedlich, je nachdem, wie hoch die Kurzschlussleistung des Knotens ist. Um dies zu belegen, wurden zusätzliche Simulationen ausgehend von Szenario 3 mit einer bemerkenswerten Zunahme der Kabelkilometer bei 380 kV Romanel und 380 kV Laufenburg durchgeführt.

Für einen schwachen Knoten wie 380 kV Romanel verschiebt die in Szenario 3 vorgeschlagene Erhöhung der Kabellänge von 40 km auf 117,4 km rund um 380 kV Romanel die Parallelresonanz weiter von der Oberschwingung 3 zur Oberschwingung 2, was zu stark erhöhten TOVs (von 1,32 pu auf über 1,5 pu) beim Einschalten der Transformatoren in Romanel führt.

Andererseits würde bei einem starken Knoten wie dem 380-kV-Knoten Laufenburg fast eine Verdreifachung der Kabellänge von 64,8 km auf 171,74 km die parallele Resonanzfrequenz in einer getesteten Ausfallvariante N-1 nur geringfügig um weniger als 10 Hz verschieben. Ausserdem bewirkt die hohe Dämpfung des Systems aufgrund der hohen Kurzschlussleistung, dass die Oberschwingungsimpedanz des Netzes bei 380 kV Laufenburg für Oberschwingungen niedriger Ordnung (d. h. 2, 3 und 4) ausreichend niedrig ist, um die Anregung jeglicher paralleler Resonanzen niedriger Ordnung zu vermeiden. Wenig überraschend kann in beiden getesteten Fällen während des Einschaltens des Transformators in Laufenburg kein TOV beobachtet werden, selbst bei intensiver Verkabelung in der Nähe von 380 kV Laufenburg.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es sicherer wäre, Kabelprojekte in der Nähe eines starken Knotenpunkts zu integrieren, da hier nur minimale Auswirkungen auf das bestehende Netz zu erwarten sind. Bei der Integration von Kabelprojekten in der Nähe eines schwachen Knotens ist jedoch Vorsicht geboten, da möglicherweise detailliertere Erhebungen oder Studien erforderlich sind.

2.1.4 Spannungsänderungen aufgrund von Kabelverbindungen und oder des Verlusts einer Kompensationseinrichtung

Die durch das Einschalten eines Kabels erzeugte Blindleistungszufuhr führt zu einem Anstieg der stationären Spannung des Knotens, an den das Kabel angeschlossen ist. Dieser Spannungsanstieg ist direkt proportional zur Menge der vom Kabel erzeugten Blindleistung und umgekehrt proportional zur Kurzschlussleistung des Knotens. Da man weiss, dass der Blindleistungsbeitrag eines Kabels direkt mit seiner Länge zusammenhängt, kann man schlussfolgern, dass ein starker Knoten (hohe Kurzschlussleistung) die Verbindung einer grossen Menge von Kabeln besser unterstützen kann, ohne einen grossen Einfluss auf seine Spannung im stationären Zustand zu haben.

Per Definition beträgt die maximal zulässige Spannungsschwankung 2% [2.29]. Wenn man diesen Grenzwert kennt, kann man die maximale Gesamtlänge der an einen Knoten angeschlossenen Kabel in Abhängigkeit von der Kurzschlussleistung bei einer bestimmten Betriebsspannung abschätzen.

Analog dazu wird, wenn ein Kabel in Betrieb ist und sein Ausgleichselement verloren geht (z. B. durch einen Defekt oder eine Fehlbedienung), die Spannung des entsprechenden Knotens tendenziell ansteigen. Daher sollte die Leistung der Kompensationsspulen so begrenzt werden, dass der Verlust eines dieser Elemente nicht zu einem Anstieg von über 2% (Grenzwert) der Spannung im stationären Zustand führt.

Zusammenfassend zeigen die Analysen, dass für Knotenpunkte mit einer minimalen Kurzschlussleistung von weniger als 10 GVA Ausgleichselemente mit einer Leistung von weniger als 200 Mvar verwendet werden sollten. In jedem Fall wäre es sinnvoll, diese Ergebnisse als erste Annäherung zu betrachten, wobei man sich bewusst sein sollte, dass möglicherweise weitere Untersuchungen erforderlich sind, insbesondere bei einem schwachen Knoten.

2.2 Studien zu Frequenz-Scans

Ein Elektrizitätsnetz besteht aus verschiedenen elektrischen Geräten und Komponenten, die resistiver, induktiver oder kapazitiver Natur sind. Einige dieser induktiven und kapazitiven Blindwiderstände können bei bestimmten Frequenzen untereinander gleich werden, was zu Reihen- oder Parallelresonanzen führt. Die Anzahl und Häufigkeit dieser Resonanzpunkte hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, z. B. von der Komplexität des Netzes und der Art seiner Komponenten, den Parametern ihrer elektrischen Eigenschaften, ihrer Lage zueinander und dem Anschlusspunkt. Andererseits könnten Komponenten nichtlinearer Natur (z. B. der Eisenkern eines Transformators) und bestimmte Schaltvorgänge (z. B. Einschaltereignisse, leistungselektronische Geräte im Normalbetrieb, Beseitigung von Erdfehlern, Inselbildung des Systems usw.) Spannungs- und Stromwellenformen mit Komponenten über ein breites Frequenzspektrum erzeugen. Diese ober-schwingungsreichen Spannungs- und Stromkomponenten würden unter bestimmten Bedingungen bei den Resonanzfrequenzen des Systems schlecht gedämpfte Schwingungen verursachen, was zu übermässigen Wellenverzerrungen und Überspannungen führen würde. Dies kann durch ein Beispiel veranschaulicht werden, bei dem eine nichtlineare Induktivität über ein einfaches RLC-Netzwerk geschaltet wird, wie in Abb. 2-1 gezeigt wird.

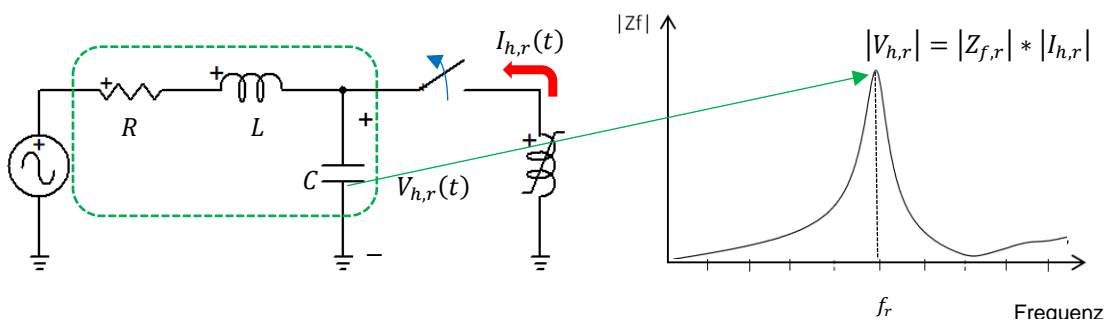


Abb. 2-1: Illustration der Verbindung einer nichtlinearen Induktivität mit einem RLC-Netzwerk

Wie in Abb. 2-1 gezeigt, hat das RLC-Netzwerk eine Resonanzfrequenz parallel zu f_r mit einer relativ hohen Impedanz. Diese Resonanz wird durch die LC-Komponenten des Netzwerks definiert:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Eine nichtlineare Induktivität, wie ein Transformator oder eine Drossel, speist bei Einschaltung Ströme ein, die ein breites Spektrum an Frequenzkomponenten enthalten. Daher wird die Stromkomponente bei f_r , $I_{h,r}$, durch die hohe Netzimpedanz bei der Resonanz $Z_{f,r}$ verstärkt, was zu einer relativ hohen Spannungskomponente bei f_r am Knoten führt, dargestellt durch $V_{h,r}$. Diese Spannungskomponente würde, überlagert von der Spannungskomponente der Grundfrequenz $V_{50\text{ Hz}}$, zu höheren als den normalen Spannungen führen (Überspannungen). Diese Überspannungen würden zu einer vorzeitigen Alterung der Isolierung und der Geräte, zu einer Verschlechterung oder sogar zu einem Ausfall aufgrund einer übermässigen dielektrischen Belastung und/oder Erwärmung führen.

Daher sind Studien zu Oberschwingungen und Resonanzen unerlässlich, um vor der Einführung neuer elektrischer Bauteile und Geräte die empfindlichen Punkte im Netz zu bewerten, die anfällig für Resonanz- und Stabilitätsprobleme sind.

Ausserdem haben Erdkabel mehr Kapazität als Freileitungen, was die Resonanzfrequenzen des Netzes zu niederrangigen Oberschwingungen führen kann. Daher sind Untersuchungen zu Oberschwingungen und Resonanzen in einem kabeldichten Stromübertragungsnetz von besonderer Bedeutung.

Untersuchungen zu Oberschwingungen und Netzresonanzen werden in der Regel in zwei Schritten durchgeführt: In einem ersten Schritt, dem Frequenz-Scan, werden die resonanzempfindlichen Punkte des Netzes (parallel oder in Reihe) und ihre jeweiligen Resonanzfrequenzen ermittelt; in einem zweiten Schritt, der Oberschwingungsverstärkung, wird die Reaktion des Systems auf bestimmte Oberschwingungsfrequenzen hinsichtlich der Verstärkung beurteilt.

Die Ergebnisse der Studien zu Frequenz-Scans werden in diesem Abschnitt vorgestellt, während die Ergebnisse der Oberschwingungsverstärkung im Abschnitt 2.3 präsentiert werden.

2.2.1 Methodik

In EMTP kann der Frequenz-Scan für die Oberschwingungsimpedanz an einer bestimmten Stelle des Netzes durchgeführt werden, indem Strom über 1 A mit einer bestimmten Frequenz in einem vordefinierten Frequenzbereich in den Punkt von Interesse eingespeist und die Antwort der Spannung an diesem Punkt gemessen wird. Die gemessene Spannung im vorgegebenen Frequenzspektrum entspricht der am Steuerpunkt beobachteten Oberschwingungsimpedanz.

Normalerweise werden Frequenz-Scans bis 2500 Hz (Frequenz der Oberschwingung 50) durchgeführt. Aufgrund der Besonderheiten des Schweizer Stromübertragungsnetzes und der durch bestimmte transiente Ereignisse hervorgerufenen TOVs interessieren wir uns für jede Parallelresonanz bis zur Oberschwingungsfrequenz 7 (d. h. 350 Hz). Daher wird es im Rahmen dieser Arbeit als ausreichend erachtet, Frequenzen bis 500 Hz zu filtern. Es ist zu beachten, dass unter allen möglichen parallelen Resonanzfrequenzen unterhalb der Oberschwingung 7 die Aufmerksamkeit auf Resonanzfrequenzen gerichtet sein sollte, die sich auf oder in der Nähe von ganzzahligen Oberschwingungsfrequenzen niedrigerer Ordnung befinden (d. h. 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz usw.).

Die Netzkurzschlussleistung spielt bei der Resonanz eine wichtige Rolle. Im Allgemeinen tendiert ein hoher Kurzschlusspegel (SCL) dazu, die Parallelresonanz zu höheren Frequenzen zu verschieben, wodurch die Gefahr von TOVs, die durch jegliche Resonanz angeregt werden, verringert wird. Im Gegensatz dazu drückt ein niedriger Kurzschlusspegel die Netzresonanz stärker in Richtung niedrigerer Frequenzen und erhöht damit das Risiko von resonanzangeregten TOVs während transients Ereignisse. Die Kurzschlussleistung an einem bestimmten Netzknoten hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie z. B. dem Produktionsniveau, geplanten Ausserbetriebnahmen, Ausfällen von Anlagen (z. B. Transformatoren, Leitungen/Kabel, Shunt-Reaktoren/-kondensatoren, SVCs, Filter usw.)

Das EMT-Modell des Netzes ermöglicht das Umschalten zwischen zwei Produktionsniveaus – optimal und niedrig. Die optimale Erzeugungsebene (nachfolgend «optimaler SCL») ermöglicht es, die Reaktion des Netzes unter optimalen Betriebsbedingungen hinsichtlich der Erzeugung zu bewerten. Er wird an jedem Knotenpunkt auf der Grundlage interner Kurzschlussstudien berechnet. Die Bedingung SCL niedrig ist dagegen eine fiktive Betriebsbedingung, deren Zweck es ist, die Reaktion des Systems unter nicht optimalen Betriebsbedingungen zu untersuchen, wenn die lokalen Kraftwerksgruppen 50% ihrer jeweiligen Kapazität erreichen. In den Studien zu Frequenz-Scans wurden ein niedriger SCL sowie verschiedene N-1- (und in einigen Fällen auch N-2) Leitungs-/Kabelaufälle berücksichtigt, um die Antwort der Netzfrequenz mit den geplanten Kabelprojekten unter «ungünstigen» Netzbedingungen zu bewerten und so zu einer konservativen Gesamtbewertung zu gelangen. Die Ausfallvarianten N-1 (und N-2) werden sorgfältig definiert, um die «ungünstigsten» Netzwerkbedingungen zu erreichen (z. B. Resonanzen niedrigerer Ordnung, SCL niedrig usw.).

Neben den Resonanzfrequenzen ist auch die Amplitude der Oberschwingungsimpedanz bei Resonanz, die mit der Dämpfung des Netzes zusammenhängt, ein entscheidender Faktor für die Schwere von TOVs, die

durch bestimmte transiente Ereignisse ausgelöst werden können. Da es keine relevanten internationalen Standards gibt, verwenden die europäischen ÜNB in der Regel ihre eigenen kritischen Schwellenwerte für die Amplitude der Oberschwingungsimpedanz bei Resonanz. Einige Beispiele finden sich in Tabelle 2-1 [2.1].

TSO	Kritische Schwellenwerte
Svenska Kraftnät	100 Hz \pm 10 Hz: 400 Ohm 150 Hz \pm 10 Hz: 800 Ohm
Eirgrid	<150 Hz: 1000 Ohm
Energinet	100 Hz \pm 10 Hz: 400 Ohm 150 Hz \pm 10 Hz: 600 Ohm 200 Hz \pm 10 Hz: 2400 Ohm
RTE	Verschiedene Werte für Oberschwingungen zwischen 2 und 10

Tabelle 2-1: Von den europäischen ÜNB verwendete kritische Schwellenwerte für die Amplitude der Oberschwingungsimpedanz

Es ist anzumerken, dass eine Marge von ± 10 Hz von den meisten ÜNB angenommen wurde, wenn es um Frequenz-Scan-Analysen geht, um mögliche Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und dem tatsächlichen Netz aufgrund von Ungenauigkeiten in den Modellierungsansätzen, Annahmen, unvorhersehbaren Netzbedingungen usw. zu berücksichtigen. Laut Tabelle 2-1 und aus einer konservativen Perspektive werden wir uns auf parallele Resonanzen bei oder in der Nähe von Oberschwingungsfrequenzen bis zu 200 Hz mit einer Marge von ± 10 Hz und den kritischen Schwellenwerten, die in Tabelle 2-2 angegeben sind, konzentrieren.

Resonanzfrequenzen	Kritische Schwellenwerte
100 Hz \pm 10 Hz	400 Ohm
150 Hz \pm 10 Hz	600 Ohm
200 Hz \pm 10 Hz	2400 Ohm

Tabelle 2-2: Werte für den Schwellenwert der kritischen Oberschwingungsimpedanz bis zu 4. in dieser Studie

Die Frequenz-Scans wurden an insgesamt 28 Stellen des Netzes bei zwei Spannungsebenen durchgeführt, wie in der folgenden Tabelle dargestellt. Diese Orte wurden aufgrund des Vorhandenseins grosser 220/380-kV-Transformatoren von Swissgrid und/oder ihrer Nähe zu geplanten Kabelprojekten ausgewählt.

220 kV Altgass	220 kV Auwiesen	220 kV Benken	220 kV Bickigen
380 kV Bickigen	220 kV Chamoson	380 kV Châtelard	220 kV Fällanden
220 kV Froloo	220 kV Flumenthal	220 kV Gösgen	380 kV Gösgen
220 kV Lachmatt	380 kV Lachmatt	220 kV Laufenburg	380 kV Laufenburg
380 kV Lavorgo	220 kV Magadino	220 kV Mettlen	380 kV Mettlen

220 kV Mühleberg	220 kV Romanel	380 kV Romanel	220 kV Sarelli
380 kV Sils	380 kV Soazza	220 kV Wimmis	220 kV Winkeln

2.2.2 Ergebnisse und Diskussionen

Aus den durchgeführten Studien lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Mehrere kritische Fälle von Parallelresonanz hinsichtlich der Resonanzfrequenzen und der Amplitude der Oberschwingungsimpedanz (gemäss Tabelle 2.2) wurden in Szenario 3 bei 380 kV Romanel und 380 kV Magadino unter bestimmten Netzbedingungen gefunden (siehe Abschnitt 2.2.2.1).
- Bei einer noch höheren Anzahl an Kabeln als in Szenario 3 wurde eine Verschlechterung der Antwort der Netzfrequenz im Vergleich zu Szenario 3 beobachtet und in Szenario 4 bestätigt. In Szenario 4 wurden an mehreren Stellen im Netz kritische Oberschwingungsresonanzen niedriger Ordnung beobachtet, die in den vorherigen Szenarien 1, 2 und 3 nicht aufgetreten waren. In einigen Fällen werden zuvor unkritische Parallelresonanzen kritisch, nachdem sie sich aufgrund zusätzlicher Kabelprojekte zu Oberschwingungen niedrigerer Ordnung verschoben haben, während in anderen Fällen neue Spitzen von Parallelresonanzen bei Oberschwingungsfrequenzen niedrigerer Ordnung mit einer signifikanten Impedanzamplitude auftreten, die zu einem kritischen TOV während der Netztransienten führen würde (siehe Abschnitt 2.2.2.2).
- Die zunehmende Anzahl von Kabelprojekten verschiebt die Resonanzfrequenzen des Systems an verschiedenen Stellen des Netzes zu niedrigeren Oberschwingungen, was wiederum das Risiko von TOV und Resonanzen auf Oberschwingungen niedriger Ordnung während der Netztransienten erhöht (siehe Abschnitt 2.2.2.3).
- Im Vergleich zum 380-kV-Netz bietet das stärker vermaschte 220-kV-Netz in der Regel eine höhere Systemdämpfung an verschiedenen Stellen des Netzes, was die potenziellen Risiken von TOVs und Resonanzen, die durch die Integration von Kabelprojekten verursacht werden, verringert. Das bedeutet, dass es sozusagen sicherer ist, Kabelprojekte auf dem 220-kV-Netz durchzuführen als auf dem 380-kV-Netz (siehe Abschnitt 2.2.2.4).

Die vier oben genannten Hauptschlussfolgerungen werden in den jeweiligen Abschnitten weiter ausgeführt. Die Studien zu Frequenz-Scans werden durchgeführt, um mit Szenario 3 zu beginnen. Fälle, bei denen die Gefahr von Oberschwingungsresonanzen niedrigerer Ordnung besteht, finden sich im Abschnitt 2.2.2.1 und andere im Anhang 4.4.3, um die Bequemlichkeit des Lesers zu erhöhen.

Darüber hinaus sollte erwähnt werden, dass 220 kV Wimmis und 380 kV Lavorgo, obwohl sie nicht als Orte mit kritischen Risiken für Parallelresonanz identifiziert wurden, die Aufmerksamkeit der Leserinnen und Leser verdienen, da potenzielle Risiken für Parallelresonanz entstehen können, wenn zusätzliche Kabelprojekte, die nicht Szenario 3 sind, in den lokalen Netzbereichen vorgeschlagen werden (siehe Anhang 4.4.3).

2.2.2.1 Kritische Fälle von parallelen Resonanzen

Mehrere kritische Fälle von Parallelresonanz hinsichtlich der Resonanzfrequenzen und der Amplitude der Oberschwingungsimpedanz (laut Tabelle 2-2) wurden in Szenario 3 bei 380 kV Romanel und 380 kV Magadino unter bestimmten Netzbedingungen gefunden.

2.2.2.1.1 380 kV Romanel

In Szenario 3 werden mehrere Kabelprojekte in der Nähe von 380 kV Romanel vorgeschlagen:

- 8 km, von 380 kV Romanel nach 380 kV Bois Tollot
- 8 km, von 380 kV Romanel nach 380 kV La Bâtiaz

- 12 km um 380 kV Veytaux, ~36 km um 380 kV Romanel

In 380 kV Romanel ist mit parallelen Resonanzen mit Oberschwingungen tiefer Ordnung zu rechnen.

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Romanel berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Romanel – Bois Tollot
3	N-1 bei 380 kV Romanel – La Bâtiaz
4	N-1 bei 380 kV Châtelard – La Bâtiaz
5	N-1 bei 380 kV Chamoson – La Bâtiaz
6	N-2 bei 380 kV Romanel – Bois Tollot und Chamoson – La Bâtiaz

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 380 kV Romanel für die 6 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 2-2 dargestellt.

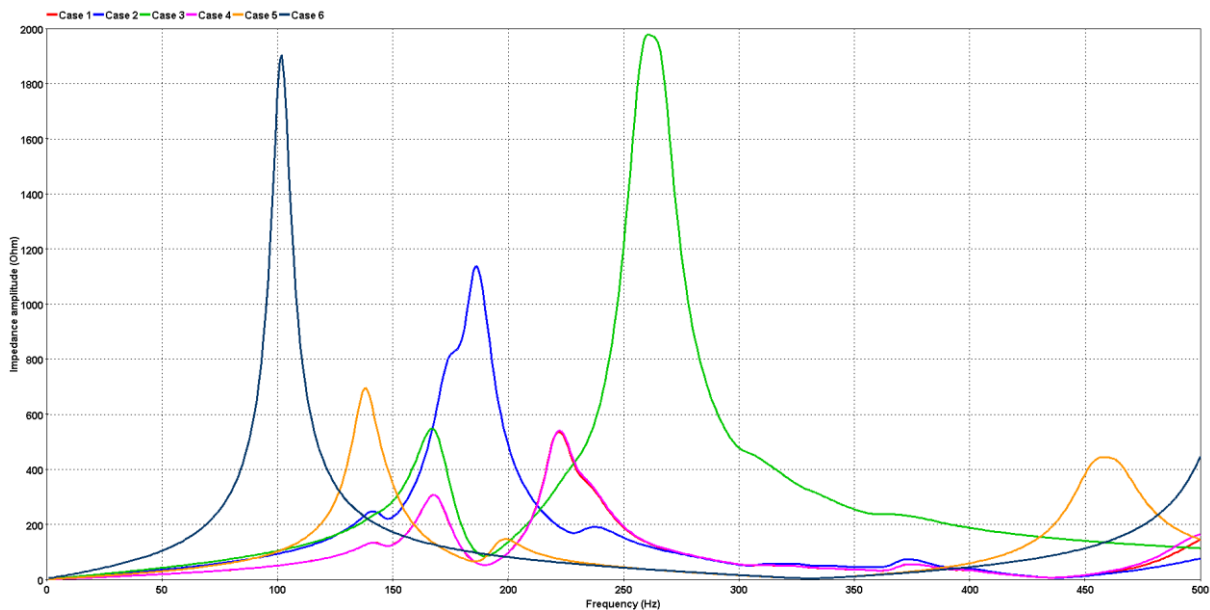


Abb. 2-2: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für den 6. Fall – niedriger SCL, Szenario 3

Die Impedanzamplitude nahe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 in den 6 Fällen für Szenario 3 ist in Tabelle 2-3 dargestellt.

	Fall 1:	Fall 2:	Fall 3:	Fall 4:	Fall 5:	Fall 6:
100 Hz ± 10 Hz	42–61	77–112	88–122	42–61	77–139	600–1904
150 Hz ± 10 Hz	121–212	219–353	224–430	121–211	190–666	143–215
200 Hz ± 10 Hz	52–217	298–988	85–217	52–215	79–146	72–92

Tabelle 2-3: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 bei 380 kV Romanel für alle 6 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

Es sei darauf hingewiesen, dass in Tabelle 2-3 zwei Fälle hervorgehoben werden, in denen die Impedanzamplitude um einen bestimmten harmonischen Rang die kritischen Schwellenwerte überschreitet, die in Tabelle 2-2 definiert sind. Folgende Phänomene sind in Szenario 3 zu erwarten:

- Die Sättigung oder erneute Sättigung des Transformators in Romanel (z. B. Einschalten der 380-kV-Seite, Behebung eines Fehlers auf einer benachbarten 380-kV-Leitung usw.) unter der Ausfallvariante N-1 von 380 kV La Bâtiâz – Chamoson (Fall 5) und niedrigen SCL-Bedingungen würde aufgrund der Netzresonanz nahe der Oberschwingung 3 mit einer ausreichend hohen Amplitude potenziell zu TOVs mit einer signifikanten Oberschwingung 3 führen.
- Hohe TOVs sind zu erwarten, wenn der Transformator in Romanel durch das Einschalten der 380-kV-Seite, die Behebung eines Fehlers auf einer benachbarten 380-kV-Leitung usw. in den Ausfallvarianten N-2 380 kV La Bâtiâz – Chamoson und Romanel – Bois Tollot (Fall 6) gesättigt oder wieder gesättigt wird. Das liegt daran, dass diese Netzwerktopologie zu einer Parallelresonanz nahe der Oberschwingung 2 mit einer extrem hohen Impedanzamplitude führt.

Zum Vergleich: Die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für alle drei Szenarien (d. h. Szenario 1, 2 und 3) für die Fälle 5 und 6 ist in Abb. 2-3 und Abb. 2-4 dargestellt. Ebenso sind die Impedanzamplituden in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 für die drei Szenarien in den Fällen 5 und 6 in Tabelle 2-4 bzw. Tabelle 2-5 dargestellt.

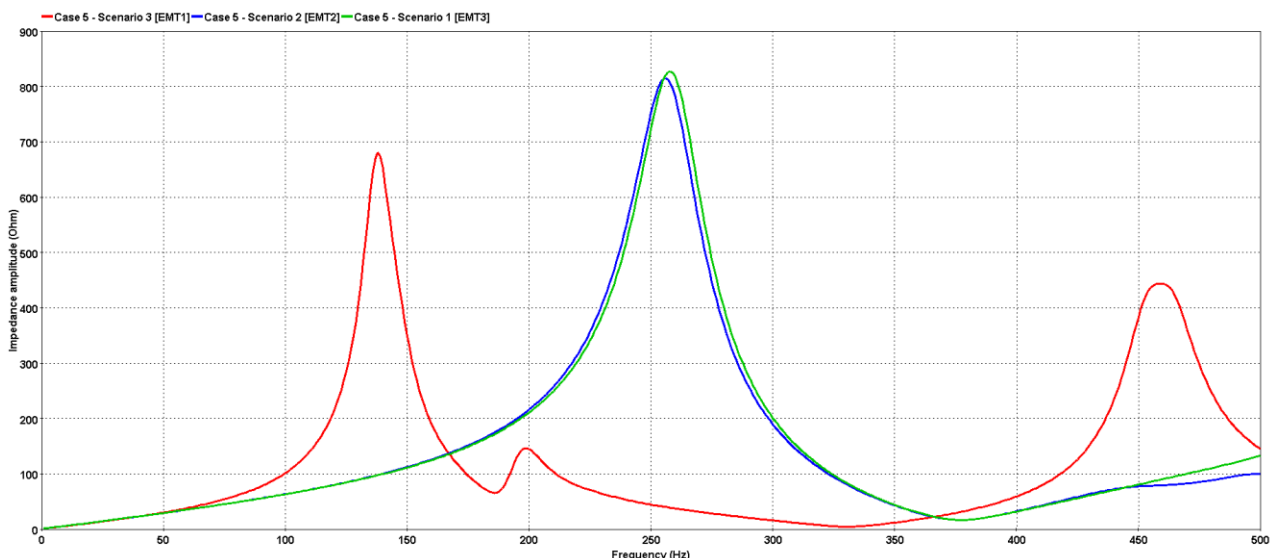


Abb. 2-3: Vergleich der harmonischen Impedanz bei 380 kV Romanel für Fall 5 zwischen den Szenarien 1, 2 und 3

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
100 Hz ± 10 Hz	77–139	55–71	55–71
150 Hz ± 10 Hz	190–666	100–125	99–124
200 Hz ± 10 Hz	79–146	185–257	181–249

Tabelle 2-4: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 bei 380 kV Romanel für Fall 5 – Vergleich zwischen den Szenarien 1, 2 und 3

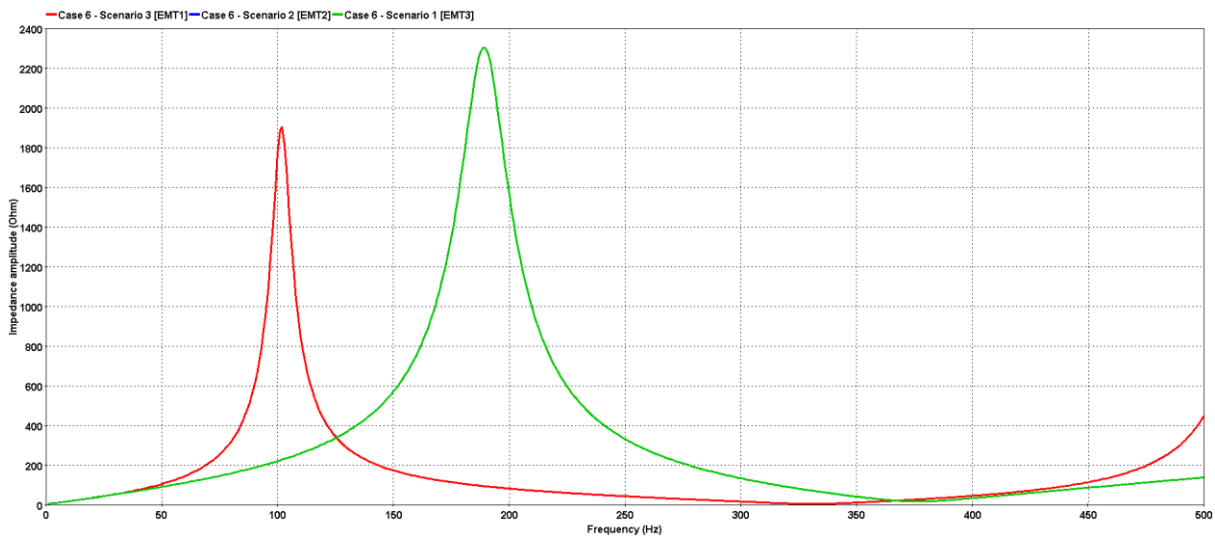


Abb. 2-4: Vergleich der harmonischen Impedanz bei 380 kV Romanel für Fall 6 zwischen den Szenarien 1, 2 und 3

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
100 Hz ± 10 Hz	600–1904	186–258	186–258
150 Hz ± 10 Hz	143–215	450–753	450–753
200 Hz ± 10 Hz	72–92	988–2298	988–2298

Tabelle 2-5: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 bei 380 kV Romanel für Fall 6 – Vergleich zwischen den Szenarien 1, 2 und 3

In den beiden Grafiken ist zu erkennen, dass sich die Parallelresonanz in den Szenarien 1 und 2 mit weniger Kabelprojekten zu höheren Frequenzen verschiebt. Insbesondere,

- Fall 5:**

Die Entfernung der beiden 8 km langen Kabel von 380 kV Romanel zu 380 kV La Bâtiaz und 380 kV Bois Tollot hat die deutlichsten Auswirkungen auf die Verschiebung der Netzresonanz, was aufgrund ihrer Nähe zum Ort der Frequenz-Scans offensichtlich ist.

Das 4,8 km lange Kabel zu 220 kV Foretaille – Verbois führt zu einer leichten Verschiebung der Resonanzfrequenz zwischen den Szenarien 1 und 2. Aufgrund seiner geringen Länge und grossen Entfernung (gekoppelt an das 380-kV-Netz in Verbois) ist sein Einfluss auf die beobachtete harmonische Resonanz bei 380 kV

Romanel unbedeutend. Andere in Szenario 2 enthaltene Kabel, wie die in Innerkirchen und im Tessin, haben minimale Auswirkungen auf die harmonische Resonanz bei 380 kV Romanel, da sie elektrisch weiter entfernt sind.

Die etwas höhere Resonanzfrequenz als die Oberschwingung 5 in den Szenarien 1 und 2 ist auf die 380-kV-Kabel in Nant de Drance zurückzuführen.

- **Fall 6:**

Der in Fall 6 betrachtete Leitungsausfall N-2 schliesst das 8 km lange Kabel von 380 kV Romanel nach 380 kV Bois Tollot aus. Folglich ist die in den Szenarien 1 und 2 beobachtete Frequenzverschiebung im Vergleich zu Szenario 3 auf die Entfernung der 8 km langen Kabel von 380 kV Romanel nach 380 kV La Bâtiatz zurückzuführen.

Zwischen den Szenarien 1 und 2 ist kein Unterschied in der harmonischen Resonanz zu beobachten. Dies liegt daran, dass durch den geplanten Leitungsausfall N-2 eine 380-kV-Insel von 380 kV Romanel nach 380 kV Nant de Drance geschaffen wird und alle Kabelsysteme in Szenario 2 an elektrisch weit entfernten Punkten an die 380-kV-Insel gekoppelt werden.

Darüber hinaus verringert der Ausschluss der 380-kV-Leitung Romanel – Bois Tollot im Leitungsausfall N-2 den SCL bei 380 kV Romanel weiter, was in den Szenarien 1 und 2 zu einer Parallelresonanz führt, die unterhalb der Oberschwingung 4 liegt. Wieder einmal ist diese Parallelresonanz das Ergebnis der 380-kV-Kabel von Nant de Drance.

2.2.2.1.2 380 kV Magadino

Ein 13 km langes Kabelsegment wird in Szenario 3 zwischen 380 kV Magadino und 380 kV Musignano in Italien vorgeschlagen. Da das Netz um 380 kV Magadino nicht vermascht ist, wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Magadino nur zwei Fälle berücksichtigt, die im Folgenden dargestellt werden:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Lavorgo – Magadino

Die bei 380 kV Magadino beobachtete frequenzabhängige Netzimpedanz für die beiden Fälle des Szenarios 3 ist in Abb. 2-5 dargestellt.

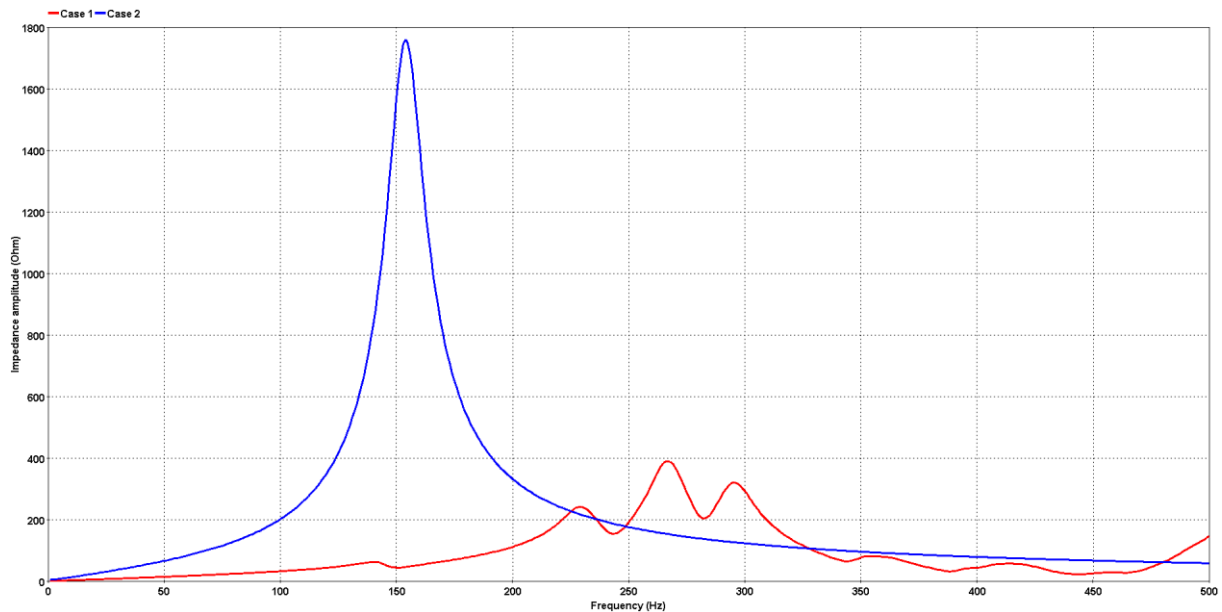


Abb. 2-5: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Magadino für beide Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

Die Impedanzamplitude nahe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 in beiden Fällen für Szenario 3 ist in der folgenden Tabelle dargestellt Tabelle 2-6.

	Fall 1:	Fall 2:
100 Hz ± 10 Hz	28–37	159–260
150 Hz ± 10 Hz	44–62	829–1760
200 Hz ± 10 Hz	90–140	280–411

Tabelle 2-6: Die Impedanzamplitude nahe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 bei 380 kV Magadino für beide Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

Es sei darauf hingewiesen, dass der Fall mit N-1 auf 380 kV Magadino – Lavorgo in Tabelle 2-6 hervorgehoben wird. Die Impedanzamplitude um die Oberschwingung 3 überschreitet den kritischen Schwellenwert, der in Tabelle 2-2 definiert ist, erheblich. Daher kann man in Szenario 3 das folgende Phänomen vorhersagen:

- Die Sättigung oder erneute Sättigung des Transformators in Magadino (z. B. Einschalten der 380-kV-Seite, Behebung des Fehlers auf einer benachbarten 380-kV-Leitung usw.) in der Ausfallvariante N-1 der 380-kV-Leitung Magadino – Lavorgo (Fall 2) und niedrige SCL-Bedingungen würden aufgrund der Netzresonanz nahe der Oberschwingung 3 mit extrem hoher Amplitude potenziell zu kritischen TOV mit einer signifikanten Oberschwingung 3.

Zum Vergleich ist die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Magadino für alle drei Szenarien (d. h. Szenario 1, 2 und 3) für den Fall 2 unter Abb. 2-6 dargestellt. Ebenso sind die Impedanzamplituden in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 für die drei Szenarien in Fall 2 in Tabelle 2-7 dargestellt.

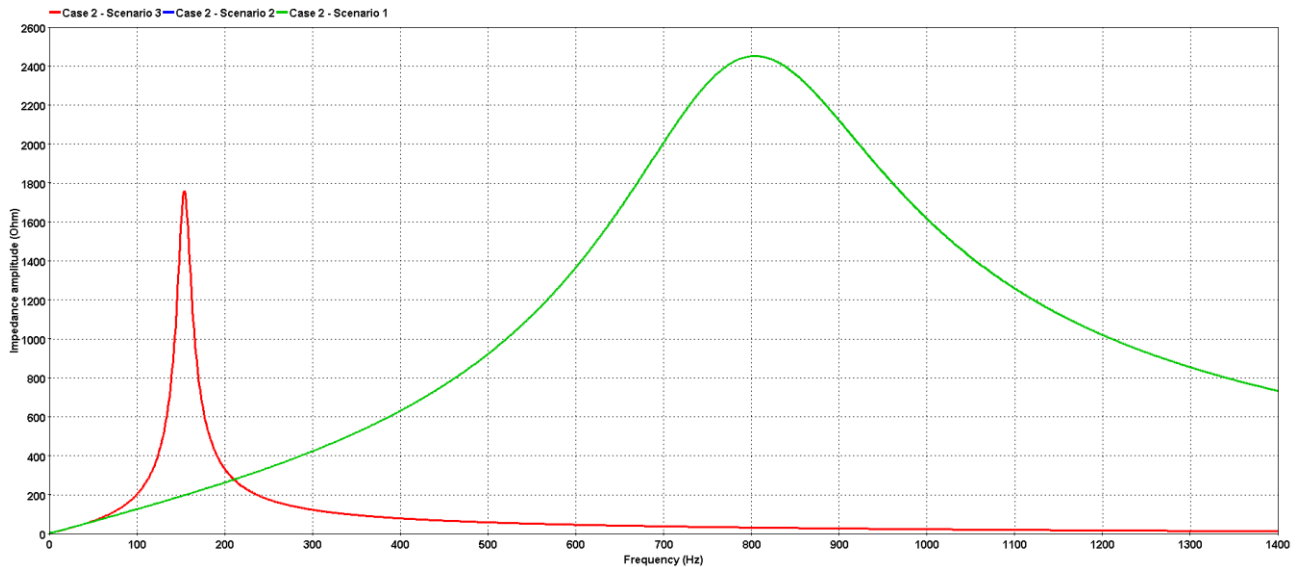


Abb. 2-6: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Magadino für Fall 2 zwischen den Szenarien 1, 2 und 3

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
100 Hz ± 10 Hz	159–260	112–138	112–138
150 Hz ± 10 Hz	829–1760	178–205	178–205
200 Hz ± 10 Hz	280–411	247–276	247–276

Tabelle 2-7: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 bei 380 kV Magadino für Fall 2 – Vergleich zwischen Szenario 1, 2 und 3

In der Grafik ist zu erkennen, dass die Parallelresonanz in den Szenarien 1 und 2 verschwindet, nachdem das 13 km lange Kabel zwischen 380 kV Magadino und 380 kV Musignano entfernt wurde.

Insbesondere weist die Oberschwingungsimpedanz in den Szenarien 1 und 2 die typischen Eigenschaften von Freileitungen im definierten Frequenzbereich auf, mit einer Parallelresonanz aufgrund der Impedanz der Quelle und der Leitung selbst sowie der Nebenschlusskapazität der Leitung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ausfallvariante N-1 380 kV Magadino vom Swissgrid Netz isoliert und das italienische Netz nur durch ein Thévenin-Äquivalent abgebildet wird.

Die bei 380 kV Magadino beobachtete Differenz der Oberschwingungsimpedanz ist in der Realität in der geplanten Ausfallvariante N-1 zu erwarten, da das tatsächliche italienische Netz eine gewisse Dynamik mit sich bringen sollte. Zur weiteren Bestätigung wären detaillierte Informationen über das Netz von Terna erforderlich, um etwas mehr Leitungen und Unterwerke im Süden zu modellieren. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die kritischen TOVs aufgrund der Parallelresonanz um die Oberschwingung 3 mit der Entfernung des 13 km langen 380-kV-Kabels Magadino – Musignano beseitigt werden können.

2.2.2.2 Resonanzfrequenzen in einem vierten Szenario

Um den Einfluss der Kabel auf die Resonanzfrequenzen besser zu verstehen, wurde ein viertes Szenario mit einem höheren Kabelinhalt als in Szenario 3 erstellt. Dieses vierte Szenario wurde nur für die Resonanzberechnungen verwendet, sein Kompensationsbedarf und die Verstärkung der Oberschwingungen wurden nicht untersucht. Die neuen Kabel in Szenario 4 sind in hellblauer Farbe in Abb. 2-7 dargestellt.

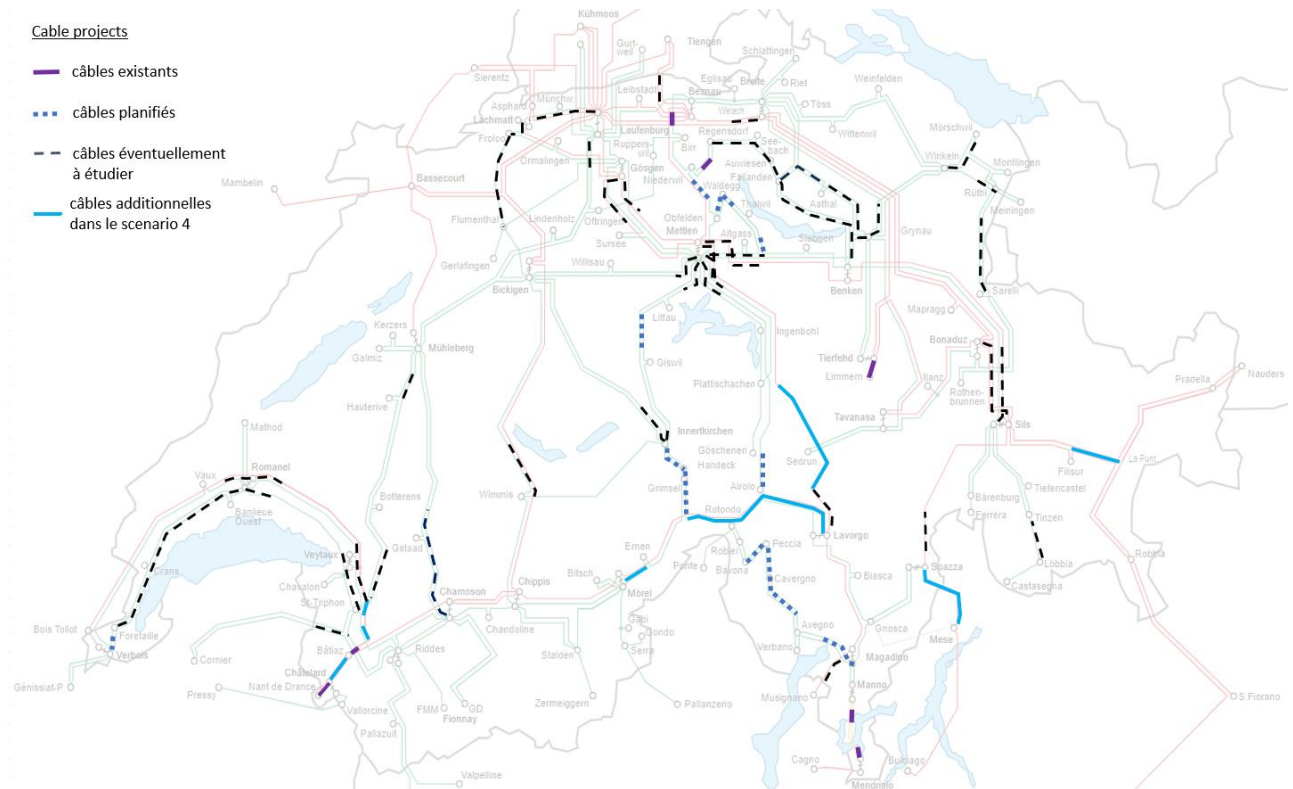


Abb. 2-7: Projekte für Kabelverbindungen in Szenario 4

Die Resonanzfrequenzen an verschiedenen Punkten des Netzwerks wurden in diesem Szenario untersucht, wobei im Folgenden nur die kritischen Ergebnisse dargestellt werden.

2.2.2.2.1 380 kV Châtellard

Ein Vergleich der Netzimpedanz gegen die Frequenz, die bei 380 kV Châtellard beobachtet wurde, zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 für N-1 bei 380 kV La Bâtiâz – Chamoson ist in Abb. 2-8 dargestellt.

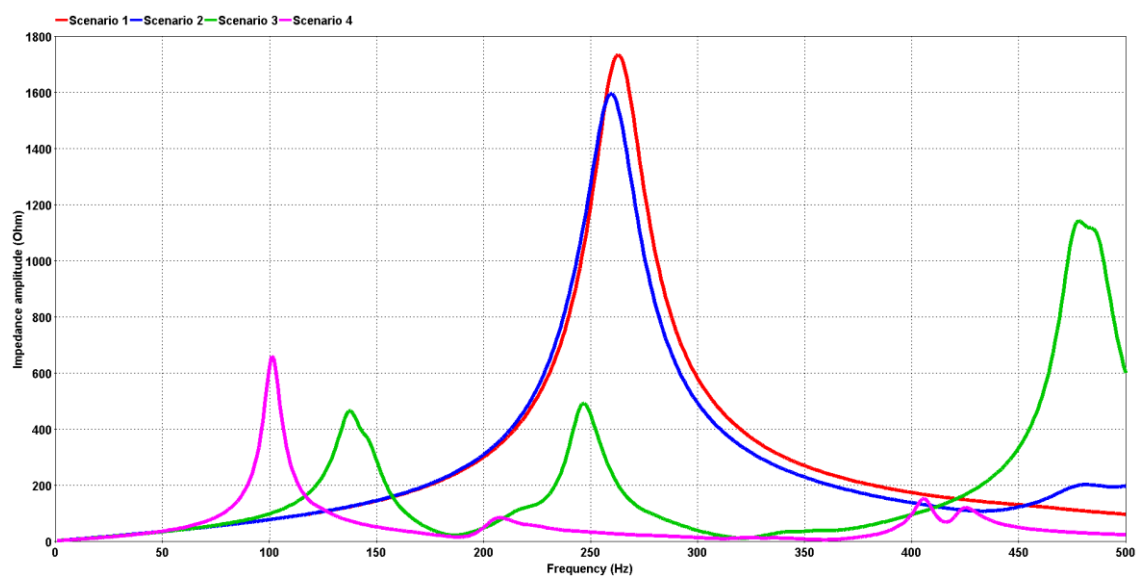


Abb. 2-8: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Châtellard zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Der Vergleich der Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 wird in Tabelle 2-8 dargestellt.

Oberschwingungsrang	2.	3.	4.	5.
Szenario 1 (Ohm)	67–87	126–163	252–362	805–1688
Szenario 2 (Ohm)	67–87	127–165	258–376	879–1595
Szenario 3 (Ohm)	77–128	131–442	23–84	242–490
Szenario 4 (Ohm)	203–659	39–67	15–84	27–37

Tabelle 2-8: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 bei 380 kV Châtelard – Vergleich zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Anmerkungen: Während dieses Leitungsausfalls in Szenario 3 zu einer Parallelresonanz etwas unterhalb der Oberschwingung 3 mit einer relativ geringen Impedanzamplitude führt, verschiebt sich die Parallelresonanz in Szenario 4 auf fast 100 Hz (Oberschwingung 2) mit einer alarmierend hohen Impedanzamplitude. Es ist mit ernsthaften TOV-Risiken zu rechnen.

2.2.2.2 380 kV Nant de Drance

Ein Vergleich der Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 380 kV Nant de Drance zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 für N-1 auf 380 kV La Bâtiaz – Chamoson ist in Abb. 2-9 dargestellt.

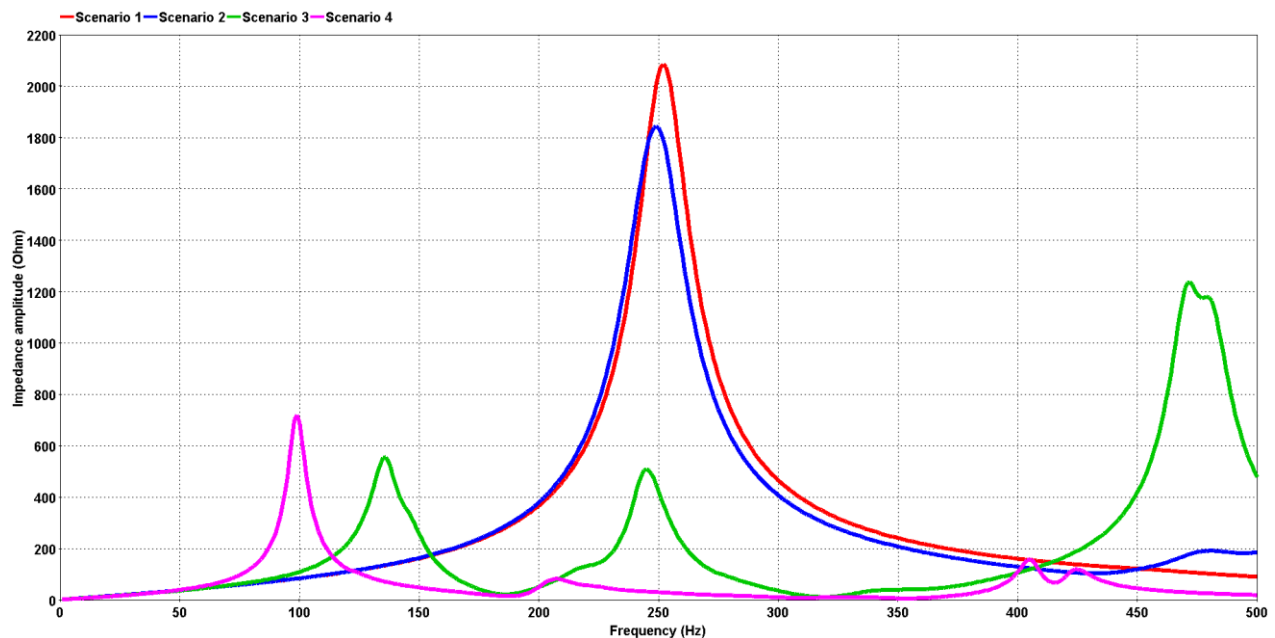


Abb. 2-9: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Nant de Drance zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Der Vergleich der Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 wird in Tabelle 2-9 dargestellt.

Oberschwingungsrang	2.	3.	4.	5.
Szenario 1 (Ohm)	73–96	141–186	301–461	1346–2084
Szenario 2 (Ohm)	73–96	142–188	309–484	1338–1844
Szenario 3 (Ohm)	86–147	122–454	25–91	220–510
Szenario 4 (Ohm)	224–720	37–63	15–82	24–35

Tabelle 2-9: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 bei 380 kV Nant de Drance – Vergleich zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Anmerkungen: Wie im vorherigen Fall verschiebt sich die Parallelresonanz auf die Oberschwingung 2 und die Impedanzamplituden steigen auf einen signifikanten Wert an, was während transienter Ereignisse bei 380 kV Nant de Drance ein grosses TOV-Risiko darstellt.

2.2.2.2.3 380 kV Mörel

Ein Vergleich der Netzimpedanz in Abhängigkeit von der bei 380 kV Mörel beobachteten Frequenz zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 für N-2 auf 380 kV Chippis – Mörel und Lavorgo – Magadino ist in Abb. 2-10 dargestellt.

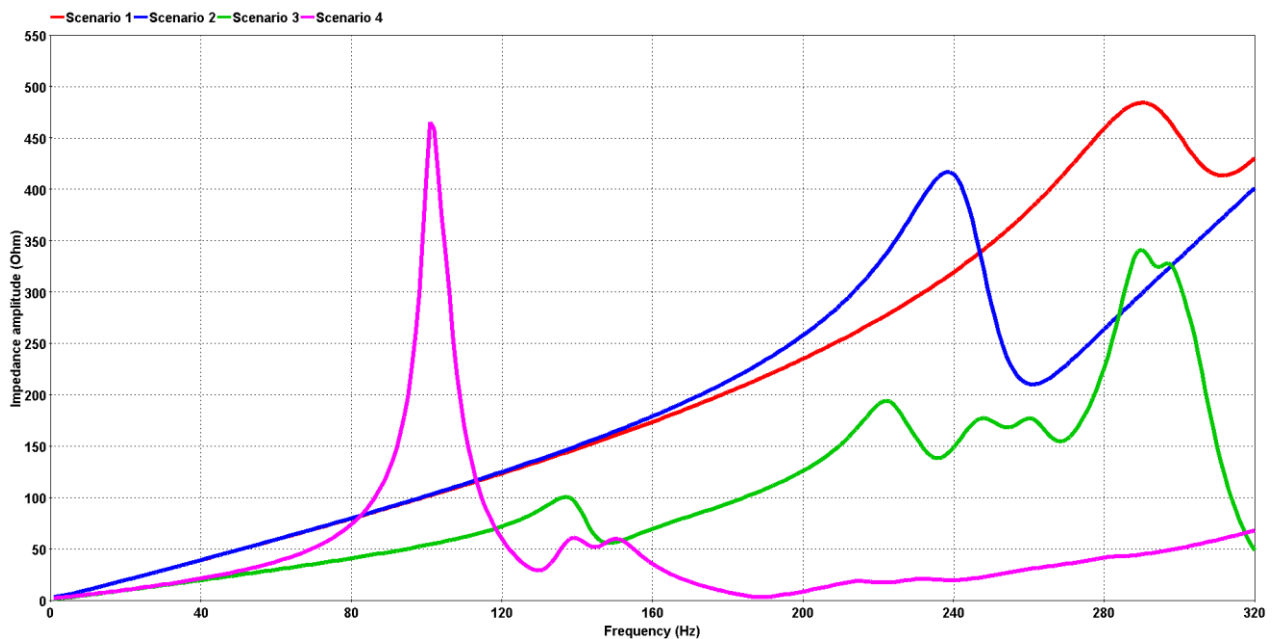


Abb. 2-10: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Mörel zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Der Vergleich der Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 wird in Tabelle 2-10 dargestellt.

Oberschwingungsrang	2.	3.	4.	5.
Szenario 1 (Ohm)	73–96	141–186	301–461	1346–2084
Szenario 2 (Ohm)	73–96	142–188	309–484	1338–1844

Szenario 3 (Ohm)	86–147	122–454	25–91	220–510
Szenario 4 (Ohm)	224–720	37–63	15–82	24–35

Tabelle 2-10: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 bei 380 kV Mörel – Vergleich zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Anmerkungen: Eine Parallelresonanz tritt bei der Oberschwingung 2 mit einer hohen Impedanzamplitude in Szenario 4 aufgrund der zusätzlichen Kabelprojekte auf, was in den Szenarien 1, 2 oder 3 nicht der Fall ist.

2.2.2.2.4 380 kV Lavorgo

Ein Vergleich der Netzimpedanz in Abhängigkeit von der bei 380 kV Lavorgo beobachteten Frequenz zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 für N-2 auf 380 kV Chippis – Mörel und Lavorgo – Magadino ist in Abb. 2-11 dargestellt.

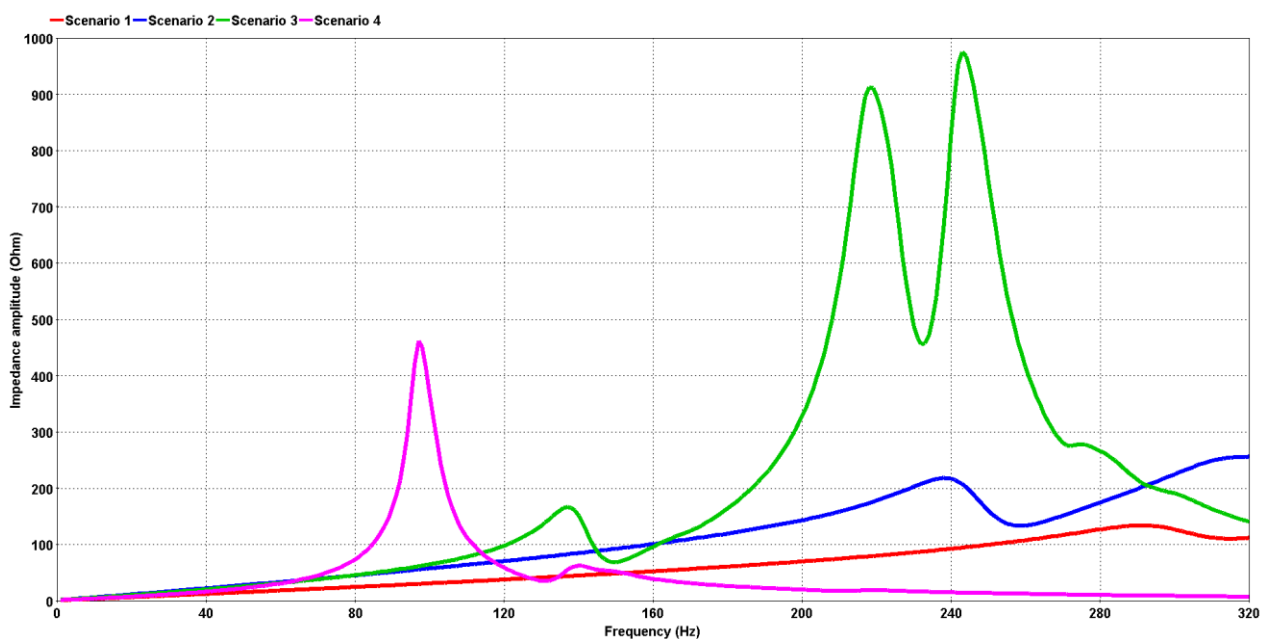


Abb. 2-11: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Lavorgo zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Der Vergleich der Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 wird in Tabelle 2-11 dargestellt.

Oberschwingungsrang	2.	3.	4.	5.
Szenario 1 (Ohm)	27–34	45–52	65–75	92–107
Szenario 2 (Ohm)	51–63	85–101	130–158	133–217
Szenario 3 (Ohm)	54–78	69–151	224–568	416–974
Szenario 4 (Ohm)	113–462	39–62	17–23	12–15

Tabelle 2-11: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 bei 380 kV Lavorgo – Vergleich zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Anmerkungen: Wie im vorherigen Fall tritt bei der Oberschwingung 2 in Szenario 4 eine neue Parallelresonanz mit einer signifikanten Amplitude auf, die ein TOV-Risiko für transiente Ereignisse bei 380 kV Lavorgo darstellt.

2.2.2.2.5 380 kV Tierfehd

Ein Vergleich der Netzimpedanz gegen die Frequenz, die bei 380 kV Tierfehd beobachtet wurde, zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 für N-1 bei 380 kV Tierfehd – Tavanasa ist in Abb. 2-12 dargestellt.

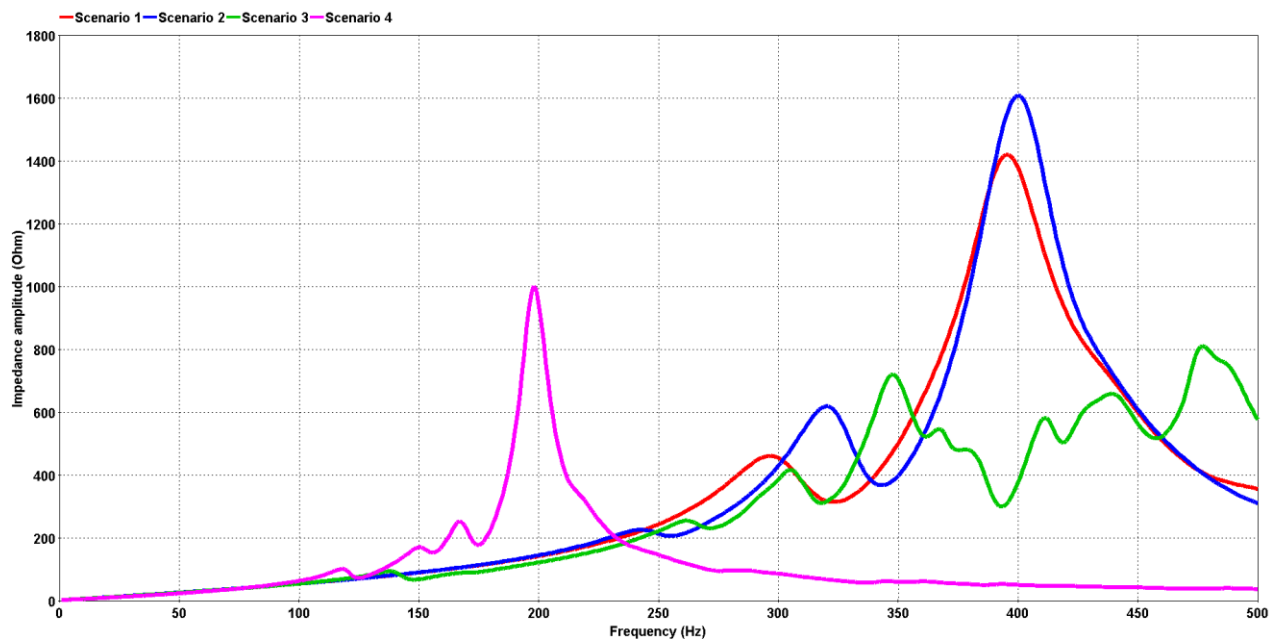


Abb. 2-12: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Tierfehd zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Der Vergleich der Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 wird in Tabelle 2-12 dargestellt.

Oberschwingungsrang	2.	3.	4.	5.
Szenario 1 (Ohm)	46–60	81–98	129–156	215–278
Szenario 2 (Ohm)	47–60	81–98	130–160	205–225
Szenario 3 (Ohm)	46–61	66–91	108–135	193–253
Szenario 4 (Ohm)	50–80	121–175	434–1001	120–169

Tabelle 2-12: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 bei 380 kV Tierfehd – Vergleich zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Anmerkungen: Eine Parallelresonanz mit einer hohen Impedanzamplitude tritt bei der Oberschwingung 4 in Szenario 4 auf, was in den Szenarien 1, 2 oder 3 nicht der Fall ist. Obwohl diese Resonanz nicht hoch genug ist, um einen kritischen TOV zu verursachen, wurde eine Verschlechterung der Antwort der Netzfrequenz mit den zusätzlichen Kabeln in Szenario 4 bestätigt und es ist zu erwarten, dass die dielektrische

Belastung der Netzausrüstung in der Region während transientser Ereignisse bei 380 kV Tierfeld ansteigen wird.

2.2.2.2.6 380 kV Filisur

Ein Vergleich der Netzimpedanz gegen die Frequenz, die bei 380 kV Tierfeld beobachtet wurde, zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 für N-1 bei 380 kV Filisur – Sils ist in Abb. 2-13 dargestellt.

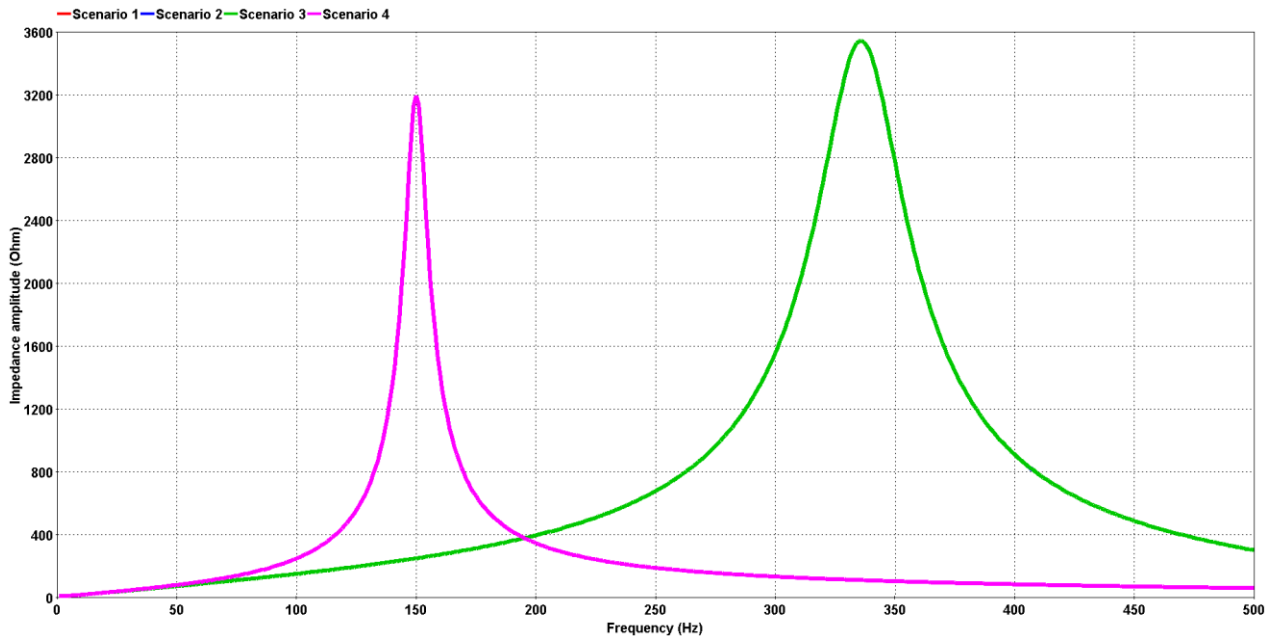


Abb. 2-13: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Filisur zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Der Vergleich der Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 wird in Tabelle 2-13 dargestellt.

Oberschwingungsrank	2.	3.	4.	5.
Szenario 1 (Ohm)	131–166	225–271	358–435	599–770
Szenario 2 (Ohm)	131–166	225–271	358–435	599–770
Szenario 3 (Ohm)	131–166	225–271	358–435	599–770
Szenario 4 (Ohm)	193–325	1345–3196	292–421	171–204

Tabelle 2-13: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 bei 380 kV Filisur – Vergleich zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Anmerkungen: Die zuvor unkritische Resonanz zwischen den Oberschwingungen 5 und 6 verschiebt sich nun in Szenario 4 in Richtung der Oberschwingung 3. Die extrem hohe Impedanzamplitude deutet auf ernsthafte TOV-Risiken während transientser Ereignisse hin.

2.2.2.2.7 380 kV Soazza

Ein Vergleich der Netzimpedanz gegen die Frequenz, die bei 380 kV Tierfehd beobachtet wurde, zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 für N-1 bei 380 kV Sils – Soazza ist in Abb. 2-14 dargestellt.

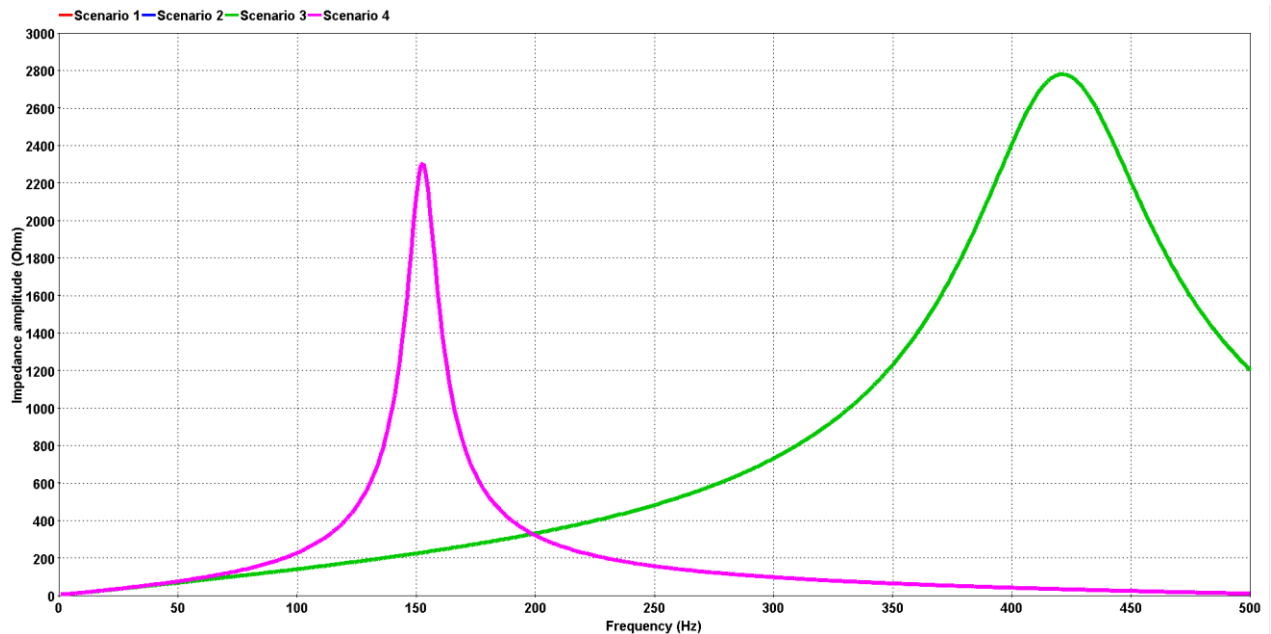


Abb. 2-14: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Soazza zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Der Vergleich der Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4 wird in Tabelle 2-14 dargestellt.

Oberschwingungsrang	2.	3.	4.	5.
Szenario 1 (Ohm)	124–155	205–243	304–356	447–522
Szenario 2 (Ohm)	124–155	205–243	304–356	447–522
Szenario 3 (Ohm)	124–155	205–243	304–356	447–522
Szenario 4 (Ohm)	180–293	1000–2304	266–412	141–175

Tabelle 2-14: Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3, 4 und 5 bei 380 kV Soazza – Vergleich zwischen den Szenarien 1, 2, 3 und 4

Anmerkungen: Wie im vorherigen Fall bewegt sich die zuvor unkritische Resonanz jenseits der Oberschwingung 8 nun in Szenario 4 zur Oberschwingung 3. Die extrem hohe Impedanzamplitude deutet auf ernsthafte TOV-Risiken während transients Ereignisse hin.

2.2.2.3 Verschiebung der Resonanzfrequenz des Systems mit mehr Kabelprojekten

Die zunehmende Anzahl von Kabelprojekten verschiebt die Resonanzfrequenzen des Systems an verschiedenen Stellen des Netzes zu niedrigeren Oberschwingungen hin, was wiederum das Risiko von TOVs und Resonanzen auf Oberschwingungen niedrigerer Ordnung während der Netztransienten erhöht.

Dies lässt sich durch einen Vergleich der Oberschwingungsimpedanz an verschiedenen Stellen des Netzes bei unterschiedlichen Netzbedingungen zwischen den drei vorgeschlagenen Szenarien nachweisen. Die Vergleiche wurden an vier nicht benachbarten Netzwerkestellen durchgeführt: 220 kV Verbois, 380 kV Romanel, 380 kV Mettlen und 220 kV Fällanden, wobei der Schwerpunkt auf dem ersten parallelen Resonanzpeak liegt. Für jede Stelle des getesteten Netzwerks wurden zwei verschiedene Netzwerkbewingungen (d. h. eine Bedingung N und eine Ausfallvariante N-1) berücksichtigt.

2.2.2.3.1 220 kV Verbois

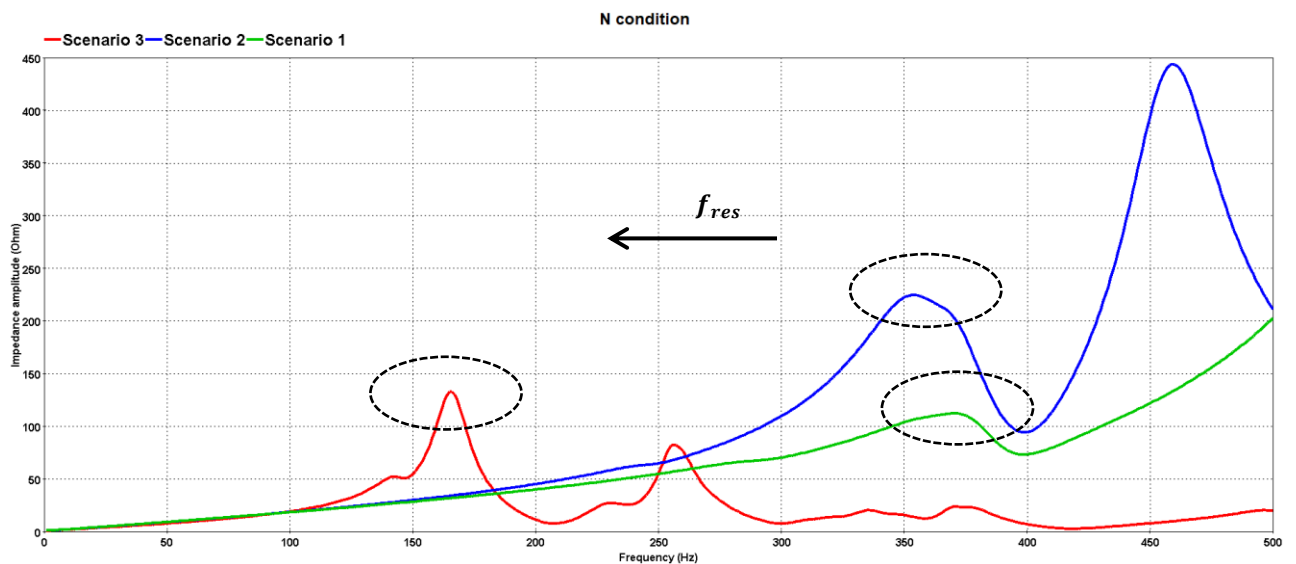


Abb. 2-15: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Verbois zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 – Bedingung N

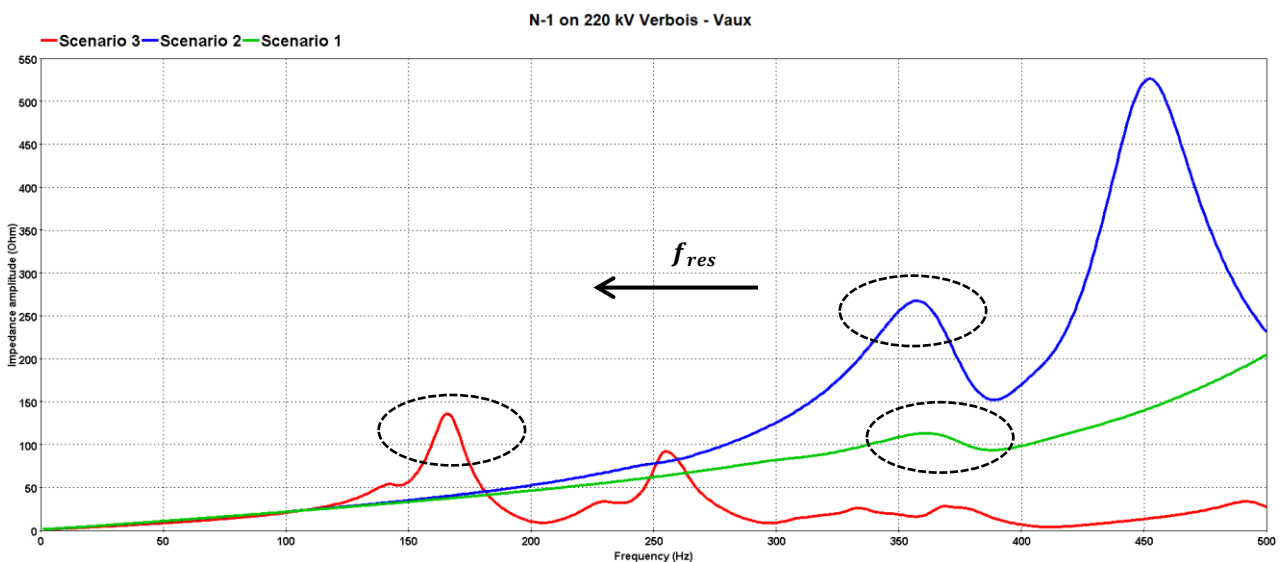


Abb. 2-16: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Verbois zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 – Ausfallvariante N-1

2.2.2.3.2 380 kV Romanel

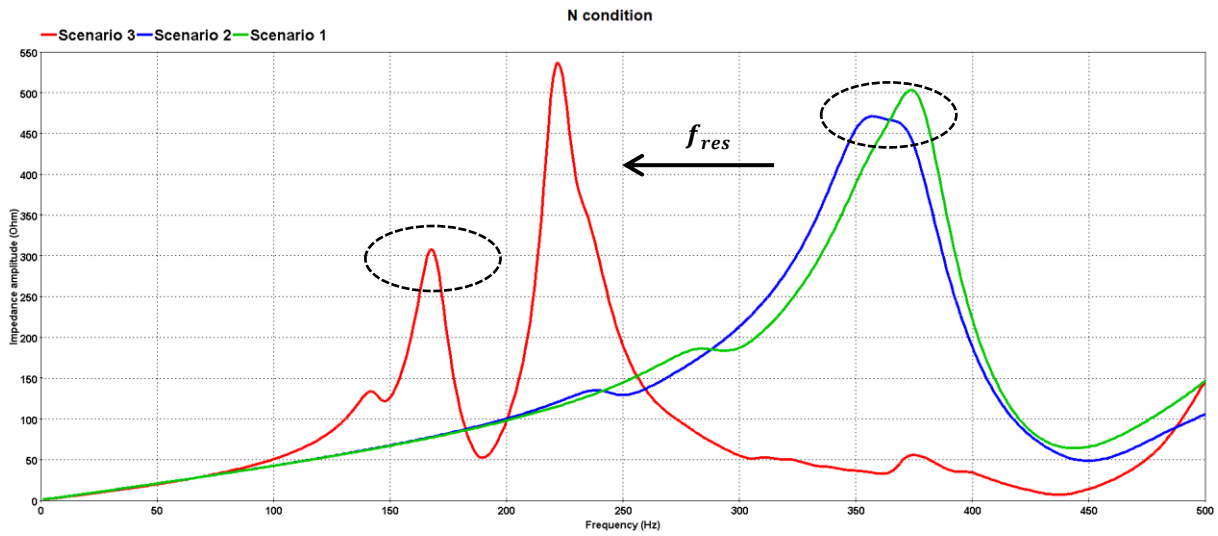


Abb. 2-17: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 – Bedingung N

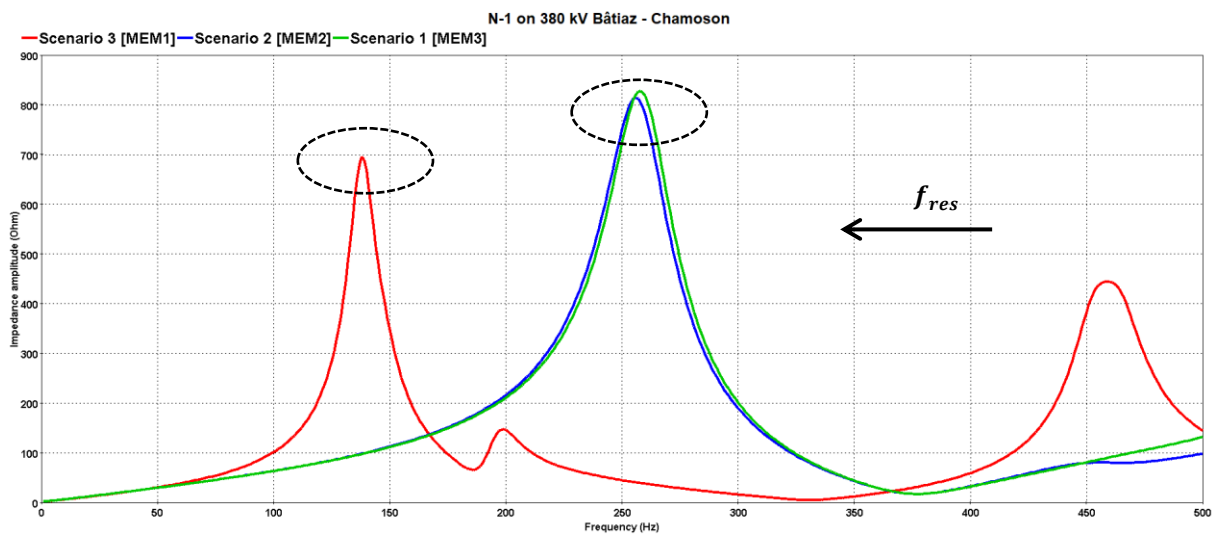


Abb. 2-18: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 – Bedingung N-1

2.2.2.3.3 380 kV Mettlen

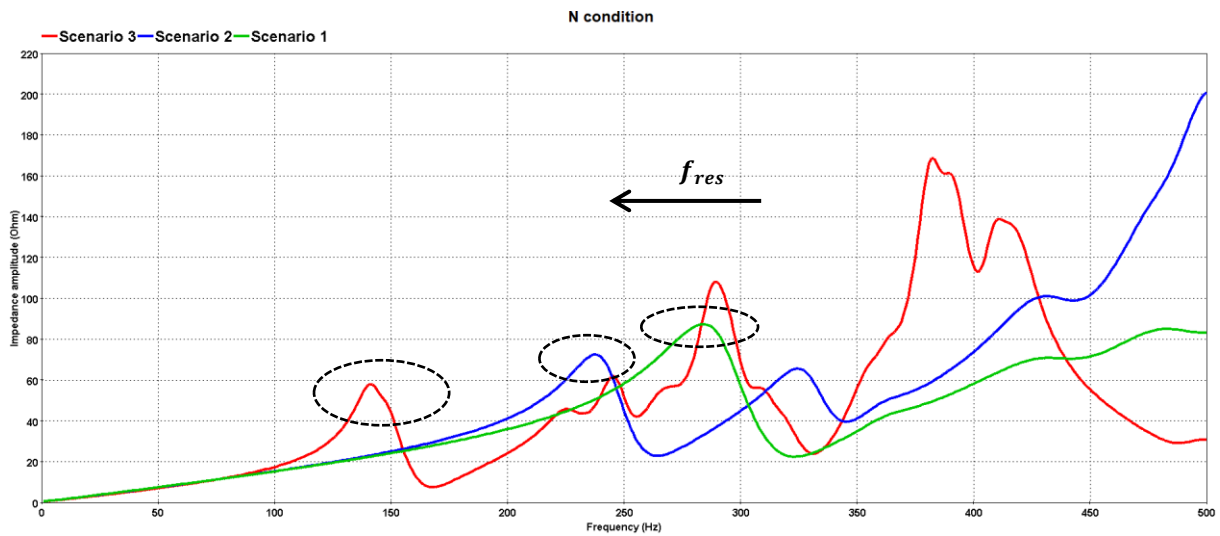


Abb. 2-19: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Mettlen zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 – Bedingung N

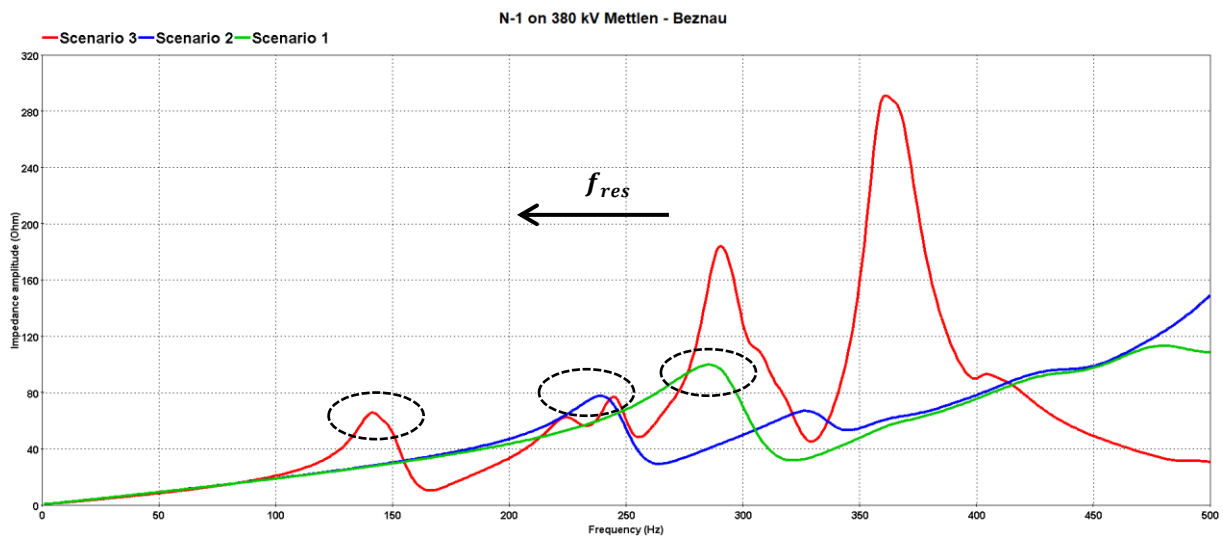


Abb. 2-20: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Mettlen zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 – Bedingung N-1

2.2.2.3.4 220 kV Fällanden

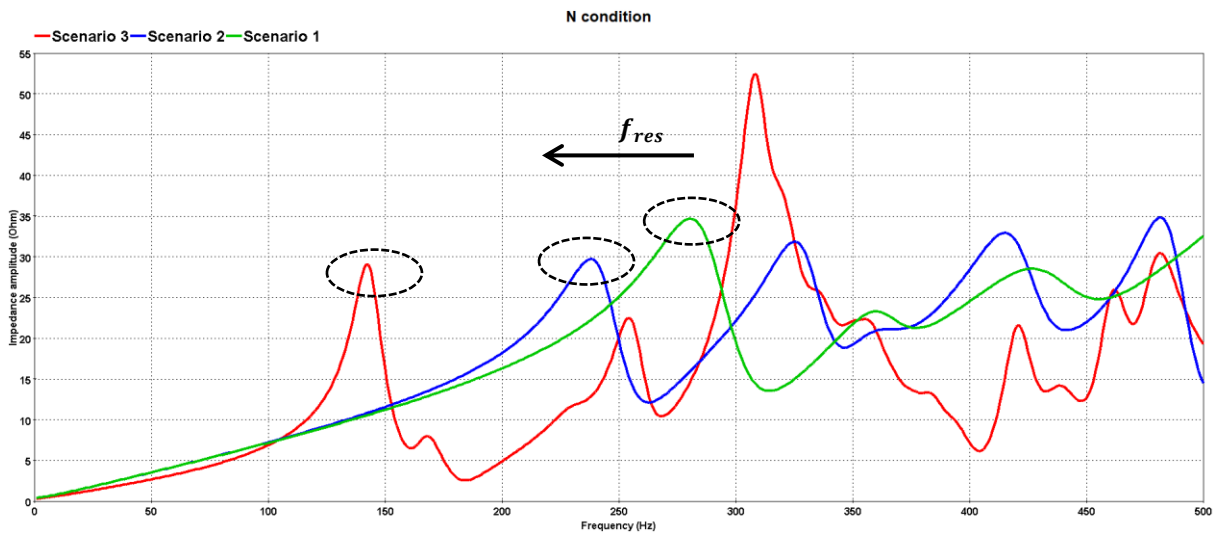


Abb. 2-21: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Fällanden zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 – Bedingung N

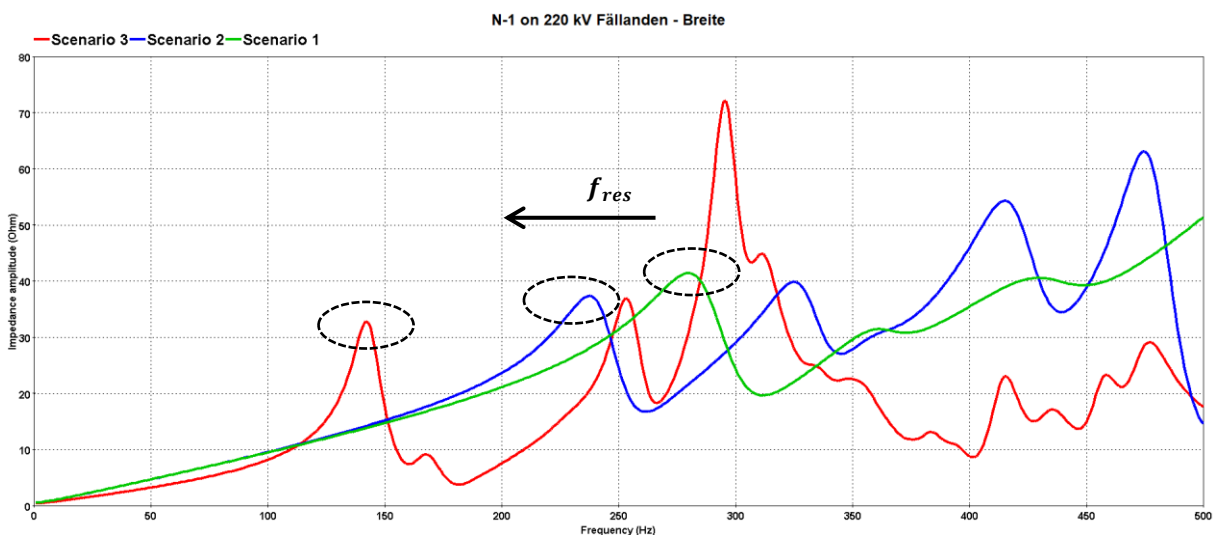


Abb. 2-22: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Fällanden zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 – Bedingung N-1

2.2.2.3.5 Bemerkungen

Aus den in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Ergebnissen lassen sich zwei Hauptbeobachtungen ableiten:

- Ein bemerkenswerter erster Parallelresonanzpeak kann an allen vier Orten des getesteten Netzes und bei allen drei Szenarien beobachtet werden, mit Ausnahme von Szenario 1 bei 220 kV Verbois, wo der erste Peak eher flach ist. Dies liegt daran, dass die bestehenden 220-kV-Kabelprojekte in Szenario 1 alle extrem weit von 220 kV Verbois entfernt sind (d. h. die Kabel in Spreitenbach, in Riniken und in La Bâtiatz – Le Verney) und somit nur geringe Auswirkungen auf die Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Verbois haben.
- Mit zunehmender Anzahl von Kabelprojekten von Szenario 1 zu Szenario 3 verschiebt sich die erste Parallelresonanz an allen getesteten Stellen des Netzes zu viel niedrigeren Frequenzen, wodurch die

interessierende Stelle des Netzes einem erhöhten Risiko von TOV und Resonanzen während der Netztransienten ausgesetzt ist.

2.2.2.4 Vergleich der Systemdämpfung zwischen 220-kV- und 380-kV-Netzen

Wie wir in den vorherigen Abschnitten gesehen haben, sind die beiden Aspekte der Netzresonanz, die Frequenz und die Impedanzamplitude, entscheidende Faktoren für die Leistung und das Verhalten des Systems während transienter Ereignisse. Da die Resonanzfrequenz von den kapazitiven und induktiven Elementen bei der Resonanz bestimmt wird, hängt die Impedanzamplitude stärker mit der Dämpfung des Systems zusammen, die wiederum von der Netzkonfiguration und den Lastbedingungen abhängt.

Eine geringe Systemdämpfung führt tendenziell zu einer höheren Impedanzamplitude bei der Resonanz und stellt somit ein grösseres Risiko für TOV während transienter Ereignisse dar. Eine hohe Systemdämpfung hingegen schwächt die Auswirkungen von Netzresonanzen und TOVs ab und verbessert so die Leistung des Netzes während transienter Ereignisse. Da das 220-kV-Netz an verschiedenen Stellen viel stärker vermascht ist als das 380-kV-Netz, wird davon ausgegangen, dass die Dämpfung des Systems im 220-kV-Netz unter ähnlichen Last- und Netzbedingungen im Allgemeinen viel höher ist als im 380-kV-Netz. Daher wäre es im Allgemeinen «sicherer», Kabelprojekte auf dem 220-kV-Netz durchzuführen als auf dem 380-kV-Netz, da die Auswirkungen von TOVs und Resonanzen mit einer höheren Systemdämpfung besser abgefedert werden können. Die Amplitude der Oberschwingungsimpedanz beider Spannungsebenen an fünf nicht benachbarten Orten im Netz, Romanel, Bickigen, Mettlen, Laufenburg und Bonaduz, wird in den folgenden Abschnitten dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Simulationen für dieselbe Mindestlastbedingung und dieselbe Netzwerkkonfiguration (Bedingung N) durchgeführt wurden.

2.2.2.4.1 Romanel

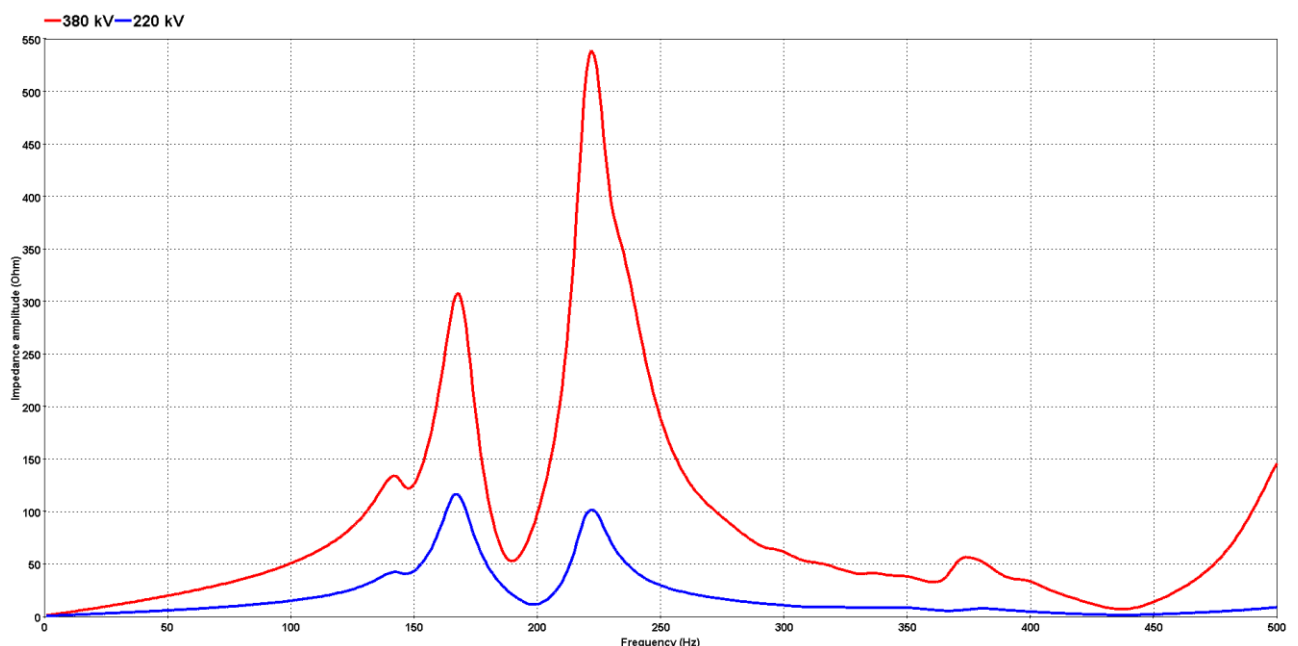


Abb. 2-23: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz zwischen 220 kV und 380 kV Romanel – Bedingung N

2.2.2.4.2 Bickigen

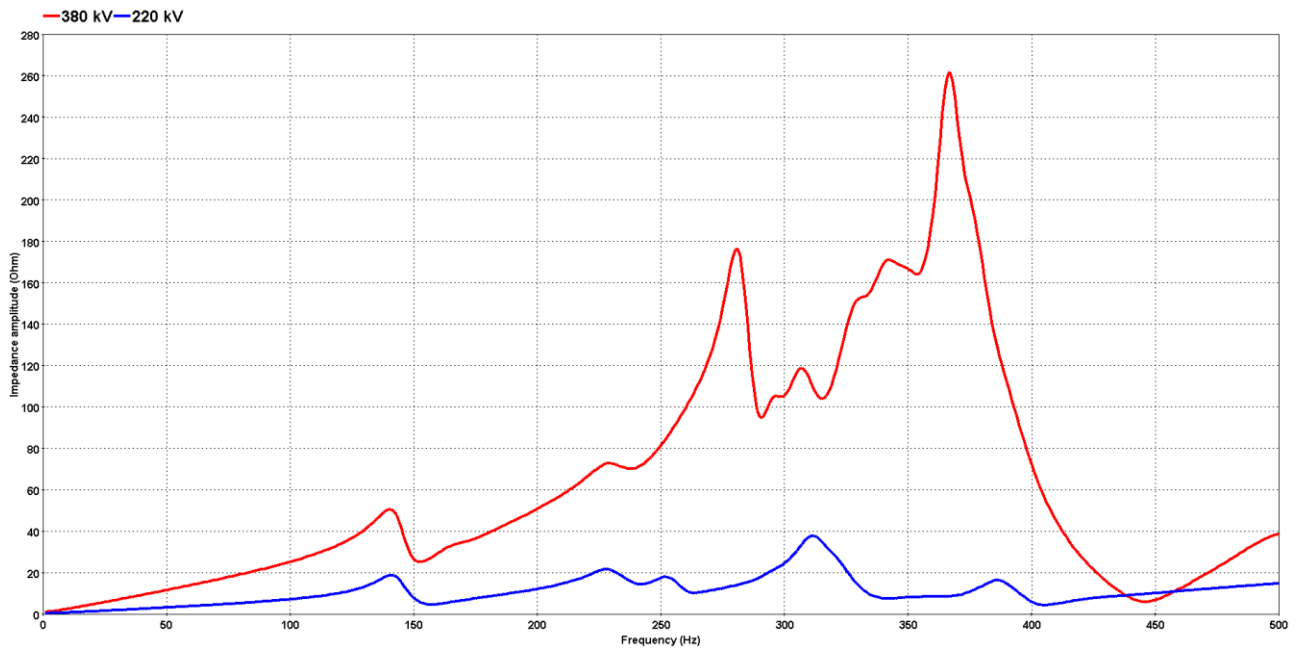


Abb. 2-24: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz zwischen 220 kV und 380 kV Bickigen – Bedingung N

2.2.2.4.3 Mettlen

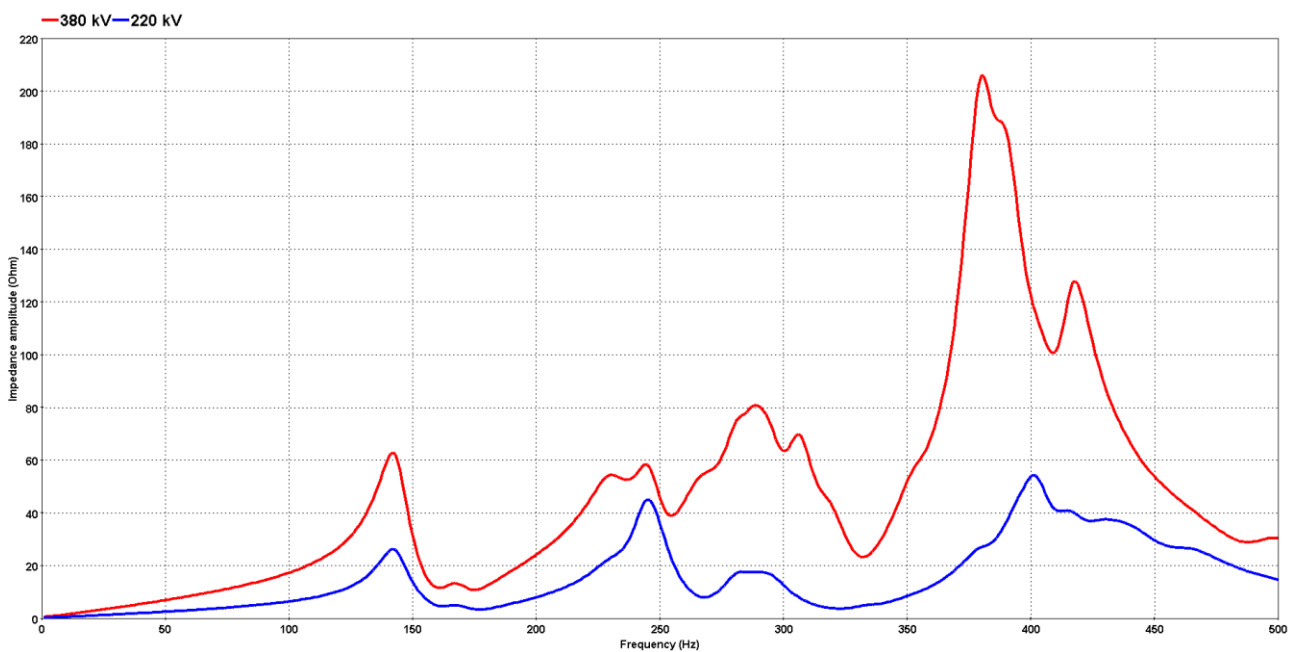


Abb. 2-25: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz zwischen 220 kV und 380 kV Mettlen – Bedingung N

2.2.2.4.4 Laufenburg

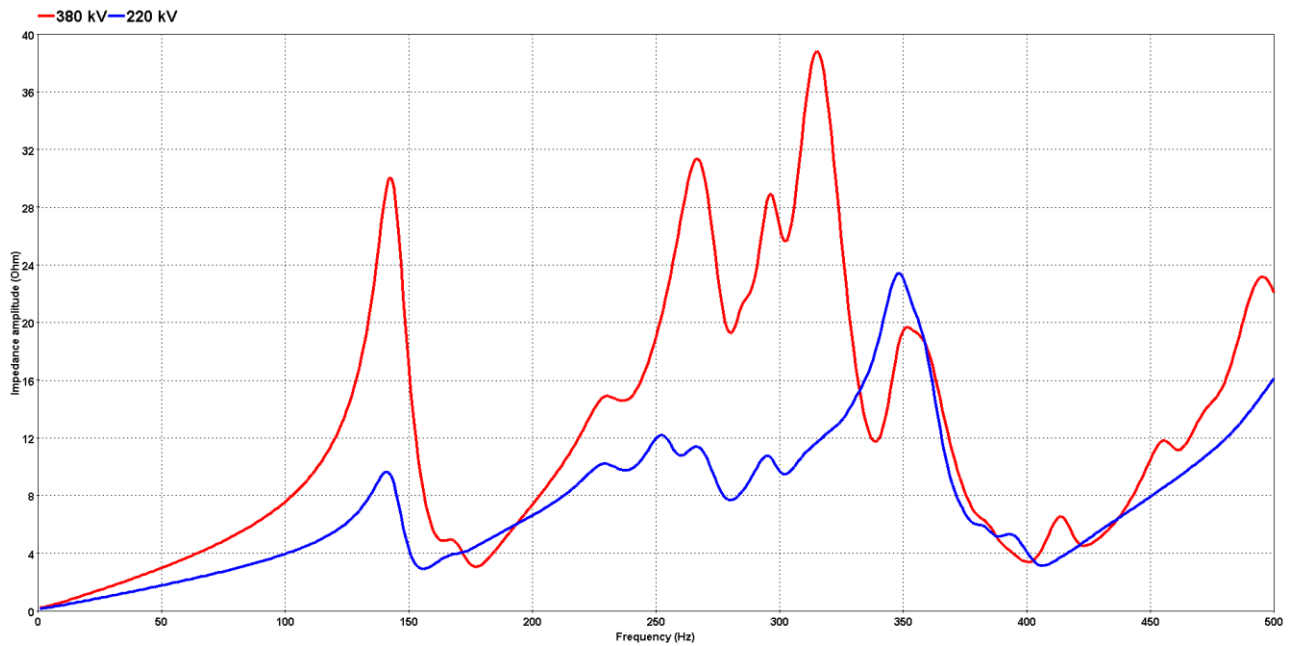


Abb. 2-26: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz zwischen 220 kV und 380 kV Laufenburg – Bedingung N

2.2.2.4.5 Bonaduz

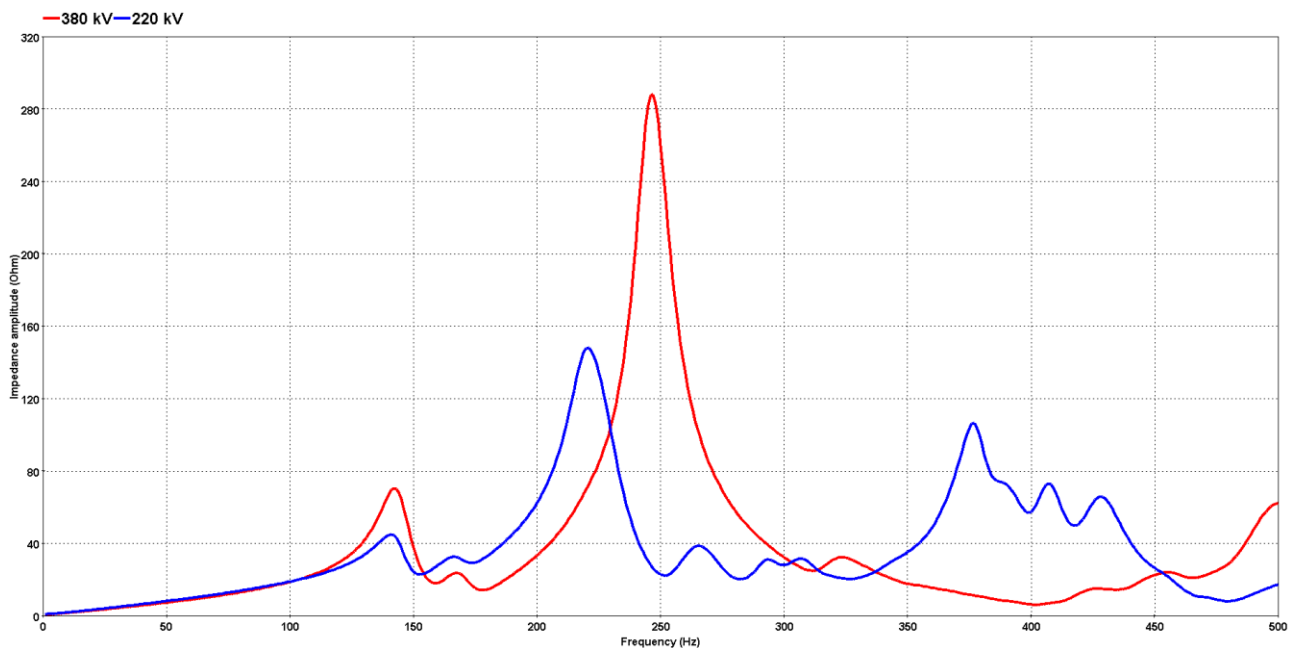


Abb. 2-27: Vergleich der Oberschwingungsimpedanz zwischen 220 kV und 380 kV Bonaduz – Bedingung N

2.2.2.4.6 Bemerkungen

Wie erwartet ist die Oberschwingungsimpedanz, sowohl an den Resonanzen als auch über das gesamte Frequenzspektrum, auf der 220-kV-Ebene generell niedriger als auf der 380-kV-Ebene, was darauf

hindeutet, dass das 220-kV-Netz eine höhere Dämpfung bietet. Es ist daher absehbar, dass selbst bei mehr Kabelprojekten (und damit noch niedrigeren parallelen Resonanzfrequenzen) die hohe Dämpfung des 220-kV-Netzes die Systemimpedanz tendenziell senkt, so dass TOVs, die aus transienten Ereignissen vor Ort resultieren, die Systemleistung weniger stark beeinträchtigen und weniger Risiken durch thermischen und dielektrischen Stress für die Netzausrüstung darstellen würden. Mit anderen Worten: Es wäre in Bezug auf TOV und Resonanzen relativ «sicherer», mehr Kabelprojekte auf dem 220-kV-Netz umzusetzen als auf dem 380-kV-Netz.

2.2.3 Fazit

Die Antwort der Netzfrequenz steht in direktem Zusammenhang mit den potenziellen TOVs, die während der Netztransienten aus dem Betrieb vor Ort und allgemeinen Ereignissen wie Einschalten, Fehlerbehebung, Lastabwurf, Systeminseln usw. auftreten können, die sich wiederum erheblich auf die Stabilität und Sicherheit des Netzbetriebs auswirken würden.

Auf der Grundlage der vorgeschlagenen Kabelszenarien wurden umfangreiche Studien zu Frequenz-Scans auf Systemebene durchgeführt. Die Studien wurden an mehr als 20 Stellen im Netz durchgeführt, die empfindlich auf die Anregung bestimmter paralleler Resonanzen reagieren könnten, wobei gleichzeitig ungünstige Netzkonfigurationen in Bezug auf Leitungsausfall und Kurzschlussleistung berücksichtigt wurden. Ziel war es, die Stellen im Netz und die entsprechenden Netzkonfigurationen zu identifizieren, die potenziell zu kritischen TOVs bei transienten Netzereignissen führen könnten.

Aus den durchgeführten Studien lassen sich mehrere Schlussfolgerungen ziehen:

- Kritische Fälle von Parallelresonanz wurden in Szenario 3 identifiziert.

Während der Frequenzgang an verschiedenen Stellen des Netzes unter verschiedenen Betriebsbedingungen in den Szenarien 1 und 2 mit weniger Kabelprojekten eher unkritisch bleibt, wurden in Szenario 3 äusserst kritische Fälle von Parallelresonanz festgestellt. In diesen Fällen besteht ein ernsthaftes Risiko der Parallelresonanz bei Oberschwingungen niedriger Ordnung, insbesondere der Oberschwingungen 2, 3 und 4 mit einer extrem hohen Impedanzamplitude bei der Resonanz. Einmal durch transiente Netzereignisse wie Einschalten, Fehlerbehebung und Inselbetrieb des Systems angeregt, sind aufgrund der Parallelresonanz stark verzerrte und schlecht gedämpfte TOVs zu erwarten, die zu erheblichen dielektrischen und thermischen Belastungen der Netzausrüstung oder sogar zum Ausfall der Ausrüstung führen.

Die Problempunkte des Netzes sind 380 kV Romanel und 380 kV Magadino, und die damit verbundenen Netzausfälle sind wie folgt:

- N-1 380 kV La Bâtiaz – Chamoson
 - N-2 380 kV La Bâtiaz – Chamoson und Romanel – Bois Tollot
 - N-1 380 kV Magadino – Lavorgo
-
- Die Antwort der Netzfrequenz kann sich in Szenario 4 weiter verschlechtern, da die Anzahl der Kabelprojekte noch höher ist als in Szenario 3

In Szenario 4, in dem die Anzahl der Kabelprojekte höher ist als in Szenario 3, kann die Verschlechterung der Antwort der Netzfrequenz bestätigt werden. Bei 380 kV Nant de Drance, 380 kV Mörel, 380 kV Lavorgo, 380 kV Tierfehd, 380 kV Filisur und 380 kV Soazza werden zuvor unkritische Parallelresonanzen mit noch niedrigeren Frequenzen und höherer Impedanzamplitude kritisch, während in anderen Fällen neue Parallelresonanzspitzen bei Oberschwingungen niedrigerer Ordnung auftreten, was das Risiko kritischer TOVs während transients Netzereignisse mit sich bringt.

- Die zunehmende Anzahl von Kabelprojekten im Netz verschiebt die parallelen Frequenzen des Systems an verschiedenen Stellen zu niedrigeren Oberschwingungen.

Der Vergleich des Frequenzgangs an verschiedenen Stellen des Netzes zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 zeigt eine deutliche Verschiebung von der Parallelresonanz zu den niederrangigen Oberschwingungen. Insbesondere sind die Parallelresonanzfrequenzen für Szenario 3 an mehreren Stellen des Netzes unter die Oberschwingung 4 (d. h. 200 Hz) verschoben, was das Netz aufgrund der Anregung der Oberschwingungsparallelresonanz niedrigerer Ordnung während der Netztransienten, insbesondere unter ungünstigen Betriebsbedingungen wie niedrigem Kurzschlussleistungsniveau und Notfallsituationen, erheblichen TOV-Risiken aussetzen würde.

- Die Kabelintegration wirkt sich auf das 380-kV-Netz stärker aus als auf das 220-kV-Netz, was auf die geringere Amortisation des Systems im ersten Fall zurückzuführen ist.

Die Impedanzamplitude bei Resonanz oder insgesamt über ein definiertes Frequenzspektrum hängt mit der Dämpfung des Systems und den Lastbedingungen zusammen. Im Vergleich zum 220-kV-Netz ist das 380-kV-Netz wesentlich weniger vermascht und es sind weniger Erzeugungseinheiten und Lasten daran angeschlossen (Mittel- oder Niederspannungsnetze), so dass die Dämpfung des 380-kV-Netzes im Allgemeinen geringer ist als die des 220-kV-Netzes, was zu einer grösseren Amplitude der Impedanz an Resonanzen führt. Da eine hohe Netzdämpfung TOVs und andere Transienten während des Betriebs und bei Ereignissen vor Ort abschwächt, dürfte sich die Kabelintegration im 380-kV-Netz stärker auf die Gesamtleistung des Netzes und die Sicherheit der Anlagen auswirken als im 220-kV-Netz. Mit anderen Worten: Es wäre «sicherer», die Umsetzung von Verkabelungsprojekten im 220-kV-Netz in Betracht zu ziehen als im 380-kV-Netz.

2.3 Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen

Typische Quellen für Oberschwingungen in Stromnetzen sind nichtlineare Lasten (z. B. bestimmte Industrieanlagen, drehzahlvariable Antriebe für AC/DC-Motoren, Batterieladegeräte usw.) und Geräte der Leistungselektronik (z. B. HVDC-Wandler, Windparks, SVCs, STATCOMs usw.). Oberschwingungen aus diesen Quellen können sich über die Impedanzen des Systems ausbreiten und in Bereichen mit hoher Kabeldichte aufgrund von Resonanzen mehrfach verstärkt werden, was zu einer Verschlechterung der Versorgungsspannung führt. Dieses Phänomen lässt sich vereinfacht darstellen, wie Abb. 2-28 zeigt.

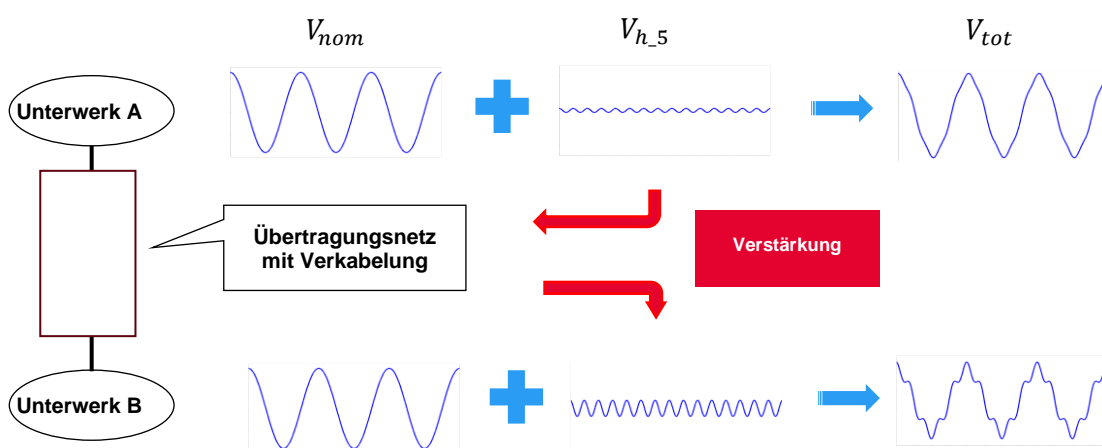
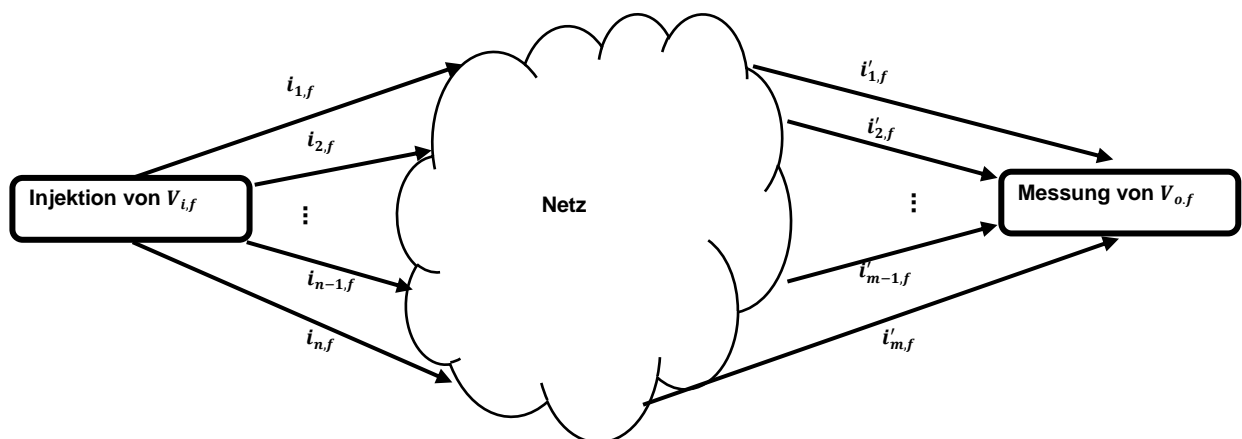


Abb. 2-28: Illustration der Oberschwingungsverstärkung

In Abb. 2-28 breitet sich die Oberschwingung 5 mit einer relativen Amplitude, die kleiner ist als die in der Norm [2.2] definierte, im Netz von Unterwerk A von einer lokalen nichtlinearen Last aus. Diese Oberschwingung erzeugt eine geringfügige Verzerrung der gemessenen Spannung an Unterwerk A, was akzeptabel ist. Wenn sie das Unterwerk B erreicht, nachdem sie eine Übertragungsstrecke aus Leitungen und

Kabelsegmenten überquert hat, wird sie durch die Resonanz verstärkt und ihre relative Amplitude überschreitet nun den in IEC 61000-3-6 festgelegten Grenzwert. Diese verstärkte Oberschwingung 5 wird der Grundkomponente der Spannungswellenformen überlagert, was zu einer schweren Verzerrung der Spannung führt.

Obwohl die harmonische Verstärkung das Ergebnis der Netzresonanz aufgrund der Wechselwirkung von induktiven und kapazitiven Elementen ist, hängt der Verstärkungsgrad nur wenig von der am Beobachtungsanschluss vorhandenen Resonanzimpedanz ab. Im Gegensatz dazu ist der Verstärkungsgrad am Beobachtungspunkt die kollektive Auswirkung der harmonischen Resonanzen auf allen Wegen zwischen dem Einspeisepunkt und dem Beobachtungspunkt. Dies kann mithilfe der einfachen Illustration in Abb. 2-29 verstanden werden.



$$V_{o,f} = Z_{1,f}i'_{1,f} + Z_{2,f}i'_{2,f} + \dots + Z_{m-1,f}i'_{m-1,f} + Z_{m,f}i'_{m,f}$$

Abb. 2-29: Illustration der Ausbreitung und Verstärkung von Oberschwingungen

In der Abb. 2-29 werden Oberschwingungen mit einer bestimmten Amplitude und Frequenz, $V_{i,f}$, an einer bestimmten Stelle in das Netz eingespeist. Diese Oberschwingungen breiten sich über die n Leitungsabgänge an dieser Stelle des Netzes in Form von Oberschwingungsströmen zu anderen Teilen des Netzes aus. Nach weiteren Fusionen/Trennungen/usw. im Netz erreichen einige Oberschwingungsströme von den m am Beobachtungspunkt beobachteten Routen einen anderen Netzpunkt, was zu einer Oberschwingungsspannung mit derselben Frequenz führt. Diese Oberschwingungsspannung ist die Summe der Produkte aus jedem Oberschwingungsstrom, der den Beobachtungspunkt erreicht, und der entsprechenden Oberschwingungsimpedanz der Strecke:

$$V_{o,f} = Z_{1,f}i'_{1,f} + Z_{2,f}i'_{2,f} + \dots + Z_{m-1,f}i'_{m-1,f} + Z_{m,f}i'_{m,f}$$

Daher ist es leicht, zu verstehen, dass, wenn die Resonanz auf einer bestimmten Route oder mehreren Routen mit einer harmonischen Frequenz angeregt wird, die entsprechende harmonische Impedanz Z hoch sein wird, was zu einer viel höheren Oberschwingungsspannung am Beobachtungspunkt als am Einspeisepunkt führt.

Ein Anstieg der THD (Total Harmonic Distortion, deutsch: Gesamtklirrfaktor) als Folge der Oberschwingungsverstärkung hat mehrere Auswirkungen auf die normale Wartung der Geräte und den Betrieb des Systems, belastet das Netz und kann Geräte beschädigen. Diese Auswirkungen umfassen (sind aber nicht beschränkt auf):

- Überhitzung von Geräten (z. B. Transformatoren, Motoren, Erdung usw.)
- Hörbares Rauschen in Transformatoren und rotierenden Massen
- Vibrationen des Motors
- Erhöhung des Skin-Effekts in Linien- und Kabelleitern
- Thermische Auslösung von Schutzeinrichtungen und logische Fehler in digitalen Geräten
- Ausfall der Kondensatorbank

Um unvorhergesehene Probleme zu vermeiden, sollten Studien zur Oberschwingungsverstärkung bereits in der Planungsphase von Projekten zur intensiven Integration von Kabeln durchgeführt werden.

2.3.1 Methodik

Studien zur Oberschwingungsverstärkung werden durchgeführt, indem Spannungen mit verschiedenen harmonischen Frequenzen (d. h. 250 Hz, 350 Hz, 550 Hz, 650 Hz, 850 Hz, 950 Hz usw.) mit einer Amplitude von 1 V an einer bestimmten Stelle des Netzes eingespeist werden und die Spannungen an verschiedenen anderen Stellen gemessen werden. Das Verhältnis zwischen der gemessenen Oberschwingung eines bestimmten Rangs und der eingespeisten Oberschwingung desselben Rangs definiert den Verstärkungsfaktor (AF, englisch: amplification factor), der angibt, wie stark die betreffende Oberschwingung verstärkt wird, oder den Grad der Verstärkung. Während dieses Vorgangs werden alle anderen Spannungsquellen (d. h. die Thévenin-Äquivalente) kurzgeschlossen. Da eine Nichtlinearität aufgrund des Oberschwingungsspannungspegels nicht erwartet wird, würden die Ergebnisse auch bei höheren Einspeisewerten konsistent bleiben.

Es gibt keine internationalen Standards für den Verstärkungsgrad, der den Übertragungsnetz-Betreibern Sorge bereiten sollte. Aufgrund der Erfahrungen [2.3], [2.5] wurden jedoch im Rahmen dieser Studie die folgenden Richtlinien verabschiedet, wie Tabelle 2-15 zeigt.

AF<1	Keine Probleme mit Oberschwingungsverstärkung
1<AF<3	Mittlere Oberschwingungsamplitude, nicht kritisch
3<AF<10	Mässige bis kritische Oberschwingungsverstärkung
AF>10	Extrem kritische Oberschwingungsverstärkung

Tabelle 2-15: Allgemeine Richtlinien zur Schwere der Oberschwingungsverstärkung

Dabei wird davon ausgegangen, dass alle AF unter 3 (grün und gelb markiert) keine Probleme mit schweren Oberschwingungsverstärkern verursachen sollten, während AF über 3 und insbesondere über 10 die Aufmerksamkeit der Leserinnen und Leser verdienen sollten.

Unserer Erfahrung nach sollte der Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung, insbesondere der Oberschwingungen 5 und 7 (d. h. 250 Hz und 350 Hz), im Swissgrid Netz aus folgenden Gründen höchste Aufmerksamkeit gelten:

- Das Vorhandensein von geradzahigen Oberschwingungen im Oberschwingungshintergrund von Übertragungsnetzen ist in der Regel unbedeutend.
- Ungerade Oberschwingungen höherer Ordnung sind aufgrund der stärkeren Dämpfung bei höheren Frequenzen weniger problematisch.
- Die Verstärkung von Zwischenoberschwingungen (d. h. Oberschwingungen, deren Werte zwischen ganzzahligen Vielfachen von 50 Hz liegen) ist aufgrund des Fehlens von VSC-HVDC (engl.: Voltage Source Converter), der direkt mit dem Übertragungsnetz verbunden ist, nicht beunruhigend.

Die Orte der potenziellen Quellen von Oberschwingungen müssen sorgfältig bestimmt werden. Insbesondere 220-kV- und 380-kV-Stationen, die mit der Mittel- und Niederspannungsebene (mit möglichen Verbindungen zu nichtlinearen Lasten) und dem SBB-Netz verbunden sind, sollten als potenzielle Quellen für Oberschwingungsver Verschmutzung betrachtet werden. Darüber hinaus sollte die Verstärkung in Gebieten mit hoher Kabelverlegung vorrangig bewertet werden. Auf der Grundlage dieser Leitlinien wurden die folgenden 12 Orte ausgewählt und als potenzielle Quellen für Oberschwingungsbelastung getestet (eine Auswahl der Ergebnisse ist in Anhang 4.4.4):

220 kV Verbois	380 kV Bois Tollot	380 kV Romanel	220 kV St. Triphon
220 kV Wimmis	220 kV Mettlen	380 kV Mettlen	220 kV Mühleberg
220 kV Gerlafingen	220 kV Fällanden	220 kV Sils	380 kV Musignano

Im Allgemeinen ist zu erwarten, dass eine zunehmende Kabeldurchdringung und ein niedriger SCL die Verstärkung eines bestimmten Oberschwingungs-rangs intensivieren. Dies ist jedoch nicht immer der Fall, insbesondere wenn es in einem bestimmten Bereich des Netzes eine intensive Verkabelung gibt, wie Abb. 2-30 zeigt.

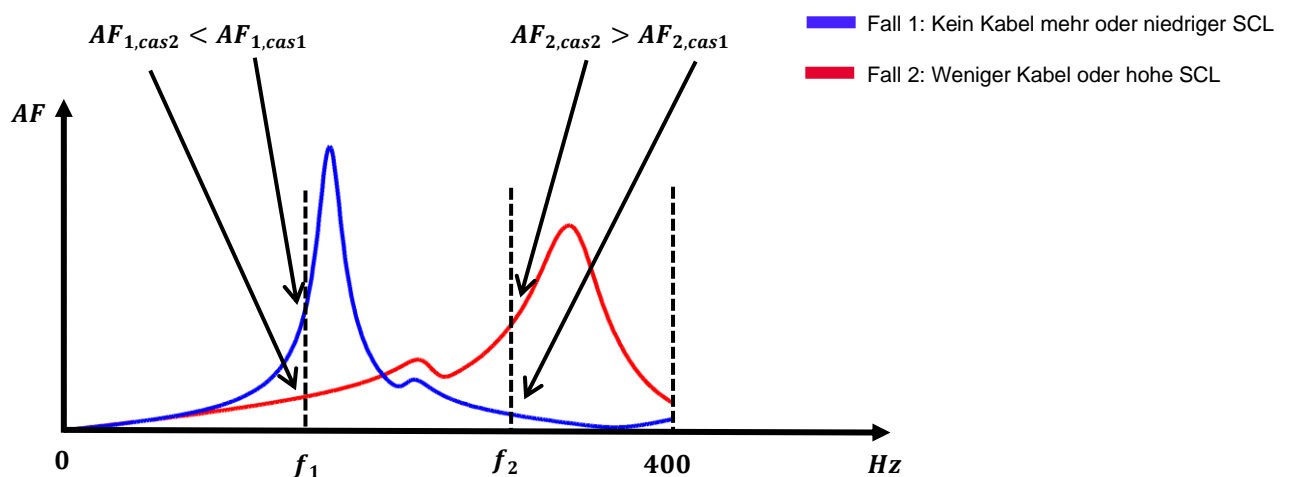


Abb. 2-30: Generische Erklärung der Auswirkungen der Netzkonfiguration auf Oberschwingungsresonanzen

Eine intensive Verkabelung kann die Netzresonanz in Richtung Oberschwingungen niedrigerer Ordnung verschieben. Da wir uns hauptsächlich mit der Verstärkung der Oberschwingungen 5 und 7 beschäftigen, konzentrieren wir uns auf das Verhalten der Impedanz im Pfad der Oberschwingungen unterhalb von 400 Hz (d. h. der Oberschwingung 8).

Zwei Fälle mit unterschiedlichen Oberschwingungsresonanzfrequenzen wurden definiert:

- Fall 1 (blaue Kurve): Niedrigere Oberschwingungsresonanzfrequenz aufgrund einer grösseren Anzahl von in der Nähe angeschlossenen Kabeln oder einer geringen Kurzschlussleistung.
- Fall 2 (rote Kurve): Höhere Oberschwingungsresonanzfrequenz aufgrund weniger in der Nähe angeschlossener Kabel oder einer hohen Kurzschlussleistung.

Bei der Verstärkung eines bestimmten Oberschwingungsrangs f_1 , ist die Verstärkung im Fall 1 mit mehr Kabeln oder geringer Kurzschlussleistung höher als im Fall 2 mit weniger Kabeln oder hoher Kurzschlussleistung. Für die Verstärkung eines Oberschwingungsrangs f_2 , ist es jedoch Fall 2 mit weniger Kabeln oder hoher Kurzschlussleistung, der einen höheren Verstärkungsfaktor hat.

Wenn immer mehr Kabel in das Netz integriert werden, kann das Ergebnis je nach Lage der Oberschwingungsresonanzfrequenz des (der) durchlaufenen Pfades (Pfade) sowie des interessierenden Oberschwingungsrangs unvorhersehbar sein, was detaillierte Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen für eine Vielzahl von Netzkonfigurationen und Betriebsbedingungen **absolut notwendig** macht.

2.3.2 Ergebnisse und Diskussionen

Aus den durchgeführten Studien lassen sich folgende Hauptschlussfolgerungen ziehen:

- Im Allgemeinen verschärft sich die Verstärkung der Oberschwingungen niedriger Ordnung (z. B. Oberschwingungen 5 und 7), wenn die Anzahl der Kabelprojekte im Netz unter denselben Netzbedingungen von Szenario 1, 2 zu 3 wechselt. Mit anderen Worten: Je mehr Kabel im Netz vorhanden sind, desto grösser ist die Gefahr, dass schwere Oberschwingungen verstärkt werden. Dieses Phänomen wurde an mehreren Stellen im Netz beobachtet (siehe Abschnitt 2.3.2.1).
- Die Netzkurzschlussleistung hat einen grossen Einfluss auf die Verstärkung der Oberschwingungen. Generell gilt, dass eine hohe Kurzschlussleistung in der Regel die Oberschwingungsresonanzen dämpft, wodurch die Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen eingeschränkt wird (siehe 2.3.2.2).
- Das Phänomen der Verstärkung von Oberschwingungen wird mit zunehmendem Verkabelungsgrad im Netz komplizierter. In einem dicht verkabelten Netz würde sich ein Kabelprojekt nicht nur auf die Verstärkung von Oberschwingungen im lokalen Bereich auswirken, sondern könnte auch die Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung in entfernten Gebieten beeinflussen. Dieses Phänomen wurde während der Studien, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden, beobachtet (siehe Abschnitt 2.3.2.3).

Insgesamt ist die Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung durch die Kabelintegration das Ergebnis einer harmonischen Resonanz entlang des Oberschwingungspfades und damit ein komplexes Problem. **Es wurden auch mehrere Ausnahmen von den ersten beiden Schlussfolgerungen festgestellt. Diese Ausnahmen sowie die dritte Feststellung zeigen die absolute Notwendigkeit detaillierter Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen für die Integration jedes neuen Kabelprojekts in der Zukunft, unter Berücksichtigung von Variationen in den Konfigurationen und Bedingungen des Netzes.**

Die drei oben genannten Hauptschlussfolgerungen werden in den jeweiligen Abschnitten weiter ausgeführt.

2.3.2.1 Auswirkungen der Anzahl der Kabelprojekte im Netz auf die Verstärkung von Oberschwingungen

Wie wir zu Beginn dieses Kapitels gesehen haben, ist die Verstärkung von Oberschwingungen bestimmter Ränge das Ergebnis von Oberschwingungsresonanz entlang bestimmter Bewegungspfade des Oberschwingungsstroms, bevor er den Beobachtungspunkt erreicht. Wenn ein Netzbereich nur aus Freileitungen besteht, sollte keine Gefahr der Verstärkung von niederrangigen Oberschwingungen bestehen. Die Integration von Kabelprojekten in einen ursprünglich induktiven Netzbereich, der hauptsächlich aus Freileitungen besteht, führt jedoch kapazitive Elemente in das Netz ein, die das Risiko einer Verstärkung bestimmter Oberschwingungen niedrigerer Ordnung mit sich bringen. Ausserdem gilt generell, dass mit zunehmender Anzahl von Kabelprojekten die Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen zunimmt.

Oberschwingungsstärkestudien für die drei Szenarien wurden an verschiedenen Stellen des Netzes unter Berücksichtigung von Schwankungen der Netzbedingungen durchgeführt (siehe Anhang 4.4.4). Beim

Vergleich der Verstärkungsfaktoren der niederrangigen Oberschwingungen zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 wurden einige Problembereiche identifiziert, insbesondere die Achse 220 kV Romanel – Banlieue Ouest – Crans – Foretaille, die Achse 380 kV Romanel – La Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance und die Achse 220 kV Mettlen – Airolo.

Die folgenden Testfälle sollen zeigen, wie sich die Anzahl der Kabelprojekte auf die Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung (d. h. der Oberschwingungen 5 und 7) auswirkt (Vergleich der Szenarien 1, 2 und 3):

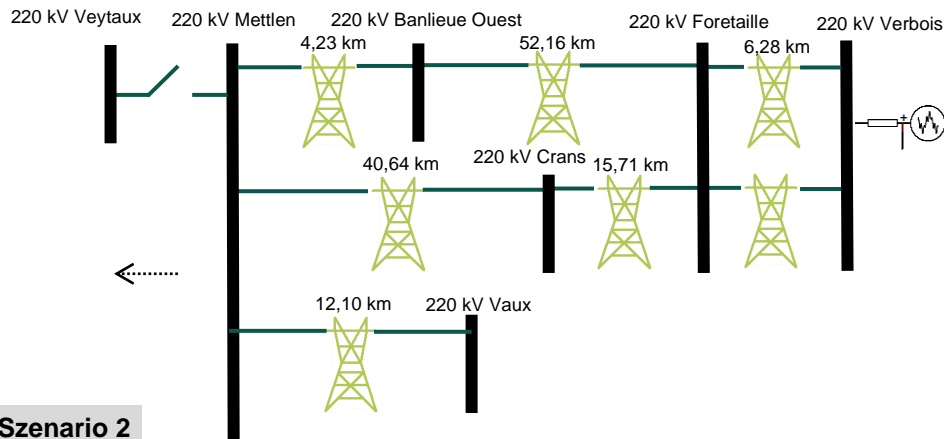
Einspeisepunkt	Beobachtungspunkt	SCL	Netzkonfiguration
220 kV Verbois	220 kV Crans 220 kV Banlieue Ouest 220 kV Romanel 220 kV Vaux	SchwachN-1 bei 220 kV Romanel – Veytaux	
380 kV Romanel	380 kV La Bâtiaz 380 kV Châtelard 380 kV Nant de Drance 220 kV Châtelard		N-1 bei 380 kV La Bâtiaz – Chamoson
220 kV Mettlen	220 kV Airolo		N-2 bei 220 kV Airolo – Rotondo und Airolo – Lavorgo

2.3.2.1.1 Verstärkung der Oberschwingungen bei 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel und 220 kV Vaux

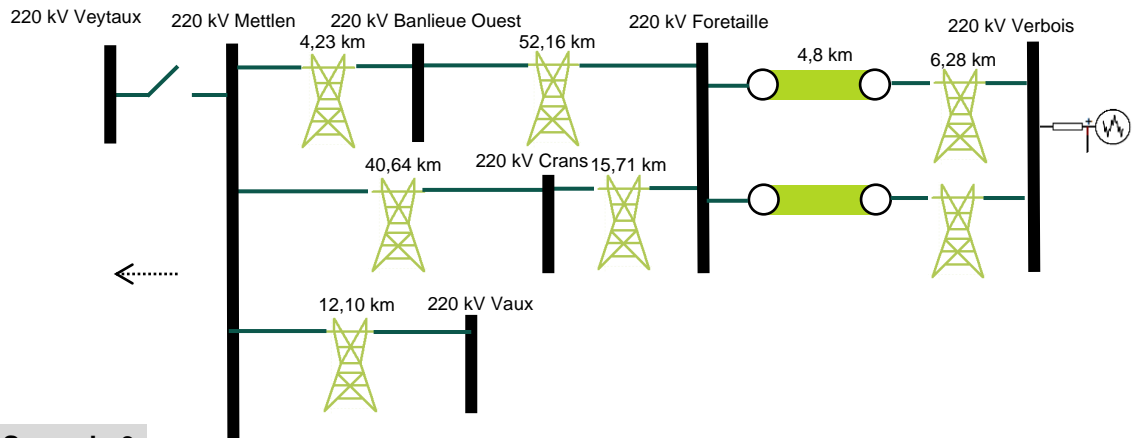
Die Konfiguration des Netzes nahe 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel und 220 kV Vaux für die Szenarien 1, 2 und 3 des Demonstrationsfalls wird in Abb. 2-31 illustriert.

Es ist anzumerken, dass das gesamte Netzgebiet in Szenario 1 ausschliesslich aus Freileitungen besteht, während die einzigen Kabelsegmente in Szenario 2 in diesem Gebiet das 4,8 km lange Doppelkreis-Kabelsystem zwischen 220 kV Foretaille und 220 kV Verbois sind. Der gesamte 57 km lange Abschnitt zwischen 220 kV Foretaille und 220 kV Romanel wird jedoch in Szenario 3 mit Erdkabeln realisiert. Darüber hinaus wird in Szenario 3 auch ein Kabelsegment mit einer Gesamtlänge von 16 km (8 km, zwei Kabel pro Phase) zwischen 220 kV Romanel und 220 kV Vaux realisiert.

Szenario 1



Szenario 2



Szenario 3

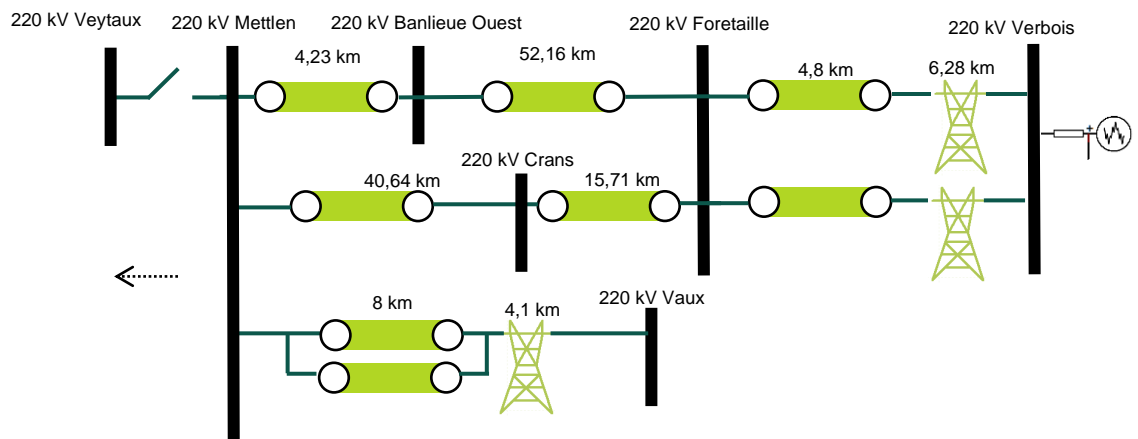


Abb. 2-31: Netzkonfiguration nahe 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel und 220 kV Vaux für den Demonstrationsfall – Szenarien 1, 2 und 3

Die beobachteten Verstärkungsfaktoren bei 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel und 220 kV Vaux für den Demonstrationsfall für die Szenarien 1, 2 und 3 werden in Tabelle 2-16 dargestellt.

	AF auf der 5			AF auf der 7		
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
220 kV Crans	0,837	0,859	0,635	0,990	0,952	3,532
220 kV Banlieue Ouest	0,664	0,657	0,511	0,786	0,821	4,080
220 kV Romanel	0,642	0,630	0,607	0,773	0,805	3,812
220 kV Vaux	0,694	0,685	0,493	0,806	0,832	3,503

Tabelle 2-16: Vergleich der AF bei 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, kV Romanel, und 220 kV Vaux zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 für Oberschwingungsinjektionen bei 220 kV Verbois – Low SCL

Anmerkungen: Während in den Szenarien 1 und 2 keine Gefahr der Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung festgestellt werden kann, können in Szenario 3 kritische Verstärkungsfaktoren auf der Oberschwingung 7 beobachtet werden, wenn der Bereich von 220 kV Foretaille bis 220 kV Romanel intensiv verkabelt wird.

Zur weiteren Information ist die Oberschwingungsresonanz entlang der Route 220 kV Verbois – Romanel und 220 kV Romanel – Vaux für die 3 Szenarien unter den gegebenen Netzbedingungen in Abb. 2-32 dargestellt.

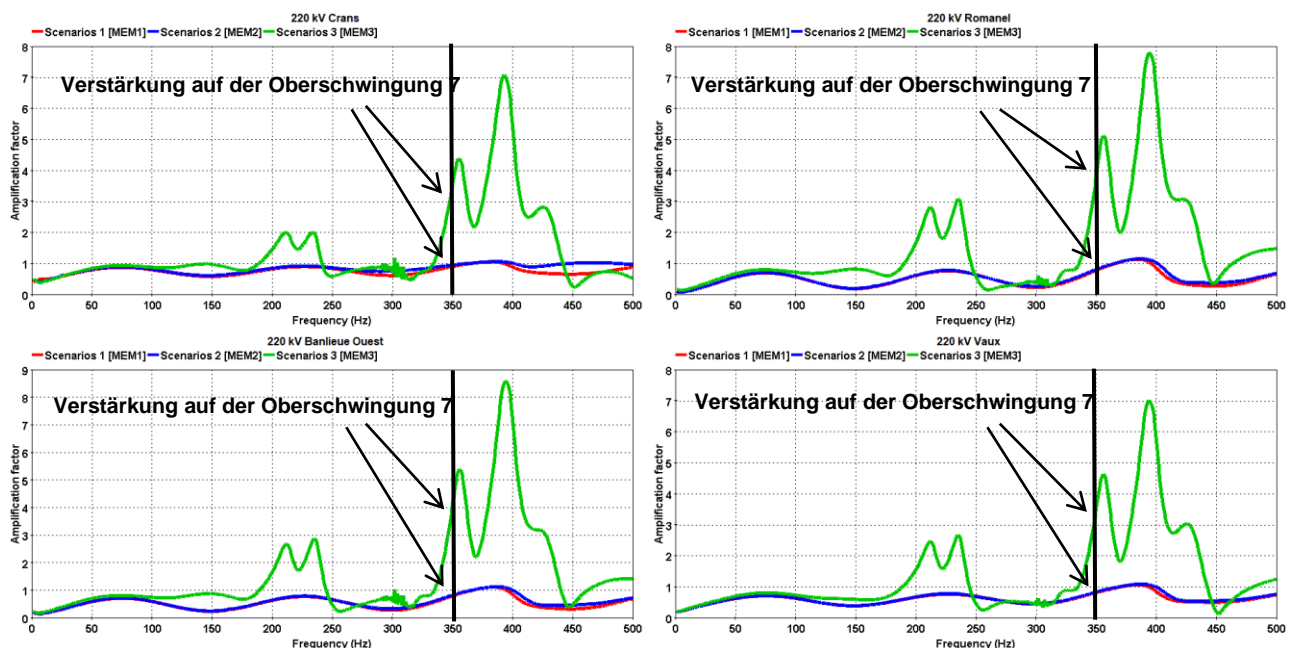


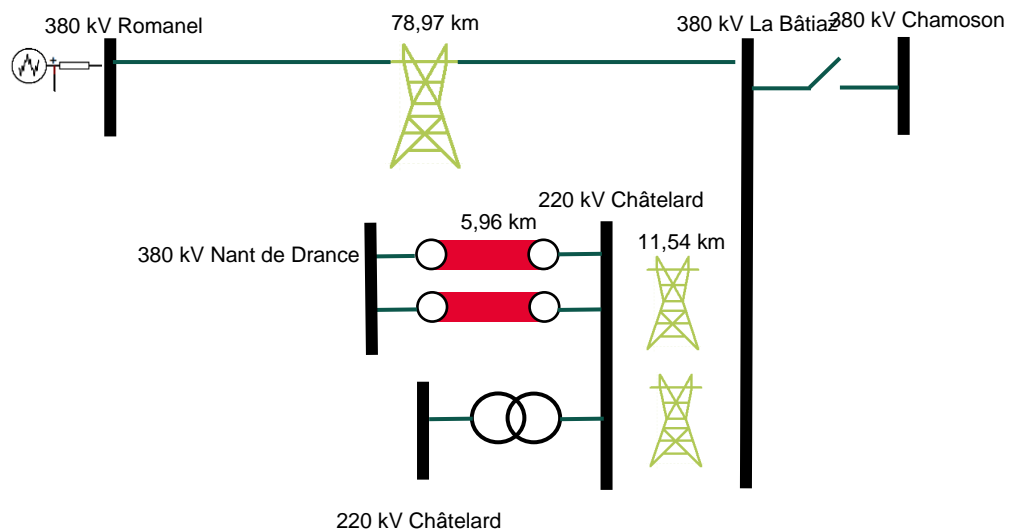
Abb. 2-32: Oberschwingungsresonanz entlang 220 kV Verbois – Romanel und 220 kV Romanel – Vaux für die Szenarien 1, 2 und 3 unter den gegebenen Netzbedingungen

Wie in Abb. 2-32 dargestellt, führt die Einführung aller Kabel in diesem Netzbereich in Szenario 3 zu einer Oberschwingungsresonanz, die bei über 350 Hz Oberschwingung 7) gipfelt. Obwohl die Spitze der Resonanzfrequenz nicht genau auf 350 Hz fällt, erzwingt diese harmonische Resonanz immer noch einen starken Einfluss auf die Oberschwingung 7, wie die Ergebnisse zeigen.

2.3.2.1.2 Verstärkung der Oberschwingungen bei 380 kV La Bâtiatz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance und 220 kV Châtelard

Die Konfiguration des Netzes nahe 380 kV Romanel bis 380 kV Nant de Drance für die Szenarien 1, 2 und 3 für den Demonstrationsfall ist in Abb. 2-33 illustriert.

Szenario 1 und 2



Szenario 3

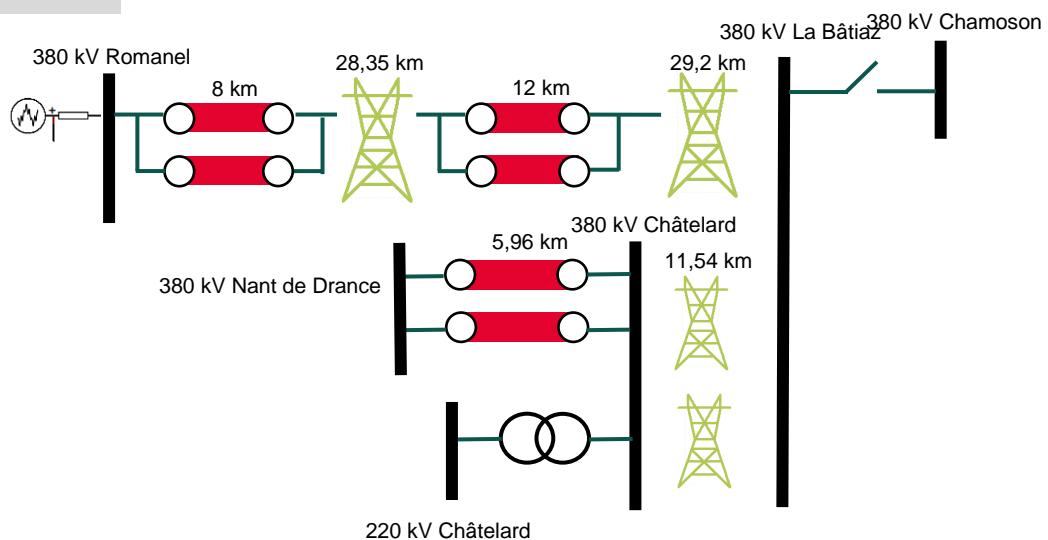


Abb. 2-33: Netzkonfiguration in der Nähe von 380 kV Romanel, 380 kV La Bâtiatz, 220/380 kV Châtelard und 380 kV Nant de Drance für den Demonstrationsfall – Szenarien 1, 2 und 3

Es ist anzumerken, dass die einzigen Kabelsegmente in den Szenarien 1 und 2 in diesem Gebiet die 380-kV-Zweikreiskabel Châtelard-Nant de Drance mit einer Länge von 5,96 km sind. Allerdings wird die 58,7 km lange Übertragungsachse in Szenario 3 von 380 kV Romanel nach 380 kV La Bâtiatz zu einem gemischten Leitungs-/Kabelabschnitt mit insgesamt 40 km Kabel (zwei Kabel pro Phase),

Die bei 380 kV La Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance und 220 kV Châtelard beobachteten Verstärkungsfaktoren für den Demonstrationsfall für die Szenarien 1, 2 und 3 sind in Tabelle 2-17 dargestellt.

	AF auf der 5			AF auf der 7		
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
380 kV La Bâtiaz	1,262	1,262	2,005	4,542	4,542	7,887
380 kV Châtelard	1,280	1,280	2,033	4,777	4,777	8,287
380 kV Nant de Drance	1,282	1,282	2,036	4,809	4,809	8,337
220 kV Châtelard	0,585	0,585	1,605	2,276	2,276	6,810

Tabelle 2-17: Vergleich der AF bei 380 kV La Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance und 220 kV Châtelard zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 für Oberschwingungsseinspeisung bei 220 kV Verbois – Low SCL.

Anmerkungen: Kritische Verstärkungsfaktoren auf der Oberschwingung 7 können im Gebiet Nant de Drance für beide Spannungsebenen mit niedrigen SCL-Bedingungen beobachtet werden, wenn die Oberschwingungen bei 380 kV Romanel für alle drei Szenarien eingespeist werden. Insbesondere ist es nicht überraschend, dass die Verstärkungsfaktoren in den Szenarien 1 und 2 identisch sind, da das lokale Netz in der Region Nant de Drance die gleiche Konfiguration aufweist. In dem Masse, wie Kabelprojekte zwischen 380 kV Romanel und 380 kV La Bâtiaz in das Netz integriert werden, wie in Szenario 3, verschlechtern sich die Verstärkungsfaktoren auf der Oberschwingung 7.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Probleme der Oberschwingungsverstärkung auch in früheren Studien von RTEi [2.5] festgestellt wurden. Die Verstärkungsfaktoren sind an denselben Beobachtungspunkten in den RTEi-Studien viel höher, weil noch niedrigere Kurzschlusswerte angenommen wurden.

Zur weiteren Information ist die Oberschwingungsresonanz entlang der Achsen 380 kV Romanel – La Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance für die Szenarien 1, 2 und 3 unter den gegebenen Netzbedingungen in Abb. 2-34 dargestellt.

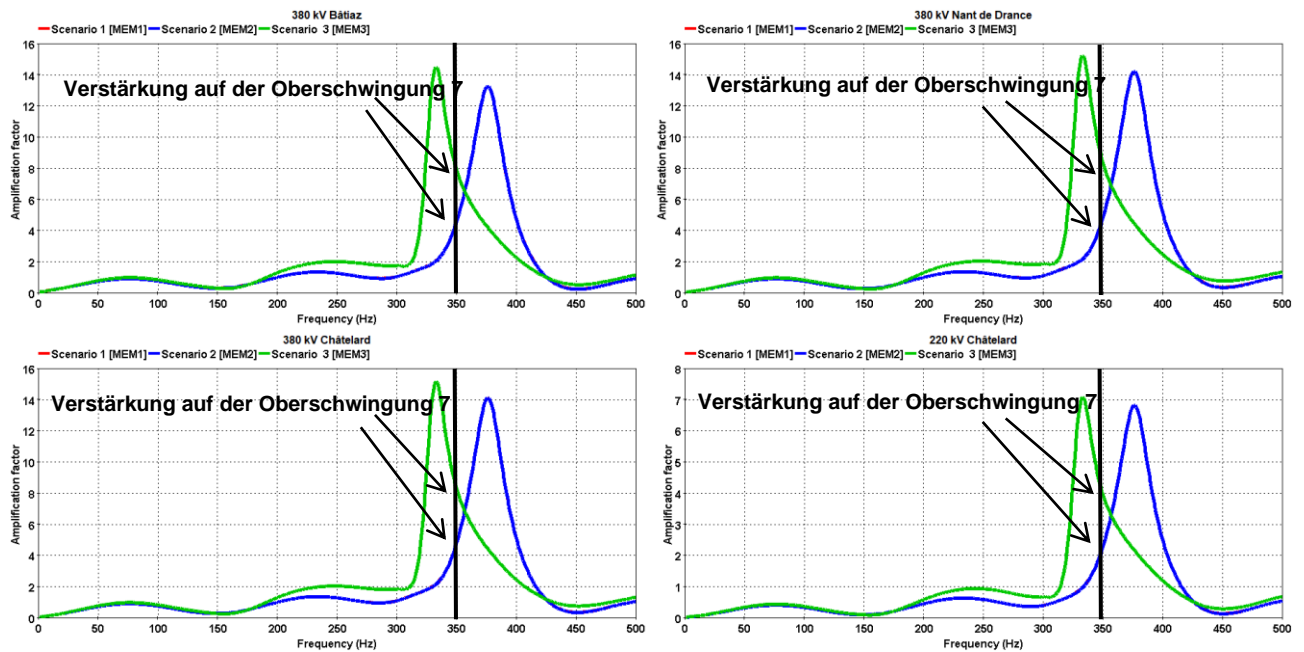


Abb. 2-34: Oberschwingungsresonanz entlang der Leitung 380 kV Romanel – La Bâtiâz – Châtélard – Nant de Drance für die Szenarien 1, 2 und 3 unter den gegebenen Netzbedingungen.

Wie in Abb. 2-34 dargestellt, führen in den Szenarien 1 und 2 die Kabel von Nant de Drance sowie die Topologie des Netzes (N-1 bei 380 kV La Bâtiâz – Chamoson) zu einer Oberschwingungsresonanz, die bei etwa 375 Hz gipfelt. Dies führt zu einer relativ hohen Verstärkung auf der Oberschwingung 7 (d. h. 350 Hz). Die Kurven der Szenarien 1 und 2 werden mit der blauen Kurve überlagert, da die Netzbedingungen in der Region gleich sind.

Im Zuge der Einführung von Kabelprojekten in Szenario 3 verschiebt sich diese Spitze der Oberschwingungsresonanz zu niedrigeren Frequenzen unter 350 Hz. Die Verstärkungsfaktoren bei der Oberschwingung 7 werden aufgrund der grösseren Oberschwingungsimpedanz und der niedrigeren Resonanzfrequenz wichtiger.

Übrigens, laut einer kürzlich durchgeführten Messkampagne von Oberschwingungen bei 380 kV Romanel [2.30], könnte die Komponente der Oberschwingung 7 bis zu 4% betragen (siehe Abb. 2-35), was bereits den von der Norm definierten Grenzwert von 2% übersteigt [2.2].

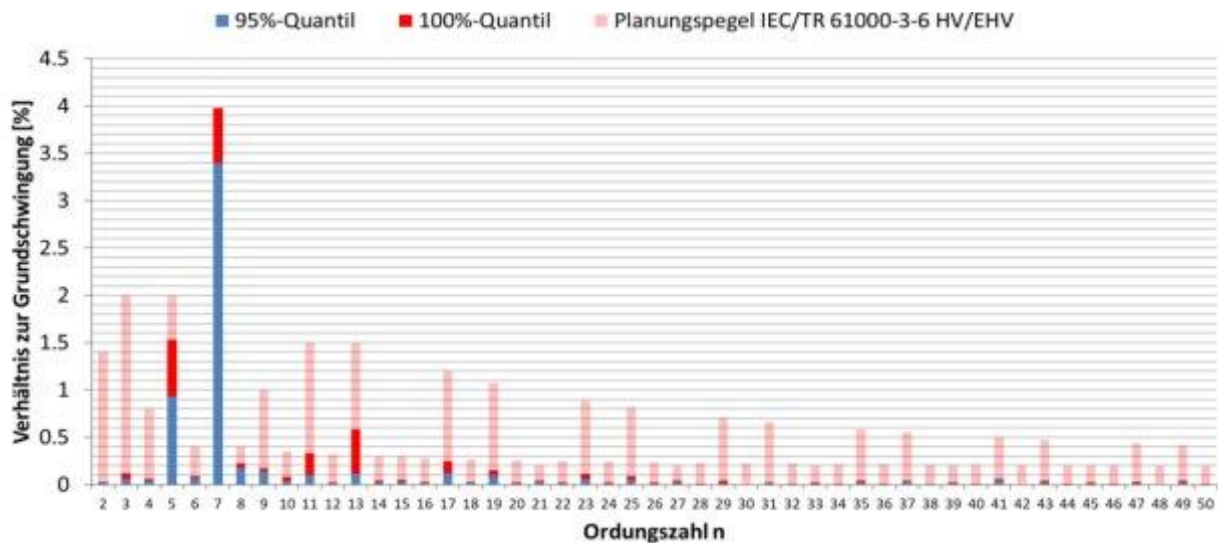


Abb. 2-35: Oberschwingungsanteile im Verhältnis zur Grundschiwingung (%), gemessen bei 380 kV Romanel

Mit einem Verstärkungsfaktor auf der Oberschwingung 7, der 7,887 bei 380 kV La Bâtiatz, 8,287 bei 380 kV Châtelard und 8,337 bei 380 kV Nant de Drance in Szenario 3 erreicht (siehe Tabelle 2-173), würde die Verzerrung der Oberschwingung 7 an diesen drei Orten 31,548%, 33,148% bzw. 33,348% betragen. Eine derart starke Verstärkung der Oberschwingung 7 hätte gravierende Auswirkungen auf die Energiequalität und die Netzausrüstung.

2.3.2.1.3 Verstärkung der Oberschwingungen bei 220 kV Airolo

Die Netzkonfiguration in der Nähe von 220 kV Airolo für die Szenarien 1, 2 und 3 des Demonstrationsfalls ist in Abb. 2-36 dargestellt.

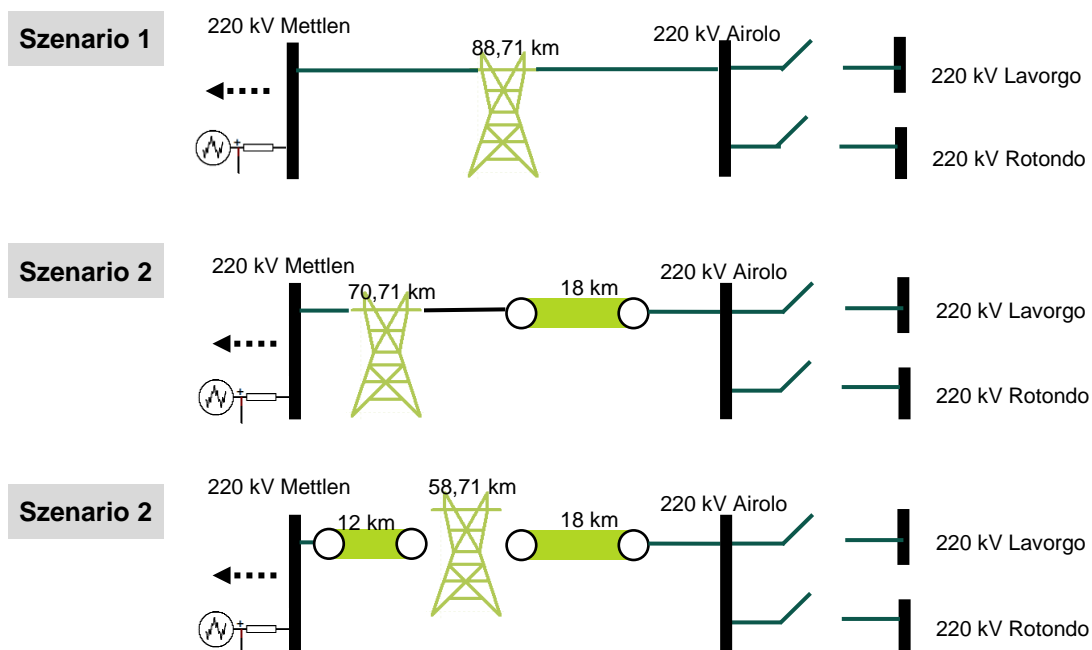


Abb. 2-36: Netzkonfiguration nahe 220 kV Airolo für die Szenarien 1, 2 und 3 unter den gegebenen Netzbedingungen

Die Verbindung 220 kV Mettlen – Airolo besteht in Szenario 1 nur aus Freileitungen, während das 18 km lange Gotthardkabel in Szenario 2 nördlich von 220 kV Airolo eingeführt wird. In Szenario 3 wird südlich von Mettlen ein weiteres 12 km langes Kabelsegment integriert, wodurch sich die Gesamtlänge der Kabelverbindung auf der Verbindung 220 kV Mettlen – Airolo auf 30 km erhöht.

Der Leitungsausfall N-2 220 kV Airolo – Lavorgo und 220 kV Airolo – Rotondo lässt das Gotthardkabel über eine lange Übertragungsachse radial mit der Quelle der Oberschwingungen verbunden.

Die beobachteten Verstärkungsfaktoren bei 220 kV Airolo für den Demonstrationsfall für die Szenarien 1, 2 und 3 sind in Tabelle 2-18 dargestellt.

	AF auf der 5			AF auf der 7		
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
220 kV Airolo	1,058	11,32	6,143	1,191	1,306	1,913

Tabelle 2-18: Vergleich der AF bei 220 kV Airolo zwischen den Szenarien 1, 2 und 3 für Oberschwingungsinjektionen bei 220 kV Mettlen – Low SCL

Anmerkungen: In Szenario 1 kann keine Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung beobachtet werden, was verständlich ist, da die Verbindung 220 kV Mettlen – Airolo nicht verkabelt ist.

Ein extrem hoher Verstärkungsfaktor von über 10 auf der Oberschwingung 5 kann in Szenario 2 bei 220 kV Airolo aufgrund der Einführung von Kabelprojekten (18 km Gotthard-Kabel) in die Ausbreitungsachse der Oberschwingung beobachtet werden. Dieser Fall wurde auch in früheren Studien von RTEi [2.3] und E-nernex [2.4] festgestellt.

Mit der Aufnahme eines weiteren 12 km langen Kabelprojekts südlich von Mettlen in Szenario 3 sinkt der Verstärkungsfaktor der Oberschwingung 5 jedoch auf etwas über 6. Dies kann verstanden werden, wenn man die Oberschwingungsresonanz entlang der Verbindung 220 kV Mettlen – Airolo für die drei Szenarien untersucht, wie in Abb. 2-37 dargestellt.

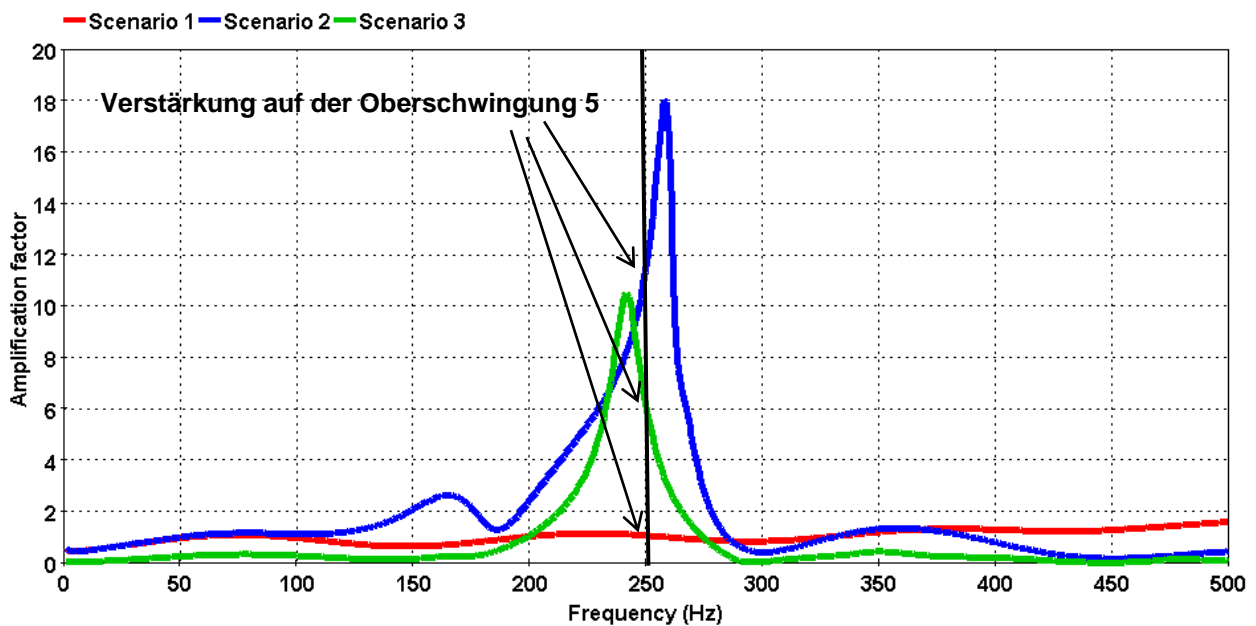


Abb. 2-37: Oberschwingungsresonanz entlang 220 kV Mettlen – Airolo für die Szenarien 1, 2 und 3 unter den gegebenen Netzbedingungen

Wie in Abb. 2-37 gezeigt, führt die Einführung des 18 km langen Gotthardkabels in Szenario 2 zu einer Oberschwingungsresonanz, die etwas oberhalb von 250 Hz (Oberschwingung 5) gipfelt, was zu einem hohen Verstärkungsfaktor auf der Oberschwingung 5 bei 220 kV Airolo führt. Doch obwohl die Integration eines weiteren 12 km langen Kabels südlich von Mettlen die Oberschwingungsresonanz unter 250 Hz verschiebt, sinkt auch der Verstärkungsfaktor auf der Oberschwingung 5 von 250 Hz. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass sich die Oberschwingungsverstärkung im Allgemeinen verstärkt, je mehr Kabel in das Netzwerk integriert werden. Wenn sich die Oberschwingungsresonanz jedoch in ausreichend niedrige Frequenzbereiche verschiebt, kann die Beziehung zwischen dem Verstärkungsfaktor für einen bestimmten Oberschwingungsrang und der Anzahl der Kabelprojekte unvorhersehbar werden. Daher ist es absolut notwendig, für jedes neue Kabelprojekt, das in das Netz integriert werden soll, detaillierte Studien zur Oberschwingungsverstärkung unter Berücksichtigung von Variationen in der Konfiguration und den Netzbedingungen durchzuführen.

2.3.2.2 Auswirkung der Kurzschlussleistung auf die Verstärkung der Oberschwingungen

Die Netzkurzschlussleistung spielt eine wichtige Rolle bei der Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen. Im Allgemeinen verstärkt sich die Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen, wenn die Netzkurzschlussleistung gering ist. Durch die Erhöhung der Netzkurzschlussleistung sollte sich die Oberschwingungsresonanz jedoch zu höheren Frequenzen hin verschieben und die Resonanzspitze dämpfen, wodurch die Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen abgeschwächt wird.

Die folgenden Testfälle sollen zeigen, wie sich die Netzkurzschlussleistung auf die Verstärkung der Oberschwingungen niedriger Ordnung (d. h. der Oberschwingungen 5 und 7) auswirkt (Vergleich zwischen niedriger und hoher SCL):

Einspeisepunkt	Beobachtungspunkt	Szenario	Netzkonfiguration	Vergleich
220 kV Mettlen	220 kV Airolo	2	N-2 bei 220 kV Airolo – Rotondo und Airolo – Lavorgo	SCL niedrig und hoch
380 kV Romanel	380 kV La Bâtiaz	2	N-1 bei 220 kV La Bâtiaz – Chamoson	SCL niedrig und hoch
	380 kV Châtelard			
	380 kV Nant de Drance			
	220 kV Châtelard			
380 kV Romanel	220 kV Romanel	3	N-1 bei 220 kV La Bâtiaz – Chamoson	SCL niedrig und hoch
	220 kV Banlieue Ouest			
	220 kV Crans			
	220 kV Foretaille			
	380 kV La Bâtiaz			
	380 kV Châtelard			
	380 kV Nant de Drance			
	220 kV Châtelard			

2.3.2.2.1 Verstärkung der Oberschwingungen bei 220 kV Airolo

Die Netzkonfiguration nahe 220 kV Airolo für das Szenario 2 des Demonstrationsfalls ist in Abb. 2-38 dargestellt.

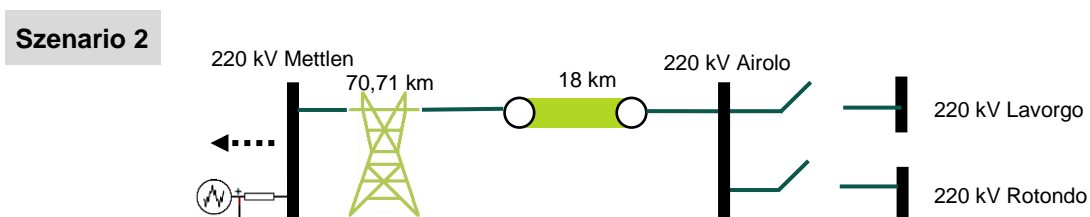


Abb. 2-38: Konfiguration des Netzes nahe 220 kV Airolo für den Demonstrationsfall – Szenario 2

Es ist anzumerken, dass das 18 km lange Gotthardkabel in Szenario 2 nördlich von 220 kV Airolo eingeführt wird.

Die bei 220 kV Airolo beobachteten Verstärkungsfaktoren für den Demonstrationsfall mit niedrigem und hohem SCL sind in Tabelle 2-19 dargestellt.

	AF auf der 5		AF auf der 7	
	SCL niedrig	SCL hoch	SCL niedrig	SCL hoch
220 kV Airolo	11,32	1,306	7,322	1,387

Tabelle 2-19: Vergleich der AF bei 220 kV Airolo zwischen tiefem SCL und hohem SCL für Oberschwingungseinspeisungen bei 220 kV Mettlen – Szenario 2

Anmerkungen: Wie wir bereits in 2.3.2.1.3 beobachtet haben, kann die Oberschwingung 5 mit Oberschwingungsinjektionen bei 220 kV Mettlen stark verstärkt werden, wenn 220 kV Airolo von 220 kV Rotondo und 220 kV Lavorgo unter niedrigen SCL-Bedingungen isoliert wird. Allerdings kann eine Erhöhung der Kurzschlussleistung des Netzes den Verstärkungsfaktor tatsächlich um fast 40% senken.

Zur weiteren Information ist die Oberschwingungsresonanz entlang der Verbindung 220 kV Mettlen – Airolo für niedrige und hohe SCL unter den gegebenen Netzbedingungen in Abb. 2-39 dargestellt.

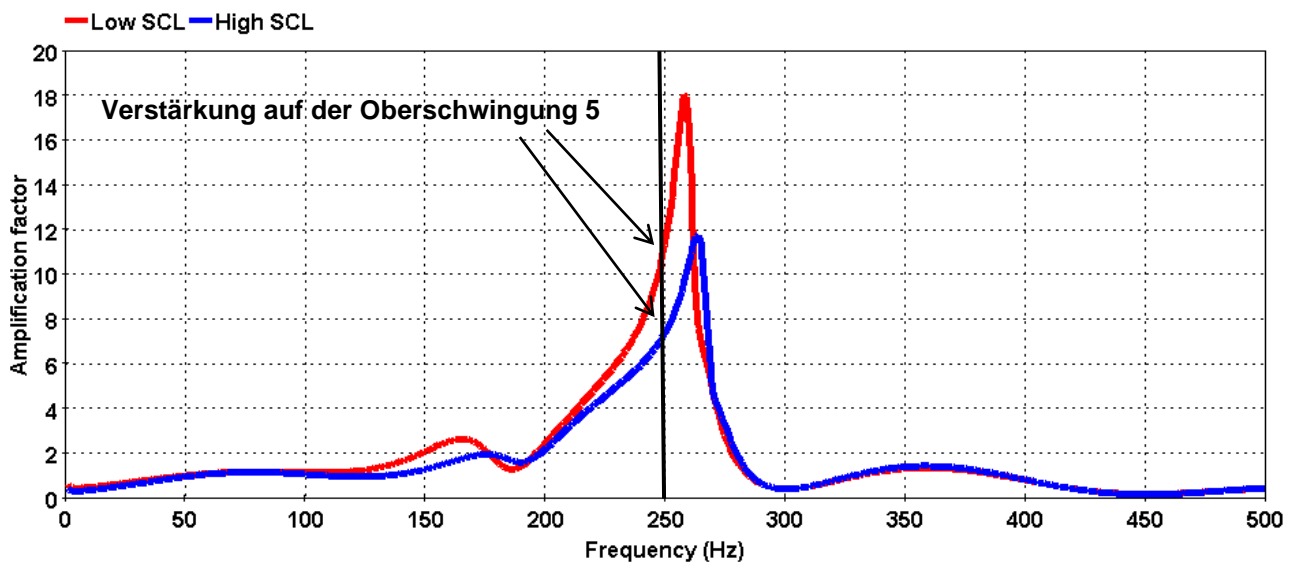


Abb. 2-39: Oberschwingungsresonanz entlang 220 kV Mettlen – Airolo für niedrige und hohe SCL unter gegebenen Netzbedingungen

Wie Abb. 2-39 zeigt, verschiebt die Erhöhung der Kurzschlussleistung des Netzes nicht nur die Oberschwingungsresonanz geringfügig zu höheren Frequenzen, sondern dämpft auch die Resonanzspitze entlang der Verbindung 220 kV Mettlen – Airolo. Mit einem Wert von über 7 ist der Verstärkungsfaktor bei hoher SCL zwar immer noch recht hoch, wurde aber im Vergleich zu einem sehr kritischen Wert von 11 wirksam reduziert.

2.3.2.2.2 Szenario 2 – Verstärkung der Oberschwingungen bei 380 kV La Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance und 220 kV Châtelard

Die Konfiguration des Netzes nahe 380 kV La Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance und 220 kV Châtelard für das Szenario 2 des Demonstrationsfalls ist in Abb. 2-40 dargestellt.

Szenario 2

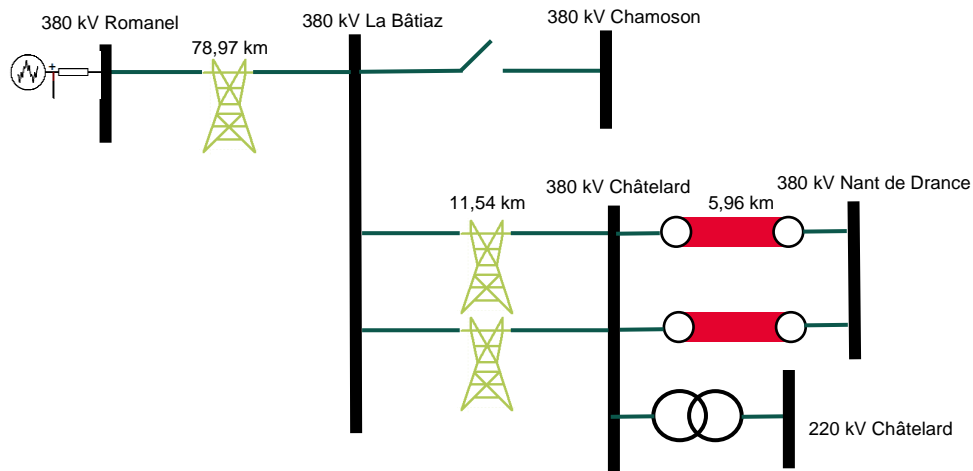


Abb. 2-40: Netzkonfiguration in der Nähe von 380 kV La Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance und 220 kV Châtelard für den Demonstrationsfall – Szenario 2

Zu beachten ist, dass in Szenario 2 die einzigen Kabelsysteme in diesem Netzbereich die 380-kV-Zweikreis-kabel Châtelard-Nant de Drance mit einer Länge von 5,96 km sind. In der gegebenen Netzkonfiguration sind die Kabel von Nant de Drance radial mit der Oberschwingungsquelle bei 380 kV Romanel verbunden.

Die bei 380 kV La Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance und 220 kV Châtelard beobachteten Verstärkungsfaktoren für den Demonstrationsfall mit niedrigem und hohem SCL sind in der folgenden Tabelle dargestellt Tabelle 2-20.

	AF auf der 5		AF auf der 7	
	SCL niedrig	SCL hoch	SCL niedrig	SCL hoch
380 kV La Bâtiaz	1,262	0,877	4,542	1,728
380 kV Châtelard	1,280	0,874	4,777	1,784
380 kV Nant de Drance	1,282	0,871	4,809	1,789
220 kV Châtelard	1,011	0,582	3,894	1,223

Tabelle 2-20: Vergleich der AF bei 380 kV La Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance und 220 kV Châtelard zwischen niedrigem und hohem SCL für Oberschwingungseinspeisungen bei 380 kV Romanel – Szenario 2

Anmerkungen: Wie bereits im Abschnitt 2.3.2.1.2 gesehen, können kritische Verstärkungsfaktoren auf der Oberschwingung 7 im Gebiet von Nant de Drance für beide Spannungsebenen bei niedrigen SCL-Bedingungen beobachtet werden, wenn die Oberschwingungen bei 380 kV Romanel eingespeist werden. Dennoch werden bei einem hohen SCL im Netzwerk die Verstärkungsfaktoren bei gleicher Schaltungstopologie unkritisch.

Zur weiteren Information ist die Oberschwingungsresonanz entlang der Routen 380 kV Romanel – La Bâtiatz – Châtelard – Nant de Drance für niedrige und hohe SCL unter den gegebenen Netzbedingungen in Abb. 2-41 dargestellt.

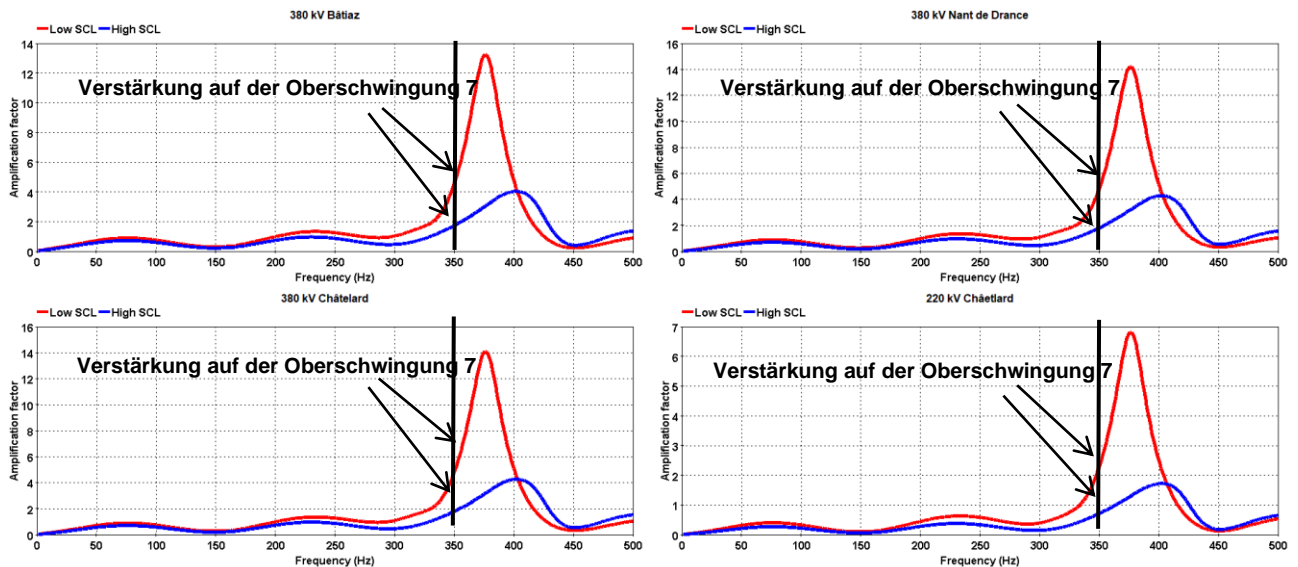


Abb. 2-41: Oberschwingungsresonanz entlang des Netzes 380 kV Romanel – La Bâtiatz – Châtelard – Nant de Drance für niedrige und hohe SCL unter den gegebenen Netzbedingungen

Wie in Abb. 2-41 gezeigt, führen die Kabel von Nant de Drance sowie die Topologie des Netzes (N-1 auf 380 kV La Bâtiatz – Chamoson) zu einer harmonischen Resonanz, die bei niedrigen SCL-Bedingungen bei etwa 375 Hz gipfelt. Dies führt zu einer starken Verstärkung der Oberschwingung 7 (d. h. 350 Hz). Die Erhöhung des SCL verschiebt jedoch nicht nur die Oberschwingungsresonanz zu noch höheren Frequenzen, sondern dämpft auch die Resonanzspitze erheblich, was zu einer stark abgeschwächten Verstärkung auf der Oberschwingung 7 führt.

Die Abb. 2-41 weist auch darauf hin, dass sich mit der Integration einer grösseren Anzahl von Kabeln in diesem Netzbereich die Spitze der Oberschwingungsresonanz wahrscheinlich weiter in Richtung der Oberschwingung 7 verschieben wird. Bei seiner hohen Spitzenimpedanz sind noch kritischere Probleme mit der Verstärkung von Oberschwingungen zu erwarten.

2.3.2.2.3 Szenario 3 – Verstärkung der Oberschwingungen entlang der Verbindungen 380 kV Romanel – Nant de Drance und 220 kV Romanel – Foretaille

Die Konfiguration des Netzes in Szenario 3 nahe 380 kV Romanel bis 380 kV La Bâtiatz und 220 kV Foretaille ist in Abb. 2-42 illustriert.

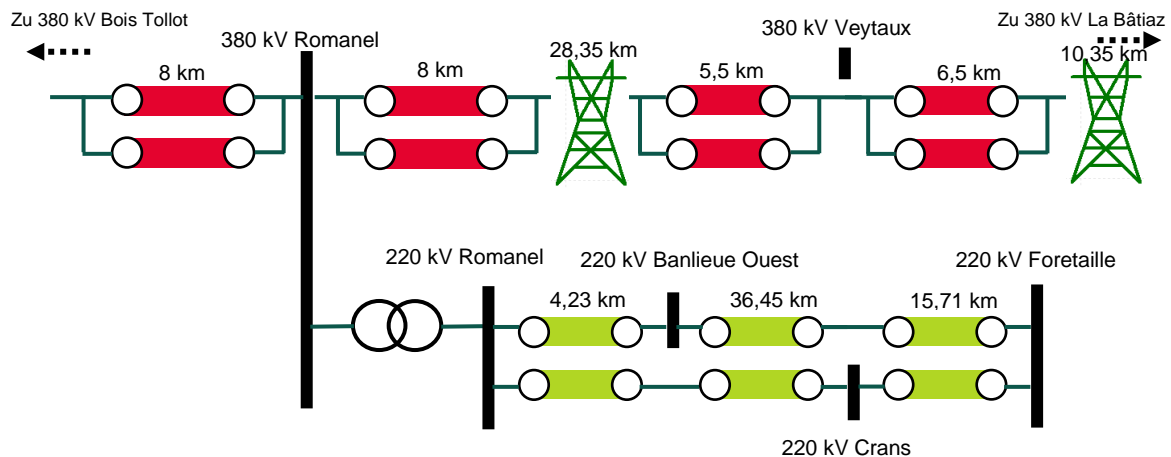


Abb. 2-42: Konfiguration des Netzes nahe 380 kV Romanel für den Demonstrationsfall – Szenario 3

Der 58,7 km lange Übertragungsweg in Szenario 3 von 380 kV Romanel nach 380 kV La Bâtiarz wird zu einem gemischten Leitungs-/Kabelabschnitt mit insgesamt 40 km Kabel (zwei Kabel pro Phase), während die 57 km lange Verbindung 220 kV Romanel – Foretaille vollständig mit Erdkabeln realisiert wird.

Die Amplifikationsfaktoren an den Beobachtungspunkten für den Demonstrationsfall mit niedrigem und hohem SCL sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

	AF auf der 5		AF auf der 7	
	SCL niedrig	SCL hoch	SCL niedrig	SCL hoch
220 kV Romanel	1,278	3,051	0,335	0,250
220 kV Banlieue Ouest	1,355	3,204	0,408	2,257
220 kV Crans	1,461	3,433	0,529	0,343
220 kV Foretaille	1,368	3,207	0,496	0,306
380 kV La Bâtiarz	2,005	1,364	7,887	11,260
380 kV Châtélard	2,033	1,360	8,287	11,627
380 kV Nant de Drance	2,036	1,355	8,337	11,660
220 kV Châtélard	1,605	0,906	6,810	7.972

Tabelle 2-21: Vergleich der AF bei 220 kV Romanel, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Crans, 220 kV Foretaille, 380 kV La Bâtiarz, 380 kV Châtélard, 380 kV Nant de Drance und 220 kV Châtélard zwischen niedrigen und hohen SCL für Oberschwingungsinjektionen bei 380 kV Romanel – Szenario

Anmerkungen: Unter niedrigen SCL-Bedingungen kann auf der Route 220 kV Romanel – Foretaille keine Oberschwingungsverstärkung beobachtet werden, während kritische Verstärkungsfaktoren auf der Oberschwingung 7 an verschiedenen Orten in der Region Nant de Drance beobachtet werden.

Anstatt die Oberschwingungsresonanzen zu dämpfen, erhöht die Erhöhung der Kurzschlussleistung des Netzes in diesem Fall die Verstärkungsfaktoren auf der Oberschwingung 7 in der Region Nant de Drance weiter auf über 10 (extrem kritisch). Gleichzeitig werden die anfänglich moderaten Verstärkungsfaktoren auf der Oberschwingung 5 entlang der Route 220 kV Romanel – Foretaille bei hoher Netz Kurzschlussleistung ebenfalls kritisch.

Zur weiteren Information ist die Oberschwingungsresonanz entlang der Route 380 kV Romanel – La Bâtiâz – Châtélard – Nant de Drance und 220 kV Romanel – Banlieue Ouest – Crans – Foretaille für niedrige und hohe SCL unter den gegebenen Netzbedingungen in Abb. 2-43 dargestellt.

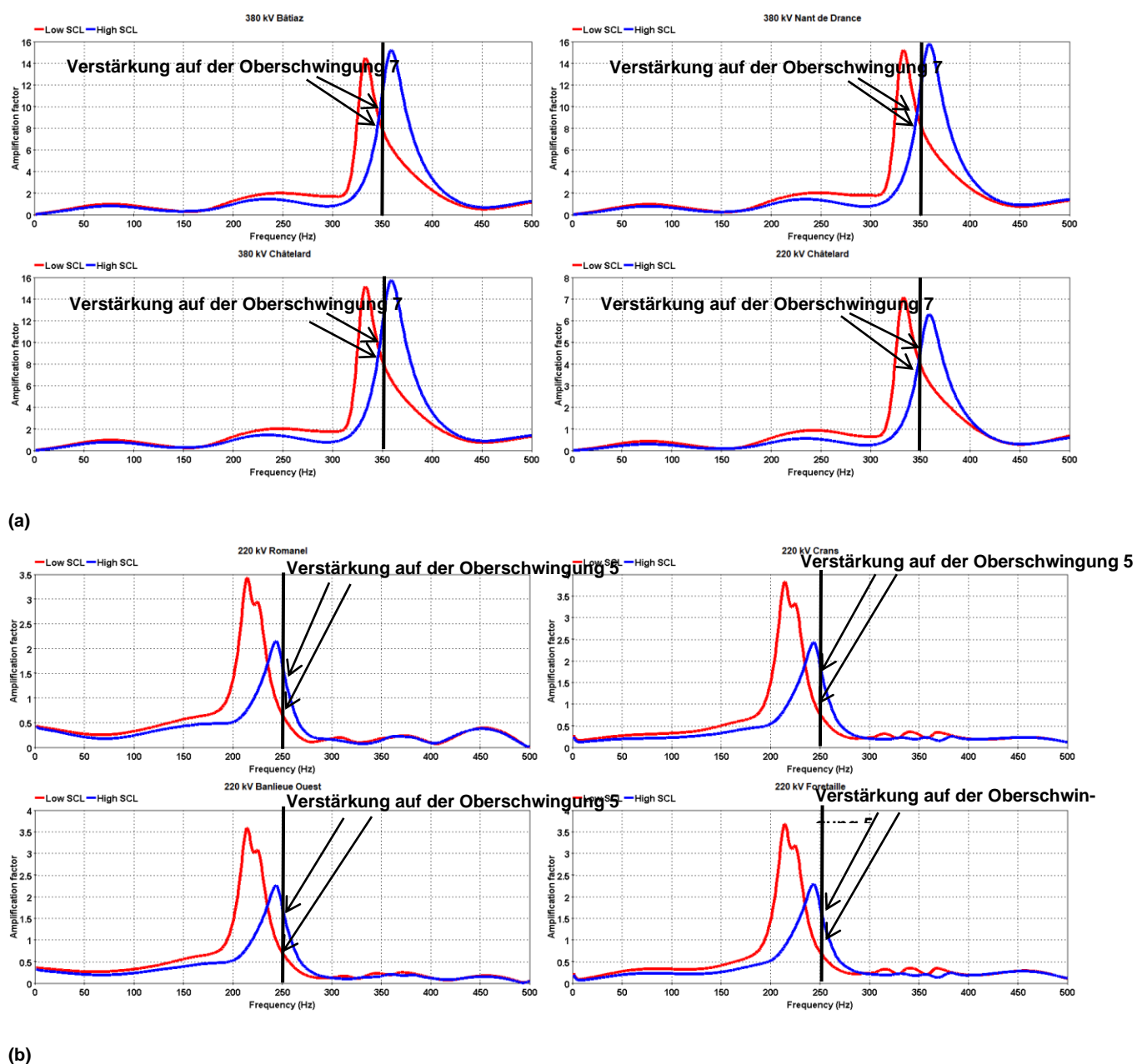


Abb. 2-43: Oberschwingungsresonanz entlang der Routen 380 kV Romanel – La Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance und 220 kV Romanel – Banlieue Ouest – Crans – Foretaille für niedrige und hohe SCL unter den gegebenen Netzbedingungen, (a) 380 kV Romanel – La Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance, (b) 220 kV Romanel – Banlieue Ouest – Crans – Foretaille.

Wie in Abb. 2-43 (a) gezeigt, liegt die harmonische Resonanzfrequenz entlang der Route 380 kV Romanel – Nant de Drance unter schwachen SCL-Bedingungen an verschiedenen Orten in der Region Nant de Drance unter 350 Hz (d. h. Oberschwingung 7). Mit zunehmender Kurzschlussleistung des Netzes verschiebt sich diese Oberschwingungsresonanz auf eine Frequenz von etwas über 350 Hz. Die Oberschwingungsresonanz wechselt von einer Frequenz unterhalb der interessierenden Frequenz (d. h. 350 Hz, Oberschwingung 7) zu einer höheren Frequenz, was zu dem hier beobachteten Verhalten führt.

Ähnliche Beobachtungen können für Abb. 2-43 (b) gemacht werden, wo die Oberschwingungsresonanzfrequenz entlang der Achse 220 kV Romanel – Foretaille unter niedrigen SCL-Bedingungen weit unter 250 Hz liegt (d. h. Oberschwingung 5). Durch die Erhöhung der Kurzschlussleistung des Netzes wird die Oberschwingungsresonanz näher an 250 Hz herangeführt, was zu einer stärkeren Verstärkung der Oberschwingung 5 führt.

Insgesamt wird deutlich, dass eine hohe Kurzschlussleistung des Netzes im Allgemeinen die Oberschwingungsresonanz zu höheren Frequenzen verschieben und die Resonanzspitze dämpfen sollte, was zu gedämpften Verstärkungsfaktoren auf den niederrangigen Oberschwingungen führt. In einem dicht verkabelten Gebiet, in dem die Oberschwingungsresonanz im Niederfrequenzbereich liegt, wird die tatsächliche Auswirkung der Netzkurzschlussleistung auf die Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen jedoch aufgrund der unsicheren Beziehung zwischen den Oberschwingungsresonanzfrequenzen und den interessierenden Frequenzen (d. h. den Oberschwingungen 5 und 7) unvorhersehbar. Daher ist es einmal mehr absolut notwendig, für jedes neue Kabelprojekt, das in das Netz integriert werden soll, detaillierte Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen unter Berücksichtigung von Variationen in der Konfiguration und den Netzbedingungen durchzuführen.

2.3.2.3 Auswirkungen eines Kabelprojekts auf die Verstärkung von Oberschwingungen in abgelegenen Gebieten

Das Phänomen der Oberschwingungsverstärkung wird mit zunehmendem Integrationsgrad der Kabel in das Netz zu einem komplexen Problem. In einem dicht verkabelten Netz hängt die Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen in einem bestimmten Bereich des Netzes nicht nur von den Verkabelungsprojekten im lokalen Bereich ab, sondern kann auch von einem anderen Verkabelungsprojekt in einem entfernten Bereich beeinflusst werden. Mit anderen Worten: Die spezifische Implementierung eines bestimmten Netzsegments mit Freileitungen oder Kabeln kann sich auf die Verstärkung von niederrangigen Oberschwingungen in einem entfernten Gebiet auswirken. In diesem Abschnitt wird anhand eines Beispiels gezeigt, wie sich in Szenario 3 die Verkabelung eines 14,56 km langen Netzabschnitts in der Region Zürich auf die Verstärkung der Oberschwingungen im Tessin auswirken würde.

Die beiden Gebiete Zürich und Tessin in Szenario 3 sind dicht verkabelt, wie Abb. 2-44 zeigt. Der folgende Testfall wird vorgestellt. Es ist zu beachten, dass in diesem Testfall Oberschwingungen bei 220 kV Mettlen eingespeist werden und dass die Verstärkungsfaktoren an verschiedenen Orten in den Gebieten Zürich und Tessin unter optimalen SCL-Bedingungen beobachtet werden. Der betrachtete Ausfallvariante N-1, 220 kV Airolo – Lavorgo, befindet sich in der Region Tessin. Die Auswirkungen der Umsetzung der Verbindung 220 kV Altgass – Samstagern, wie in Abb. 2-44 dargestellt, mit Freileitungen oder Kabeln werden bewertet.

Einspeisepunkt	Beobachtungspunkt	Szenario	Netzkonfiguration	Vergleich
220 kV Mettlen	220 kV Regensdorf	3	N-1 bei 220 kV Airolo – Lavorgo	Kabel- oder Leitungseinführung des Abschnitts 220 kV Altgass – Samstagern
	220 kV Seebach			
	220 kV Auwiesen			
	220 kV Fällanden			
	220 kV Bavona			
	220 kV Peccia			
	220 kV Cavigno			
	220 kV Avegno			

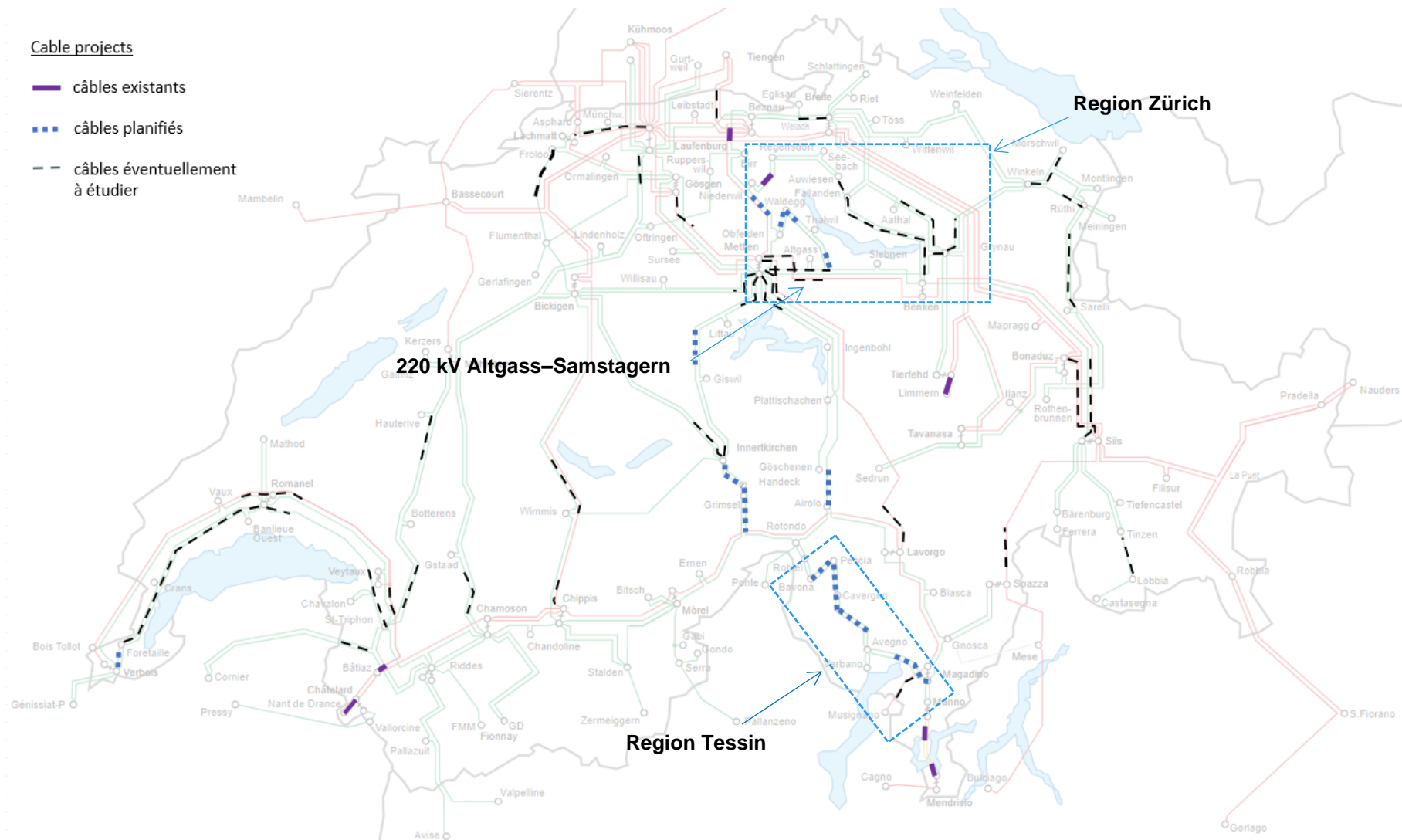


Abb. 2-44: Für Szenario 3 vorgesehene Verdrachtungs- und Ausgleichsschemata

Die an den Beobachtungspunkten beobachteten Verstärkungsfaktoren für den Demonstrationsfall mit den beiden Kabel- und Leitungsimplementierungen für den Abschnitt 220 kV Altgass – Samstagern sind in Tabelle 2-22 dargestellt.

	AF auf der 5		AF auf der 7	
	Kabel	Leitung	Kabel	Leitung
220 kV Regensdorf	0,159	0,108	3,013	1,841
220 kV Seebach	0,120	0,085	3,192	1,956
220 kV Auwiesen	0,111	0,084	3,217	1,973
220 kV Fällanden	0,078	0,097	3,289	2,025
220 kV Bavona	0,582	0,670	3,085	2,421
220 kV Peccia	0,567	0,658	3,128	2,455
220 kV Cavergho	0,546	0,639	3,114	2,444
220 kV Avegno	0,391	0,476	2,170	1,698

Tabelle 2-22: Vergleich der AF an mehreren Orten in den Regionen Zürich und Tessin zwischen zwei Implementierungen der Verbindung 220 kV Altgass – Samstagern für Oberschwingungseinspeisungen bei 220 kV Mettlen – Szenario 3

Anmerkungen: Dies kann man in Tabelle 2-22 beobachten: Wenn die Verbindung 220 kV Altgass – Samstagern mit Kabeln realisiert wird, können unter den gegebenen Netzbedingungen an mehreren Stellen in den Regionen Zürich und Tessin kritische Verstärkungsfaktoren auf der Oberschwingung 7 beobachtet werden.

Wenn jedoch die Verbindung 220 kV Altgass – Samstagern in der Freileitungskonfiguration verbleibt, können die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 7 in den beiden Regionen Zürich und Tessin moderat auf unterhalb der kritischen Werte von 3 abgeschwächt werden.

Die Umsetzung eines einzelnen, relativ kurzen (~14,56 km) Segments 220 kV Altgass – Samstagern hätte erhebliche Auswirkungen auf die Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung in einem abgelegenen geografischen Gebiet (Tessin), was darauf hindeutet, dass die Problematik der Oberschwingungsverstärkung sehr heikel werden kann, wenn die betrachteten Netzbereiche dicht verkabelt sind. Dies belegt einmal mehr die absolute Notwendigkeit, für jedes neue Kabelprojekt detaillierte Studien zur Oberschwingungsverstärkung durchzuführen und dabei die verschiedenen möglichen Umsetzungswege für jedes Projekt (mit Freileitungen oder mit Kabeln) zu berücksichtigen, insbesondere wenn der Grad der Verkabelung im Netz steigt.

2.3.3 Schlussfolgerungen

Oberschwingungen sind in einem Stromnetz allgegenwärtig, da sie von einer Vielzahl nichtlinearer Lasten und leistungselektronischer Geräte emittiert werden können. Oberschwingungen aus diesen Quellen können sich über die Systemimpedanzen ausbreiten und sich in Bereichen mit hoher Kabeldichte aufgrund von Resonanzen verstärken, was zu Problemen mit der Energiequalität führt und verschiedene Arten von Netzgeräten belastet oder sogar beschädigt.

Auf der Grundlage der drei vorgeschlagenen Kabelszenarien wurden umfangreiche Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen auf Systemebene durchgeführt. Die Studien wurden an verschiedenen Stellen des Netzes durchgeführt, die potenzielle Punkte für Oberschwingungsbelastungen sein können. Dabei wurden verschiedene Netzkonfigurationen in Bezug auf Leitungsausfall und Kurzschlussleistung berücksichtigt, wobei der Schwerpunkt auf der Verstärkung der Oberschwingungen 5 und 7 (die am häufigsten in Übertragungsnetzen vorkommen) lag.

Aus den durchgeführten Studien lassen sich mehrere Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Verstärkung der Oberschwingungen niedriger Ordnung nimmt zu, wenn die Anzahl der Kabelprojekte im Netz steigt.

Wenn ein Netzbereich nur aus Freileitungen besteht, sollte keine Gefahr der Verstärkung von Oberschwingungen bestehen. Die Integration von Kabelprojekten in einen ursprünglich induktiven Netzbereich, der hauptsächlich aus Freileitungen besteht, führt kapazitive Elemente in das Netz ein, wodurch das Risiko einer Verstärkung bestimmter Oberschwingungen niedrigerer Ordnung erheblich steigt. Generell gilt: Je mehr Kabelprojekte, desto grösser die Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen. Es gibt jedoch Ausnahmen von dieser Regel, wenn der Netzbereich dicht verkabelt ist, wie im Abschnitt 2.3.2.1.3 dargestellt. Aus diesem Grund sollten bei jedem neuen Kabelprojekt detaillierte Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen durchgeführt werden, um mögliche Probleme mit Oberschwingungsresonanzen bereits in der Planungsphase vorhersehen zu können.

- Eine hohe Kurzschlussleistung des Netzes kann die Probleme der Oberschwingungsverstärkung wirksam mindern, indem sie die Oberschwingungsresonanzen in schwach verdrahteten Netzbereichen dämpft.

Im Allgemeinen wird die Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen intensiviert, wenn die Kurzschlussleistung des Netzes gering ist. Eine Erhöhung der Kurzschlussleistung des Netzes kann jedoch in der Regel die Probleme bei der Verstärkung der niederrangigen Oberschwingungen mildern, indem die Oberschwingungsresonanzfrequenz zu höheren Frequenzen verschoben und die Oberschwingungsresonanz auf den verschiedenen Verschiebungspfaden der Oberschwingungen gedämpft wird. Allerdings werden auch wieder Ausnahmen von dieser Regel entdeckt, wie im Abschnitt 2.3.2.2.3 gezeigt wird, was beweist, wie komplex das Problem der Verstärkung von Oberschwingungen in dicht verkabelten Netzen ist.

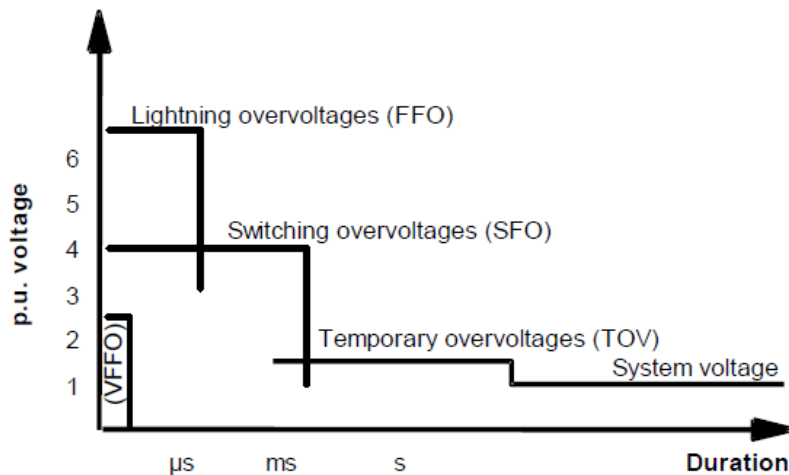
- Ein einziges Verkabelungsprojekt in einem dicht verkabelten Netz kann sich stark auf die Verstärkung von Oberschwingungen in abgelegenen Gebieten auswirken.

Die Problematik der Verstärkung von Oberschwingungen wird immer komplexer, da immer mehr Kabel in das Netz integriert werden. In einem dicht verkabelten Netz hätte die Verkabelung eines bestimmten Netzabschnitts, nicht nur Auswirkungen auf die Verstärkung von Oberschwingungen im lokalen Bereich, sondern könnte auch einen grossen Einfluss auf die Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung in einem entfernten Bereich haben. Die Komplexität dieses Themas zeigt einmal mehr die Notwendigkeit, Studien zur Oberschwingungsverstärkung für jedes neue Kabelprojekt, das in das Netz integriert werden soll, durchzuführen und dabei die verschiedenen möglichen Implementierungsarten (Leitungen oder Kabel) jedes Projekts zu berücksichtigen.

Insgesamt kann die Verstärkung von Oberschwingungen niedriger Ordnung während der Kabelintegration (insbesondere bei intensiver Kabelintegration) ein heikles Thema sein, das unbedingt detaillierte Studien zur Verstärkung von Oberschwingungen erfordern würde, um Risiken zu identifizieren, bestimmte Betriebsprinzipien festzulegen und Entscheidungen über die Gestaltung und Installation von Filtern zu treffen.

2.4 Zeitstudien

Bevor wir uns den in diesem Kapitel vorgestellten Studien zuwenden, ist es notwendig, die Arten von Überspannungen zu verstehen, die in einem Stromnetz auftreten. Abb. 2-45 Auszug aus der Norm IEC 60071-4 [2.6] veranschaulicht die Arten und Eigenschaften von Überspannungen, die häufig in einem Stromnetz auftreten.



(a) Arten von Überspannungen mit Ausnahme von Überspannungen mit sehr schneller Flanke

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,03 \text{ s} \leq T_1 \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$3 \text{ ns} < T_r \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standard voltage shapes					1)
Standard withstand test	1)	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	1)

1) To be specified by the relevant apparatus committees.

(b) Klassen und Formen von Überspannungen

Abb. 2-45: Arten und Merkmale der verschiedenen Überspannungen, die in einem Stromnetz vorkommen [2.6]

Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, können Oberschwingungsresonanzen niedriger Ordnung, die durch die intensive Integration von Kabeln verursacht werden, bei bestimmten transienten Ereignissen angeregt werden, was zur Manifestation von TOV führt. Diese TOVs entsprechen dem Typ «Low frequency (temporary)», wie in Abb. 2-45 gezeigt wird. TOVs sind in der Regel verformt und schlecht gedämpft, was dazu führen kann, dass Hochspannungsanlagen über lange Zeiträume hinweg belastet werden, was auf die folgenden zwei Hauptmechanismen zurückzuführen ist [2.1]:

- Dielektrische Spannung, die zu einem Versagen der Isolierung führen kann
- Überhitzung der Betriebsmittel und Isolation

Da die bestehenden internationalen Normen für Richtlinien zur Anwendung der Isolationskoordination keine Methoden zur Bewertung dieser Art von Überspannungen enthalten, entscheiden sich die Netzbetreiber in der Regel dafür, Resonanzbedingungen, die zu übermässigen TOVs führen würden, bei der Planung und dem Betrieb des Netzes zu vermeiden oder geeignete Minderungsmaßnahmen zu ergreifen, um die Schwere der TOVs zu begrenzen.

Erfahrungsgemäss können die folgenden transienten Ereignisse Oberschwingungen erzeugen und in das System einspeisen, was zu TOVs aufgrund von Resonanzanregung führt:

- Einschalten von grossen Leistungstransformatoren und Drosseln (in Sättigung)
- Einschalten von Kabeln und Kondensatorbänken
- Beseitigung von Erdfehlern
- Automatische Wiedereinschaltung des Leistungsschalters
- Inselbildung des Systems

Um nachzuweisen, dass ein hoher Grad an Kabelintegration zu Oberschwingungsresonanzen niedriger Ordnung führt, die wiederum zu überhöhten TOVs führen, wurden Studien zum Einschalten der Transformatoren 380 kV Romanel und 380 kV Magadino für die in Kapitel 2 identifizierten problematischen Netzwerktopologien/-konfigurationen des Szenarios 3 durchgeführt. Es wurden Vergleiche mit den Szenarien 1 und 2 unter denselben Netzbedingungen vorgelegt, um zu prüfen, ob die Netzleistung mit geringeren Graden der Kabelintegration verbessert werden kann.

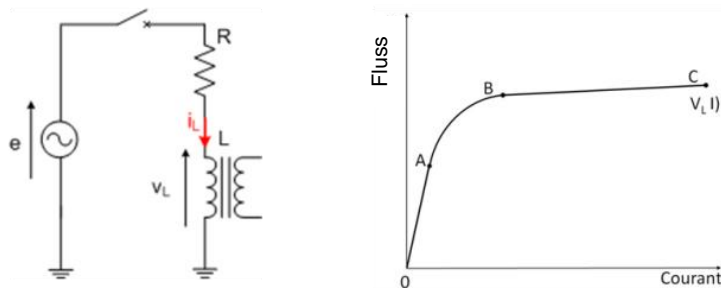
2.4.1 Theoretischer Hintergrund

2.4.1.1 Sättigung des Transformators

Das Einschalten von Transformatoren ist ein häufiger Vorgang beim Betrieb von Stromnetzen. Sie erfolgt in der Regel ohne negative Folgen für das Netz, da die bei diesem Prozess entstehenden transienten Ströme und Spannungen innerhalb weniger Sekunden im Stromnetz sicher abgeschwächt werden können. Dennoch kann in bestimmten Situationen die temporäre Überspannung (TOV), die durch parallele Resonanzen, die durch die Einschaltströme der Transformatoren angeregt werden, erzeugt wird, zu Problemen mit der Energiequalität oder sogar zu einer Verschlechterung der Isolation im Transformator führen.

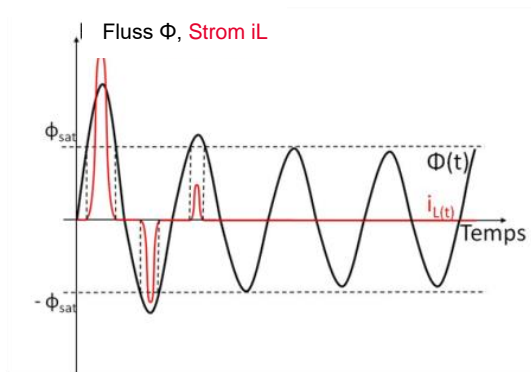
TOVs, die durch Parallelresonanz beim Einschalten des Transformators verursacht werden, entstehen durch die nichtlinearen Eigenschaften des induktiven Elements des Leistungstransformators (Eisenkern), das aufgrund einer plötzlichen Änderung der Spannung in Sättigung geraten kann (d. h. Umschaltung, phasenverschobene Generatorsynchronisation, externe Fehler und deren Beseitigung usw.). Der daraus resultierende stark verzerrte magnetisierende Strom, der sogenannte Einschaltstrom, enthält starke harmonische Komponenten über ein breites Frequenzspektrum, die durch grosse Impedanzamplituden an bestimmten Punkten mit parallelen Resonanzfrequenzen verstärkt werden können, was zu einem TOV an den Transformator-klemmen führt.

Um das nichtlineare Verhalten des magnetisierenden Zweiges eines Leistungstransformators während des Einschaltens zu erklären, kann der Transformator auf eine nichtlineare Induktivität L vereinfacht werden, die in Reihe mit einem Widerstand R geschaltet ist, der den Serienwiderstand des Netzes und den Widerstand der Transformatorwicklung darstellt, und die von einer durch e dargestellten Sinusspannungsquelle gespeist wird, wie in Abb. 2-46 (a) [2.7] gezeigt wird.



a) Einschalten eines unbelasteten Transformators

b) Sättigungskurve



c) Fluss und Strom einer nichtlinearen Induktivität bei Erregung

Abb. 2-46: Funktionsprinzip eines unbelasteten Transformators

Die Beziehung zwischen dem magnetischen Fluss der nichtlinearen Induktivität Φ und dem Magnetisierungsstrom I (beide in Effektivwerten) ist in Abb. 2-46 (b) dargestellt. Man kann beobachten, dass der Strom I nicht linear mit dem Fluss Φ variiert und drei verschiedene Regionen unterschieden werden können:

- **Die lineare Region OA:** In diesem Bereich steigt der Strom I linear an, wenn der magnetische Fluss Φ zunimmt. Die entsprechende Induktivität ist nicht gesättigt und verhält sich wie eine konstante Induktivität L_0 gleich der Induktivität der Transformatorwicklung. Aufgrund seines relativ hohen Wertes L_0 , führt eine starke Erhöhung des magnetischen Flusses Φ nur zu einer marginalen Erhöhung des Stroms.
- **Die lineare Region BC:** In diesem Bereich ist die Induktivität des Eisenkerns des Transformators stark gesättigt und der Kern selbst, der aus ferromagnetischem Material besteht, verhält sich mit einer relativen Permeabilität von fast 1 fast wie Luft. Der Wert der entsprechenden Induktivität kann durch eine Konstante dargestellt werden L_{sat} . In dieser Region würde selbst eine marginale Erhöhung des magnetischen Flusses aufgrund des niedrigen Wertes von L_{sat} zu einer Stromverstärkung führen.
- **Der nichtlineare Bereich AB:** Dies ist der Bereich, in dem sich der Knick des magnetischen Flusses befindet. Es ist aufgrund der nichtlinearen Beziehung zwischen Φ und I nicht möglich, einen äquivalenten Wert für die konstante Induktivität festzulegen.

Wenn ein Transformator im stationären Zustand arbeitet, liegt die Beziehung zwischen dem magnetischen Fluss und dem Strom im Allgemeinen im linearen Bereich 0A mit dem Wert der Induktivität L_0 wie zuvor definiert. Beim Einschalten kann der magnetische Fluss jedoch viel höhere Werte erreichen, wodurch der Arbeitspunkt der Induktivität über den Bereich 0A hinaus verschoben wird und der Transformator in die Sättigung geht [2.7]. Da die Induktivität des Transformator-kerns in den verschiedenen Regionen, die in Abb. 2-46 (b) unterschieden werden, unterschiedlich ist (d. h. $L_0 \gg L_{sat}$), bleibt der Strom in der Induktivität, wenn der Transformator-kern in die Sättigung ein- und austritt, d. h. wenn sich der Arbeitspunkt zwischen den verschiedenen Regionen in Abb. 2-46 (b) bewegt, nicht in einer kohärenten Sinusform (in Abb. 2-46 (c)), wodurch ein breites Spektrum an Oberschwingungen entsteht.

2.4.1.2 Faktoren, die den Sättigungspegel des Transformators beeinflussen

Der Sättigungsgrad eines Transformators kann durch die Höhe der induzierten Einschaltströme charakterisiert werden. Die wichtigsten Faktoren, die die Höhe der Einschaltströme während des Einschaltens beeinflussen, sind [2.8] die folgenden:

- Transformator-Design
- Anfängliche Bedingungen
- Faktoren im Zusammenhang mit dem Netzwerk

Die Konstruktion eines Transformators bestimmt seinen Arbeitspunkt im stationären Zustand auf der Sättigungskurve (Abb. 2-46 (b)). Wie wir bereits gesehen haben, kann ein Transformator leicht in die Sättigung gebracht werden, wenn sein Arbeitspunkt in der Nähe des Knicks liegt (Region AB in Abb. 2-46 (b)).

Die Anfangsbedingungen, die die Grösse des Einschaltstroms beeinflussen, sind vor allem der Remanenzfluss und die Erregung am Punkt auf der Welle (POW, englisch: Point-on-Wave). Der Remanenzfluss ist der Fluss, der aufgrund eines früheren Entregungsvorgangs im Eisenkern des Transformators bestehen bleibt und den ursprünglichen DC-Offset des Flusses im Kern bestimmt. Er wird dem Strom hinzugefügt, um den Transformator weiter zu sättigen. Andererseits bestimmt der POW zum Zeitpunkt des Einschaltens die maximale Amplitude des Einschaltstroms.

Die Netzwerkfaktoren, die den Sättigungsgrad bestimmen, sind vor allem die Netztopologie und die Dämpfung. Wie in Kapitel 2 gezeigt, wurden für Szenario 3 mehrere Topologien identifiziert, die parallele Resonanzen bei Oberschwingungsfrequenzen niedrigerer Ordnung verursachen würden. Sobald diese Resonanzen aktiviert werden, ist mit grossen und kaum gedämpften TOVs zu rechnen. Als positiver Einflussfaktor sorgt eine ausreichende Dämpfung für die Dämpfung von Resonanzen, wodurch das transiente Verhalten des Netzes verbessert und ein stabiler Betrieb gewährleistet wird.

2.4.2 Methodik

Für einen gegebenen unbelasteten Transformator und die Netzbedingungen sind die Faktoren, welche die genauen TOVs bestimmen, auf die man treffen muss, auf den Remanenzfluss und die Zeitpunkte des Einschaltens des Leistungsschalters (POW) beschränkt. Um die ungünstigsten TOV-Szenarien zu finden, müssen verschiedene Variationen des Transformator-Remanenzflusses und der Einschaltzeitpunkte des Leistungsschalters untersucht werden. Beispiele von Varianten für den Transformator-Remanenzfluss und die Einschaltzeitpunkte des Leistungsschalters sind in Tabelle 2-23 und Tabelle 2-24 dargestellt.

Szenario	$\Phi_{0A}(\text{pu})$	$\Phi_{0B}(\text{pu})$	$\Phi_{0C}(\text{pu})$
1	0	0	0
2	0,8	-0,4	-0,4
3	0	0,8	-0,8
4	-0,8	0,4	0,4
5	0	-0,8	0,8
6	0,4	-0,2	-0,2
7	0	0,4	-0,4
8	-0,4	0,2	0,2
9	0	-0,4	0,4

Tabelle 2-23: Beispiel für eine Variation für den Remanenzfluss eines Transformators

Szenario	$t_{\text{close}}(\text{s})$
1	0,500
2	0,501
3	0,502
4	0,503
5	0,504
6	0,505
7	0,506
8	0,507
9	0,508
10	0,509
11	0,510
12	0,511
13	0,512

14	0,513
15	0,514
16	0,515
17	0,516
18	0,517
19	0,518
20	0,519

Tabelle 2-24: Beispiel für eine Variation für den Zeitpunkt, zu dem der Leistungsschalter geschlossen wird

Tabelle 2-23 listet 9 Varianten möglicher Werte für den Remanenzfluss des Transformators auf, und Tabelle 2-24 gibt 20 mögliche Zeitpunkte für das Schliessen des Leistungsschalters in einem 50-Hz-Zyklus an. Es sei darauf hingewiesen, dass das Beispiel von Tabelle 2-24 davon ausgeht, dass alle drei Phasen des Leistungsschalters zum selben Zeitpunkt und zwischen [0.50s, 0.52s] geschlossen werden.

Anstatt die 180 Simulationen mit dem Ziel durchzuführen, das für die TOVs ungünstigste Szenario zu finden, konzentriert sich diese Arbeit mehr auf den Vergleich der transienten Netzleistung zwischen den drei verschiedenen Kabelszenarien beim Einschalten der Transformatoren unter bestimmten ungünstigen Netzbedingungen. Diese ungünstigen Bedingungen sind folgende:

- SCL niedrig
- Ausfallvariante N-1 (und N-2), wie sie in den kritischen Fällen in Abschnitt 2.2.2.1 identifiziert wurden und zu parallelen Resonanzen niedrigerer Ordnung führen
- Der Leistungsschalter schliesst beim Nulldurchgang der Spannung der a-Phase mit einem maximalen Remanenzfluss auf der a-Phase, was zu einer tiefen Sättigung führt.

Die folgenden Remanenzflüsse wurden berücksichtigt:

$\Phi_{0A}(\text{pu})$	$\Phi_{0B}(\text{pu})$	$\Phi_{0C}(\text{pu})$
0,8	-0,4	-0,4

Je nach gewähltem Remanenzfluss werden die Schliesszeiten der folgenden Unterbrecher so angewendet, dass die Phase a beim Nulldurchgang der Spannung geschlossen wird:

t_A (s)	t_B (s)	t_C (s)
0,115375	0,115375	0,115375

2.4.3 Ergebnisse und Diskussionen

Aus den durchgeführten Studien lassen sich die folgenden zwei Hauptschlussfolgerungen ziehen:

- Kritische TOVs aufgrund von Parallelresonanz in Szenario 3 sind zu erwarten, wenn Transformatoren an Stellen im Netz eingeschaltet werden, an denen potenzielle Risiken von Parallelresonanz aus Studien zu Frequenz-Scans identifiziert wurden, wie z. B. 380 kV Romanel und 380 kV Magadino (gemäss Abschnitt 2.2.2.1). Eine Verringerung der Anzahl der Kabelprojekte, wie in Szenario 2, kann jedoch die potenziellen Probleme, die durch TOVs verursacht werden, erheblich mindern (siehe Abschnitt 2.4.3.1).
- Die Kurzschlussleistung einer Stelle im Netz (Knotenpunkt) spielt eine wichtige Rolle für die Auswirkungen der Integration von Kabeln in der Nähe. Eine intensive Verkabelung in der Nähe eines schwachen Knotens (Ort im Netz mit geringer Kurzschlussleistung) erhöht tendenziell das Risiko schwerer und schlecht gedämpfter TOVs während der Netztransienten erheblich, während die Auswirkungen einer intensiven Verkabelung um einen starken Knoten (Ort im Netz mit hoher Kurzschlussleistung) in der Regel abgeschwächt oder weniger stark ausgeprägt sind. Daher könnte die Kurzschlussleistung an einer bestimmten Stelle des Netzwerks als Kriterium dafür dienen, ob ein Verkabelungsprojekt problemlos umgesetzt werden kann oder ob zusätzliche dynamische Studien erforderlich sind. Dies wurde in der Zusatzstudie nachgewiesen (siehe Abschnitt 2.4.3.2).

Die beiden oben genannten Hauptschlussfolgerungen werden in den jeweiligen Abschnitten weiter ausgeführt.

2.4.3.1 Kritische Fälle von TOV

Gemäss den Ergebnissen von 2.2.2.1 in Kapitel 2 wurden die folgenden Fälle aus Szenario 3 zum Einschalten des Transformators realisiert, in denen kritische Fälle von TOV, die durch Parallelresonanz verursacht werden, zu erwarten sind:

Standort des Transformators	Ort des Einschaltens	Kontingenz	Parallele Netzresonanz
Romanel	380 kV Romanel	(Fall 6) N-2 bei 380 kV Romanel – Bois Tollot und La Bâtiaz – Chamoson	Oberschwingung 2
Romanel	380 kV Romanel	(Fall 5) N-1 bei 380 kV La Bâtiaz – Chamoson	Oberschwingung 2
Magadino	380 kV Magadino	(Fall 1) N-1 bei 380 kV Magadino – Lavorgo	Oberschwingung 2

Vergleiche mit Szenario 2 mit weniger Verkabelungsprojekten werden bereitgestellt, um die Verbesserung der Systemleistung bei geringeren Verkabelungsgraden zu demonstrieren.

2.4.3.1.1 Einschalten des 380-kV-Transformators Romanel mit Leitungsausfall N-2 (Fall 6)

2.4.3.1.1.1 Szenario 3

Zunächst zur Erinnerung: Die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für den entsprechenden Leitungsausfall N-2 (Fall 6) sowie die Impedanzamplitude nahe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 sind in Abb. 2-47 dargestellt.

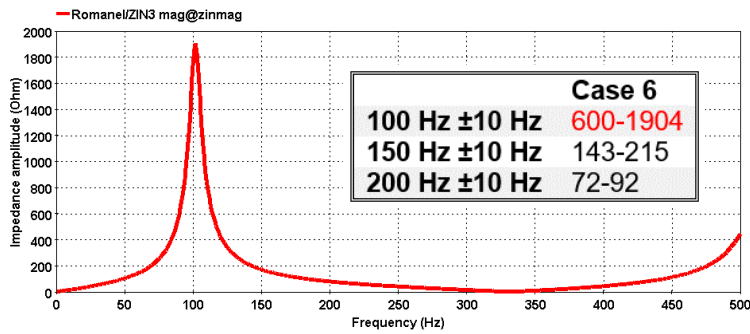
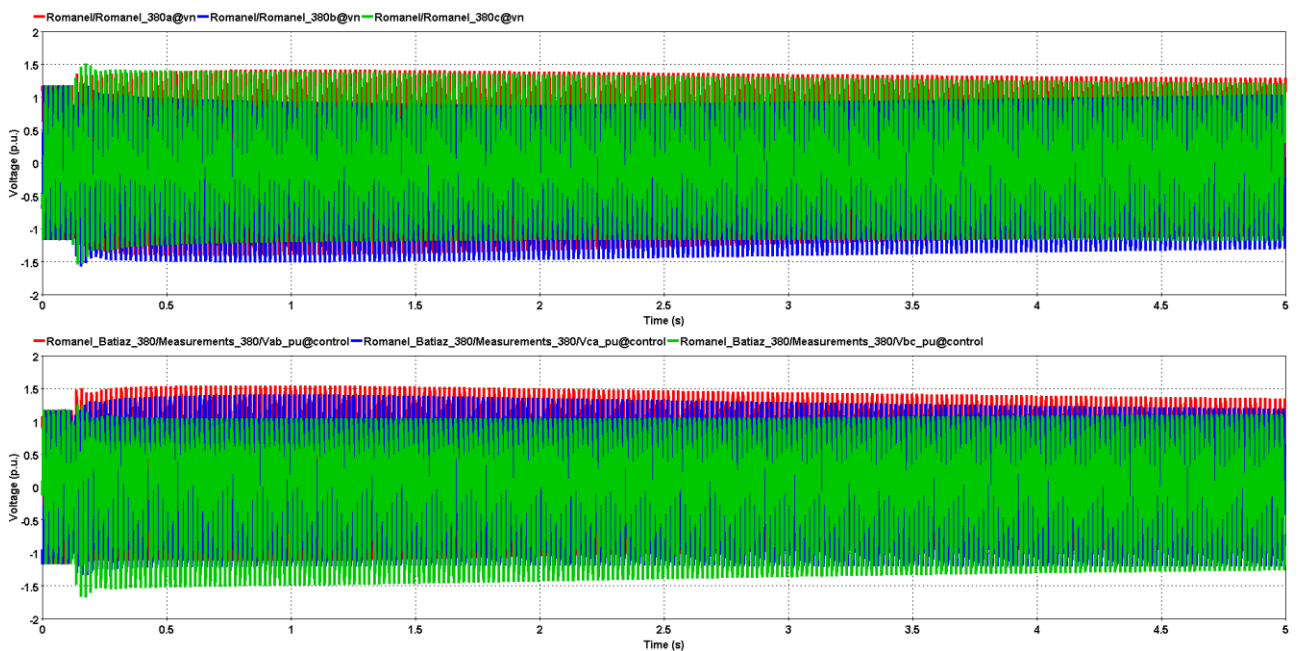


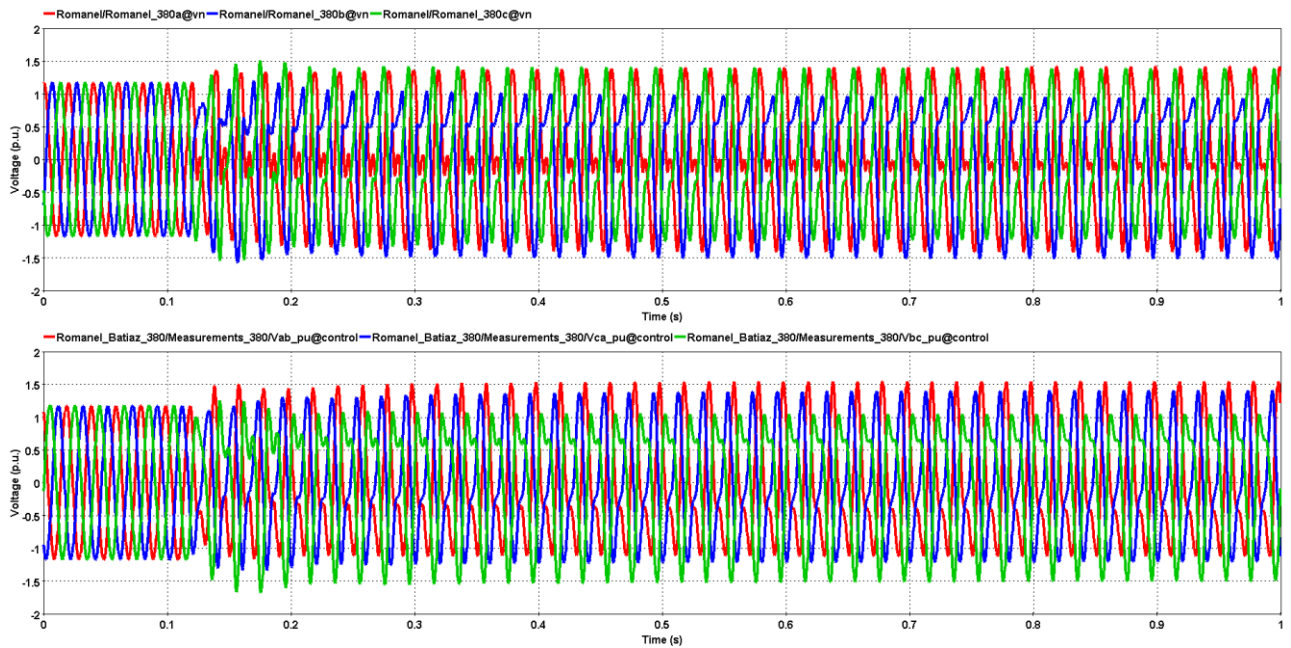
Abb. 2-47: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für Fall 6 (Leitungsausfall N-2) sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der niederrangigen Oberschwingungen

Wie in Kapitel 2, Abschnitt 2.2.2.1.1 erläutert, können die TOVs, die durch die Anregung der Parallelresonanz zur Oberschwingung 2 verursacht werden, während des Einschaltens des Transformators 380 kV Romanel unter den betrachteten Netzbedingungen erwartet werden.

Die Phase-Erde-Spannungen (oben) und die Phase-Phase-Spannungen (unten) bei 380 kV Romanel für die ersten 5 Sekunden und für die erste Sekunde der Simulation sind in Abb. 2-48 dargestellt.



(a)



(b)

Abb. 2-48: Phase-Erde-Spannungen und Phase-Phase-Spannungen bei 380 kV Romanel – Fall 6, Szenario 3, (a) für die ersten 5 Sekunden der Simulation, (b) für die erste Sekunde der Simulation

Anmerkungen: Starke Oberschwingungsverzerrungen der TOVs können nach dem Schliessen des Leistungsschalters beobachtet werden. Die maximale Amplitude der Phase-Erde- und Phase-Phase-Spannungen beträgt mehr als 1,5 pu. Dieser Fall ist äusserst kritisch, da die hohen und schlecht gedämpften TOVs voraussichtlich erhebliche dielektrische und thermische Belastungen auf die Ausrüstung und die Isolierung des Netzes in der Nähe von 380 kV Romanel ausüben werden.

Der Einschaltstrom des Transformators für die erste Sekunde der Simulation sowie seine Oberschwingungskomponenten (aus der Fourier-Analyse) für das Intervall [0,2s, 1,0s] sind in Abb. 2-49 dargestellt.

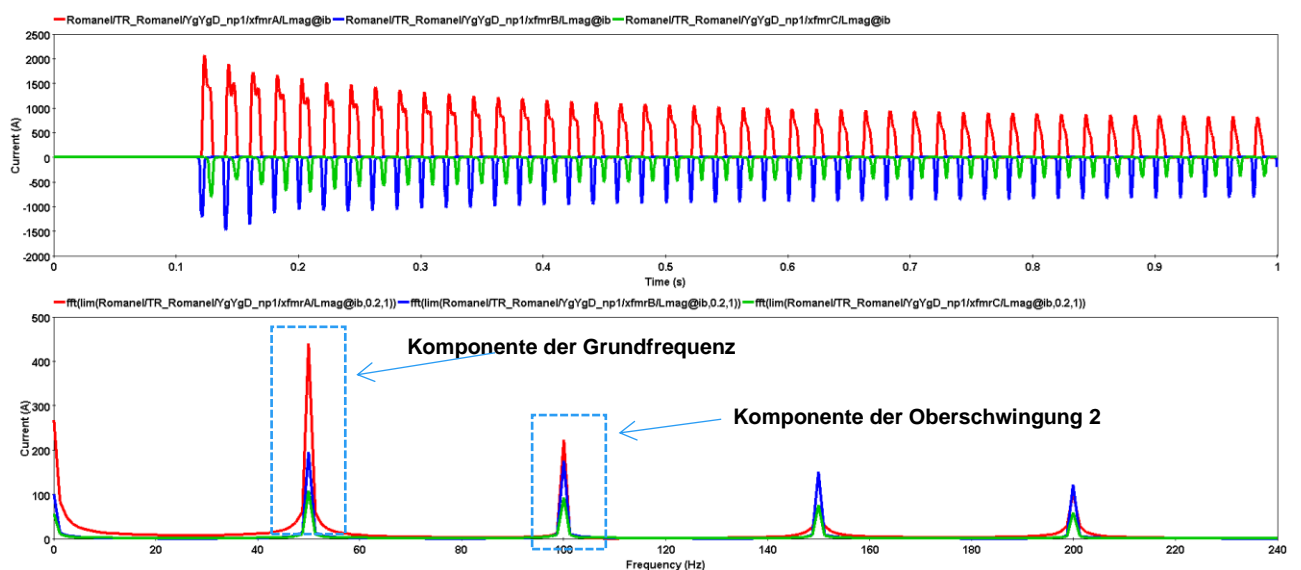


Abb. 2-49: Einschaltstrom des Transformators und seine Oberschwingungskomponenten während des Intervalls von [0,2s, 1,0s]

Anmerkungen: Zunächst einmal hat der Einschaltstrom der Phase a, wie in Abb. 2-49 gezeigt, bei der Grundfrequenz eine maximale Amplitude. Dies ist sinnvoll, da der Zeitpunkt für das Schliessen des Leistungsschalters beim Nulldurchgang der Spannung zwischen Phase a und Erde gewählt wird.

Zweitens nimmt die Amplitude des Einschaltstroms mit zunehmender Ordnung der Oberschwingungen ab (in der Regel ist die Abnahme proportional zu $1/n$ [2.1]). Dies deutet darauf hin, dass die Komponente der Oberschwingung 2 durch die Parallelresonanz verstärkt wird, was zu den schweren TOVs führt, die in Abb. 2-48 beobachtet werden. Um diesen Punkt weiter zu validieren, wurde eine Fourier-Analyse der dreiphasigen Erdspannungen bei 380 kV Romanel für das Intervall [0,2s, 1,0s] durchgeführt, wie in Abb. 2-50 gezeigt wird.

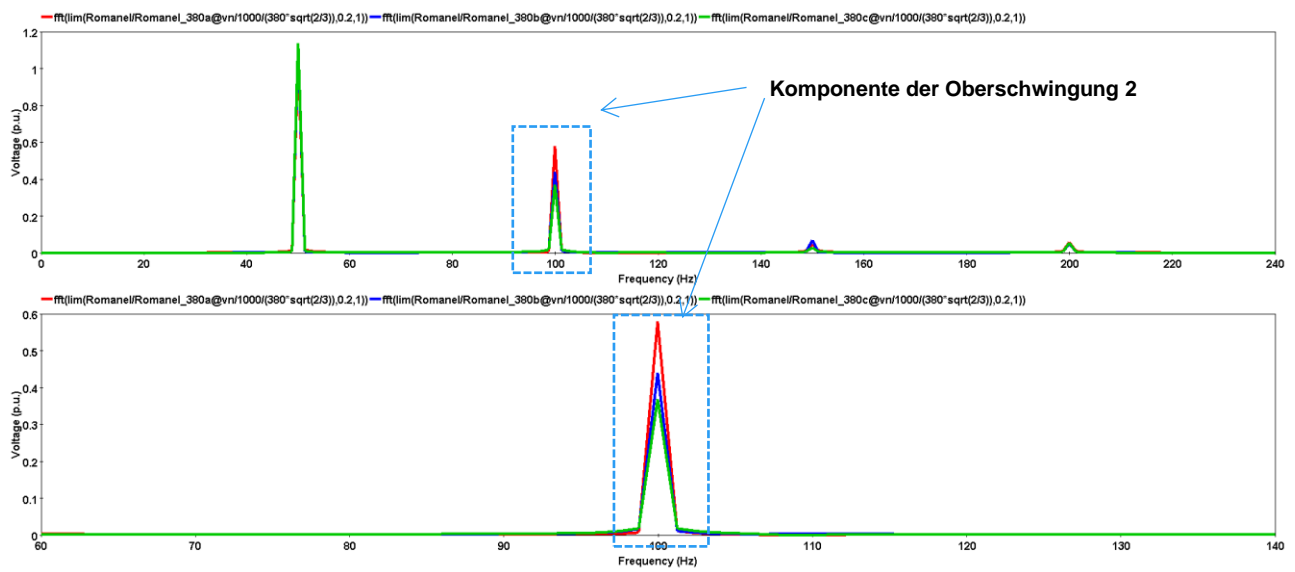


Abb. 2-50: Oberschwingungsanteile der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel für das Intervall von [0.2s, 1.0s]

Anmerkungen: Die Abb. 2-50 zeigt die Oberschwingungskomponenten der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel bis zur Oberschwingung 4, während die Komponente der Oberschwingung 2 in der unteren Abbildung herangezoomt ist.

Von allen Oberschwingungskomponenten des Einschaltstroms (trotz abnehmender Amplitude mit zunehmender Oberschwingungsordnung), die in Abb. 2-49 gezeigt werden, ist es die Komponente der Oberschwingung 2, die durch die Netzresonanz verstärkt wird, was zu einer ausreichend hohen Komponente der Oberschwingung 2 in der Abschlussspannung führt, die die beobachteten verzerrten und schlecht gedämpften TOVs verursacht.

2.4.3.1.1.2 Vergleich der Szenarien 2 und 3

Um zu prüfen, ob die Netzleistung bei transienten Ereignissen wie dem Einschalten von Transformatoren mit weniger Kabeln im Bereich 380 kV Romanel verbessert werden kann, werden auch für Szenario 2 Simulationen im Zeitbereich durchgeführt und die Ergebnisse mit denen von Szenario 3 verglichen. Beachten Sie, dass der Vergleich nur zwischen Szenario 2 und 3 durchgeführt wird, da die harmonische Impedanz bei 380 kV Romanel für die in Szenario 1 gegebenen Netzbedingungen die gleiche ist wie in Szenario 2.

Zunächst werden die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für die Szenarien 2 und 3 für den entsprechenden Leitungsausfall N-2 (Fall 6) sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 in Abb. 2-51 dargestellt.

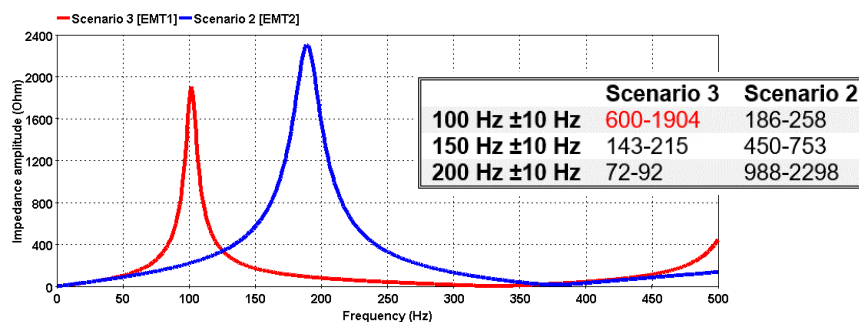


Abb. 2-51: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für Fall 6 (Leitungsausfall N-2) sowie die Impedanzamplitude nahe den niederrangigen Oberschwingungen für die Szenarien 2 und 3

Die Streichung der beiden Kabelprojekte nahe 380 kV Romanel in Szenario 2 verschiebt die Parallelresonanz erheblich in Richtung höherer Frequenzen, was im Vergleich zu Szenario 3 zu unkritischen Impedanzwerten um die Oberschwingungen 2, 3 und 4 führt. Hohe TOVs, die die Isolierung und die Netzausrüstung belasten oder gar beschädigen könnten, sind beim Einschalten des 380-kV-Transformators unter den betrachteten Netzbedingungen nicht zu erwarten.

Die Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel für die Szenarien 3 und 2 während der ersten Sekunde der Simulation sind in Abb. 2-52 dargestellt.

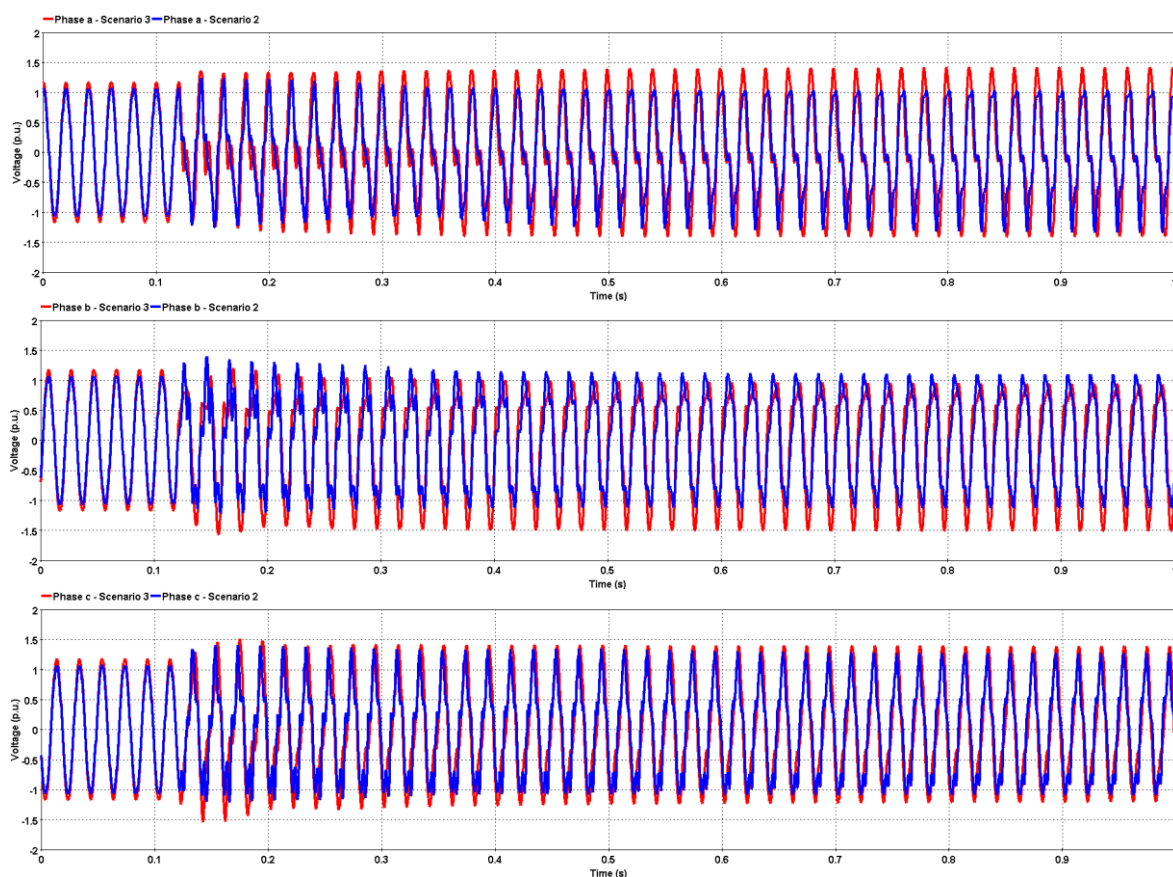


Abb. 2-52: Phase-Erde-Spannungen in 380 kV Romanel – Fall 6, Szenarien 2 und 3 für die erste Sekunde der Simulation

Anmerkungen: Wie wir im Abschnitt 2.4.3.1.1.1 gesehen haben, können in Szenario 3 (rot) stark durch Oberschwingungen verzerrte und schlecht gedämpfte TOVs beobachtet werden, die 1,5 pu überschreiten. Die Entfernung der Kabelsysteme in Szenario 2 bei 380 kV Romanel führt jedoch zu stark gedämpften TOVs, wobei die maximale Amplitude 1,2 pu erreicht und schnell abnimmt, was das Risiko von dielektrischem und thermischem Stress auf die Ausrüstung und die Netzisolierung (blau) erheblich reduziert.

Darüber hinaus wird ein Vergleich der Fourier-Analyse der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel zwischen den Szenarien 2 und 3 in Abb. 2-53 dargestellt.

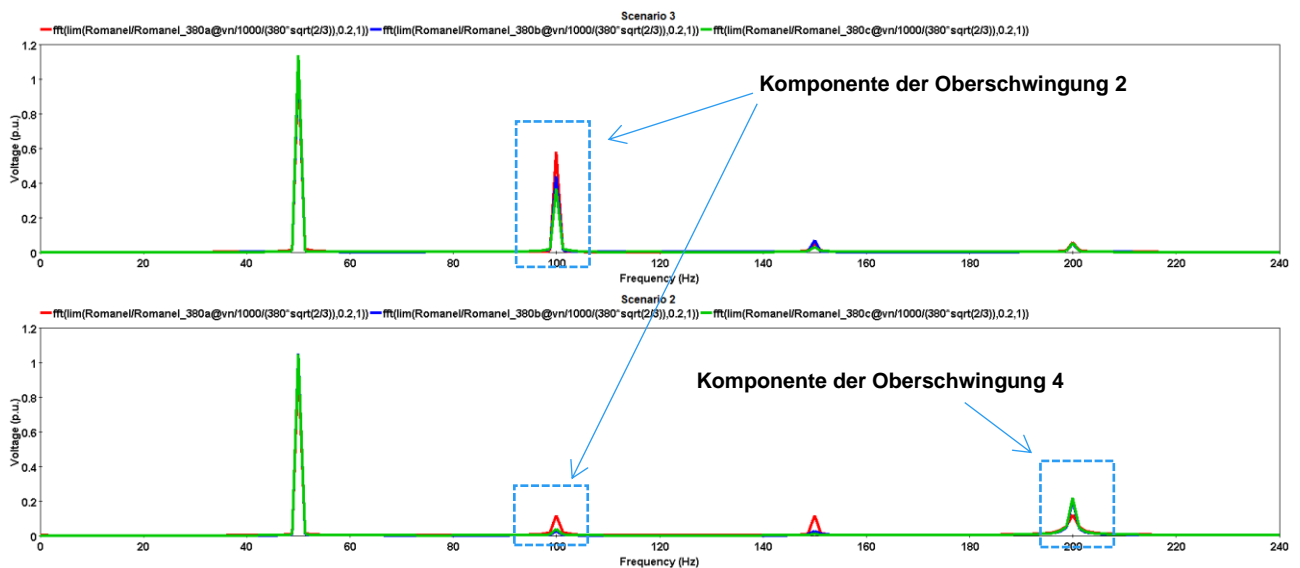


Abb. 2-53: Vergleich der Oberschwingungsanteile der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel zwischen den Szenarien 2 und 3

Anmerkungen: Im Vergleich zu Szenario 3 ist die Komponente der Oberschwingung 2 der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel in Szenario 2 stark reduziert, was die beobachteten gedämpften TOVs in der Endspannung erklärt. Da sich die Parallelresonanz des Netzes jedoch in Richtung der Oberschwingung 4 verschiebt, kann in Szenario 2 eine leicht ausgeprägte Komponente der Oberschwingung 4 beobachtet werden. Aufgrund der höheren Ordnung und der unzureichenden Impedanzamplitude bei der Oberschwingung 4 (siehe Abb. 2-51) werden die resultierenden TOVs als unkritisch angesehen und stellen daher ein geringeres Risiko für dielektrische und thermische Belastungen der Geräte und der Netzisolierung dar.

2.4.3.1.2 Einschalten des 380-kV-Transformators Romanel mit Leitungsausfall N-1 (Fall 5)

2.4.3.1.2.1 Szenario 3

Wie im vorherigen Fall, zur Erinnerung, die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für die entsprechende Ausfallvariante N-1 (Fall 5) sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 sind in Abb. 2-54 dargestellt.

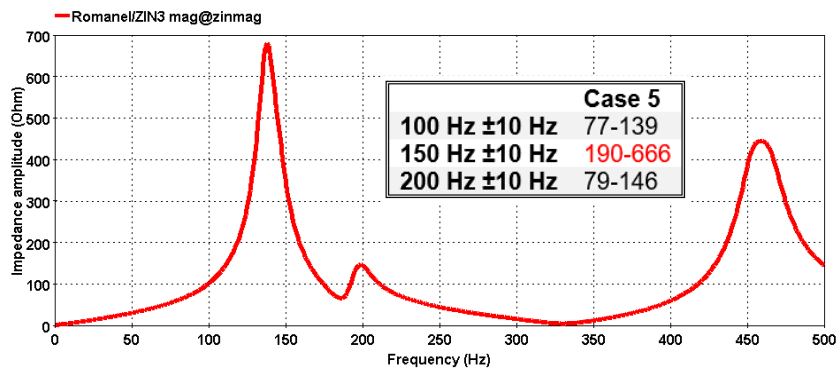
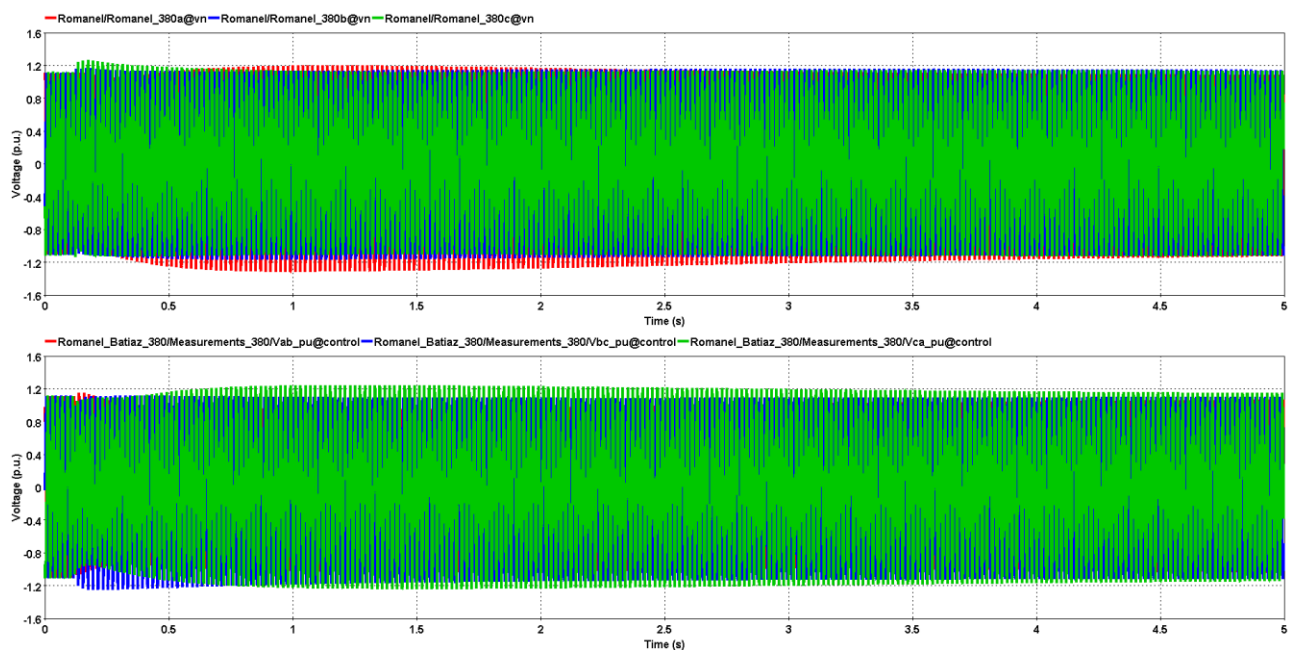


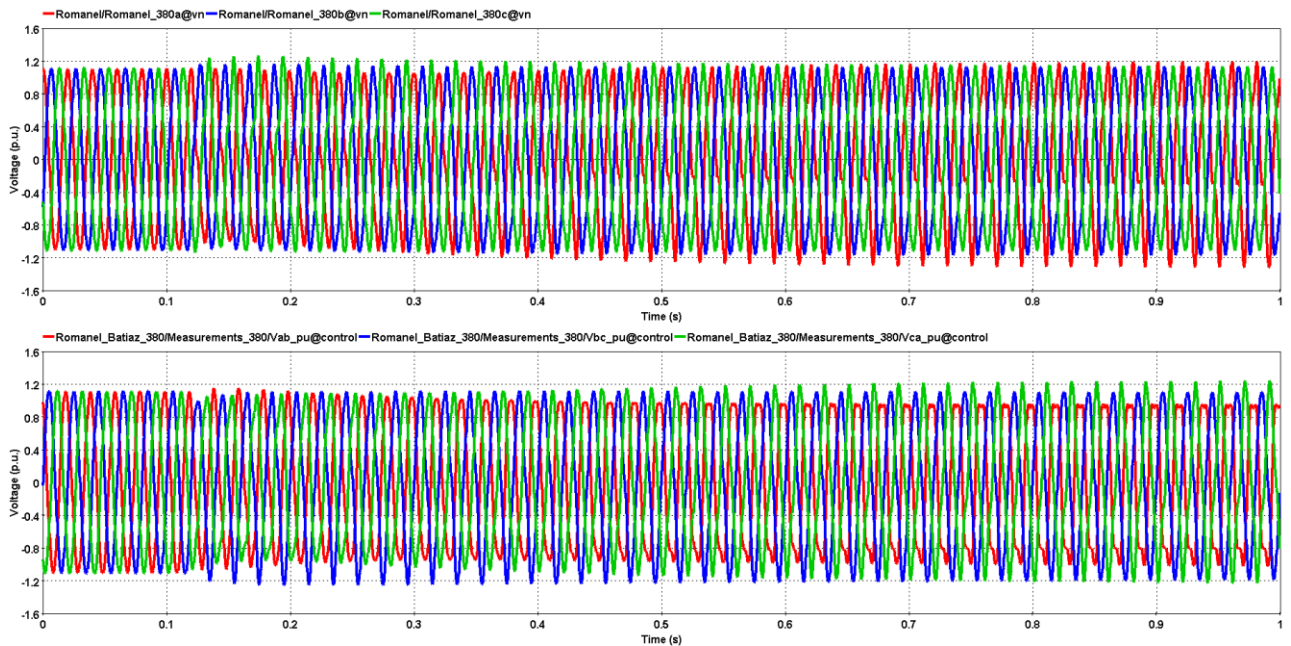
Abb. 2-54: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für Fall 5 (Leitungsausfall N-1) sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der niederrangigen Oberschwingungen

Gemäss Kapitel 2, Abschnitt 2.2.2.1.1, können TOVs, die durch die Anregung der Parallelresonanz zur Oberschwingung 3 verursacht werden, während des Einschaltens des 380-kV-Transformators Romanel unter den betrachteten Netzbedingungen erwartet werden.

Die Phase-Erde-Spannungen (oben) und die Phase-Phase-Spannungen (unten) bei 380 kV Romanel für die ersten 5 Sekunden und für die erste Sekunde der Simulation sind in Abb. 2-55 dargestellt.



(a)



(b)

Abb. 2-55: Dreiphasige Spannungen Phase-Erde und Phase-Phase-Spannungen bei 380 kV Romanel – Fall 5, Szenario 3, (a) für die ersten 5 Sekunden der Simulation, (b) für die erste Sekunde der Simulation

Anmerkungen: Verzerrte TOVs können nach dem Schliessen des Leistungsschalters beobachtet werden. Die maximale Amplitude der Phase-Erde-Spannung erreicht 1,32 pu, während die Phase-Phase-Spannung eine maximale Amplitude von 1,26 pu hat. TOVs sind mässig gedämpft, was potenzielle Risiken durch dielektrischen und thermischen Stress für die Ausrüstung und Isolation in der Nähe birgt.

Der Einschaltstrom des Transformators für die erste Sekunde der Simulation sowie seine Oberschwingungskomponenten (aus der Fourier-Analyse) für das Intervall von [0.2s, 1.0s] sind in Abb. 2-56 dargestellt.

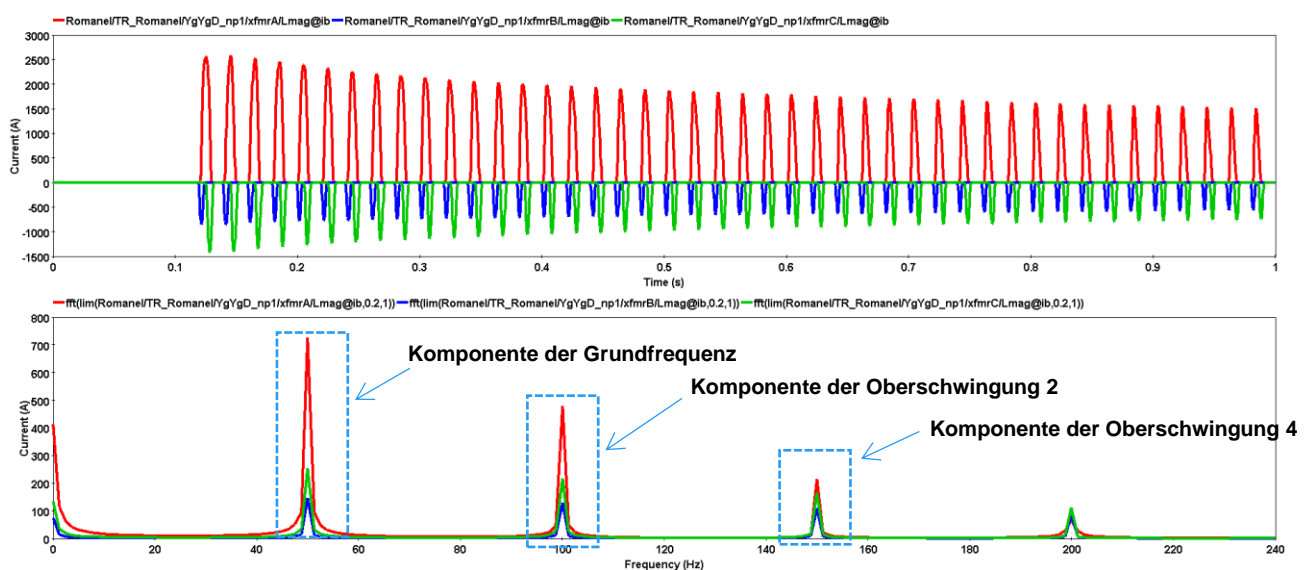


Abb. 2-56: Einschaltstrom des Transformators und seine Oberschwingungskomponenten während des Intervalls von [0.2s, 1.0s]

Anmerkungen: Wie im vorherigen Fall (Szenario 3) hat der Einschaltstrom der Phase a bei der Grundfrequenz eine maximale Amplitude. Dies ist sinnvoll, da der Zeitpunkt für das Schliessen des Leistungsschalters beim Nulldurchgang der Spannung zwischen Phase a und Erde gewählt wird.

Zweitens nimmt, wie wir im vorherigen Fall gesehen haben, die Amplitude des Einschaltstroms ab, wenn die Ordnung der Oberschwingung zunimmt (in der Regel ist die Abnahme proportional zu $1/n$ [2.1]). In diesem Fall ist es die Komponente der Oberschwingung 3, die durch die Parallelresonanz der Netzwerkkonfiguration um die Oberschwingung 3 verstärkt wird, was zu den beobachteten TOVs in Abb. 2-55 führt. Um dies zu validieren, wird eine Fourier-Analyse der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel für das Intervall von [0.2s, 1.0s] durchgeführt, wie in Abb. 2-57 gezeigt wird.

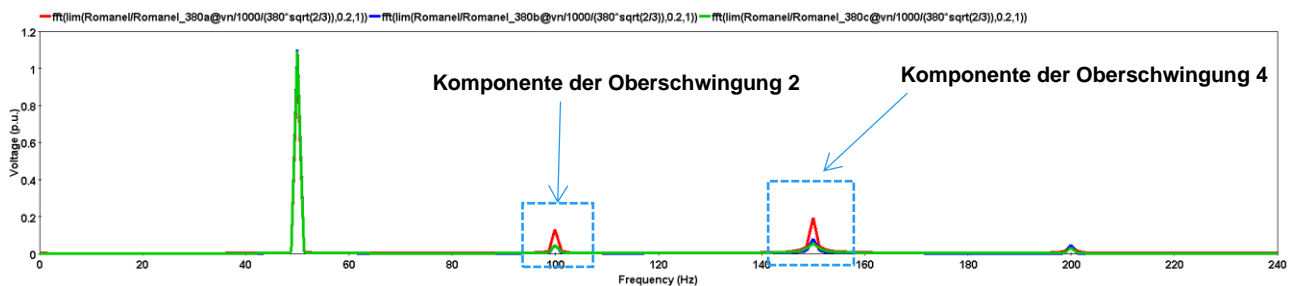


Abb. 2-57: Oberschwingungsanteile der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel für das Intervall von [0.2s, 1.0s]

Anmerkungen: Obwohl die Komponente der Oberschwingung 2 des Einschaltstroms eine grössere Amplitude hat, ist es die Komponente der Oberschwingung 3, die durch die Netzimpedanz bei der Netzresonanz verstärkt wird, die in der 380-kV-Endspannung Romanel eine wesentlich höhere Amplitude hat.

2.4.3.1.2.2 Vergleich der Szenarien 2 und 3

Es wird ein Vergleich zwischen den Szenarien 2 und 3 angestellt, um zu zeigen, dass die Netzleistung bei vorübergehenden Ereignissen wie dem Einschalten eines Transformators mit weniger Kabeln in dem Gebiet verbessert werden kann. Wiederum wird nur zwischen den Szenarien 2 und 3 verglichen, da die harmonische Impedanz bei 380 kV Romanel für die in Szenario 1 gegebenen Netzbedingungen recht ähnlich ist wie in Szenario 2.

Zunächst werden die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für die Szenarien 2 und 3 für den entsprechenden Leitungsausfall N-1 (Fall 5) sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 in Abb. 2-58 dargestellt.

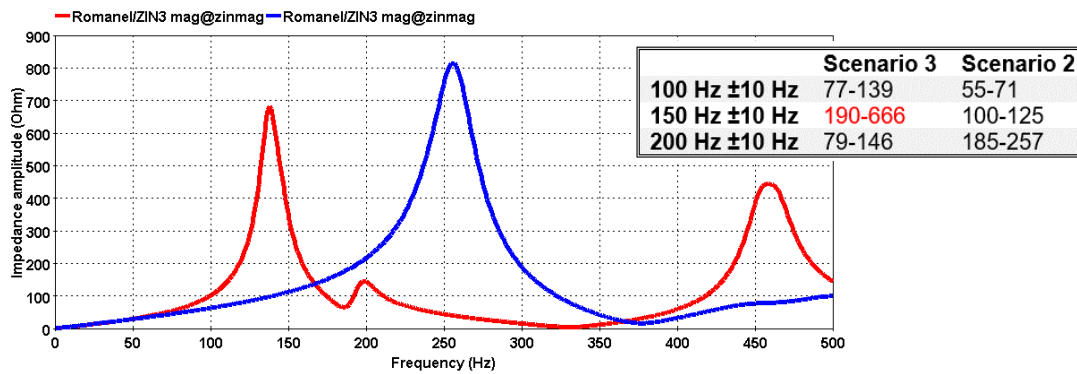


Abb. 2-58: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für Fall 5 (Ausfallvariante N-1) sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der niederrangigen Oberschwingungen für die Szenarien 2 und 3.

Die Streichung der beiden Kabelprojekte nahe 380 kV Romanel in Szenario 2 verschiebt die Parallelresonanz erheblich in Richtung höherer Frequenzen, was im Vergleich zu Szenario 3 zu unkritischen Impedanzwerten um die Oberschwingungen 2, 3 und 4 führt. Es ist nicht zu erwarten, dass beim Einschalten des Transformators bei 380 kV Romanel unter den geplanten Netzbedingungen hohe, belastende TOVs auftreten oder dass die Isolierung und die Netzausrüstung beschädigt werden.

Die Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel für die Szenarien 3 und 2 während der ersten Sekunde der Simulation sind in Abb. 2-59 dargestellt.

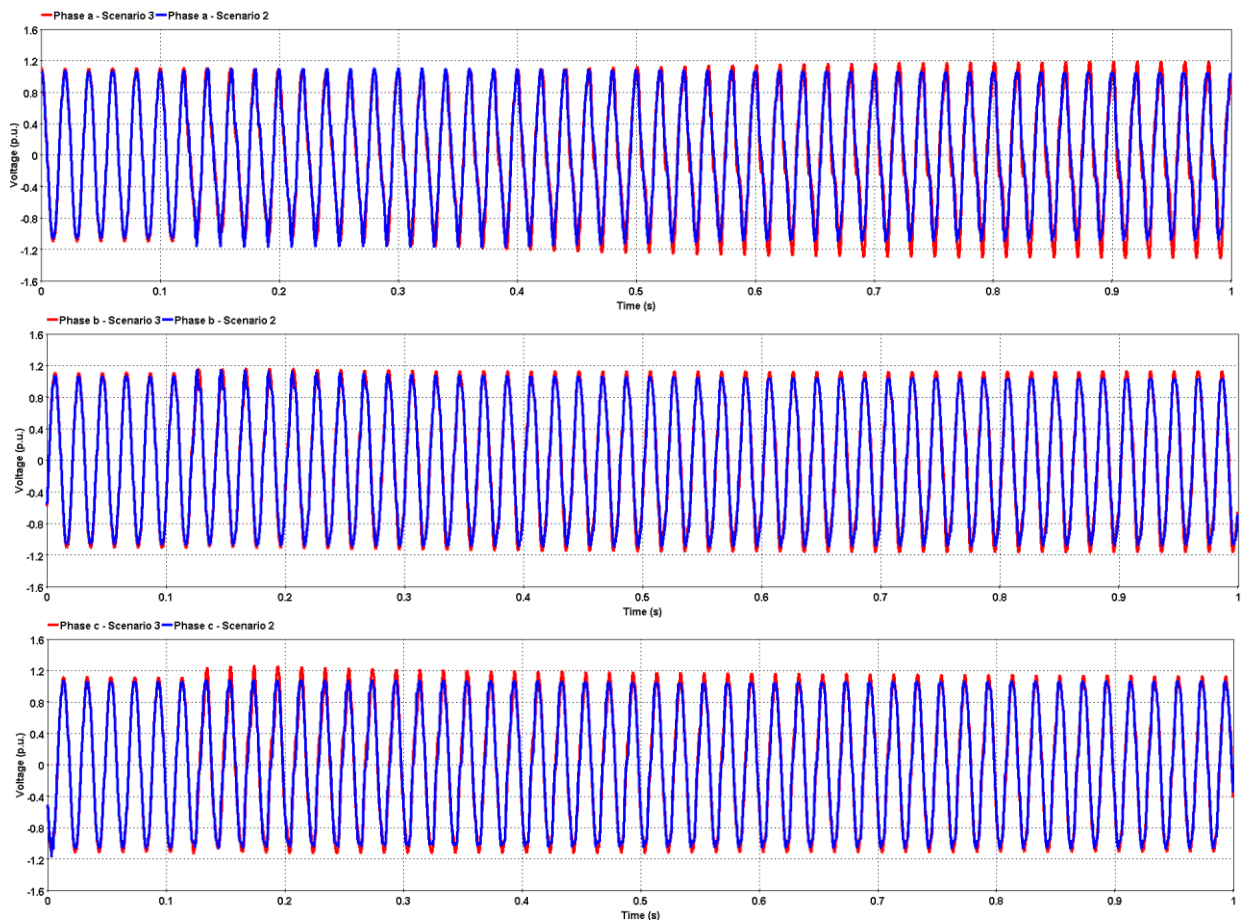


Abb. 2-59: Phase-Erde-Spannungen in 380 kV Romanel – Fall 5, Szenarien 2 und 3 für die erste Sekunde der Simulation

Anmerkungen: Wie in Abschnitt 2.4.3.1.2.1 beschrieben, können in Szenario 3 verzerrte und mässig gedämpfte TOVs von bis zu 1,32 pu beobachtet werden. Die Entfernung der Kabelsysteme in Szenario 2 nahe 380 kV Romanel führt jedoch zu stark gedämpften TOVs mit der maximalen Amplitude, die 1,18 pu erreicht und schnell abnimmt, was das Risiko von dielektrischem und thermischem Stress auf die Ausrüstung und die Netzisolierung erheblich reduziert.

Darüber hinaus wird ein Vergleich der Fourier-Analyse der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel zwischen den Szenarien 2 und 3 in Abb. 2-60 dargestellt.

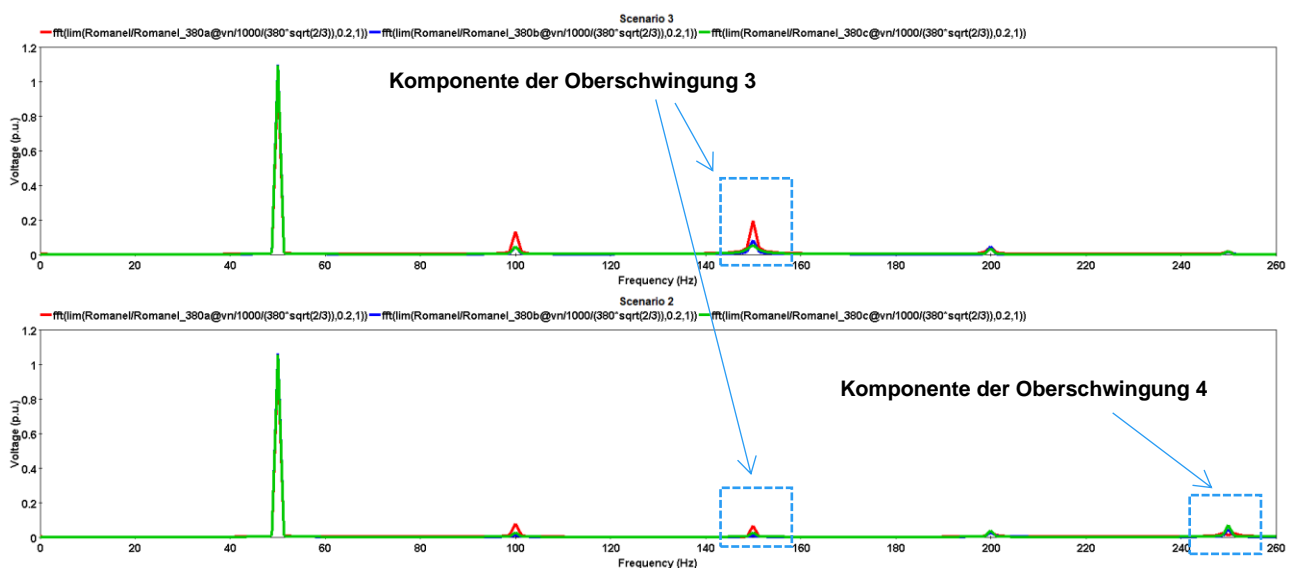


Abb. 2-60: Vergleich der Oberschwingungsanteile der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel zwischen den Szenarien 2 und 3

Anmerkungen: Im Vergleich zu Szenario 3 ist die Komponente der Oberschwingung 3 der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel in Szenario 2 stark reduziert, was die beobachteten gedämpften TOVs in der Endspannung erklärt. Da sich die Parallelresonanz des Netzes jedoch in Richtung der Oberschwingung 5 verschiebt, kann in Szenario 2 eine leicht ausgeprägte Komponente der Oberschwingung 5 in der Abschlussspannung beobachtet werden. Aufgrund der relativ höheren Ordnung und der unzureichenden Impedanzamplitude bei der Oberschwingung 5 (siehe Abb. 2-58) werden die resultierenden TOVs als unkritisch angesehen und stellen daher ein geringeres Risiko für dielektrische und thermische Belastungen der Geräte und der Netzisolierung dar.

2.4.3.1.3 Einschalten des Transformators bei 380 kV Magadino mit Ausfallvariante N-1

Die Ausfallvariante N-1 isoliert 380 kV Magadino vom Swissgrid Netz und lässt es nur mit dem italienischen Netz verbunden, das durch ein Thévenin-Äquivalent repräsentiert wird. Da das Thévenin-Äquivalent nicht detailliert genug ist, um die tatsächliche Netzdynamik darzustellen, wird in diesem Abschnitt nur ein Vergleich der Netzleistung zwischen den Szenarien 2 und 3 vorgenommen, um zu zeigen, dass die Entfernung des Kabels in 380 kV Magadino – Musignano die Systemleistung verbessert und einen stabilen und sicheren Netzbetrieb gewährleistet.

Zunächst werden die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Magadino für die Szenarien 2 und 3 für die entsprechende Ausfallvariante N-1 (Fall 2) sowie die Impedanzamplitude nahe der Oberschwingungen 2, 3, und 4 in Abb. 2-61 dargestellt.

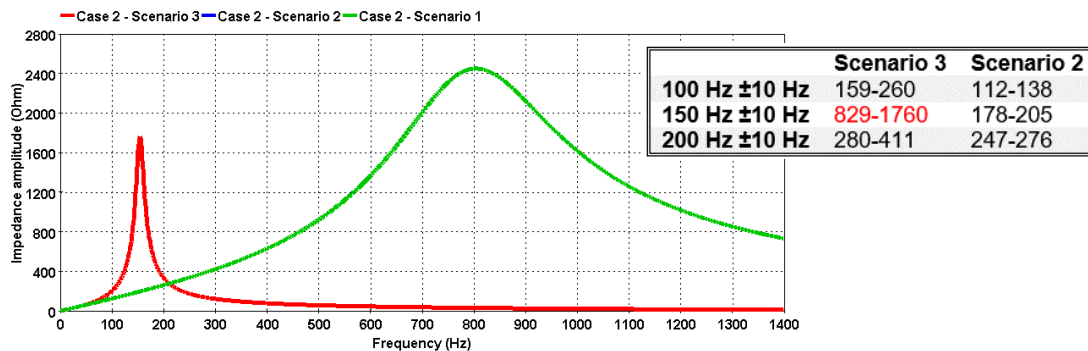


Abb. 2-61: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Magadino für Fall 2 (Ausfallvariante N-1) sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der niederrangigen Oberschwingungen für die Szenarien 2 und 3

Mit der Einbeziehung des 13 km langen Kabels bei 380 kV von Magadino nach 380 kV Musignano hat die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Magadino eine Parallelresonanz nahe der Oberschwingung 3 mit einer alarmierenden Impedanzamplitude von fast 1800 Ohm. Eine solche Amplitude deutet auf schwere TOV-Risiken hin, mit dem Potenzial, die Isolierung und die Netzausrüstung in der Nähe von 380 kV Magadino zu belasten und sogar zu beschädigen. Wenn jedoch die gesamte 19,29 km lange Übertragungsachse zwischen 380 kV Magadino und 380 kV Musignano aus Freileitungen besteht, verschiebt sich die Parallelresonanz in Richtung 800 Hz (d. h. Oberschwingung 16), die erheblich reduzierte Impedanzamplitude bei oder in der Nähe von Oberschwingungen niedrigeren Rangs impliziert ein viel geringeres Risiko für schwere TOVs unter denselben Netzbedingungen.

Die 380 kV Magadino Phase-Erde-Spannungen für die Szenarien 3 und 2 während der ersten Sekunde der Simulation sind in Abb. 2-62 dargestellt.

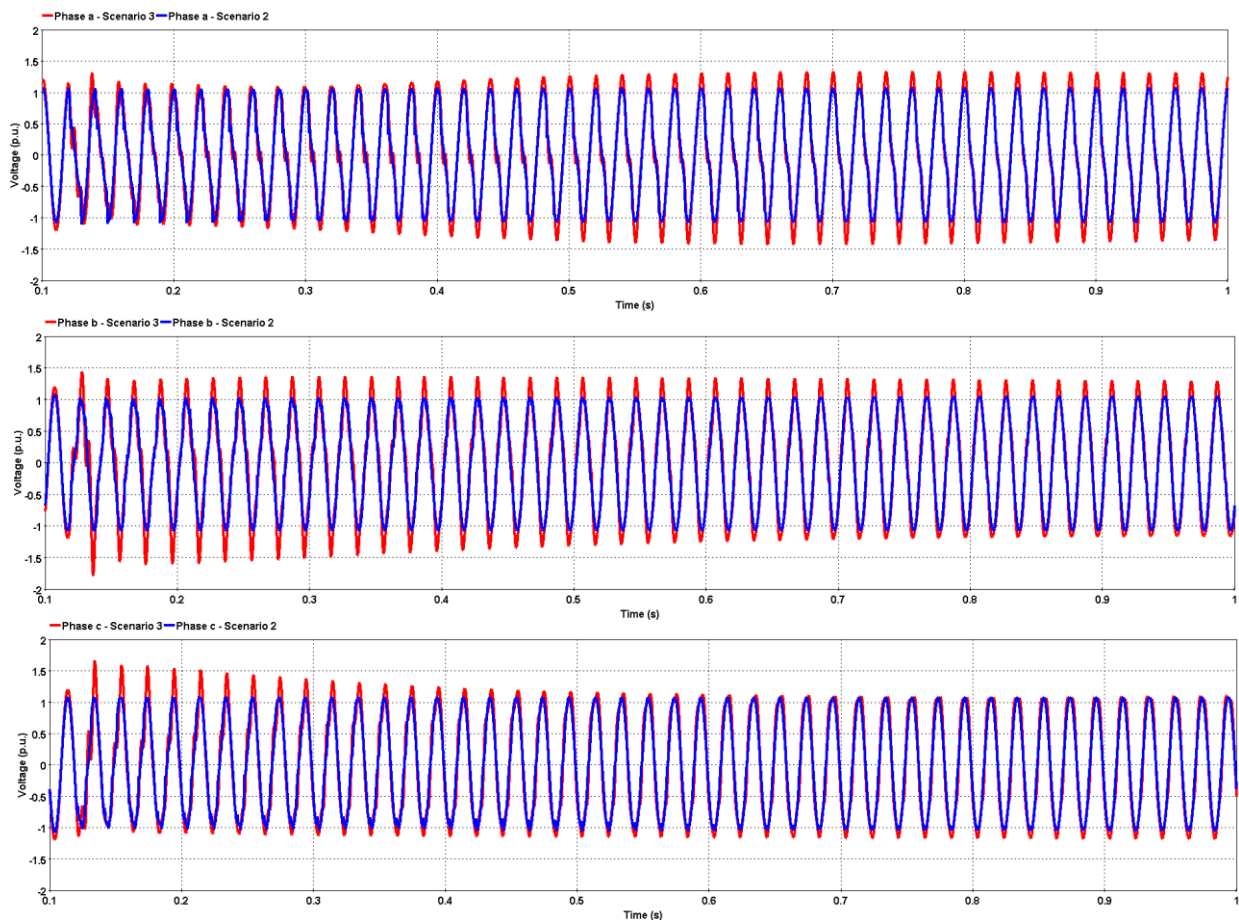


Abb. 2-62: 380 kV Magadino Phase-Erde-Spannungen – Fall 2, Szenarien 2 und 3 für die erste Sekunde der Simulation

Anmerkungen: Wie in Abb. 2-62 dargestellt, sind in Szenario 3 verzerrte und schlecht gedämpfte TOVs mit einer maximalen Amplitude von über 1,5 pu zu beobachten. Die Entfernung des Kabels bei 380 kV Magadino – Musignano in Szenario 2 nahe 380 kV Magadino führt jedoch zu stark gedämpften TOVs, wobei die maximale Amplitude nur 1,11 pu erreicht und schnell abklingt, was das Risiko dielektrischer und thermischer Belastungen für die Ausrüstung und die Netzisolierung erheblich reduziert.

Darüber hinaus wird ein Vergleich der Fourier-Analyse der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Magadino zwischen den Szenarien 2 und 3 in Abb. 2-63 dargestellt.

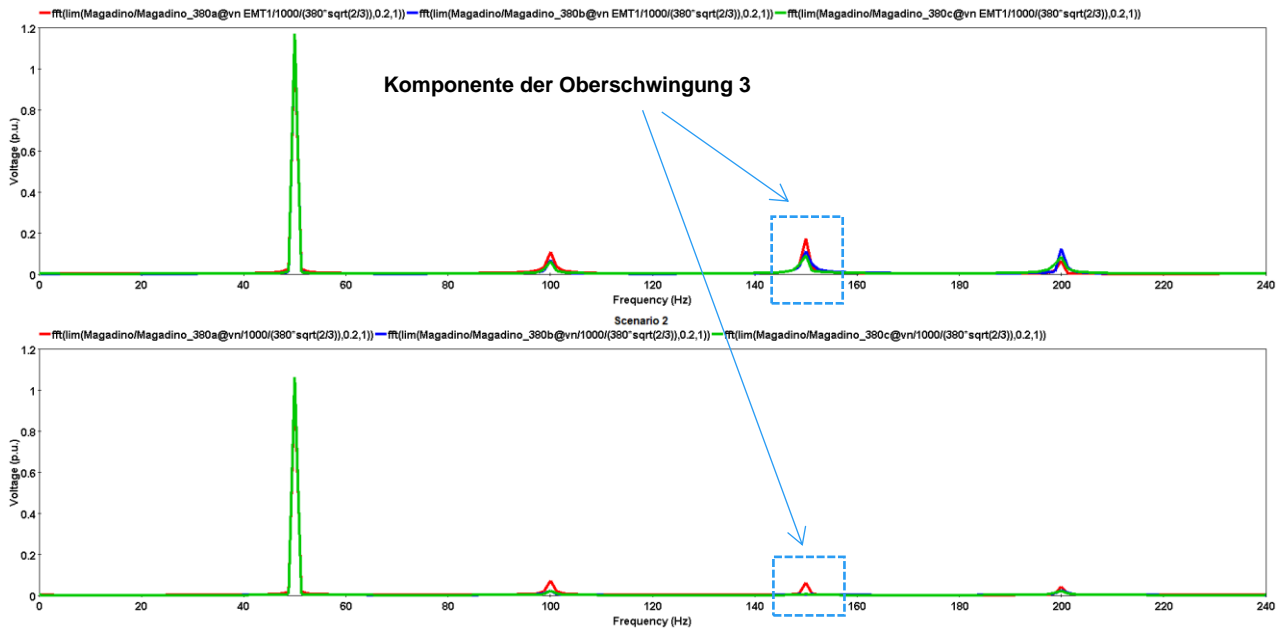


Abb. 2-63: Vergleich der Oberschwingungsanteile der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Magadino zwischen den Szenarien 2 und 3

Anmerkungen: Im Vergleich zu Szenario 3 ist die Komponente der Oberschwingung 3 der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Magadino in Szenario 2 stark reduziert, was die beobachteten gedämpften TOVs in der Endspannung erklärt.

2.4.3.2 Ergänzungsstudien – Auswirkungen einer intensiven Verkabelung in der Nähe von Knoten mit unterschiedlicher Kurzschlussleistung

Wenn das Netzwerk zu einem RLC-Netzwerk vereinfacht werden kann, wird seine parallele Resonanzfrequenz, die an einem bestimmten Ort beobachtet wird, durch die LC-Komponenten des Netzwerks definiert:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

wobei L umgekehrt proportional zur Kurzschlussleistung des Netzes an der betrachteten Stelle ist und C die Summe aller kapazitiven Elemente (wie z. B. Kabel) ist, die in der Nähe angeschlossen sind.

Es ist leicht zu verstehen, dass bei einer gegebenen Anzahl von Kabeln, die in der Nähe miteinander verbunden sind, die Resonanzfrequenz steigt, je höher die Kurzschlussleistung an einer bestimmten Stelle ist. Daher wären die Auswirkungen einer intensiven Verkabelung auf den Frequenzgang eines starken Knotens geringer als bei einem schwachen Knoten, wo eine Verschlechterung der Systemleistung zu erwarten ist.

Ausserdem deutet eine hohe Kurzschlussleistung auf eine höhere Netzdämpfung hin. Eine höhere Netzdämpfung ist ein Faktor, der negative Netzphänomene wie TOVs und Resonanzen abschwächt.

Der starke Einfluss der Kurzschlussleistung auf die Systemreaktion wurde in den Ergebnissen der drei analysierten Szenarien bestätigt. Daher wurde beschlossen, einen Schritt weiter zu gehen und den Umfang der Studie zu erweitern, indem die Kabelmenge in zwei Gebieten erhöht wurde, die in Szenario 3 bereits mit einer grossen Kabelmenge ausgestattet waren.

380 kV Romanel und 380 kV Laufenburg wurden ausgewählt, um diese These zu belegen. Die 380-kV-Kurzschlussleistung Romanel beträgt im Normalbetrieb 11 GVA, während die 380-kV-Kurzschlussleistung Laufenburg 43 GVA beträgt und damit eine der höchsten aller Unterwerke im Swissgrid Netz ist.

2.4.3.2.1 Einschalten des Transformators bei 380 kV Romanel mit intensiver Verkabelung

Die Integration von Kabeln in der Nähe von 380 kV Romanel in Szenario 3 ist in Abb. 2-64 dargestellt.

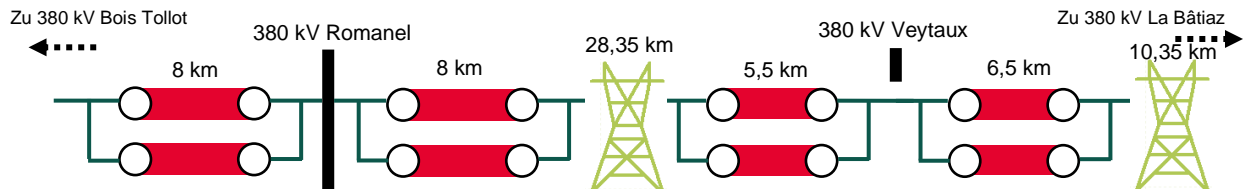


Abb. 2-64: Integration von 380-kV-Kabelsystemen in der Nähe von 380 kV Romanel

Die 58,7 km lange Übertragungsachse in Szenario 3 von 380 kV Romanel nach 380 kV La Bâtiaz ist eine gemischte Leitungs-/Kabelverbindung mit insgesamt 40 km Kabel (zwei Kabel pro Phase). Kritische TOVs wurden beim Einschalten des Transformators bei 380 kV Romanel unter N-1 (Abschnitt 2.4.3.1.2) oder N-2 (Abschnitt 2.4.3.1.1) beobachtet, wie wir zuvor gesehen haben.

Betrachten wir nun einen fiktiven Fall, in dem die gesamte 58,7 km lange Übertragungsachse von 380 kV Romanel nach 380 kV La Bâtiaz mit Erdkabeln realisiert wird, mit einer Gesamtkabellänge von 117,4 km (zwei Kabel pro Phase), wie in Abb. 2-65 dargestellt.

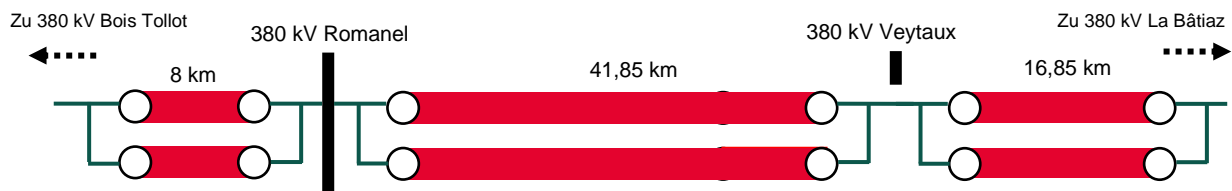


Abb. 2-65: 380-kV-Kabelsysteme in der Nähe von 380 kV Romanel im fiktiven Fall

Der Fall von N-1 bei 380 kV La Bâtiaz – Chamoson, wie in Abschnitt 2.4.3.1.2 gezeigt, wird wiederverwendet, um die Verschlechterung der TOVs im fiktiven Fall im Vergleich zu Szenario 3 zu demonstrieren.

Die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für die Szenarien 3 und den fiktiven Fall für die entsprechende Ausfallvariante N-1 (Fall 5) sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 sind erneut in Abb. 2-66 dargestellt.

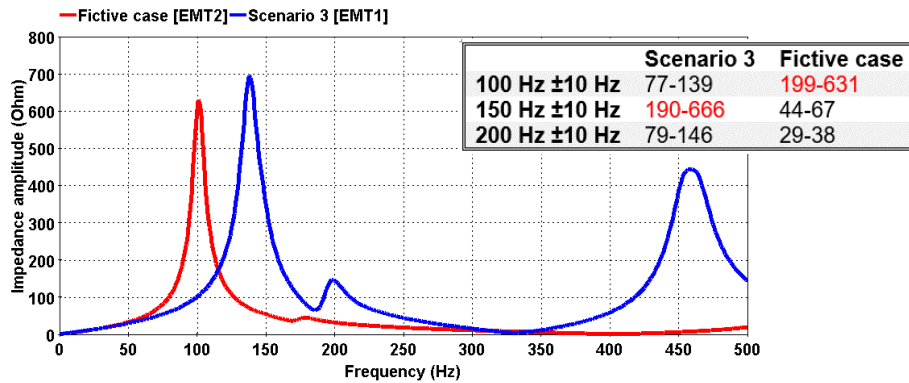


Abb. 2-66: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Romanel für Fall 5 (Ausfallvariante N-1) sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der niederrangigen Oberschwingungen für die Szenarien 3 und den fiktiven Fall

Zunächst einmal beträgt die Kurzschlussleistung bei 380 kV Romanel im Zustand N etwa 11 GVA. Der Verlust der Verbindung 380 kV La Bâtiaz – Chamoson verringert die Kurzschlussleistung bei 380 kV Romanel weiter. Wie in Abb. 2-66 gezeigt, verschiebt eine Gesamtverkabelung von 117,4 km östlich von 380 kV Romanel im fiktiven Fall die Parallelresonanz in dieser Ausfallvariante N-1 von der Umgebung der Oberschwingung 3 erheblich zur Oberschwingung 2 mit einer kritischen Impedanzamplitude, wie sie in Tabelle 2-2 definiert ist. Daher ist beim Einschalten des Transformators 380 kV Romanel unter den betrachteten Netzbedingungen mit noch schwerwiegenden TOVs zu rechnen, die die Isolierung und die Netzausrüstung belasten und sogar beschädigen können.

Die Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel für die beiden Szenarien 3 und den fiktiven Fall für die erste Sekunde der Simulation sind in Abb. 2-67 dargestellt.

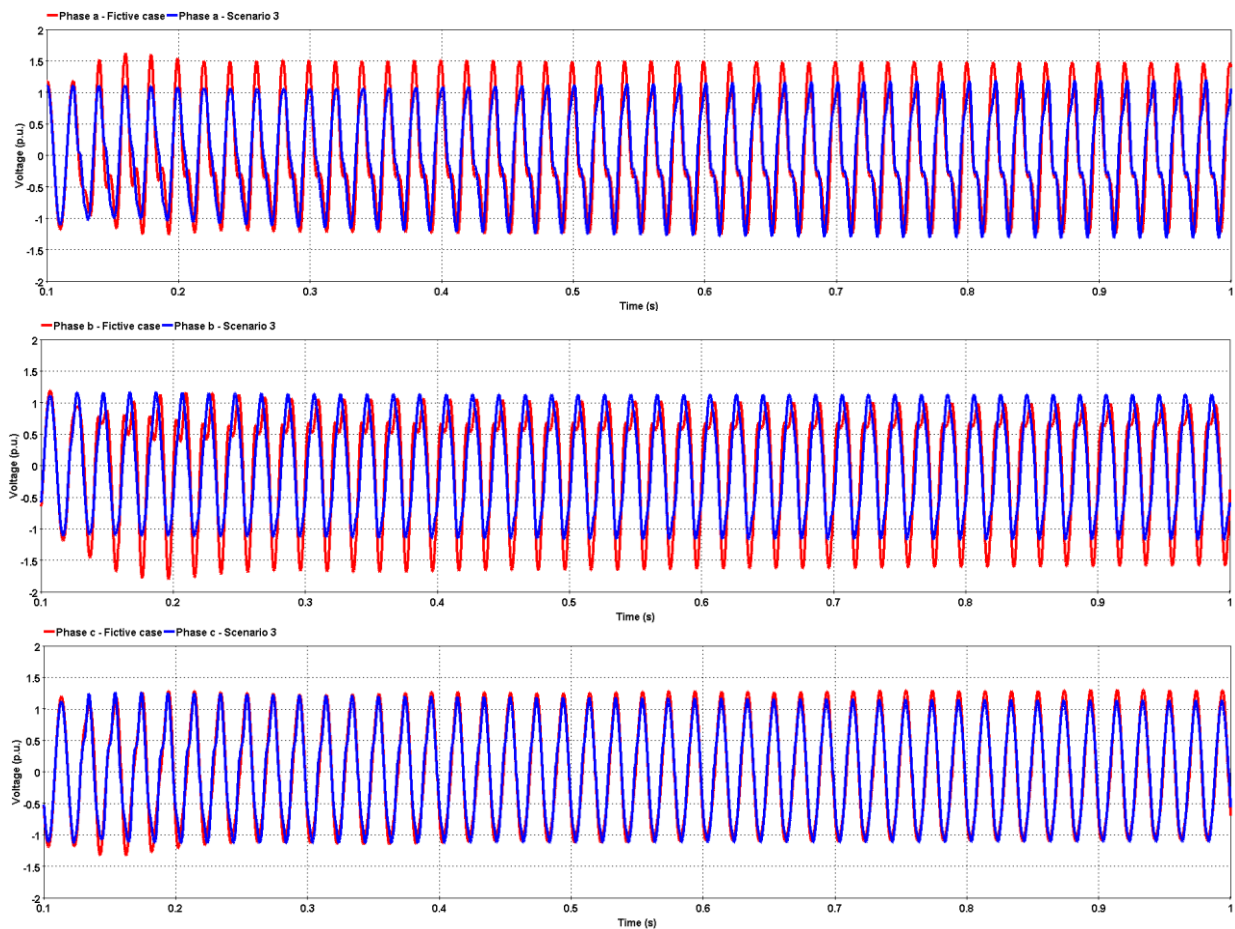


Abb. 2-67: Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel – Szenario 3 und fiktiver Fall für die erste Sekunde der Simulation

Anmerkungen: Wie Abb. 2-67 zeigt, sind im fiktiven Fall verzerrte und schwach gedämpfte TOVs von über 1,5 pu zu beobachten, während die maximale TOV-Amplitude in Szenario 3 1,32 pu erreicht, bevor sie wieder absinkt. Dies zeigt, dass die Parallelresonanz bei der Oberschwingung 2 mit einer signifikant hohen Impedanzamplitude aufgrund einer intensiven Verkabelung nahe 380 kV (der fiktive Fall) zu kritischeren TOVs für die gegebene Netzkonfiguration im Vergleich zu Szenario 3 führt.

Darüber hinaus wird ein Vergleich der Fourier-Analyse der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel zwischen dem fiktiven Fall und Szenario 3 in Abb. 2-68 dargestellt.

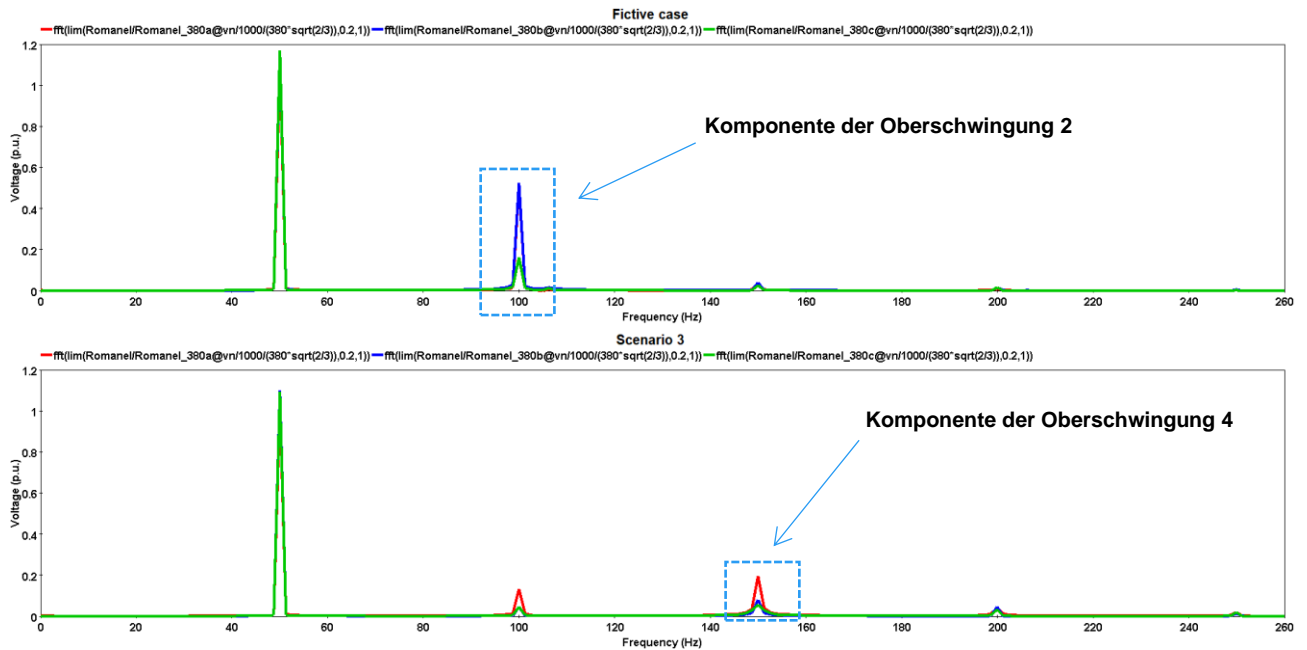


Abb. 2-68: Vergleich der Oberschwingungskomponenten der Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Romanel zwischen dem fiktiven Fall und dem Szenario 3

Anmerkungen: Ein erhöhter Verkabelungsgrad östlich des schwachen Knotens bei 380 kV Romanel verschiebt die Resonanzfrequenz des Netzes bei der gegebenen Netzkonfiguration im fiktiven Fall weiter in die Nähe der Oberschwingung 2, was zu einer extrem hohen Komponente der Oberschwingung 2 führt, die fast 50% der Grundfrequenz in den Endspannungen ausmacht. Dies erklärt die extrem verzerrten und strengen Endspannungen, die im fiktiven Fall beobachtet wurden. Andererseits führt die geplante Ausfallvariante N-1 zu einer Parallelresonanz um die Oberschwingung 3 in Szenario 3 für die gegebene Netzkonfiguration. Obwohl die Resonanzimpedanz in beiden Fällen recht ähnlich ist, deutet eine Resonanz mit einer höheren Oberschwingungsordnung auf weniger schwere TOVs hin, was sich auch in den beobachteten Ergebnissen widerspiegelte.

Dieses Beispiel zeigt, dass eine ausgedehnte Verkabelung in der Nähe eines schwachen Knotens (Stelle im Netzwerk mit geringer Kurzschlussleistung) einen grossen Einfluss auf den Frequenzgang an diesem Knoten hat, was zu einem TOV-Risiko während transients Ereignisse führt.

2.4.3.2.2 Einschalten des Transformators bei 380 kV Laufenburg mit intensiver Verkabelung

Die Integration der Kabelsysteme in der Nähe von 380 kV Laufenburg in Szenario 3 ist in Abb. 2-69 dargestellt.

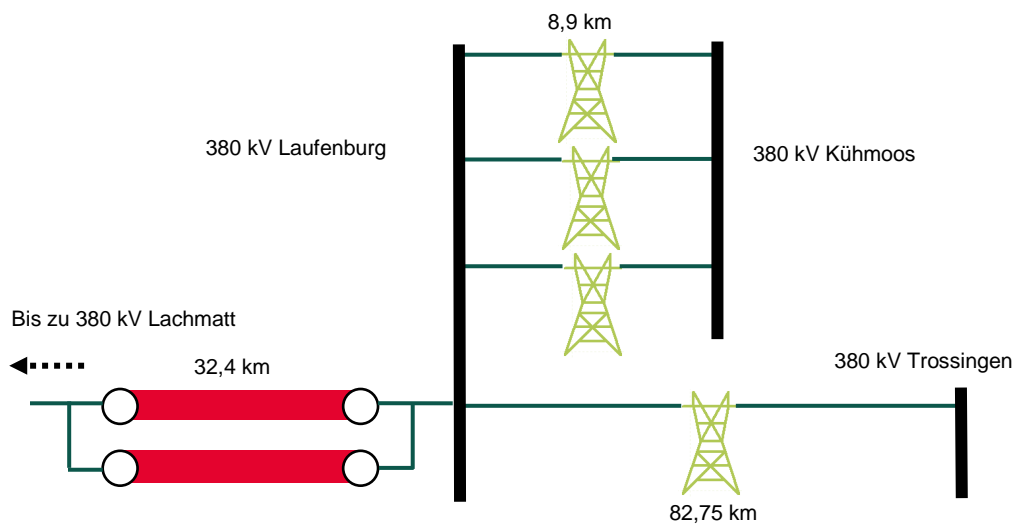


Abb. 2-69: Integration 380-kV-Kabelsystemen nahe 380 kV Laufenburg

Wie in Abb. 2-69 dargestellt, gibt es in Szenario 3 nur ein Kabelsystem, das direkt mit 380 kV Laufenburg verbunden ist, mit einer Gesamtlänge von 64,8 km (32,4 km, zwei Kabel pro Phase). Die drei 8,9 km langen Verbindungen zwischen 380 kV Laufenburg und 380 kV Kühmoos sowie die 82,75 km lange Verbindung zwischen 380 kV Laufenburg und 380 kV Trossingen bestehen ausschliesslich aus Freileitungen.

Betrachten wir nun einen fiktiven Fall, in dem die drei oberirdischen Verbindungen zwischen 380 kV Laufenburg und 380 kV Kühmoos sowie ein Teil der 82,75 km langen Verbindung zwischen 380 kV Laufenburg und 380 kV Trossingen mit Erdkabeln realisiert werden, wie in Abb. 2-70 dargestellt.

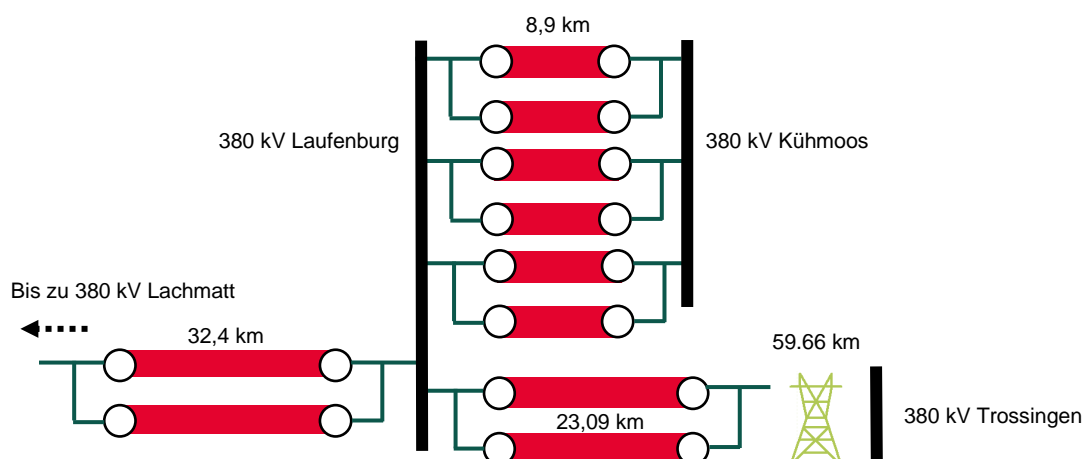


Abb. 2-70: 380-kV-Kabelsysteme in der Nähe von 380 kV Laufenburg im fiktiven Fall

Die zusätzlichen Kabelsysteme haben eine Gesamtlänge von ca. 106,94 km. Mit den Kabeln 380 kV Lachmatt – Laufenburg beträgt die Gesamtlänge der Kabel, die direkt mit dem Kabel 380 kV Laufenburg verbunden sind, 171,74 km.

Betrachten wir eine Ausfallvariante N-1 bei 380 kV Laufenburg – Beznau, so sinkt die ursprüngliche Kurzschlussleistung bei 380 kV Laufenburg von 43 GVA auf etwa 30 GVA. Die Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV unter dieser Ausfallvariante N-1 für Szenario 3 und den fiktiven Fall sowie die Impedanzamplitude in der Nähe der Oberschwingungen 2, 3 und 4 sind in Abb. 2-71 dargestellt.

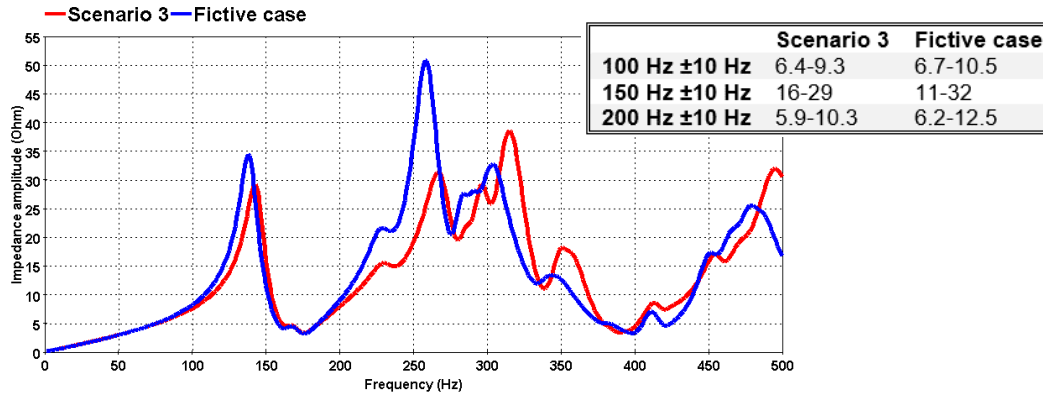


Abb. 2-71: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Laufenburg sowie die Impedanzamplitude nahe der niederrangigen Oberschwingungen für die Ausfallvariante N-1 für die Szenarien 3 und den fiktiven Fall

Wie aus Abb. 2-71 hervorgeht, verschiebt die Hinzufügung der 106,94 km Kabel die parallele Resonanzfrequenz des Netzes 380 kV Laufenburg zu niedrigeren harmonischen Frequenzen. Allerdings ist diese Verschiebung trotz der grossen Kabellänge viel geringer als im vorherigen Fall. Dies belegt die Behauptung, dass starke Knoten mit einer hohen Kurzschlussleistung eine grössere Fähigkeit hätten, mehr Kabelprojekte ohne Leistungseinbussen einzubauen.

Ausserdem ist die Impedanzamplitude bei Resonanz sowie bei Oberschwingungsfrequenzen niedriger Ordnung dank der hohen Netzdämpfung aufgrund der hohen Kurzschlussleistung recht gering. Absehbar ist, dass bei transienten Ereignissen bei 380 kV Laufenburg, wie dem Einschalten von Transformatoren, in beiden Fällen keine schweren TOVs zu erwarten sind.

Zur Bestätigung sind die Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Laufenburg für die beiden Szenarien 3 und fiktiv für die erste Sekunde der Simulation in Abb. 2-72 dargestellt. Die Kurven der beiden Szenarien werden übereinandergelegt.

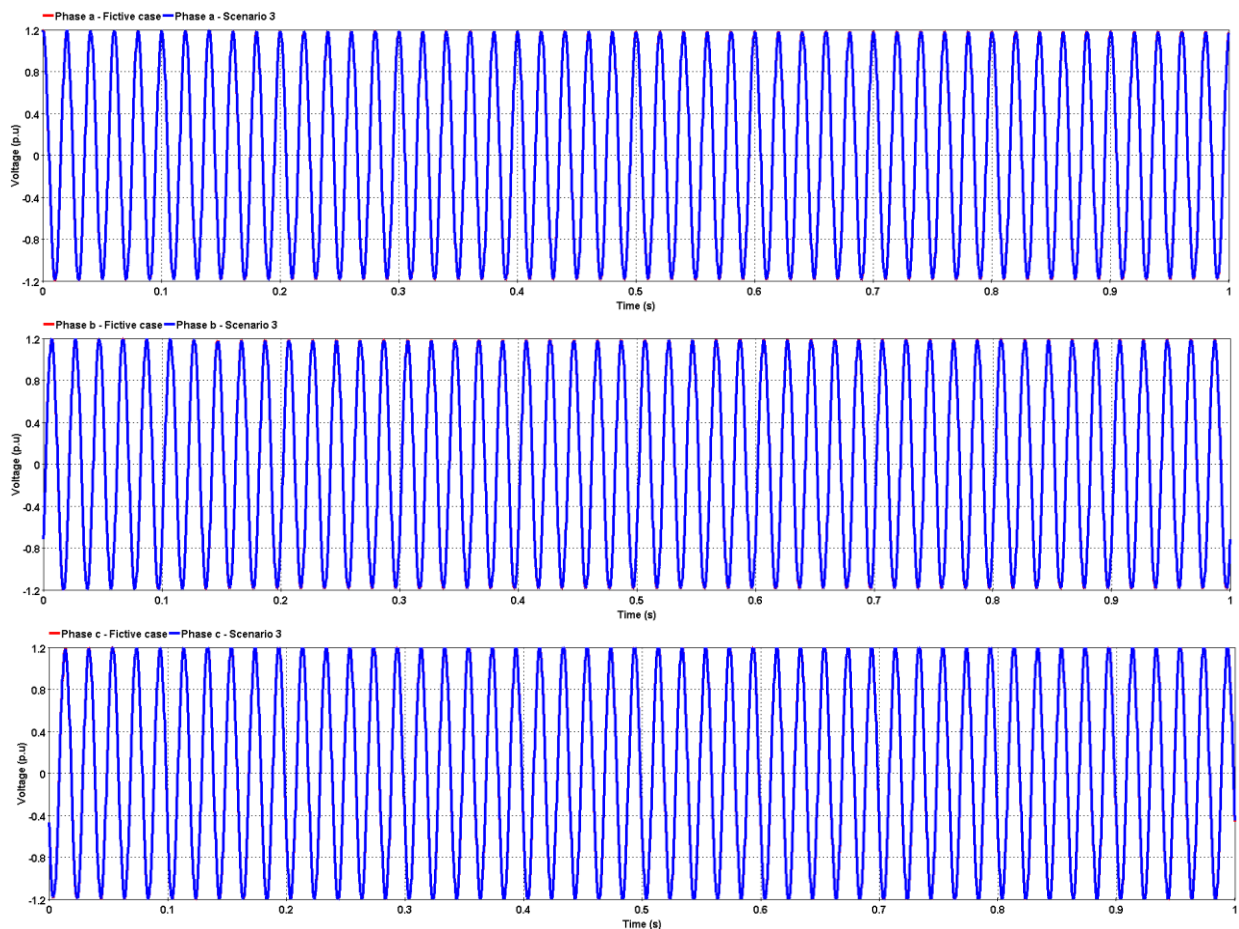


Abb. 2-72: Phase-Erde-Spannungen bei 380 kV Laufenburg – Szenario 3 und fiktiver Fall für die erste Sekunde der Simulation

Anmerkungen: Um von ungünstigen Bedingungen auszugehen, wurde die Simulation mit einer recht hohen Spannung bei 380 kV Laufenburg durchgeführt, bevor der Transformator eingeschaltet wurde. Trotz der hohen Endspannung und der umfangreichen Verkabelung kann jedoch sowohl in Szenario 3 als auch im fiktiven Fall während des Einschaltens des Transformators fast kein TOV beobachtet werden, was bestätigt, dass während des Übergangsereignisses in keinem der beiden Fälle eine Parallelresonanz angeregt wird (siehe Abb. 2-71).

Dieses Beispiel zeigt, dass eine ausgedehnte Verkabelung in der Nähe eines starken Knotens (Stelle im Netz mit hoher Kurzschlussleistung) tendenziell einen gedämpften Einfluss auf den Frequenzgang an diesem Knoten hat, was für TOVs während transients Ereignisse keine zusätzlichen Probleme bereiten sollte.

2.4.4 Fazit

EMT-Studien im Zeitbereich können eine wertvolle Referenz für die Systemplanung und den Betrieb darstellen, da sie die Werte und Wellenformen verschiedener System- und Ausrüstungsparameter (z. B. Spannungen, Ströme, Wirk- und Blindleistung, Steuerungsparameter, Referenzen usw.) im Zeitbereich anzeigen.) im Zeitbereich, entweder im stationären Zustand oder bei Störungen (z. B. Einschalten von Leitungen/Kabeln/Transformatoren, Anschliessen von Kondensatorbänken oder Drosseln, Fehler und deren Behebung, Inselbildung des Systems, Lastabwurf, Schutzmassnahmen, Änderungen der Phasenwinkel von Leistungselektronikgeräten usw.)

Im Anschluss an die Schlussfolgerungen in Kapitel 2 wurden in diesem Kapitel Zeitstudien zum Ausrüstungsniveau durchgeführt, um die Auswirkungen der in den drei Szenarien vorgesehenen Kabelprojekte auf die Leistung und das Verhalten des Netzes genauer zu bewerten. Die in diesem Kapitel durchgeführten EMT-Studien im Zeitbereich konzentrieren sich auf das Einschalten der grossen Transformatoren von Swissgrid an sensiblen Stellen im Netz unter den kritischen Netzkonfigurationen und -bedingungen, die in Kapitel 3 identifiziert wurden.

Aus den durchgeführten Studien lassen sich mehrere Schlussfolgerungen ziehen:

- Kritische TOVs sind beim Einschalten von Transformatoren in den in Kapitel 2 identifizierten Fällen zu erwarten.

In Kapitel 2 wurden für Szenario 3 mehrere Fälle von kritischer Parallelresonanz bei Oberschwingungen niedriger Ordnung, insbesondere Oberschwingungen 2 und 3, identifiziert. Diese Fälle betrafen sensible Netzpunkte wie 380 kV Romanel und 380 kV Magadino unter bestimmten Netztopologien (N-1 und N-2) und Bedingungen (niedriger SCL). Es überrascht nicht, dass beim Einschalten der grossen Transformatoren von Swissgrid an diesen Standorten in den identifizierten Netztopologien und -konfigurationen hohe und schlecht gedämpfte TOVs beobachtet werden können. Mit einer TOV-Amplitude, die in manchen Fällen 1,5 pu überschreitet, stellen diese TOVs eine erhebliche dielektrische und thermische Belastung für die Netzausrüstung in der Nähe dar, was zu einer vorzeitigen Alterung der Ausrüstung oder sogar zu einem Ausfall führt.

Dennoch wird auch beobachtet, dass bei Szenario 2 mit deutlich weniger Kabelprojekten die gleichen Netztopologien und -konfigurationen zu sehr abgeschwächten TOVs führen würden, so dass es keinen Grund zur Sorge um die Stabilität und Sicherheit des Netzbetriebs gibt.

Insgesamt lässt sich sagen, dass eine intensive Kabelintegration wie in Szenario 3 das Risiko kritischer TOVs an mehreren Stellen des Netzwerks bei vorübergehenden Ereignissen am Standort erheblich erhöhen würde.

- Die Kurzschlussleistung an einer Stelle des Netzes spielt eine wichtige Rolle bei den Auswirkungen der Integration von Kabeln in die Nachbarschaft (weitere Studien).

Wie bereits erwähnt, neigt die Kabelintegration im Allgemeinen dazu, die Parallelresonanzfrequenzen an verschiedenen Stellen des Netzes zu senken, wodurch sie bei transienten Ereignissen vor Ort, wie dem Einschalten, der Beseitigung eines Fehlers, der Inselbildung des Systems usw., kritischen TOV-Risiken ausgesetzt sind. Die Auswirkungen der Kabelintegration sind jedoch von Knoten zu Knoten unterschiedlich und hängen von der Kurzschlussleistung des Knotens ab. Um diesen Punkt mit der Ausfallvariante N-1 zu demonstrieren, wurden zwei Orte im Netz ausgewählt: 380 kV Romanel und 380 kV Laufenburg.

Mit einer Kurzschlussleistung von etwas mehr als 11 GVA ist die Station 380 kV Romanel ein relativ schwacher Knotenpunkt unter allen 380-kV-Stationen. Die in Szenario 3 vorgeschlagene Erhöhung der Kabellänge von 40 km auf 117,4 km um 380 kV Romanel verschiebt die Parallelresonanz weiter von der Oberschwingung 3 (in Szenario 3) zur Oberschwingung 2, was zu viel schlimmeren TOVs (von 1,32 pu auf über 1,5 pu) für die Ausfallvariante N-1 führt, die während des Einschaltens der Transformatoren in Romanel getestet wurde.

Andererseits ist der Knoten 380 kV Laufenburg einer der leistungsstärksten Knotenpunkte des 380-kV-Netzes. Seine Kurzschlussleistung beläuft sich im Normalbetrieb auf über 43 GVA. Mit der Ausfallvariante N-1 auf 380 kV Laufenburg – Beznau sinkt seine Kurzschlussleistung auf etwa 30 GVA, was immer noch ziemlich hoch ist. Aufgrund der hohen Kurzschlussleistung würde eine nahezu Verdreifachung der Kabellänge von 64,8 km auf 171,74 km die Parallelresonanzfrequenz nur geringfügig um weniger als 10 Hz verschieben. Ausserdem bewirkt die hohe Dämpfung des Systems aufgrund der hohen Kurzschlussleistung, dass die

Oberschwingungsimpedanz des Netzes bei 380 kV Laufenburg für Oberschwingungen niedriger Ordnung (d. h. Oberschwingungen 2, 3 und 4) ausreichend niedrig ist, um die Anregung jeglicher paralleler Resonanzen niedriger Ordnung zu vermeiden. Wenig überraschend kann in beiden getesteten Fällen während des Einschaltens des Transformators in Laufenburg kein TOV beobachtet werden, selbst bei intensiver Verkabelung in der Nähe von 380 kV Laufenburg.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es eher sicher wäre, Kabelprojekte in der Nähe eines starken Knotenpunkts zu integrieren, da hier nur minimale Auswirkungen auf das bestehende Netz zu erwarten sind. Bei der Integration von Kabelprojekten in der Nähe eines schwachen Knotens ist jedoch Vorsicht geboten, da möglicherweise detailliertere Erhebungen oder Studien erforderlich sind.

2.5 Spannungsänderungen durch das Verbinden oder Trennen von Kabeln und Ausgleichsvorrichtungen

In den Abschnitten 2, 3 und 4 wurden die Auswirkungen der Kurzschlussleistung auf die Resonanzfrequenzen, die Verstärkung von Oberschwingungen und das Einschalten grosser Transformatoren analysiert. In diesem Abschnitt geht es darum, den Einfluss der Kurzschlussleistung auf Spannungsschwankungen nach dem Verbinden von Kabeln oder dem Trennen von Kompensationsspulen zu untersuchen. Ziel dieser Analyse ist es, die Maximalwerte für die Kabellänge in Abhängigkeit von der Kurzschlussleistung eines Knotens zu schätzen. In ähnlicher Weise wird die Schätzung des maximalen Ausgleichsbetrags dargestellt, dessen Verlust nicht zu einem Anstieg der Spannung über die maximal zulässige Schwankung hinaus führt. Diese Analysen drehen sich um die Tatsache, dass bei Swissgrid die maximal zulässige Spannungsschwankung im stationären Zustand infolge der Verbindung eines Kabels oder der Trennung eines Ausgleichselements 2% beträgt [2.29].

Aufgrund ihrer kapazitiven Eigenschaften neigen Kabel dazu, die Spannung des Knotens, mit dem sie verbunden sind, zu erhöhen. Dieser Spannungsanstieg kann durch die Verwendung von Kompensationseinrichtungen begrenzt werden, die einen Teil oder die gesamte vom Kabel erzeugte Blindleistung absorbieren. Wenn die Kompensationseinrichtung (aufgrund eines Defekts oder einer Fehlbedienung) abgeschaltet wird, während das Kabel unter Spannung bleibt, kommt es zu einem Blindleistungsfluss vom Kabel zu seinem Anschlusspunkt. Daher kommt es an diesem Knoten zu einem Spannungssprung, der zu einem Anstieg der Spannung im stationären Zustand führt. Dieser Spannungsanstieg hängt nicht nur von der Menge der verlorenen Kompensation ab, sondern auch von der Kurzschlussleistung (SCL) des Anschlusspunktes sowie der Netzvermaschung um diesen herum. Mit anderen Worten: Je höher die Kurzschlussleistung oder die Maschenweite des Netzes, desto geringer ist der Spannungsanstieg bei einer gegebenen Menge an verllorener Kompensation.

2.5.1 Spannungsänderungen, die durch das Verbinden/Trennen eines Kabels verursacht werden

Es ist möglich, den Spannungsanstieg an einem Knotenpunkt, der durch ein Kabel verursacht wird, wenn die Kompensationseinrichtung abgeschaltet ist, näherungsweise abzuschätzen. Auf einfache Weise kann dieser Fall durch eine LC-Schaltung angenähert werden, wobei der Wert der Induktivität umgekehrt proportional zur Kurzschlussleistung (L_{sc}) ist und der Wert der Kapazität die Kabelkapazität (C_{cable}) darstellt:

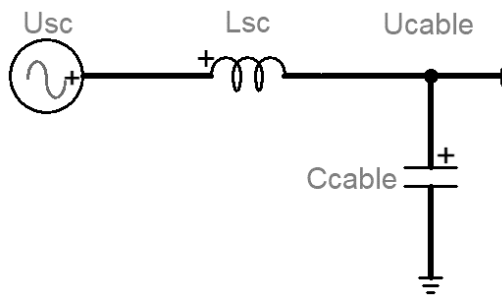


Abb. 2-73: Vereinfachte elektrische Darstellung eines Kabels, das mit einem Knoten verbunden ist

Beim Lösen dieser Gleichung lässt sich erkennen, dass der Spannungsanstieg direkt proportional zur Menge der vom Kabel erzeugten Blindleistung (Q_{cable}) und umgekehrt proportional zur Kurzschlussleistung des Knotens $S_{(sc)}$ ist:

$$\Delta u_{pu} \propto \frac{Q_{cable}}{S_{sc}}$$

Unter der Annahme, dass die vom Kabel erzeugte Blindleistung eine Funktion der Kabellänge und der Betriebsspannung ist, lässt sich die maximale Gesamtlänge der an einen Knotenpunkt angeschlossenen Kabel (l_{max}) bei einer maximal zulässigen Spannungsschwankung (Δu_{max}) abschätzen. Diese Beziehung ist wie folgt definiert:

$$l_{max} = \frac{\Delta u_{max} (\Delta u_{max} + 1)}{k_{Q-l}} \cdot S_{sc}$$

wobei k_{Q-l} die vom Kabel erzeugte Blindleistung pro Längeneinheit (in Mvar/km) ist und Δu_{max} die maximal zulässige Spannungsschwankung in *Per Units* (pu) ist.

Für ein Kupferkabelsystem mit einer Nennspannung von 380 kV und einem Querschnitt von 2500 mm², das mit einer Spannung von 410 kV betrieben wird, entspricht die vom Kabel erzeugte Blindleistung pro Längeneinheit (k_{Q-l}) 12,7 Mvar/km [2.22]. Unter der Annahme einer maximal zulässigen Spannungsänderung von 2% ($\Delta u_{max} = 0,02 pu$) lässt sich die maximal zulässige Kabelmenge, die an einem Knoten installiert werden muss, in Abhängigkeit von seiner Kurzschlussleistung darstellen:

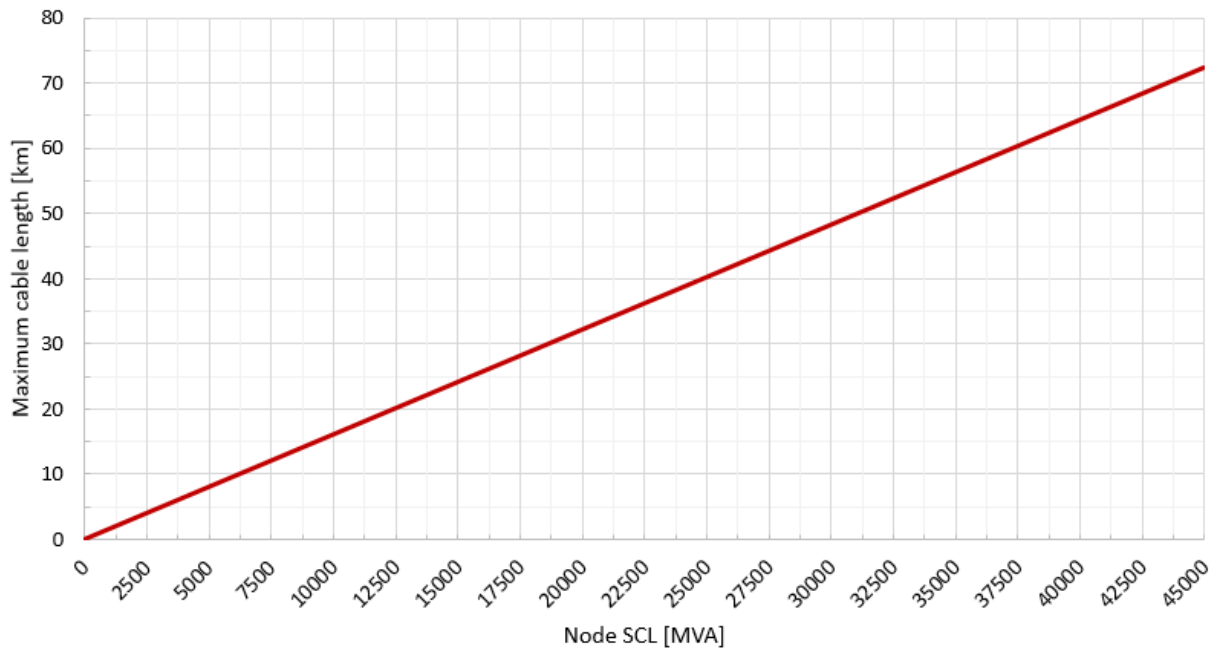


Abb. 2-74: Maximal zulässige Kabellänge an einem 380-kV-Knoten bei einer Spannungserhöhung von 2%

Anhand dieser Abbildung lässt sich beispielsweise feststellen, dass bei einem 380-kV-Knoten mit einer Kurzschlussleistung von 12 500 MVA ein Kabel (2500 mm²) mit einer Länge von 20 km zu einem Anstieg des Spannungswerts im stationären Zustand um 2% führen würde. Logischerweise ist bei einem schwächeren Knoten (niedrigerer SCL) die zulässige Gesamtkabellänge kleiner.

Betrachtet man ein Kupferkabelsystem mit einer Nennspannung von 220 kV und einem Querschnitt von 1600 mm², das mit einer Spannung von 235 kV betrieben wird, so entspricht die vom Kabel erzeugte Blindleistung pro Längeneinheit (k_{Q-l}) 4,3 Mvar/km [2.22]. Unter der Annahme der gleichen maximal zulässigen Spannungsänderung von 2% wird die Beziehung zwischen der Kurzschlussleistung des Knotens und der maximal zulässigen Kabellänge zu:

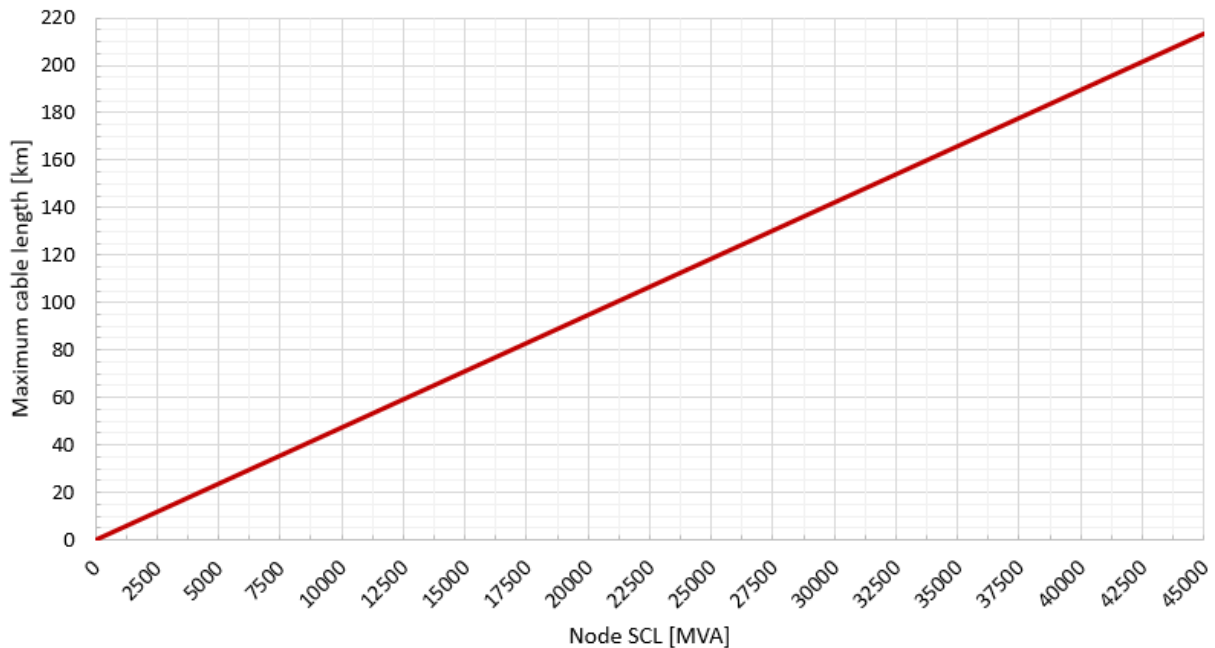


Abb. 2-75: Maximal zulässige Kabellänge an einem 220-kV-Knoten bei einer Spannungserhöhung von 2%

Da ein 220-kV-Kabel eine geringere Blindleistungseinspeisung in das Netz erzeugt, ist die maximal zulässige Kabellänge an einem 220-kV-Knoten erheblich grösser als an einem 380-kV-Knoten.

Entsprechende Abbildungen können für andere Kabeltypen mit anderen Querschnitten und unter anderen Spannungsarbeitspunkten entnommen werden.

Auf der Grundlage dieser Beziehung zwischen maximaler Länge und Kurzschlussleistung lässt sich ermitteln, wo die Einführung von Kabeln gemäss Szenario 3 zu Spannungserhöhungen von mehr als 2% führen könnte. Tatsächlich stellt sich das Genferseegebiet als Problemfall in Bezug auf Spannungserhöhungen im Dauerbetrieb dar. Insgesamt handelt es sich um eine 57 km lange Installation von 220-kV-Kabeln zwischen Foretaille und Romanel, wobei die beiden längsten Abschnitte die maximal zulässige Länge überschreiten, wie in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Leitung	Geplante Kabellänge (km)	Standort 1	Standort 2	SCL min. zwischen Station 1 und 2 (MVA)	Max. zulässige Länge (km)
220 kV Banlieue Ouest – Foretaille	52,2	B. Ouest	Foretaille	9500	45,1
220 kV Crans – Romanel	40,7	Crans	Romanel	7300	34,6

Tabelle 2-25: Vergleich zwischen zulässiger und geplanter Kabellänge im Genferseegebiet – Problemfälle

Im Fall der Leitung 220 kV Banlieue Ouest – Foretaille könnten die 52,2 km langen Kabel zu einem Spannungsanstieg über die zulässigen 2% führen. Aufgrund der Kurzschlussleistung der Knotenpunkte würde die maximal zulässige Länge 45,1 km betragen und damit 7,1 km kürzer sein als die geplante Länge.

Bezüglich der Leitung 220 kV Crans – Romanel könnte es zu einem Spannungsanstieg über den maximal zulässigen Schwellenwert hinaus kommen, wenn alle 40,7 km an Kabel verlegt werden. Die Kurzschlussleistung der Stationen würde das Einschalten eines Kabels mit einer maximalen Länge von 34,6 km ermöglichen, ohne den Grenzwert von 2% zu überschreiten, was 6,1 km weniger sind als die in Szenario 3 betrachtete Länge.

Es ist wichtig zu beachten, dass die oben angegebenen Begrenzungen der Kabellänge nicht als einzige zu berücksichtigende Begrenzung verstanden werden sollten. Dies ist eine erste, näherungsweise berechnete Begrenzung, der alle EMT-Studien für Resonanzfrequenzen und Oberschwingungsverstärkung folgen müssen, wie bereits in diesem Bericht vorgestellt.

2.5.2 Spannungsänderungen, die durch die Trennung eines Ausgleichselements verursacht werden

Im gleichen Sinne kann der maximal akzeptable Blindkompensationsverlust geschätzt werden, der zu einem Anstieg der Spannung im stationären Zustand führen würde, der die Grenze von 2% nicht überschreitet. Dieser Wert kann durch die folgende Beziehung definiert werden:

$$Q_{comp\ loss} = (\Delta u_{max}^2 + \Delta u_{max}) \cdot S_{sc}$$

wobei $Q_{comp\ loss}$ den reaktiven Kompensationsverlust darstellt, der zu einem Spannungsanstieg führt, der gleich dem maximal zulässigen Wert (Δu_{max}) ist.

Betrachtet man wieder die 2%-Grenze ($\Delta u_{max} = 0,02\ pu$), kann man den maximal zulässigen Blindkompensationsverlust in Abhängigkeit von der Kurzschlussleistung des Knotens grafisch darstellen.

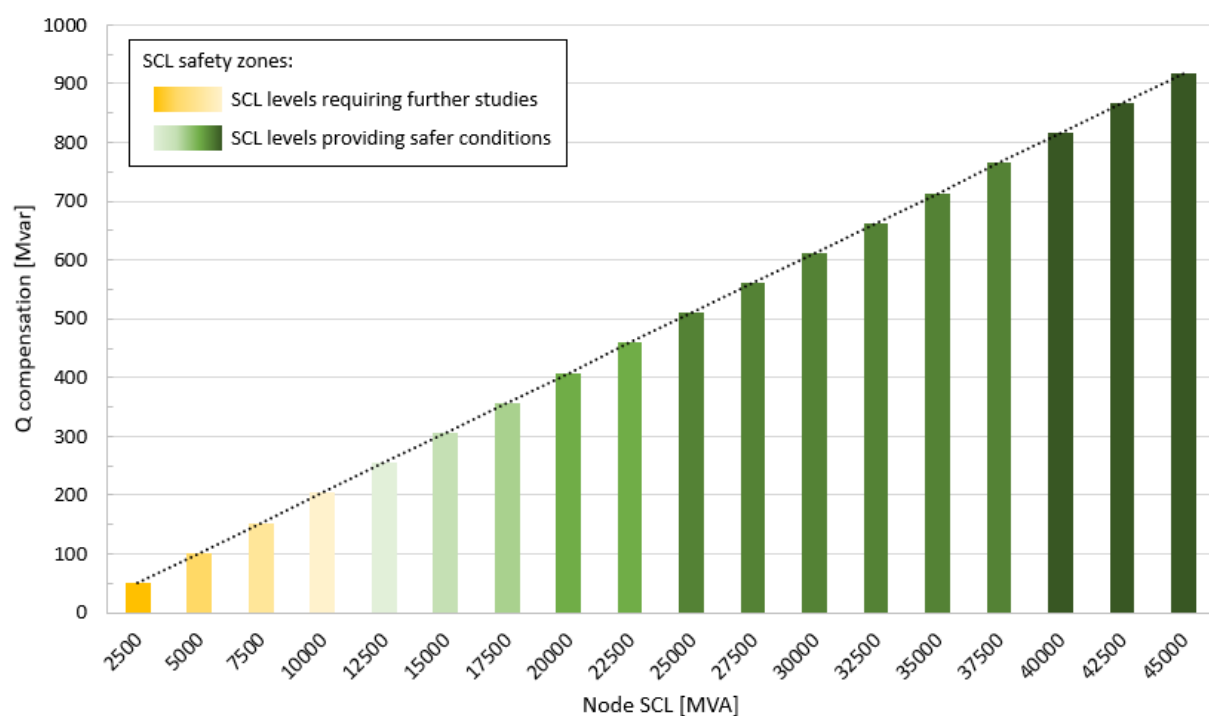


Abb. 2-76: Maximaler reaktiver Kompensationsverlust, der zu einem Spannungssprung von 2% führt

Gemäss der obigen Abbildung würde die maximal mögliche Grösse einer Kompensationsspule für eine Region, in der die Kurzschlussleistung 10 GVA beträgt, 200 Mvar betragen. Da die maximal sinnvolle Leistung,

die Swissgrid für ihre Spulen in Betracht zieht, 200 Mvar beträgt, ist es notwendig, die Spulenkapazität zu begrenzen, wenn die Kurzschlussleistung am Ort des Interesses weniger als 10 GVA beträgt.

Schliesslich ist auch zu beachten, dass im Laufe der EMT-Studien festgestellt werden konnte, dass bei einer Kurzschlussleistung von mehr als 12 GVA die Installation von Kabeln weniger wahrscheinlich zu technischen Problemen führt. Dennoch sind unterhalb dieses Wertes weitere Studien erforderlich, um die Situation von Fall zu Fall zu bewerten. Dies wird in der obigen Abbildung durch die Sicherheitszonen für Kurzschlussleistungen (SCL safety zones) angezeigt.

3 WP 3 – Netzwiederaufbau nach einem Blackout

3.1 Einleitung

Dieser Bericht ist Teil der Schweizer Verdrahtungsstudie und stellt das dritte und letzte Work package dar. Ziel dieses Teils des Berichts ist es, die Auswirkungen von Kabeln auf den Wiederaufbau des Netzes nach einem Blackout zu analysieren.

Die Kabel, um die es in dieser Studie geht, sind unterirdische XLPE-Stromkabel. Nachfolgend wird zur besseren Lesbarkeit das Wort «Kabel» verwendet.

Das aktuelle Konzept für den Schweizer Netzwiederaufbau basiert auf vier über das ganze Land verteilten Aufbauzellen. Dabei handelt es sich um die Zellen Süd, West, Mitte und Ost.

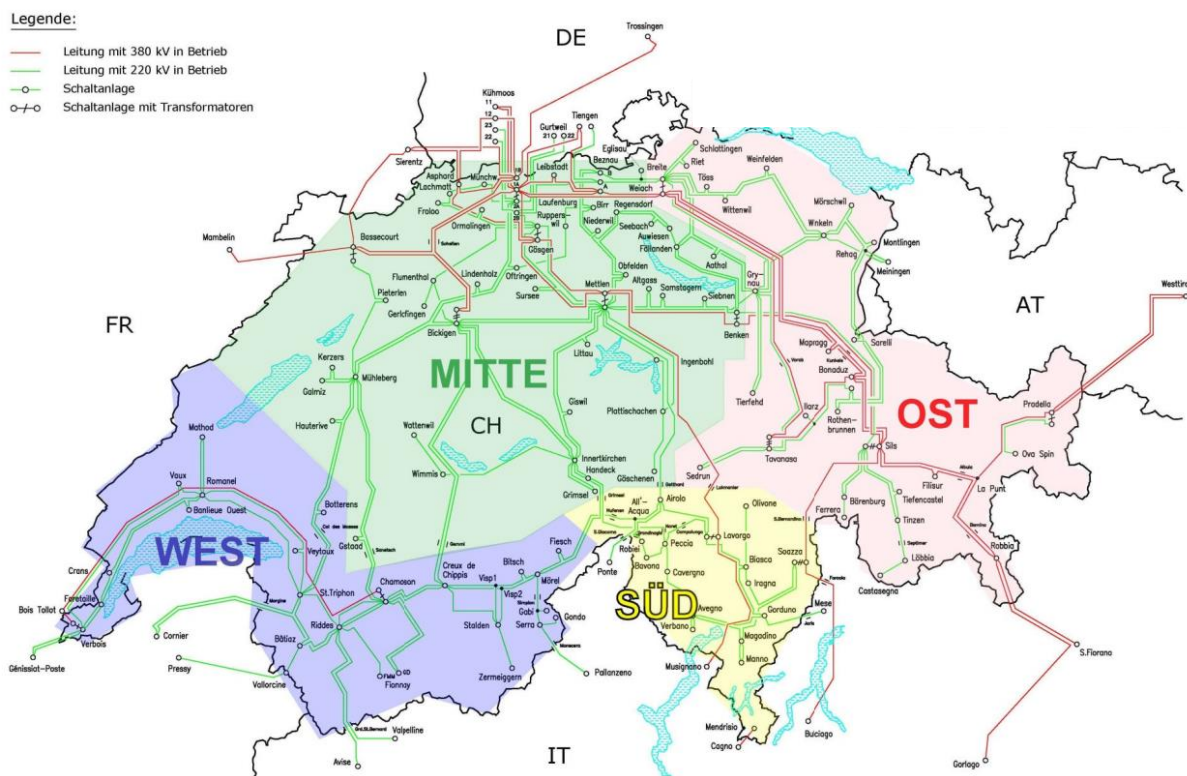


Abb. 3-1: Swissgrid Aufbauzellen

Im Falle eines Totalausfalls ist vorgesehen, dass die vier Zellen den Wiederaufbauprozess unabhängig voneinander beginnen und sich dann im Rahmen des Synchronisationsprozesses miteinander verbinden. Der Vorteil mehrerer Aufbauzellen besteht darin, dass der Prozess beschleunigt wird und der Dienst in kurzer

Zeit wiederhergestellt werden kann. Auch die Hilfe der Nachbarländer wäre in diesem Fall sehr hilfreich. Die Schweiz muss jedoch die Möglichkeit bewahren, den Dienst auch dann wieder aufzunehmen, wenn in den Nachbarländern ein Blackout eintritt.

Das bestmögliche Szenario für den Wiederaufbau ist, dass die Leitungen oberirdisch und nicht zu lang sind. Die Kabelabschnitte machen den Netzwiederaufbau aus einer Reihe von Gründen, die in diesem Bericht beschrieben werden, sehr schwierig. Die Zunahme von Kabelprojekten im Verkehrsnetz macht eine Neubewertung des Wiederaufbauprozesses erforderlich. Einige bereits durchgeführte Studien für laufende Kabelprojekte zeigen deutlich die Herausforderungen, denen sich Swissgrid stellen muss.

3.2 Netzwiederaufbau mit Kabeln

Der Wiederaufbauprozess beginnt mit einem oder mehreren Maschinen, die in der Lage sind, im Dunkeln zu starten (d. h. ohne externe Stromversorgung). Nach und nach werden benachbarte Leitungen und Transformatoren zugeschaltet, bis eine Last, normalerweise eine Pumpe, erreicht ist. Die Last stabilisiert die Aufbauzelle und nach einigen Minuten stabilen Betriebs können weitere Leitungen angeschlossen werden, um die Zelle zu erweitern. In diesen frühen Phasen ist die Kurzschlussleistung sehr gering und das Netz daher sehr empfindlich. Schon die kleinste Störung kann zum Verlust der Zelle führen, sodass ein Neuanfang nötig wird.

Eine der grössten Schwierigkeiten beim Wiederaufbau ist die Verbindung der langen Leitungen. Diese Leitungen benötigen einen hohen kapazitiven Ladestrom, d. h. die Generatoren werden stark beansprucht. Dieser Effekt nimmt mit der Länge der Leitung zu und ist bei Kabeln, die aufgrund ihres kapazitiven Charakters einen sehr hohen Ladestrom haben, noch ausgeprägter.

Um zu verhindern, dass die von den Kabeln erzeugte Blindleistung die Generatoren überlastet, können BLK eingebaut werden. Ihre Aufgabe ist es, überschüssige Blindleistung zu absorbieren und so den Generatoren Spielraum zu verschaffen, um auf unvorhergesehene Lastschwankungen reagieren zu können. Wenn die BLK einstellbar sind, sorgen sie auch dafür, dass der Spannungspegel während des Wiederaufbaus auf angemessenen Werten gehalten wird.

Doch nicht nur das Problem der Blindleistungserzeugung durch die Kabel behindert den Wiederaufbau. Kabel erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Resonanzen niedriger Ordnung, die zu übermässigen Überspannungen führen. Dies erhöht das Risiko einer unerwünschten Aktivierung von Schutzmechanismen und einer Beschädigung von Netzwerkkomponenten.

Beim Informationsaustausch zwischen Swissgrid und anderen europäischen TSO wurde festgestellt, dass es keinen Präzedenzfall für einen Wiederaufbau mit Kabeln in der Nähe von Aufbauzellen gibt. In der Regel ist es gängige Praxis, Kabel zu vermeiden, bis eine ausreichend starke und grosse Zelle zur Verfügung steht. Dies ist möglich, wenn sich die Kabel ausserhalb der Aufbauzellen befinden oder wenn das Netz ausreichend vermascht ist, um sie zu umgehen. Im Fall der Schweiz gibt es oft nur eine einzige Trasse, um die Maschinen mit den Lasten zu verbinden, was keine Flexibilität zulässt.

Nach der aktuellen Planung sind zwei der vier verfügbaren Zellen von diesem Problem der Verkabelungsprojekte betroffen. Das Kabelprojekt im Maggiatal betrifft die südliche Aufbauzelle und die Kabelprojekte zwischen Mettlen und Ulrichen betreffen die zentrale Aufbauzelle. Die Folgen werden in den nächsten beiden Abschnitten erläutert.

3.3 Rekonstruktionszelle Süd (OFIMA-OFIBLE)

Die südliche Aufbauzelle im Tessin basiert auf den Generatoren Biasca und Olivone, die über die Leitung 220 kV Lavorgo – Peccia mit der Pumpe in Peccia verbunden sind.

Die Leitung 220 kV Lavorgo – Peccia wird abgebaut, wenn das Projekt Valle Maggia abgeschlossen ist. Das bedeutet, dass die elektrische Entfernung zwischen den Generatoren und der Pumpe der Südzone um etwa 27 km verlängert wird, wovon 6 km auf das Kabel zwischen Bavona und Peccia entfallen. Der Verlauf des aktuellen und des geplanten zukünftigen Wiederaufbaus im Jahr 2022 ist in der folgenden Abbildung gelb markiert.

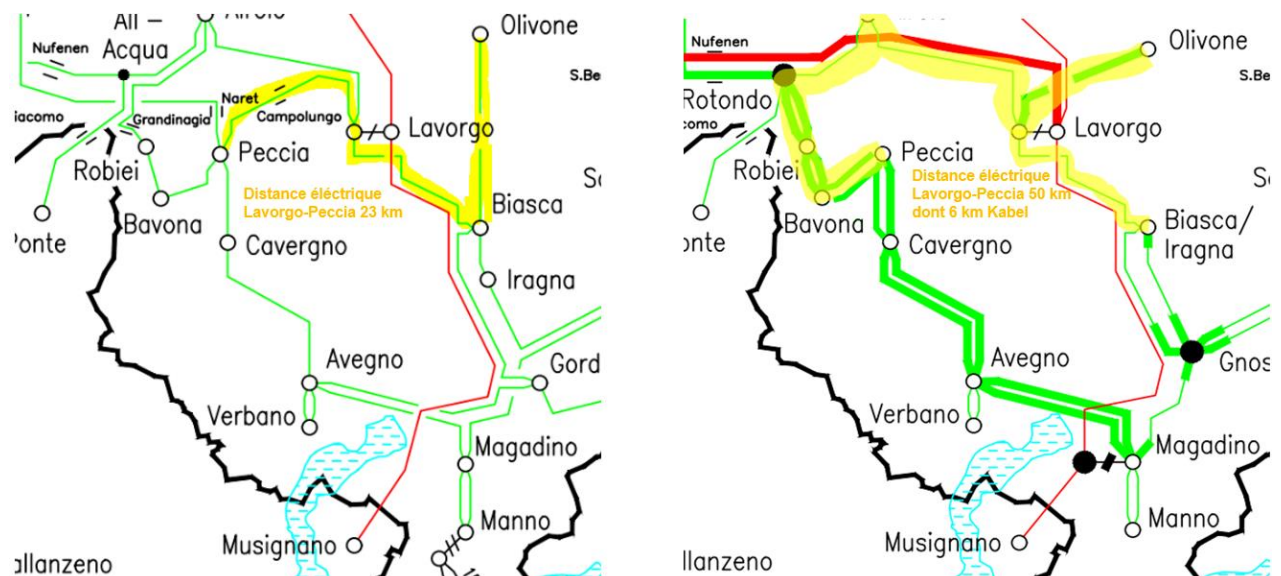


Abb. 3-2: Netzwerk-Rekonstruktionspfad mit aktueller (links) und zukünftiger (rechts) Netzwerkkonfiguration

Zu beachten ist, dass es ab 2022 Änderungen in der Planung des Tessiner Netzes gab. Insbesondere wird es nur eine 220 kV-Leitung zwischen Biasca und Gnosca geben und das Kraftwerk Olivone wird mit 150 kV betrieben. Die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der längeren Wiederaufbauachse bleiben jedoch unverändert und die Einspeisung von Olivone mit 150 kV könnte den Wiederaufbau weiter erschweren.

Es stimmt zwar, dass die 220-kV-Leitung Bavona – Peccia heute bereits ein Kabel ist, doch wird sie in der Wiederaufbauabfolge nicht verwendet, da es dank der 220-kV-Leitung Lavorgo – Peccia eine kürzere Route gibt.

Der verdrahtete Abschnitt und die höhere Länge als Freileitung stellen eine wichtige Variation im Wiederaufbauprozess dar. Aus diesem Grund wurde nach den dynamischen Studien des Kabelprojekts [3.1] eine spezielle Studie durchgeführt, die sich mit dem Wiederaufbau [3.2] befasst.

Die Studie vergleicht die Spannungen und die Blindleistungsaufnahme von Generatoren mit zwei Netzkonfigurationen, der aktuellen und der zukünftigen. Die Resonanzfrequenzen der Aufbauzelle werden in beiden Fällen ebenfalls berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass es bei der zukünftigen Konfiguration zu einer deutlichen Abnahme der Resonanzfrequenzen kommt, was beim Einschalten des Transformators der Pumpe in Peccia zu Überspannungen führt. Dieses Problem kann durch den Einbau einer gesteuerten Umschaltung (POW Switching) im Transformator gelöst werden. Eine weitere wichtige Schlussfolgerung ist, dass in Zukunft mehr Generatoren in Biasca und/oder Olivone in Betrieb sein müssen, um die Kurzschlussleistung der Aufbauzelle zu erhöhen. Dadurch können die Resonanzfrequenzen so weit wie möglich erhöht und die notwendigen Leitungen, Kabel und Transformatoren mit Strom versorgt werden.

Für die Aufbauzelle wurden auch andere Lösungen in Betracht gezogen, z. B. die Nutzung der Generatoren in Verbano. Diese Option erzielte jedoch aufgrund der geringen Leistung der Generatoren in Verbano schlechtere Ergebnisse als die herkömmliche Zelle.

Die Alternative, die den Prozess vereinfachen könnte, wäre die Verwendung von Pumpen in Robiei anstelle von Pumpen in Peccia. Dadurch würde der elektrische Abstand zwischen den Generatoren und der Pumpe verringert, was die Ergebnisse verbessern würde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse, die mit der zukünftigen Konfiguration des Netzwerks erzielt werden, deutlich schlechter sind als die aktuellen Ergebnisse. Es gibt jedoch Lösungen für die aufgetretenen Probleme und der Wiederaufbau mit der Südzelle ist immer noch möglich.

3.4 Zentrale Aufbauzelle (KWO)

Da das Problem der zentralen Zelle verschärfter ist als das der südlichen Zelle, wird es in diesem Bericht näher erläutert.

Der Aufbau der Kernzelle beginnt normalerweise mit dem Netzwiederaufbau eines 43-MVA-Generators in Handeck. In Innertkirchen gibt es auch einen 52-MVA-Generator, der schwarz gestartet werden kann. Nach der Inbetriebnahme eines Generators müssen mehrere weitere Generatoren in Innertkirchen und Handeck hinzugefügt werden. Die rotierende Masse, die vor dem Anschluss der Grimselpumpe benötigt wird, wird durch das Zusammensetzen einer Generation von etwa 200 MVA erreicht. Die Grimselpumpe ist über einen Umrichter angeschlossen, der die Last bis zu einem Maximum von 100 MVA regulieren kann.

Die folgende Abbildung zeigt die Konfiguration des Netzwerks in der Region nach Einbeziehung der geplanten Kabel (gestrichelte Linien). Die Länge der Kabel ist in km in blauer Schrift angegeben.

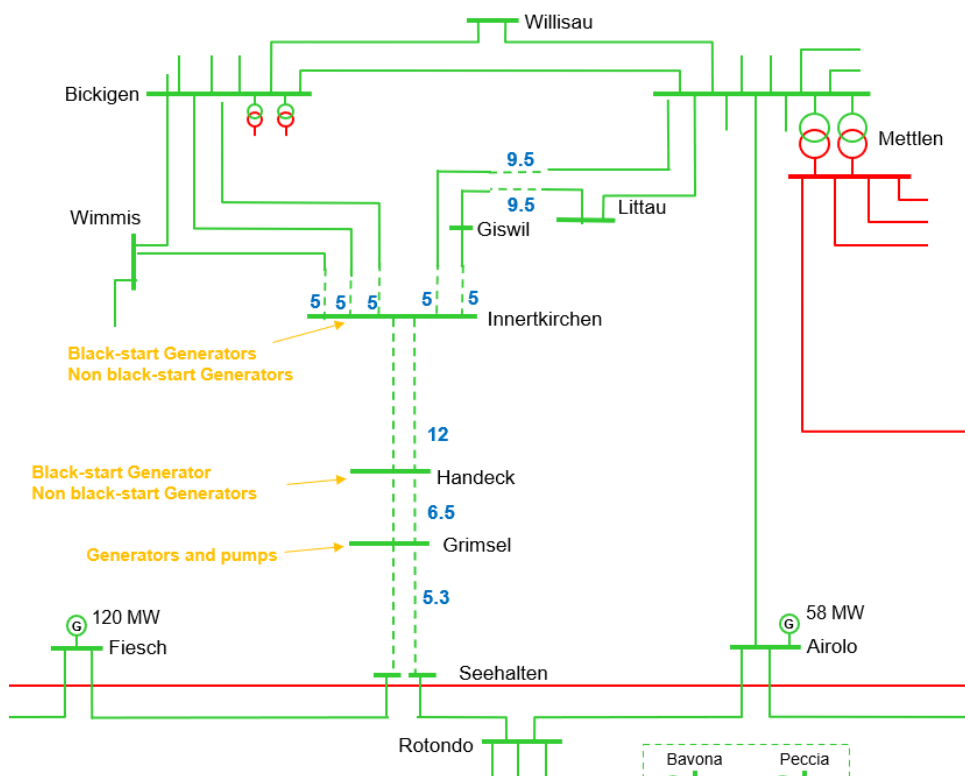


Abb. 3-3: Zukünftige Netzwerkkonfiguration in der Region Grimsel

Wie aus Abb. 3-3 hervorgeht, ist die Verbindung der Generatoren in Handeck und Innertkirchen mit der Grimselpumpe nur mit Kabeln möglich, die sich innerhalb der Aufbauzelle befinden. In den folgenden Ergebnissen werden wir sehen, wie dies den Prozess erheblich erschwert.

In mehreren Studien wurden verschiedene Wiederaufbauszenarien simuliert, um den aktuellen Prozess an die neue Kabelkonfiguration anzupassen. Zunächst simulierte Enernex den aktuellen Prozess und 3 neue Szenarien, die von Swissgrid und KWO vorgeschlagen wurden, um die Ergebnisse zu verbessern [3.3]. Dann wiederholte FKH die von Enernex durchgeführten Analysen, um die Ergebnisse zu bestätigen [3.4]. Schliesslich wurden die Simulationen innerhalb von Swissgrid erneut überprüft und ein neues, von KWO vorgeschlagenes Szenario simuliert [3.5]. Studien von drei verschiedenen Unternehmen [3.3][3.4][3.5] haben gezeigt, dass der Wiederaufbau, wie er derzeit vorgeschlagen wird, mit den geplanten neuen Kabeln nicht funktionieren kann. Das Problem ist die geringe Kurzschlussleistung am Anfang mit einem einzigen 43-MVA-Generator. Die Resonanzfrequenz bei langen Kabeln und geringer Kurzschlussleistung liegt nahe bei 50 Hz, so dass sehr hohe Überspannungen auftreten, die sich halten und mit der Zeit ansteigen.

Die folgende Abbildung zeigt das Einschalten des 12 km langen Kabels Innertkirchen – Handeck bei $t = 1,08$ Sek., gefolgt vom Einschalten des Transformators in Innertkirchen bei $t = 3$ Sek. Erstens betragen die Transienten beim Einstecken des Kabels mehr als 2 pu und brauchen bis zu 1 Sekunde, um sich abzuschwächen. Zweitens, und das ist beunruhigender, werden durch das Einschalten des Transformators in Innertkirchen niederfrequente Resonanzen angeregt, was zu ungedämpften Spannungstössen führt.

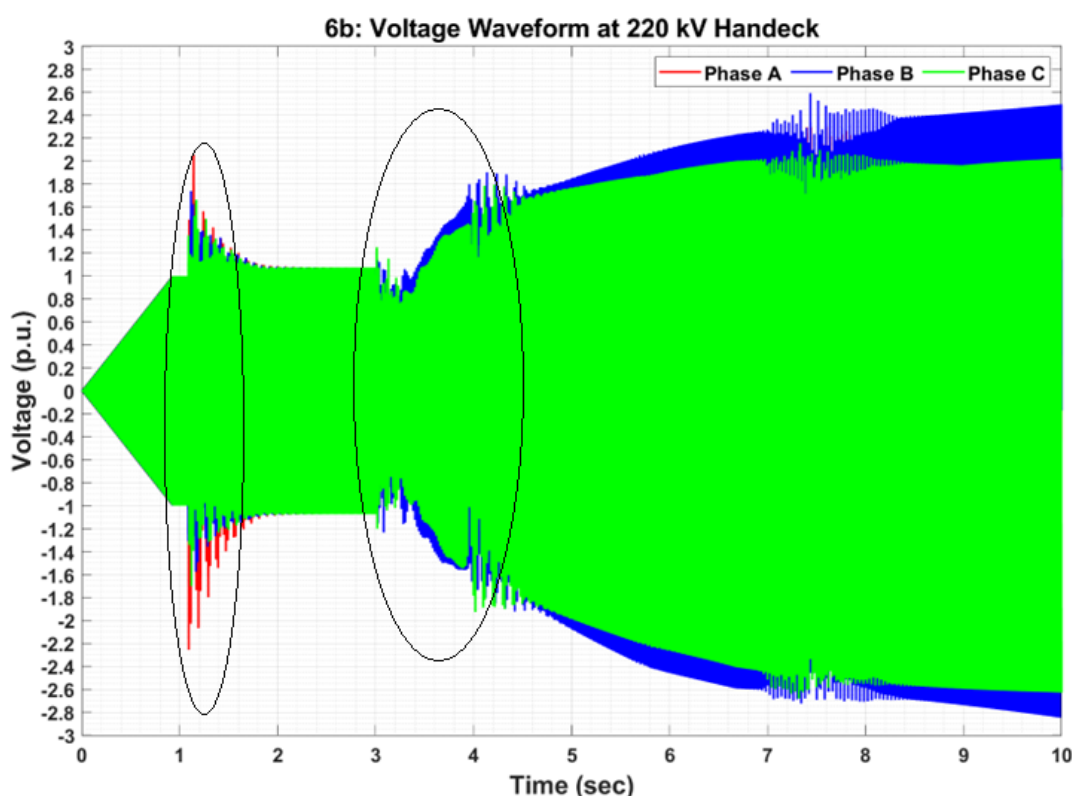


Abb. 3-4: Spannung in Handeck während des aktuellen Wiederaufbauprozesses mit zukünftiger Netzkonfiguration

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass es wie bei der Aufbauzelle Süd notwendig ist, die rotierende Masse erheblich zu erhöhen, um die Resonanzfrequenz des Systems zu steigern und die Kabel und

Transformatoren ohne gefährliche Transienten unter Spannung setzen zu können. Dies führt dazu, dass mehr Generatoren in den Prozess einbezogen werden müssen.

Ausserdem ist es notwendig, die Spannung zu erhöhen, und zwar in Form einer Rampe, um plötzliche Spannungssprünge zu vermeiden, die die Resonanzfrequenzen anregen können. Bei dieser Methode wird eine Gruppe von Elementen der Aufbauzelle miteinander verbunden und die Spannung nach und nach erhöht. Drei Szenarien nach dieser Methodik wurden von Swissgrid und KWO vorbereitet und von Enernex [3.3] und FKH [3.4] simuliert.

Die Simulationen dieser drei neuen Szenarien zeigen eine deutliche Verbesserung gegenüber dem aktuellen Prozess (der nicht funktioniert). Die Transienten sind zwar markant, werden aber im Laufe der Zeit abklingen. Allerdings gibt es eine Phasenasymmetrie der Spannung für mehr als 30 Sekunden nach dem Einschalten der Last.

Die folgende Abbildung zeigt die Spannung in Handeck nach dem Prozess eines dieser drei Szenarien. Die Spannung wird rampenförmig erhöht, wobei die gesamte Aufbauzelle (Innertkirchen, Handeck und Grimsel) von Anfang an angeschlossen ist, sodass in dieser Phase keine Transienten zu beobachten sind. Es sind die Verbindungen von zusätzlichen Elementen ausserhalb der Rekonstruktionszelle, die die in der Abbildung dargestellten Transienten und Asymmetrien verursachen. Bei $t = 1,08$ wird die 220 kV Giswil – Innertkirchen eingeschaltet, bei $t = 2$ Sek. der 220/50 kV Transformator in Giswil, bei $t = 3,5$ Sek. 10 MW Last in Giswil, bei $t = 4$ Sek. die 220 kV Giswil – Littau, bei $t = 5$ der 220/110 kV Transformator in Littau usw.

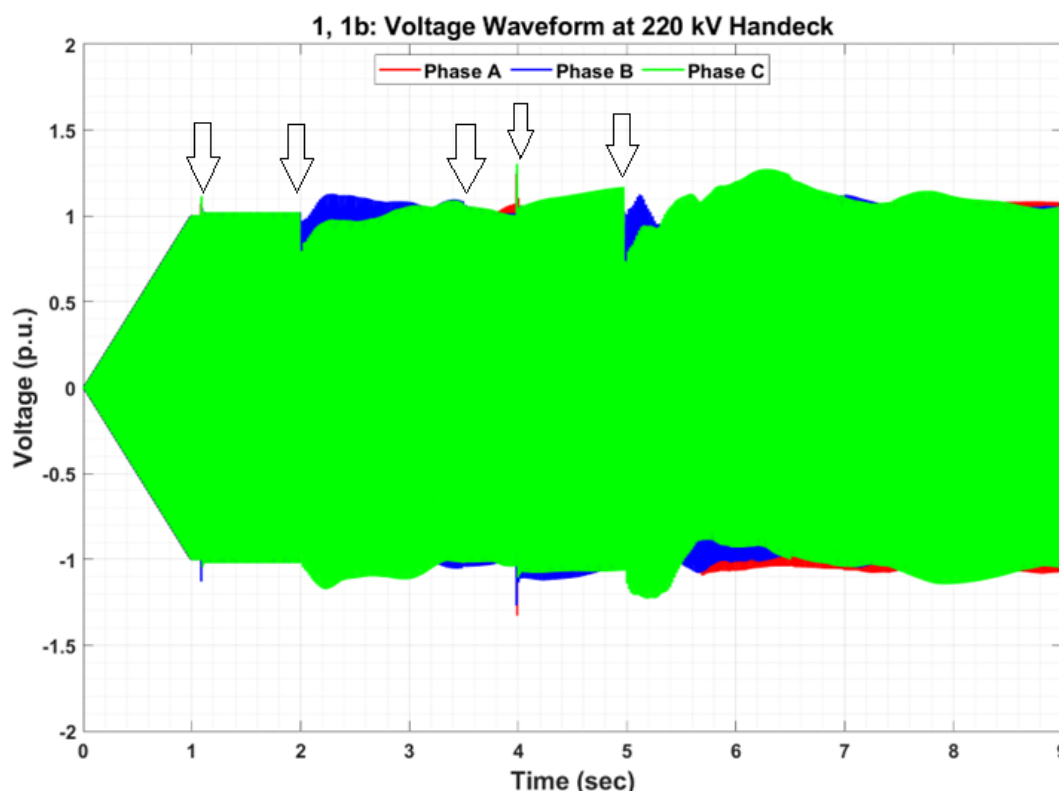


Abb. 3-5: Spannung in Handeck während eines Wiederaufbauprozesses, der an die zukünftige Netzwerkkonfiguration angepasst ist

Die Transienten, die von den verbundenen Elementen im Laufe des Prozesses erzeugt werden, werden abklingen und sind nicht sehr hoch. Allerdings kann das Risiko nicht ausgeschlossen werden, dass ein Überspannungs- oder Asymmetrieschutz aufgrund einer Verzerrung für mehrere Sekunden aktiviert wird.

In der Praxis halten die Fachleute von KWO die Umsetzung dieser Szenarien für äusserst schwierig. Zum einen würden Generatoren verwendet werden, die nicht schwarzstartfähig und daher angepasst werden müssten. Es wären zusätzliche Investitionen seitens KWO erforderlich, und diese Investitionen werden auf den ersten Blick nicht entschädigt; andererseits wäre ein Kontrollsystem erforderlich, das es ermöglicht, die Spannung in drei durch Kabel getrennten Unterwerken gleichzeitig zu erhöhen. Daher wurde beschlossen, ein viertes Szenario zu simulieren, bei dem zwei Inseln unabhängig voneinander starten und sich anschliessend synchronisieren.

Die Ergebnisse dieses vierten Szenarios mit einem Netzwiederaufbau von zwei Zellen und anschliessender Synchronisation sind in [3.5] beschrieben. Zusammenfassend wäre ein Netzwiederaufbau beider Zellen möglich, obwohl es in einer der Zellen nennenswerte Schwierigkeiten gibt, die viele Vorbedingungen erfordern, die in der Praxis nur schwer zu erfüllen sind. Die anschliessende Synchronisation stellt keine Schwierigkeit dar, aber die Verbindung von Leitungen, Lasten und Transformatoren ausserhalb der Zelle kann zu Asymmetrien und Transienten führen, die die Schutzvorrichtungen auslösen können.

Ausserdem wurden mehrere Simulationen des Lastverlust während des Wiederaufbauprozesses durchgeführt [3.6] Ziel ist es, die Widerstandsfähigkeit der kleinen Zelle zu bestimmen, sobald sie aufgebaut ist und die ersten Elemente ausserhalb der Zelle verbunden sind. Der Verlust einer kleinen Last wird simuliert, um sicherzustellen, dass er nicht zu einem Systemausfall führt. Je nachdem, wo sich die verlorene Last befindet und wie gross sie ist, gibt es Fälle, in denen das System der Störung standhält, und andere, in denen dies nicht gelingt. Darunter in der folgenden Abbildung das Beispiel eines Verlustes von nur 10 MW in Giswil, der zu einem Systemausfall führte.

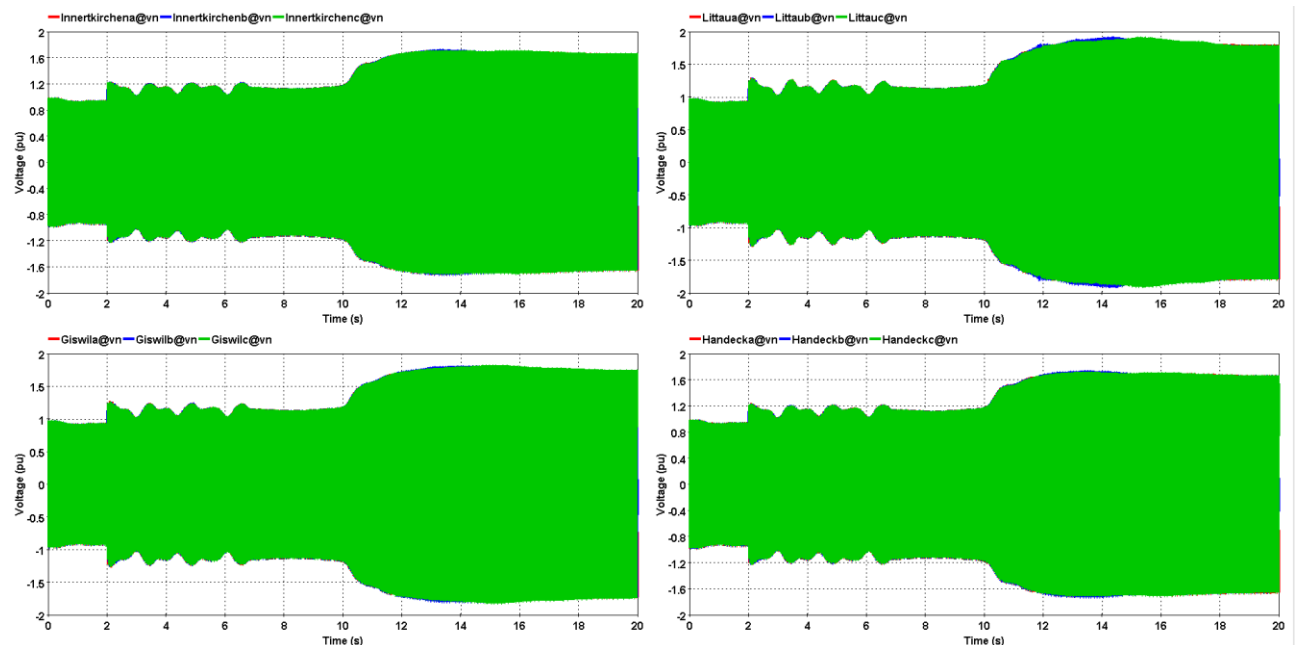


Abb. 3-6: Spannungsprofil in Handeck, Innerkirchen, Giswil und Littau nach Verlust von 10 MW in Giswil (t = 2 Sek.)

Fasst man die Schlussfolgerungen aller durchgeführten Analysen zusammen, so wird nach der Realisierung der geplanten Kabelprojekte ein Wiederaufbau, wie er derzeit vorgeschlagen wird, nicht mehr möglich sein.

Die Suche nach alternativen Szenarien zeigt eine deutliche Verbesserung, aber die Risiken sind sehr hoch und es wären mehrfache Anpassungen der Infrastruktur des Swissgrid Netzes und des KWO-Kraftwerks erforderlich. Die notwendigen Anpassungen und Vorbedingungen, ohne die es keine Aussicht auf Erfolg gibt, sind folgende:

- Die neuen grossen Generatoren in Innertkirchen und Handeck mit einer Leistung von 150 bzw. 90 MW müssen in der Lage sein, im Dunkeln zu starten (im Projekt zur Erneuerung des Kraftwerks nicht vorgesehen).
- Diese Generatoren müssen in der Lage sein, die Spannung mehrere Minuten lang bei 0,85 pu zu halten. Es wurde nie gemacht und die Spezialistinnen und Spezialisten in der Zentrale wissen nicht, ob es möglich ist. Die Überspannungsschutzvorrichtungen der Generatoren könnten auslösen.
- Die an Innertkirchen und Grimsel angeschlossenen Pumpen müssen in der Lage sein, ein Ungleichgewicht der drei Spannungsphasen für mindestens 30 Sekunden aufrechtzuerhalten.
- Es ist sicherzustellen, dass weder Unterspannungen noch Phasenungleichgewichte der Spannung zu Schutzauslösungen führen.
- Reaktor-BLK in Innertkirchen und in Handeck oder Grimsel. Diese Ausgleichslösung ist etwa CHF 32 Millionen teurer als die Ausgleichslösung ohne die Möglichkeit des Wiederaufbaus.
- Kontrollierte Ein- und Ausschaltmechanismen (POW-Switching) in allen Transformatoren der Zelle und in den Transformatoren, die demnächst angeschlossen werden.
- Bereitstellung von Mitteln zur Entmagnetisierung von Transformatoren und zur Entlastung von Kabeln (induktive Transformatoren und/oder BLK).

Eine von Swissgrid durchgeführte Analyse der Parameter der Schutzvorrichtungen des KWO-Kraftwerks hat bereits gezeigt, dass das Risiko unerwünschter Schutzauslösungen sehr hoch ist. Unter Berücksichtigung all dieser Faktoren kann man zu dem Schluss kommen, dass, um die Tür für einen Wiederaufbauprozess in der Zukunft offen zu halten, zahlreiche Investitionen ohne Erfolgsgarantie erforderlich wären.

Der Wiederaufbau des Netzwerks ist ein sehr extremer Prozess und daher sehr belastend. Auch wenn eine Lösung theoretisch funktionieren kann, ist nicht garantiert, dass in dieser Ausnahmesituation (Blackout) alle Teilnehmer alle Schritte korrekt und fehlerfrei einhalten. Mit anderen Worten: Je komplizierter das Verfahren und je mehr Voraussetzungen für einen erfolgreichen Netz-wiederaufbau erfüllt sein müssen, desto höher ist das Risiko, dass es in der Praxis scheitert.

3.5 Schlussfolgerungen

Die Erfahrungen anderer TSO und von Swissgrid zeigen, dass das Vorhandensein von Kabeln in oder in der Nähe von Aufbauzellen die Wiederherstellung nach einem Blackout extrem erschweren kann.

Je nachdem, mit welcher Technologie die geplanten Entwicklungen realisiert werden, können neue Strategien zum Wiederaufbau des Netzwerks erforderlich sein. Änderungen der Standorte der Kraftwerke, der Art der Produktion und ihrer Leistung können die derzeitigen Wiederaufbaukonzepte enorm verändern und sich direkt auf die für den Wiederaufbau benötigte Zeit auswirken. Ausserdem ist es nicht sicher, dass die neuen Konzepte funktionieren, da sie vor der Umsetzung der Verkabelungsprojekte nicht unter realen Bedingungen getestet werden können. In diesem Fall müssen die Entscheidungen auf Simulationsergebnissen basieren.

Da sich die Anzahl der verfügbaren Aufbauzellen direkt auf die Wiederherstellungszeit des Dienstes auswirkt, muss der Schutz unserer Aufbauzellen vor Kabeln als Priorität betrachtet werden.

4 Referenzen und Anhänge

4.1 Referenzen WP 1

- [1.1] Markus Willi, «Technische Grundlagen Kabel als Netzbestandteil», ZSTD-25-011
- [1.2] Martin Hässig, RFI Drossel

4.2 Referenzen WP 2

- [2.1] «Evaluation of Temporary Overvoltages in Power Systems due to Low Order Harmonic Resonances», CIGRÉ technical brochure, WG C4. 46, Ref. 913, 2023.
- [2.2] IEC 61000-3-6, «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3–6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV, and EHV power systems», Ausgabe 2.0, 2008-02.
- [2.3] RTE international, «Technical report for EMTP cable feasibility studies – Mettlen – Ulrichen (Work Package 2)», R1, March 13, 2024.
- [2.4] Enernex (MESZ), «Mettlen – Ulrichen Study Report for Work Package 1–3», June 10, 2024.
- [2.5] RTE international, «Technical report for EMTP cable feasibility studies Foretaille – Verbois (Work Package 2)», R0, October 30, 2023.
- [2.6] IEC TR 60071-4, «Insulation co-ordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks», First edition, 2004-06.
- [2.7] Y. Fillion, «Ferrerésonance et surtension temporaires harmoniques», internal technical report, CNER, RTE.
- [2.8] «Transformer energization in power systems: A study guide», CIGRÉ technical brochure, WG C4. 307, Ref. 568, 2014.
- [2.9] RTE international, «Composite testing of HVDC-connected offshore wind farms», R4, March 10, 2021. Online: https://www.hvdccentre.com/wp-content/uploads/2021/03/Composite-Testing-of-HVDC-connected-OWF_110321.pdf.
- [2.10] «Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables», CIGRÉ technical brochure, WG C4. 502, Ref. 556, 2013.
- [2.11] «Line/Cable Data», user support document, EMTP-EMTPWorks.
- [2.12] W. I. Bowman and J. M. McNamee, «Development of Equivalent Pi and T Matrix Circuits for Long Untransposed Transmission Lines», IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. 83, Issue 6, pp.625-632, June 1964.
- [2.13] William D Stevenson Jr., «Elements of power system analysis», fourth edition, McGraw-Hill, 1982.
- [2.14] H. W. Dommel, «EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation», Vancouver, British Columbia, 1996.
- [2.15] A. Morched, B. Gustavsen, M. Tartibi, «A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables», IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999, pp. 1032 -1038.
- [2.16] I. Kocar, J. Mahseredjian, «Accurate Frequency Dependent Cable Model for Electromagnetic Transients», IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 31, No. 3, June 2016, pp. 1281-1288.
- [2.17] M. Cervantes, I. Kocar, J. Mahseredjian, A. Ramirez, «Partitioned Fitting and DC Correction for the Simulation of Electromagnetic Transients in Transmission Lines», IEEE Power Delivery Letters, Vol. 33, No. 6, Dec. 2018, pp. 3246 - 3248.
- [2.18] B. Gustavsen and A. Semlyen, «Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting», IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, no. 3, July 1999, pp. 1052-1061.
- [2.19] I. Kocar, J. Mahseredjian, G. Olivier, «Weighting Method for Transient Analysis of Underground Cables», IEEE Tran. on Power Delivery, Vol. 14, no. 3, July 2008, pp. 1629-1635.
- [2.20] I. Kocar, J. Mahseredjian, «New procedure for computation of time delays in propagation fonction fitting for transient modeling of cables», IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, no. 2, July 2008, pp. 613-621.

- [2.21] «Cable Systems Electrical Characteristics», CIGRÉ technical brochure, WG B1. 30, Ref. 531, 2013.
- [2.22] Nexans, «60 – 500 kV High Voltage Underground Power Cables – XLPE insulated cables».
- [2.23] I. Lafaia, et al., «Field Test and Simulation of Transients on the RTE 225 kV Cable», IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, issue: 2, pp. 628-637, April 2017.
- [2.24] I. Lafaia, et al., «Frequency and Time domain Responses of Cross-Bonded Cables», IEEE Transactions on Power delivery, vol. 33, issue:2, pp. 640-648, April 2018.
- [2.25] B. Gustavsen, et al., «Insulated Cables», in Power System Transients – Parameter Determination, Ed. J. A. Martinez-Velasco, CRC Press, 2010.
- [2.26] «Overhead conductor catalogues», Alfanair. Available: https://www.alfanar.com/catalogs/cables_wires/Overhead_Conductors.pdf
- [2.27] «Guide for electromagnetic transient studies involving VSC converters», CIGRÉ technical brochure, WG B4. 70, Ref. 832, 2021,
- [2.28] «Transformer energization in power systems: A study guide», CIGRÉ technical brochure, WG C4. 307, Ref. 568, 2014.
- [2.29] Markus Willi, «Technische Grundlagen Kabel als Netzbestandteil», ZSTD-25-011.
- [2.30] Swissgrid, «A22-126 Bg Swissgrid PQ Romanel Chamoson», interne.

4.3 WP 3 – Referenzen

- [3.1] Technical support for Swissgrid on cable feasibility studies – Ticino. Ming Cai (RTEi)
- [3.2] Black-start cell south with future network configuration. Elena Giménez (Swissgrid)
- [3.3] Black-start Scenarios. Muhammad Humayun (Enernex)
- [3.4] Swissgrid Schwarzstart Szenarien. Gunnar Andrae (FKH)
- [3.5] Blackstart Note KWO Procedure. Ming Cai (Swisgrid)
- [3.6] Blackstart Note load rejection. Ming Cai (Swissgrid)
- [3.7] Blindleistungskompensation Innertkirchen-Seehalten. Elena Giménez (Swissgrid)

4.4 Anhänge WP 2

4.4.1 Untersuchte Szenarien

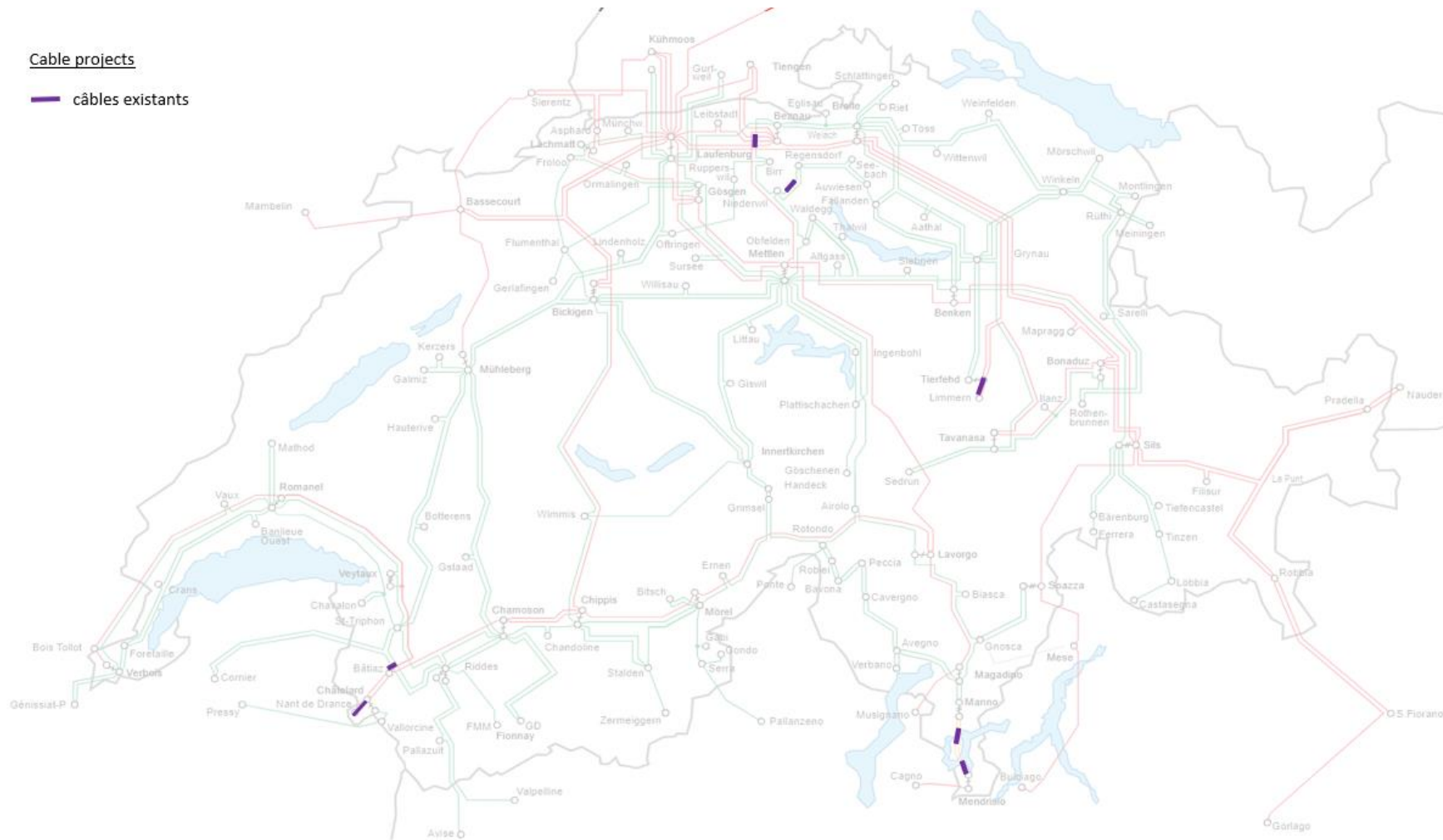


Abb. 4-1: In Szenario 1 berücksichtigte Kabel

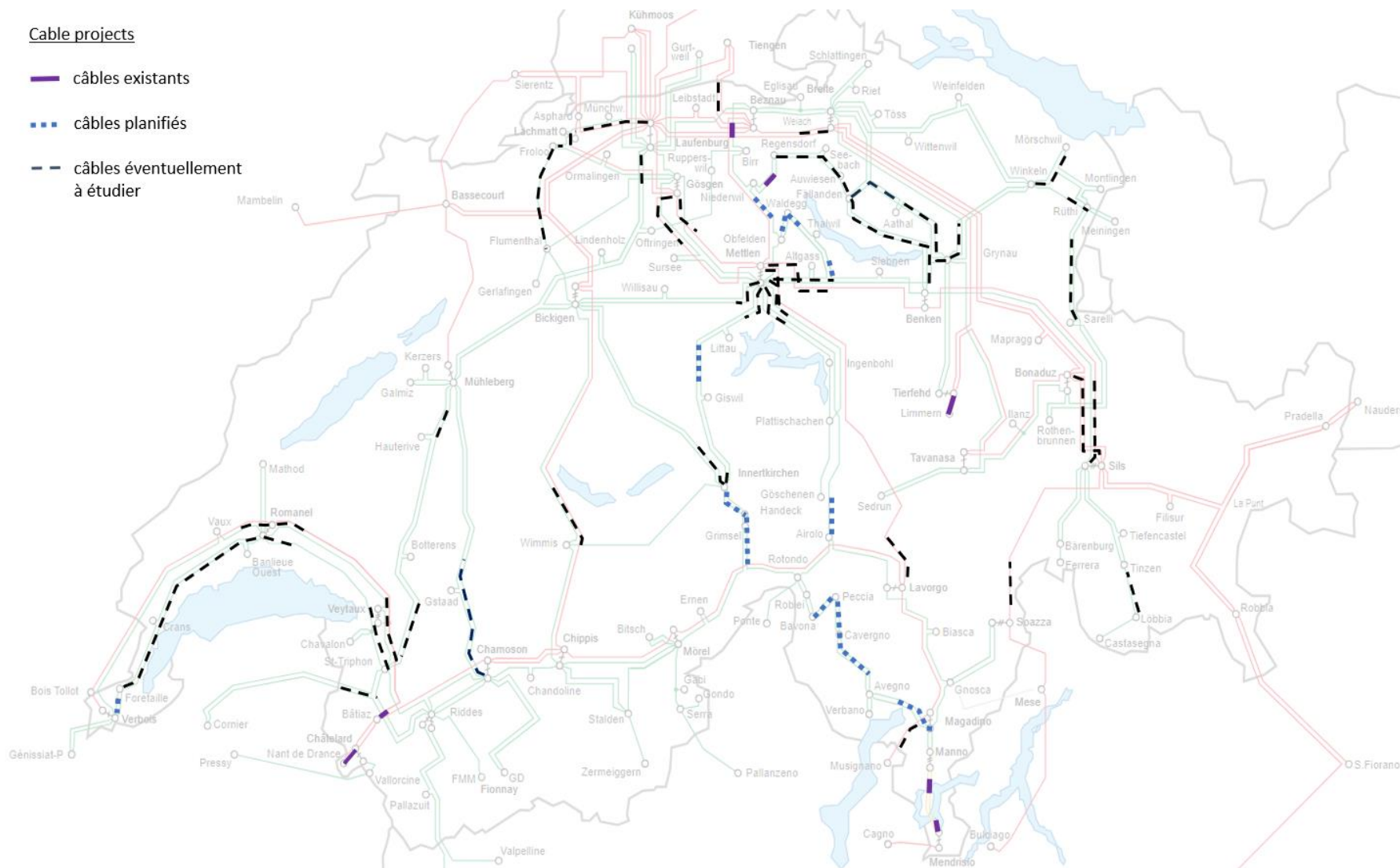


Abb. 4-3: In Szenario 3 berücksichtigte Kabel

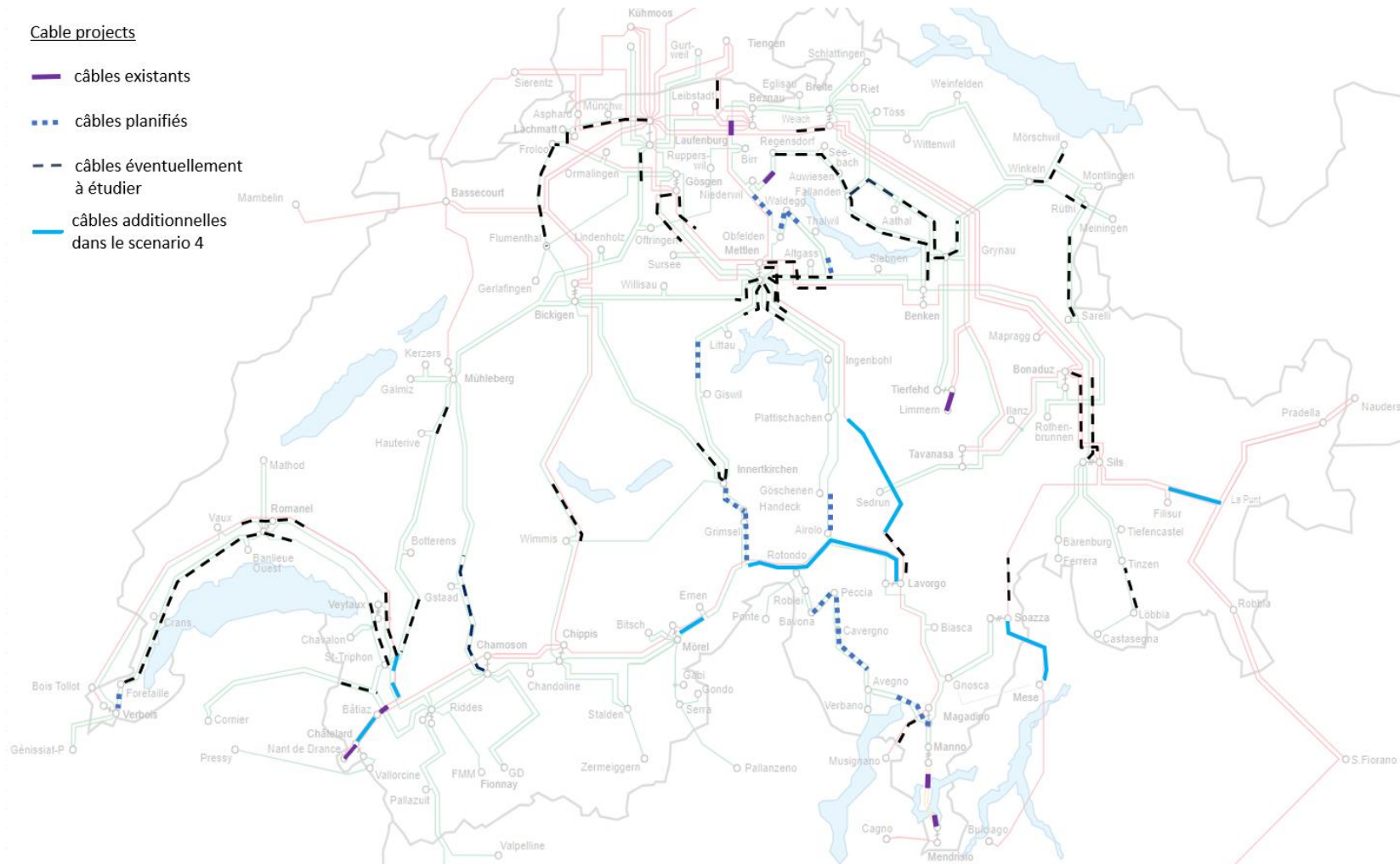


Abb. 4-4: In Szenario 4 berücksichtigte Kabel

4.4.2 Netzwerkmodellierung in EMTP

4.4.2.1 Vorteile von EMT-Simulationen

Aufgrund der zunehmenden Netzkomplexität reicht es nicht aus, die Auswirkungen der geplanten Kabelsysteme auf das Spannungsprofil, die Kurzschlussleistung und den Energiefluss zu bewerten, da sich die transienten und dynamischen Reaktionen der Kabel auf kleine und grosse Störungen von denen der Freileitungen unterscheiden. Um die Stabilität der technischen Leistung und die Sicherheit von Betrieb und Versorgung zu gewährleisten, müssen daher auch Studien zu elektromagnetischen Transienten (EMT, englisch: electromagnetic transients) durchgeführt werden, um die Reaktionen des Systems auf Oberschwingungen und Resonanzen sowie das Systemverhalten bei bestimmten transienten Ereignissen am Standort genauer zu bewerten.

Um die Vorteile von EMT-Simulationen zu demonstrieren, wird in Abb. 4-5[2.9] ein Überblick über die drei wichtigsten Simulationswerkzeuge gegeben, die üblicherweise bei der Analyse von Stromnetzen verwendet werden.

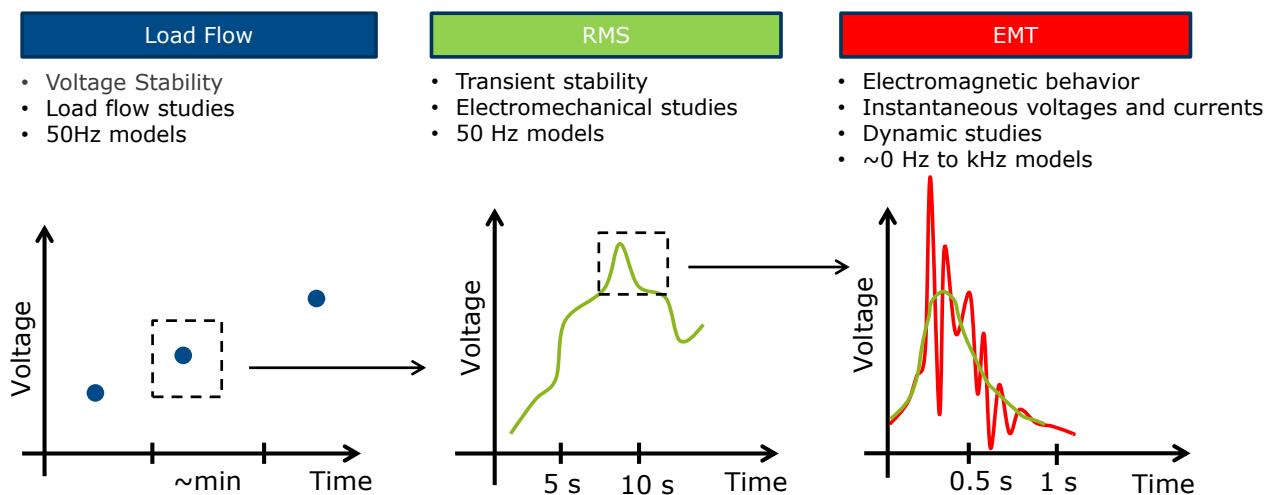


Abb. 4-5: Überblick über die drei Arten von Werkzeugen für die Analyse von Stromnetzen [2.9]

EMT-Simulationen gelten für einen breiten Frequenzbereich und erfordern daher detaillierte Darstellungen der einzelnen Netzkomponenten (d. h. Hochspannungsausrüstung, Umrichter, C&P-Systeme, falls vorhanden usw.). Wie in Abb. 4-5 gezeigt, bieten EMT-Simulationen im Zeitbereich anstelle eines einzelnen «Schnappschusses» (Lastfluss) oder einer langsamen Dynamik in einem Bereich von mehreren Sekunden (RMS) eine detaillierte transiente dynamische Analyse innerhalb von Mikro- oder Millisekunden, indem sie die momentanen Wellenformen der Zustandsvariablen zu einem beliebigen Zeitpunkt im simulierten Netz berechnen, wodurch das Systemverhalten in einem breiten Frequenzbereich genau dargestellt wird. Der Preis dafür ist jedoch eine wesentlich längere Simulationszeit als bei Lastfluss- oder RMS-Tools.

Die Modellierung mehrerer Hauptkomponenten des Netzes, einschliesslich der Modellierungsansätze und Fallbeispiele, wird in den folgenden Abschnitten dargestellt.

4.4.2.2 Einführung von Leitungs-/Kabelmodellen in EMTP

4.4.2.2.1 Verfügbare Leitungs-/Kabelmodelle in EMTP

Bei EMT-Studien von Stromnetzen hängt die Modellierung von unterirdischen Kabeln und Freileitungen von den zu untersuchenden Phänomenen und einer Reihe weiterer Einschränkungen ab, wie dem interessierenden Frequenzbereich, dem Zeitschritt der numerischen Integration im Verhältnis zur Komplexität des Netzes

usw. In der Literatur wurden mehrere Kabel- und Leitungsmodelle vorgeschlagen, die derzeit in den meisten EMT-Simulationswerkzeugen verfügbar sind. Diese Modelle können grob in zwei Kategorien eingeteilt werden: Modelle mit pauschalen Parametern und Modelle mit verteilten Parametern.

4.4.2.2 Modelle mit gruppierten Parametern

Modelle mit gebündelten Parametern (englisch: lumped parameter models), auch PI-Abschnittmodelle genannt, betrachten die Gesamtlänge eines Erdkabels oder einer Freileitung als einen einzigen Abschnitt, anstatt eine unendliche Anzahl von Kabel- oder Leitungssegmenten zu berücksichtigen. In EMTP stehen zwei Arten von Vorlagen für Kabel/Leitungen mit gruppierten Parametern zur Verfügung, die in Tabelle 4-1 aufgeführt sind.

Name des Modells	Eigenschaften	Anwendbarer Frequenzbereich
Nominal-PI	R, L, C mit fester Nennfrequenz	50/60
Exact-PI	R, L, C, die bei festen Frequenzen berechnet und korrigiert werden, um die Auswirkungen langer Linien auszugleichen (verteilte Natur). Nur anwendbar für die Simulation im Frequenzbereich	DC bei kHz

Tabelle 4-1: Modelle für Kabel/Leitungen mit gruppierten Parametern, die in EMTP verfügbar sind

Die Parameter des Nominal-PI-Modells werden direkt aus der Multiplikation der bei der Speisefrequenz berechneten elektrischen Eigenschaften des Kabels/der Leitung R' , L' und C' (Widerstand, Induktivität bzw. Kapazität pro Längeneinheit) mit der Gesamtlänge des Kabels/der Leitung abgeleitet, was eine Darstellung des Modells mit einer Serienimpedanz $R + j\omega L$ und Nebenschlusskomponenten von C (Kapazität) parallel zu G (Leitwert) ergibt. Die Ersatzschaltung des Dreiphasenmodells Nominal-PI in EMTP ist in Abb. 4-6 dargestellt (unter Vernachlässigung des Nebenschlussleitwerts G).

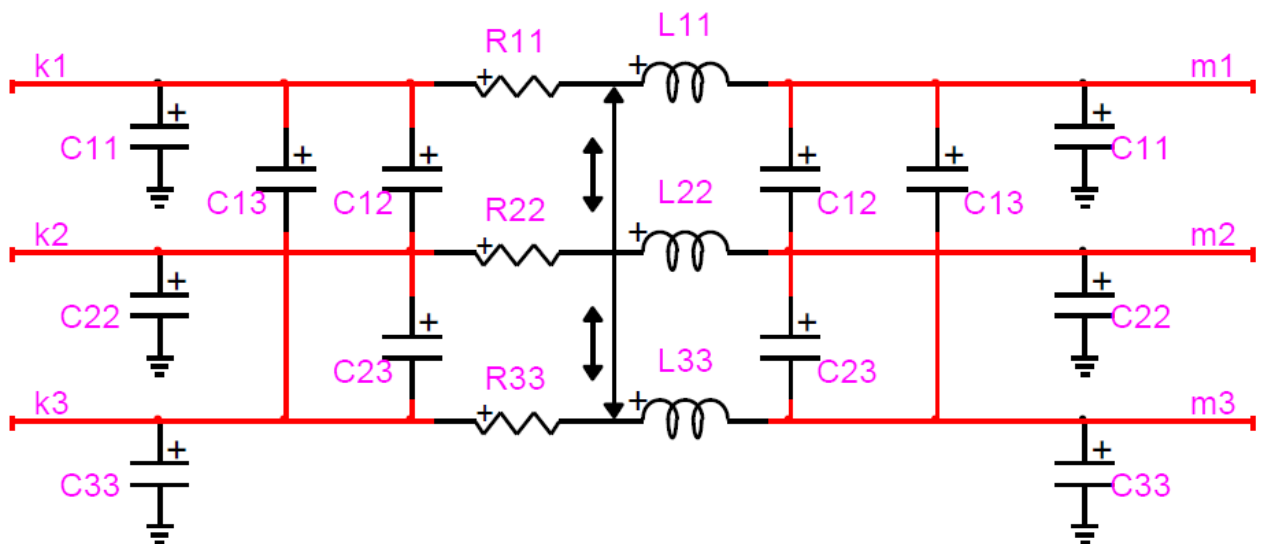


Abb. 4-6: Ersatzschaltung des Dreiphasenmodells Nominal-PI in EMTP (Nebenschlussleitwert G vernachlässigt)

Das Nominal-PI-Modell kann mit ausreichender Genauigkeit für elektrische Frequenzphänomene im stationären Zustand verwendet werden. Es wird daher hauptsächlich in Studien wie Leistungsfluss, Kurzschluss, Dynamik usw. verwendet.

Das Exact-PI-Modell hingegen ähnelt dem Nominal-PI-Modell mit geänderten gruppierten Elementen. Angepasste R' , L' und C' , um der verteilten Natur langer Kabel/Leitungen Rechnung zu tragen.

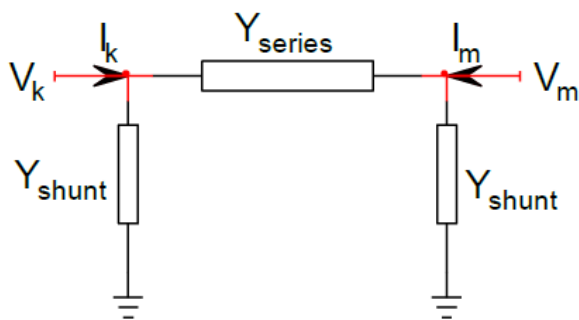


Abb. 4-7: Einphasige Darstellung des Exact-PI-Modells in EMTP

Für ein einphasiges Kabel/Leitung, das mithilfe des Exact-PI-Modells dargestellt wird, wie in Abb. 4-7 gezeigt, kann die Beziehung zwischen Spannung und Strom am Sende- und Empfangsende (k bzw. m) des Kabels/Leitung aus der folgenden Gleichung für die Knotenadmittanzmatrix berechnet werden:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{series} + Y_{shunt} & -Y_{series} \\ -Y_{series} & Y_{series} + Y_{shunt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (4,1)$$

wobei V_k, I_k und V_m, I_m die Spannungen und Ströme an den Enden des Senders und des Empfängers darstellen und die Serien- und Nebenschlussadmittanzen durch:

$$Y_{series} = \frac{1}{Z_c \sinh(\gamma l)}$$

$$Y_{shunt} = \frac{1}{Z_c \tanh(\gamma l / 2)}$$

Es sollte erwähnt werden, dass γ und Z_c die Ausbreitungskonstante bzw. der Wellenwiderstand sind. Sie können gegeben werden durch:

$$\gamma = \sqrt{(R' + sL')(G' + sC')} = \underbrace{\alpha + j\beta}_{\text{attenuation constant} + \text{phase constant}}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R' + sL'}{G' + sC'}} = \widehat{Z}_c \angle \theta_{Z_c}$$

In EMTP kann das Exact-PI-Modell nur für Steady-State- und Frequenz-Scan-Analysen verwendet werden, mit der Möglichkeit, genaue Simulationsergebnisse für einen bestimmten Frequenzbereich zu liefern. Weitere Informationen über das Exact-PI-Modell finden Sie unter [2.10] – [2.13].

4.4.2.2.3 Modelle mit verteilten Parametern

In Wirklichkeit haben ein unterirdisches Kabel oder eine Freileitung eine bestimmte Länge. Ihre elektrischen Eigenschaften (R' , L' und C') sind daher nicht an einer bestimmten Stelle des Netzwerks konzentriert und gebündelt, sondern gleichmässig über die gesamte Länge des Übertragungswegs verteilt. Eine Wellenform, die sich von einem Ende zum anderen eines Kabel-/Leitungssegments bewegt, kann aufgrund der verteilten Natur der elektrischen Eigenschaften des Kabels/der Leitung und der begrenzten

Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenform eine Amplitudendämpfung und eine Phasenverschiebung erfahren, was in detaillierten transienten Simulationen berücksichtigt werden muss. Darüber hinaus können transiente Störungen in Stromnetzen steile Spannungswellenfronten verursachen, die hochfrequente Komponenten enthalten und in der Folge zu Überspannungen an Busverbindungen oder Reflexionen an offenen Enden führen. Die Frequenzabhängigkeit der elektrischen Eigenschaften von Kabeln/Leitungen (d. h. Skin-Effekt in den Leitern, Rückweg zur Erde usw.). In EMTP stehen drei Arten von Kabel-/Leitungsmodellen mit verteilten Parametern zur Verfügung, wie in Tabelle 4-2 dargestellt.

Name des Modells	Eigenschaften	Anwendbarer Frequenzbereich
CP (konstanter Parameter)	Stossimpedanz und Ausbreitungsgeschwindigkeit bei einer festen Frequenz im Modalbereich. Keine Frequenzabhängigkeit. Relativ höhere Recheneffizienz.	Eine feste Frequenz, bei der die Stossimpedanz und die Ausbreitungsgeschwindigkeit ausgewertet werden
FD (frequenzabhängig)	Frequenzabhängigkeit im Modalbereich. Annahme bestimmter Annäherungen.	DC bei kHz
Wideband	Vollständige Abhängigkeit von der Frequenz im Bereich der Phase. Präziser. Schwere Rechenlast.	DC bei kHz

Tabelle 4-2: In EMTP verfügbare Kabel-/Leitungsmodelle mit verteilten Parametern

Sowohl das CP- als auch das FD-Modell basieren auf der Lösung der partiellen Differentialgleichungen (4.2) und (4.3) (unter der Annahme, dass $\Delta x \rightarrow 0$) eines infinitesimalen Segments des Klumpenelements eines Kabels/einer Einzeldrahtleitung, wie in Abb. 4-8 dargestellt.

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -R' i(x,t) - L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -G' i(x,t) - C' \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} \quad (4.3)$$

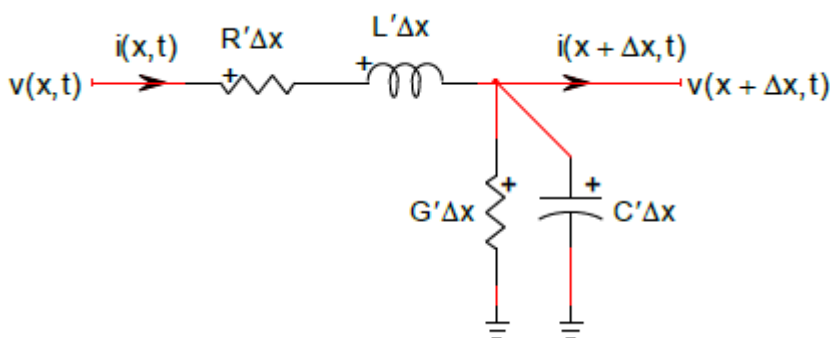


Abb. 4-8: Ersatzschaltung für ein infinitesimales Segment eines Kabels/einer Leitung mit Klumpenelementen

Löst man die Gleichungen (4.2) und (4.3) für die gesamte Länge l des Kabel-/Leitungssegments (von $x = 0$ bis $x = l$), erhält man die folgenden beiden Gleichungen:

$$I_k = Y_c V_k - H[Y_c V_m + I_m] \quad (4.4)$$

$$I_m = Y_c V_m - H[Y_c V_k + I_k] \quad (4.5)$$

wobei V_k, I_k und V_m, I_m die Spannungen und Ströme an den Enden des Senders und des Empfängers bezeichnen und Y_c, H gegeben sind durch:

$$Y_c = Z_c^{-1}$$

$$H = e^{-\gamma l}$$

Für ein Mehrleitersystem (z. B. Dreiphasenkabel/-leitungen) liegen die Gleichungen (4.2) bis (4.5) in Vektor- und Matrixform vor.

Anschliessend werden die Gleichungen (4.4) und (4.5) im Modalbereich mit Hilfe einer bestimmten Technik der Modalzerlegung mit Transformationen gelöst und für transiente Studien in EMTP wieder in den Zeitbereich umgewandelt.

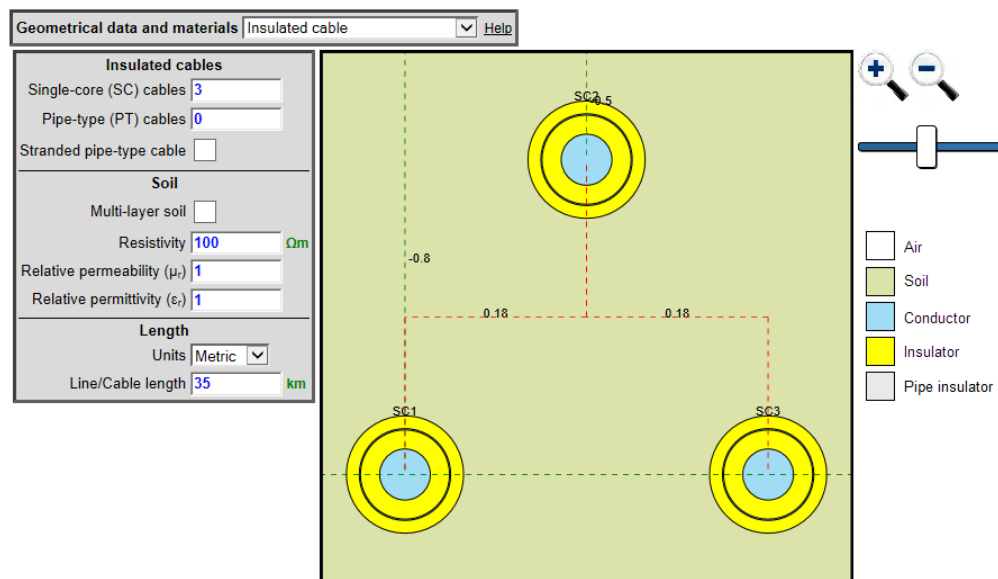
Es ist zu beachten, dass beim CP-Modell Y_c und H für eine einzelne angegebene Frequenz berechnet werden, während sie beim FD-Modell für einen ausgewählten Frequenzbereich abgetastet und mithilfe einer Bode-basierten Technik in den äquivalenten rationalen Funktionen kurvenförmig angepasst werden. Ausführliche Informationen zu den CP- und FD-Modellen finden Sie unter [2.11] und [2.14].

Wie in Tabelle 4-2 beschrieben, ist das Wideband-Modell bei weitem das genaueste Modell für Simulationen im Zeitbereich mit Kabeln und Leitungen für ein breites Frequenzband. Es arbeitet im Phasenbereich und berücksichtigt die vollständige Frequenzabhängigkeit der elektrischen Parameter des Kabels/der Leitung mit möglichst wenigen Annäherungen. Die Theorien und Algorithmen, die hinter dem Breitbandmodell in EMTP stehen, sind jedoch recht komplex und würden daher den Rahmen dieses Berichts sprengen. Weitere Informationen über das Breitbandmodell finden sich in einer Reihe von Publikationen, wie z. B. [2.15] – [2.20].

Aufgrund der Besonderheiten des Projekts werden Modelle mit gruppierten Parametern aufgrund ihrer oben beschriebenen Einschränkungen nicht zur Modellierung von Kabeln/Leitungen im Rahmen dieses Projekts verwendet. Von allen in EMTP verfügbaren Modellen mit verteilten Parametern wurde beschlossen, das Wideband-Modell zur Modellierung aller Leitungen/Kabel in diesem Projekt zu verwenden, da es bei weitem das genaueste Modell für Simulationen im Zeitbereich ist, das die gesamte Frequenzabhängigkeit mit einem Minimum an Annäherungen berücksichtigt.

4.4.2.3 Modellierung von unterirdischen Kabelsegmenten

Um die Daten für das Kabelmodell abzuleiten, das in den transienten Studien verwendet werden soll, müssen ihre geometrischen und materiellen Eigenschaften angegeben werden. Am Beispiel des 35 km langen 220-kV-Kabels Froloo – Flumenthal in Szenario 3 sind die geometrischen und materiellen Daten des Kabels in Abb. 4-9 dargestellt. Es ist anzumerken, dass dieses Kabel auf der Grundlage der ersten Annahmen einen Querschnitt von 1600 mm² hat.



Single-core (SC) cable main data

Cable	Number of conductors	Horizontal position (m)	Ground depth (m)	Radius (cm)
1	2	0	-0.8	5.65
2	2	0.175	-0.49689	5.65
3	2	0.35	-0.8	5.65

Single-core (SC) cable conductors/insulators data

Cable	Conductor	Phase	Inner radius (cm)	Outer radius (cm)	Conductor resistivity (Ohm m)	Conductor relative permeability	Conductor relative permittivity	Insulator relative permittivity	Insulator loss factor
1	1	1	0	2.445	1.76e-8	1	1	2.5318	0.0008
1	2	0	4.295	4.404765	2.84e-8	1	1	2.5	0.001
2	1	2	0	2.445	1.76e-8	1	1	2.5318	0.0008
2	2	0	4.295	4.404765	2.84e-8	1	1	2.5	0.001
3	1	3	0	2.445	1.76e-8	1	1	2.5318	0.0008
3	2	0	4.295	4.404765	2.84e-8	1	1	2.5	0.001

Abb. 4-9: Geometrische und materielle Daten des 220-kV-Kabels Froloo – Flumenthal in Szenario 3 (35 km)

Die Auswahl und Ableitung bestimmter geometrischer und materieller Parameter des Kabels sowie die getroffenen Annahmen werden wie folgt hervorgehoben:

4.4.2.3.1 Bodenparameter

Der spezifische Erdwiderstand spielt nicht nur eine wichtige Rolle bei transienten Überspannungen im Mantel, sondern trägt auch teilweise zur homopolaren Impedanz des Kabelsystems bei, was sich auf das Verhalten des Systems bei asymmetrischen Fehlern auswirken würde. Es wurde beschlossen, den von EMTP vorgeschlagenen Standardwert von 100 Ωm aus den folgenden Gründen zu verwenden:

- a. Der spezifische Erdwiderstand ist von inhomogener Natur und variiert von Gebiet zu Gebiet, was die Modellierung von Kabelsegmenten, die einen einzigen, festen Wert für den spezifischen Erdwiderstand benötigen, erschwert;

- b. trotz der Verfügbarkeit einiger interner Dokumente zu diesem Thema sind genaue Feldmessungen selten;
- c. der Standard-Erdwiderstand von 100 Ωm bietet eine angemessene Genauigkeit in den meisten transienten Studien, was in dieser Phase des Projekts ausreichend ist.

Neben dem spezifischen Bodenwiderstand werden die von EMTP vorgeschlagenen Standardwerte auch für die relative Bodenpermeabilität μ_r und die Permittivität ϵ_r übernommen.

4.4.2.3.2 Hauptdaten des Einleiterkabels (SC, englisch: single-core)

Da im derzeitigen Projektstadium keine konkreten Informationen über die Kabelformation vorliegen, wird angenommen, dass die *Trefoil-Formation* umgesetzt wird, wie in Abb. 4-10 [2.21] dargestellt. Geringfügige Unterschiede in der Gesamtinduktivität und -kapazität des Kabels aufgrund von Änderungen in der gegenseitigen Phasenkopplung sind zu erwarten, wenn eine andere Formationsart am Standort umgesetzt wird. Die aktuellen Annahmen sind jedoch für die Zwecke der Machbarkeitsstudien relevant.

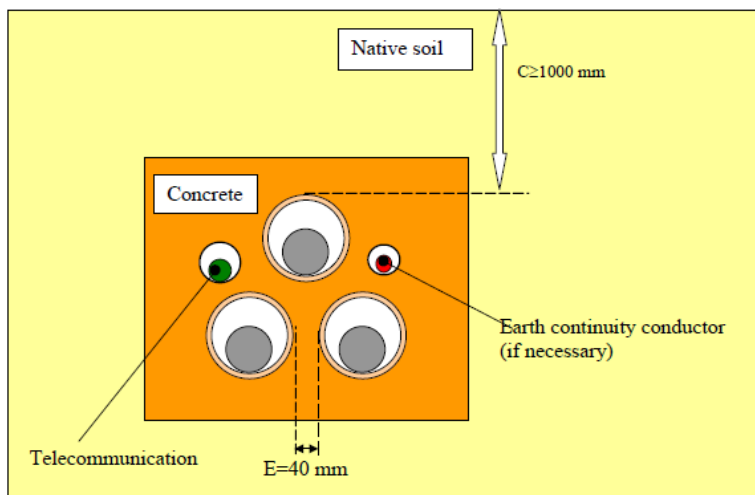


Abb. 4-10: Typisches Schema eines Trefoil-Kabelsystems [2.21]

Die Bodentiefe für unterirdische Kabelsysteme beträgt in der Regel weniger als 2 m. Eine Tiefe von mehr als 2 m bedeutet höhere Anforderungen an die Bautechnik und ist daher eher selten. Eine Tiefe von 0,8 m für die Phasen a und c wird in diesem Projekt als Annahme betrachtet.

4.4.2.3.3 Leiterdaten/Isolation von Einleiterkabeln (SC)

Unter der Annahme, dass der Milliken-Kupferleiter fest ist, um die Herleitung der Parameter zu vereinfachen, können der innere und äussere Radius des Leiters und des Schirms wie folgt hergeleitet werden [2.22].

Der spezifische Widerstand des Leiters und des Aluminiumschirms sowie die Verlustfaktoren der Isolierung sind aus [2.23] [2.24] zu entnehmen, wo die Ergebnisse von Feldversuchen eines langen Kabelsystems desselben Typs (XLPE) bei RTE dargestellt werden.

Die Nennkapazität pro Längeneinheit eines solchen Kabelsystems beträgt 0,25 $\mu\text{F}/\text{km}$ gemäss [2.22]. Die relative Permittivität von XLPE-Isolierung kann daher mit der folgenden Formel berechnet werden [2.10].

$$\epsilon_{r1} = \frac{C \ln(r_2/r_1)}{2\pi\epsilon_0} \quad (4.6)$$

wobei:

- C : Kabelkapazität pro Längeneinheit ($\mu\text{F}/\text{km}$)
- r_2 : Innenradius des Bildschirms
- r_1 : Aussenradius des Leiters
- ε_0 : Permittivität des Vakuums

Wie bei anderen typischen Hochspannungskabeln ist jedoch auch der Leiter des 220-kV-Kabelsystems Frolo – Flumenthal von zwei Schichten aus Halbleitermaterial auf der Aussenfläche des Leiters und auf der Innenfläche des Schirms umgeben. Diese Halbleiterschichten haben die Aufgabe, das elektrische Feld um den Leiter herum auszugleichen, indem sie die elektrische Belastung der Isolierung verringern und die elektrolytische Korrosion der metallischen Panzerungsschichten verhindern. Aufgrund des höheren spezifischen Widerstands des Halbleitermaterials neigen Ströme dazu, im Kern zu fliessen, während Ladungen durch die Halbleiter fliessen. Daher sind die Halbleiterschichten für die Magnetismus- und Stromberechnungen Teil des Isolationssystems, während sie für die Kapazitätsberechnung der Kabel Teil des Kerns sind. Daher ist es notwendig, die relative Permittivität der Isolierung zu ändern, indem die Halbleiterschichten als Teil der Isolierung behandelt werden [2.25].

$$\varepsilon_{r1_mod} = \varepsilon_{r1} \frac{\ln(R_b/R_a)}{\ln(r_b/r_a)} \quad (4.7)$$

wobei:

- r_b : Aussenradius der Isolierung
- r_a : Innenradius der Isolierung
- R_b : Aussenradius der zweiten Halbleiterschicht
- R_a : Aussenradius des Leiters

Daher ist es möglich, die modifizierte relative Permittivität des Isolators zu erhalten:

$$\varepsilon_{r1_mod} = 2.5318$$

Die äusseren Lagen des Kabels bestehen in der Regel aus Materialien aus dichtem Polyethylen. Diese Materialien sind jedoch im derzeitigen Stadium des Projekts nicht bekannt. Aufgrund seiner viel geringeren Dicke als die der Isolationsschicht (die daher weniger Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften des Kabels hat) wird eine relative Dielektrizitätskonstante von 2,5 angenommen, wie in [2.23].

Zusätzlich zu den zuvor vorgestellten Diskussionen müssen in EMTP auch mehrere zusätzliche Modellierungsoptionen angegeben werden, um die allgemeine dynamische Leistung des Kabelmodells zu verbessern, wie in Abb. 4-11 gezeigt wird.

Modeling options

Model	Wideband	▼
Frequency range		
f_{\min}	0.001	Hz
Points/decade	15	
Decades	10	
f_{\max}	10E6	Hz
Options		
Proximity effect	<input type="checkbox"/>	
Earth return path	<input checked="" type="checkbox"/>	
Crossbonded	<input checked="" type="checkbox"/>	
Crossbonded and reduced	<input checked="" type="checkbox"/>	
Wideband Fitting		
Convergence tolerance	0.1	%
Cable model correction	<input type="checkbox"/>	
DC correction	<input type="checkbox"/>	
Apply grouping	<input checked="" type="checkbox"/>	

Abb. 4-11: Modellierungsoptionen für Wideband-Kabelmodelle

Unter Abb. 4-11 ist die Option «Earth return path» in Wideband-Modellen wichtig für die Stabilität und die genaue Darstellung des transienten Verhaltens des Kabels (insbesondere des Metallschirms) bei hohen Frequenzen (10 kHz und mehr). Die beiden Optionen «Crossbonded» und «Crossbonded and reduced» werden gewählt, um die Vollständigkeit der Verbindungsstellen innerhalb jeder «major section» zu berücksichtigen und um eine effiziente Berechnung zu erreichen. Die Anpassungsparameter werden mithilfe eines Trial-and-Error-Ansatzes in «Frequency range» sorgfältig ausgewählt, um Stabilitätsprobleme aufgrund von Passivitätsverletzungen zu vermeiden. Weitere Informationen zur Auswahl anderer Modellierungsoptionen finden Sie unter [2.11].

4.4.2.4 Modellierung von Freileitungssegmenten

Die elektrischen und physikalischen Eigenschaften von Freileitungen in Wideband-EMTP-Modellen werden aus den Materialien und geometrischen Daten der Leiter und Erddrähte sowie aus den geometrischen Parametern der Masten abgeleitet. Bitte beachten Sie:

- Für bestehende Liniensegmente sind alle Informationen, einschliesslich der Phasenpläne, verfügbar. Daher sind Mindestannahmen erforderlich.
- In einigen Bereichen des Netzes sind umfangreiche Arbeiten zur Verbesserung der Infrastruktur geplant. Daher werden bei der Modellierung dieser Liniensegmente, die in naher Zukunft umgesetzt werden sollen, entsprechende Annahmen getroffen.

Zu Demonstrationszwecken wird in diesem Abschnitt die Ableitung der Parameter des Freileitungsmodells in EMTP für die 71,1 km lange 220-kV-Zweikreisleitung Bickigen – Innertkirchen als Beispiel angeführt. Es ist anzumerken, dass ein 15 km langes Kabelsegment vorgesehen ist, um einige Abschnitte dieser Strecke zu ersetzen, wie in Szenario 3 vorgesehen.

Der Phasenplan TR1520 bestätigt, dass der derzeitige Übertragungsweg Bickigen – Innertkirchen aus einem System von 220 kV-Zweikreis-Freileitungen besteht, die auf demselben Mast montiert sind, wobei die vorherrschende Konfiguration des Mastes in Abb. 4-12 angegeben ist.

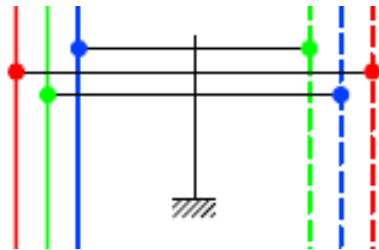


Abb. 4-12: Dominierende Mastkonfiguration auf der Strecke Bickigen – Innertkirchen (beides 220-kV-Leitungen)

Die Masse des identifizierten dominanten Mastes können aus dem Projekt A158 Trassendigitalisierung entnommen werden, wie in Abb. 4-13 dargestellt. Es ist zu beachten, dass:

- die Höhe jedes Phasenleiters in der Erhebungsanzeige rechts identifiziert werden kann, während der horizontale Abstand jedes Phasenleiters direkt in der Abbildung angegeben wird (Einheit: Meter);
- W1 – W6 stehen für die einadrigen Phasenleiter und W7 für den einadrigen Erdleiter.

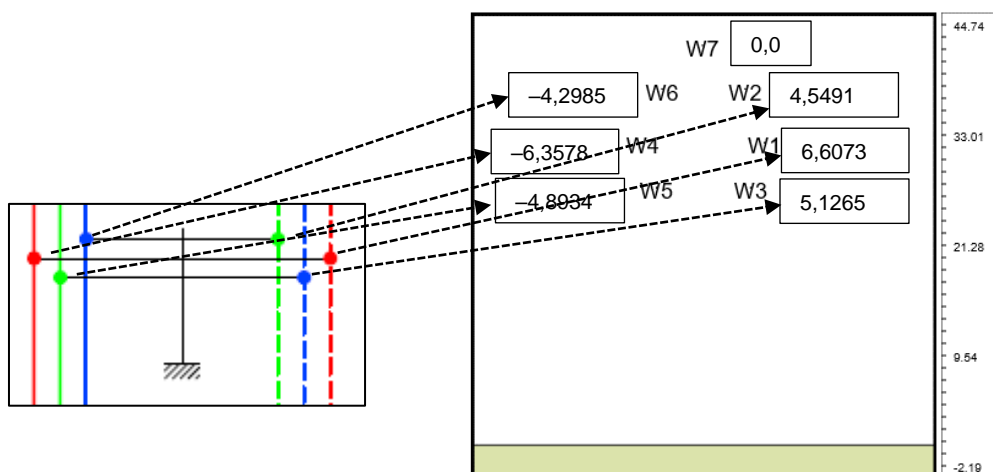


Abb. 4-13: 220-kV-Mast auf der Strecke Bickigen – Innertkirchen

Neben den geometrischen Daten des Mastes verlangt EMTP auch die folgenden Informationen zu den Leitern und Erddrähnen:

- Art der Leiter (Einzeldraht oder gebündelt)
- Anzahl der Leiter pro Phase, wenn sie gruppiert sind
- Bezugswinkel bei Zusammenlegung
- Radius des Strahls
- Radius des Leiters
- DC-Widerstand des Leiters

4.4.2.4.1 Phasenleiter

Die materiellen und geometrischen Daten für die 220 kV-Leitung Bickigen – Innertkirchen sind in Tabelle 4-3 dargestellt.

Länge (km)	Das gebündelte Angebot	Querschnitt (mm ²)	Art
40,3	1	600	Aldrey
30,8	1	486 + 64	ACSR

Tabelle 4-3: Materielle und geometrische Daten für die 220-kV-Leitung Bickigen – Innertkirchen

Laut Tabelle 4-3 besteht ein 40,3 km langer Abschnitt dieser Verbindung aus einem einadrigen Aldrey-Leiter (AAAC, All Aluminum – Alloy Conductors) für jede Phase mit einem Querschnitt von 600 mm², während jede Phase des restlichen 30,8 km langen Abschnitts aus einem einadrigen ACSR-Leiter (Aluminum Conductors, Steel-Reinforced) mit einem Querschnitt von 486 (Aluminium)+64 (Stahl) mm² besteht.

Ein Katalog von Aldrey- und ACSR-Leitern mit ähnlichen Querschnitten, die den Normen IEC 61089 bzw. DIN 48204 entsprechen, kann von einem bestimmten Hersteller bezogen werden [2.26], von dem ein Auszug in Abb. 4-14 gezeigt wird. Die entsprechenden Werte werden in diesem Projekt als Annahme verwendet.

Code Number	Nominal cross sectional area	Conductor construction	Approx. overall diameter	Approx. overall weight	Max. DC Resistance at 20 °C	Rated strength	AES Code
	mm ²	No. x Ø (mm)	mm	Kg / km	Ω / km	KN	
500	575.0	37 x 4.45	31.20	1585.5	0.05770	169.76	L02B800370IMX

(a)

Nominal cross sectional area	Nominal cross sectional area		Conductor construction		Approx. overall diameter	Approx. overall weight	Calculated DC Resistance at 20 °C	Ampacity (*)	Rated strength	AES Code
	Al	St	Al	St						
	mm ²		No. x Ø (mm)		mm	Kg / km	Ω / km	A	KN	
450 / 40	448.71	39.49	48 x 3.45	7 x 2.68	28.7	1553	0.06440	920	120.19	S02I400550DMX
490 / 65	490.29	63.55	54 x 3.40	7 x 3.40	30.6	1860	0.05900	960	152.85	S02I500610DMX
495 / 35	494.36	34.09	45 x 3.74	7 x 2.49	29.9	1636	0.05840	985	120.31	S02I600520DMX

(b)

Abb. 4-14: Auszug aus dem Katalog der Aldrey- und ACSR-Leiter für 220 kV Bickigen – Innertkirchen (Alfanar [2.26])

Der Radius des Leiters und der DC-Widerstand können so ermittelt werden:

Für den 40,3 km langen Abschnitt:

$$r_{c220} = 1.560 \text{ cm}$$

$$R_{DC,220} = 0.0577 \text{ Ω/km}$$

Für den 30,8 km langen Abschnitt:

$$r_{c_{220}} = 1.530 \text{ cm}$$

$$R_{DC_{220}} = 0.0590 \text{ } \Omega/\text{km}$$

4.4.2.4.2 Leiter des Erdungsdrahtes

Informationen zu Material und Geometrie des Erdungsdrahtes für die 220-kV-Verbindungen Bickigen – Innertkirchen sind in der folgenden Tabelle Tabelle 4-4 aufgeführt.

Länge (km)	Querschnitt (mm ²)	Art
71,1	70	ST

Tabelle 4-4: Materielle und geometrische Daten für den Erdungsdraht in 220-kV-Verbindungen Bickigen – Innertkirchen

Es ist leicht zu verstehen, dass die beiden Freileitungen, die auf demselben Mast montiert sind, denselben Erdungsdraht teilen, der hauptsächlich aus 70 mm² Stahl besteht. Aufgrund des Fehlens eines Leiterkatalogs wird angenommen, dass die Informationen über den Gleichstromwiderstand und den Leiterradius des Stahlerdungsdrahts von 70 mm² dieselben sind wie die eines 74,05 mm² Stahlerdungsdrahts von Hind Aluminium Industries Limited, der im folgenden Dokument Abb. 4-15 (unter Verwendung der Norm ASTM B 416) auszugsweise dargestellt ist.

No and size of wires	Area	Diameter	Stranding and wire diameter		Nominal breakingload	MaximumDCResistanceat20°C	Standard Weight
	mm ²	mm	N°	Ø(mm)	daN	Ohm/km	kg/km
7No.7AWG	74.05	11.01	7	3.67	8,530	1.1566	492.9

Abb. 4-15: Auszug aus dem Katalog der Leiter für den Erdungsdraht in der 220 kV Bickigen – Innertkirchen (Hind Aluminium Industries Limited)

Aus diesem Grund:

$$r_{c_g} = 0.5505 \text{ cm}$$

$$R_{DC_g} = 1.1566 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Basierend auf den oben dargestellten Diskussionen können die geometrischen und materiellen Daten für die 220 kV Freileitungen Bickigen – Innertkirchen im EMTP-Modell abgeleitet werden und sind in Abb. 4-16 dargestellt.

Geometrical data and materials Overhead line

Overhead lines
 Use Overhead Line Database

Single-wire (W) conductors

Bundled (B) conductors

Conductor characteristic

Midspan height available

Hollow conductors

Soil

Multi-layer soil

Resistivity Ωm

Relative permeability (μ_r)

Relative permittivity (ϵ_r)

Length

Units

Line/Cable length km

The diagram shows a cross-section of an overhead line with 7 conductors labeled W1 through W7. The conductors are arranged in a vertical stack. W7 is at the top, followed by W6 and W2, then W4 and W1, then W5 and W3. A vertical scale on the right indicates heights from -2.19 to 44.74. The ground level is at -2.19. The conductors are positioned at various heights: W7 at 44.74, W6 at 33.01, W2 at 33.01, W4 at 33.01, W1 at 33.01, W5 at 21.28, and W3 at 21.28. The ground level is at -2.19.

Drawing options

List of tables

Overhead line, Single-wire (W) conductors

Conductor	Phase	Horizontal position (m)	Height (m)	Radius (cm)	DC resistance (Ohm/km)	Conductor relative permeability (μ_r)	Conductor relative permittivity (ϵ_r)
1	1	6.6073	32.1960	1.56	0.0577	1	1
2	2	4.5491	37.9160	1.56	0.0577	1	1
3	3	5.1265	27.4060	1.56	0.0577	1	1
4	4	-6.3578	32.1960	1.56	0.0577	1	1
5	5	-4.8934	27.4060	1.56	0.0577	1	1
6	6	-4.2985	37.9160	1.56	0.0577	1	1
7	0	0	42.5460	0.5505	1.1566	1	1

(a)

Geometrical data and materials Overhead line

Overhead lines
Use Overhead Line Database

Single-wire (W) conductors

Bundled (B) conductors

Conductor characteristic

Midspan height available

Hollow conductors

Soil

Multi-layer soil

Resistivity Ωm

Relative permeability (μ_r)

Relative permittivity (ϵ_r)

Length

Units

Line/Cable length km

Drawing options

List of tables

Overhead line, Single-wire (W) conductors

Conductor	Phase	Horizontal position (m)	Height (m)	Radius (cm)	DC resistance (Ohm/km)	Conductor relative permeability (μ_r)	Conductor relative permittivity (ϵ_r)
1	1	6.6073	32.1960	1.53	0.059	1	1
2	2	4.5491	37.9160	1.53	0.059	1	1
3	3	5.1265	27.4060	1.53	0.059	1	1
4	4	-6.3578	32.1960	1.53	0.059	1	1
5	5	-4.8934	27.4060	1.53	0.059	1	1
6	6	-4.2985	37.9160	1.53	0.059	1	1
7	0	0	42.5460	0.5505	1.1566	1	1

(b)

Abb. 4-16: Geometrische und materielle Daten für die 220-kV-Leitungen Bickigen – Innertkirchen, a): der 40,3 km lange Abschnitt, b): der 30,8 km lange Abschnitt

Die Optionen für die Modellierung von Wideband-Linienmodellen werden in Abb. 4-17 vorgestellt.

Modeling options

Model ▾

Frequency range

f_{\min} Hz

Points/decade

Decades

f_{\max} Hz

Options

Proximity effect

Earth return path

Enter G shunt

Balanced line

Segmented ground-wires

Wideband Fitting

Convergence tolerance %

DC correction

Apply grouping

Abb. 4-17: Modellierungsoptionen für Wideband-Linienmodelle

Weitere Informationen zur Auswahl anderer Modellierungsoptionen finden Sie unter [2.11].

4.4.2.5 Modellierung von Thévenins äquivalenten Netzwerken

Das Netz hinter jeder Sammelschiene, die als Endpunkt des untersuchten Netzes betrachtet wurde, wurde als Thévenin-Äquivalent modelliert, d. h. eine ideale Spannungsquelle, die mit einer Thévenin-Äquivalent-Impedanz verbunden ist. Die Thévenin-Impedanz wird durch den Kurzschlusspegel (SCL), das X/R-Verhältnis und das Z_0/Z_1 -Verhältnis des Netzes hinter der betreffenden Sammelschiene bestimmt. Dieser Ansatz ist gültig und stellt eine gängige Praxis in Übergangsstudien dar, sofern die erforderlichen Informationen verfügbar sind.

Die Parameter des Thévenin-Äquivalents in allen Unterwerken können aus den Kurzschlussbeiträgen abgeleitet werden, die von den einzelnen Leitungen/Kabeln oder Erzeugungsgruppen geliefert werden. Es ist zu beachten, dass die Kurzschlussbeiträge von Leitungen/Kabeln, die in das EMTP-Modell einfließen sollen, bei der Berechnung der Parameter der Thévenin-Äquivalente ausgeschlossen werden müssen. Die folgende Formel wird verwendet, um die Kurzschlussbeiträge von Leitungen/Kabeln und Erzeugungsgruppen an jedem PCC (gemeinsamer Kopplungspunkt, englisch: point of common coupling, ein Unterwerk, das mit Erzeugungsgruppen oder externen Systemen des modellierten Netzes verbunden ist) zu berechnen:

$$I_{cc}(3ph - fault) = \text{abs}(\sum I_{cc} * e^{i\theta}) \quad (4.8)$$

Unter der Annahme eines ausgeglichenen Netzes ($Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}$, $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$) können die positive, negative und Null-Sequenzimpedanz an jedem PCC wie folgt berechnet werden:

$$Z_1 = Z_2 = \frac{U_1}{I_{sc3ph} * \sqrt{3}} \quad (4.9)$$

$$Z_0 = \frac{3 \cdot U_1}{I_{sc1ph} \cdot \sqrt{3}} - Z_1 - Z_2 \quad (4.10)$$

In (4.9) und (4.10) bezeichnen I_{sc3ph} und I_{sc1ph} die drei- und einphasigen Fehlerströme am untersuchten PCC. So lassen sich der Widerstand und die Serienreaktanz für alle Sequenzen an jeder Sammelschiene jeweils ableiten.

Dieser klassische R-L-Ansatz geht davon aus, dass die Thévenin-Impedanz aus einem Widerstand in Reihe mit einer Induktivität besteht, was nur für Anwendungen bei niedrigen Frequenzen (d. h. im stationären Zustand) gültig ist. Bei steigender Frequenz würde die Thévenin-Impedanz ($R + j\omega L$) bei diesem Ansatz fast monoton ansteigen und somit ein induktives Verhalten zeigen. Aufgrund des Skin-Effekts ist jedoch mit steigender Frequenz ein stärkeres Widerstandsverhalten des Thévenin-Äquivalents zu erwarten, was den klassischen R-L-Ansatz für Hochfrequenzanwendungen unkorrekt macht. Ein anderer Ansatz, nämlich der «R-L//R-Ansatz», bei dem ein zusätzlicher Widerstand parallel zur Induktivität geschaltet wird, bietet eine angemessene Lösung für dieses Problem. Die äquivalente Thévenin-Darstellung des R-L//R-Ansatzes ist in Abb. 4-18[2.27] zu finden.

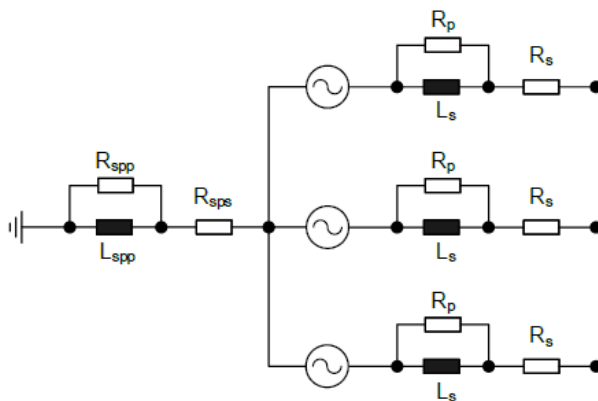


Abb. 4-18: Thévenin-Äquivalent nach dem R-L//R-Ansatz [2.27]

Ausserdem erlaubt dieser Ansatz einen zusätzlichen Freiheitsgrad, z. B. um die Dämpfung des Netzes bei einer anderen Frequenz als der Grundfrequenz anzugeben (normalerweise die standardmässige Oberschwingung 3, wenn keine anderen Informationen verfügbar sind). Sie beinhaltet auch eine Sternimpedanz, die die Systemleistung bei unsymmetrischen Fehlern berücksichtigt. Diese Sternimpedanz wird von einer Dämpfung begleitet, wie in Abb. 4-18 gezeigt, um realistische Ergebnisse zu erzielen.

Die folgenden Ausdrücke können verwendet werden, um das Thévenin-Äquivalent unter Verwendung des R-L//R-Ansatzes zu berechnen, wobei davon ausgegangen wird, dass das Verhältnis X/R für die Nennfrequenz und die n -Oberschwingung (normalerweise die standardmässige Oberschwingung 3) gleich ist. Die Methodik, die zur Bestimmung der Werte von Widerständen und Induktivitäten angewandt wird, basiert auf der CIGRE-Broschüre B4-832 [2.27].

Eingabeparameter:

- U_{nom} : Effektivspannung Leitung zu Leitung (kV)
- θ : Anfangswinkel (Grad)
- f : Frequenz (Hz)
- X/R : X/R-Verhältnis
- I_{sc3ph} : Dreiphasiger Kurzschlussstrom (kA)

- I_{sc1ph} : Einphasiger Kurzschlussstrom (kA)
- n : Gestimmt für die n-te Oberschwingung (normalerweise 3 als Standard)

Berechnungen:

$$\omega = 2\pi f$$

$$\varphi = \text{atan}(X/R)$$

$$Z_1 = Z_2 = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot I_{sc3ph}}$$

$$Z_0 = \frac{3U_1}{\sqrt{3} \cdot I_{sc1ph}} - 2 \cdot Z_1$$

$$A = Z_1 \cdot \sin(\varphi)$$

$$E = \sqrt{A} \cdot n \cdot (n - 1)$$

$$F = A \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - n^2)$$

$$G = A^2 \cdot (n - 1)$$

$$B_1 = \frac{-F + \sqrt{F^2 - 4EG}}{2E}$$

$$B_2 = \frac{-F - \sqrt{F^2 - 4EG}}{2E}$$

$$B_1 > 0 \wedge B_2 < 0 \Rightarrow B = B_1$$

Im umgekehrten Fall $B = B_2$

$$L_p = \frac{B^2 + A}{\omega}$$

$$R_p = \frac{L_p \cdot \omega \cdot \sqrt{A}}{\sqrt{L_p \cdot \omega - A}}$$

$$R_s = \frac{\frac{\omega \cdot L_p \cdot n}{R_p \cdot \tan(\varphi)} - \left(\frac{\omega \cdot L_p \cdot n}{R_p}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega \cdot L_p \cdot n}{R_p}\right)^2} \cdot R_p$$

$$k = \frac{1}{3} \left(\frac{Z_0}{Z_1} - 1 \right)$$

$$L_{spp} = L_p \cdot k$$

$$R_{spp} = R_p \cdot k$$

$$R_{sps} = R_s \cdot k$$

Der R-R//L-Ansatz erfordert einphasige und dreiphasige Kurzschlussbeiträge von jeder Leitung/jedem Kabel, die/das von einem Unterwerk ausgeht, um die positiven, negativen und Nullsequenz-Impedanzcharakteristika an jeder betrachteten Sammelschiene im modellierten Netz genau zu definieren.

4.4.2.6 Modellierung von Transformatoren

Eine genaue Darstellung der Leistungstransformatoren im Netz ist bei transienten Studien von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der nichtlinearen Natur ihres Magnetkerns können Transformatoren durch ihre Wechselwirkung mit anderen kapazitiven Elementen schwere Überspannungen im Netz verursachen. Im Netz gibt es eine grosse Anzahl von Transformatoren, die das 220-kV- und das 380-kV-Netz koppeln und die im Rahmen dieser Arbeit genau modelliert werden müssen. Es ist zu beachten, dass die Hochtransformatoren, die die Erzeugungsgruppen mit den Mittel- und Niederspannungsnetzen verbinden, nicht modelliert werden.

Die Transformatoren wurden anhand ihrer Prüfberichte modelliert, einschliesslich der Daten auf dem Typenschild, der Nennleistung und -spannungen, der Regelung, der Kurzschlussimpedanz und der Leerlaufverluste usw. Entsprechende Annahmen wurden getroffen, da die Ergebnisse der Leerlaufprüfungen einiger Hersteller unzureichend waren. Das Modellierungsverfahren für alle Transformatoren wird in diesem Abschnitt erläutert, wobei der Transformator von Mettlen als Beispiel dient.

Der 600-MVA-Transformator, der derzeit in Mettlen installiert ist, wird durch zwei 800-MVA-Transformatoren ersetzt, deren Nenndaten in der folgenden Tabelle Tabelle 4-5 zusammengefasst sind.

Nennleistung (MVA)	267/267/51,9
Nennspannung (kV)	420/ $\sqrt{3}$ /247 $\sqrt{3}$ /27.05
Wicklungskonfigurationen eines Dreiphasentransformators	5.

Tabelle 4-5: Namentliche Daten eines einphasigen Transformators in Mettlen

Das EMTP-Modell eines Transformators in Mettlen sowie die Schaltungskomponenten innerhalb jeder Phase sind in Abb. 4-19 dargestellt, wobei die magnetisierenden Zweige als nichtlineare Induktivitäten modelliert werden und die tertiären Wicklungen in einem offenen Stromkreis bleiben (über einen grossen Widerstand geerdet).

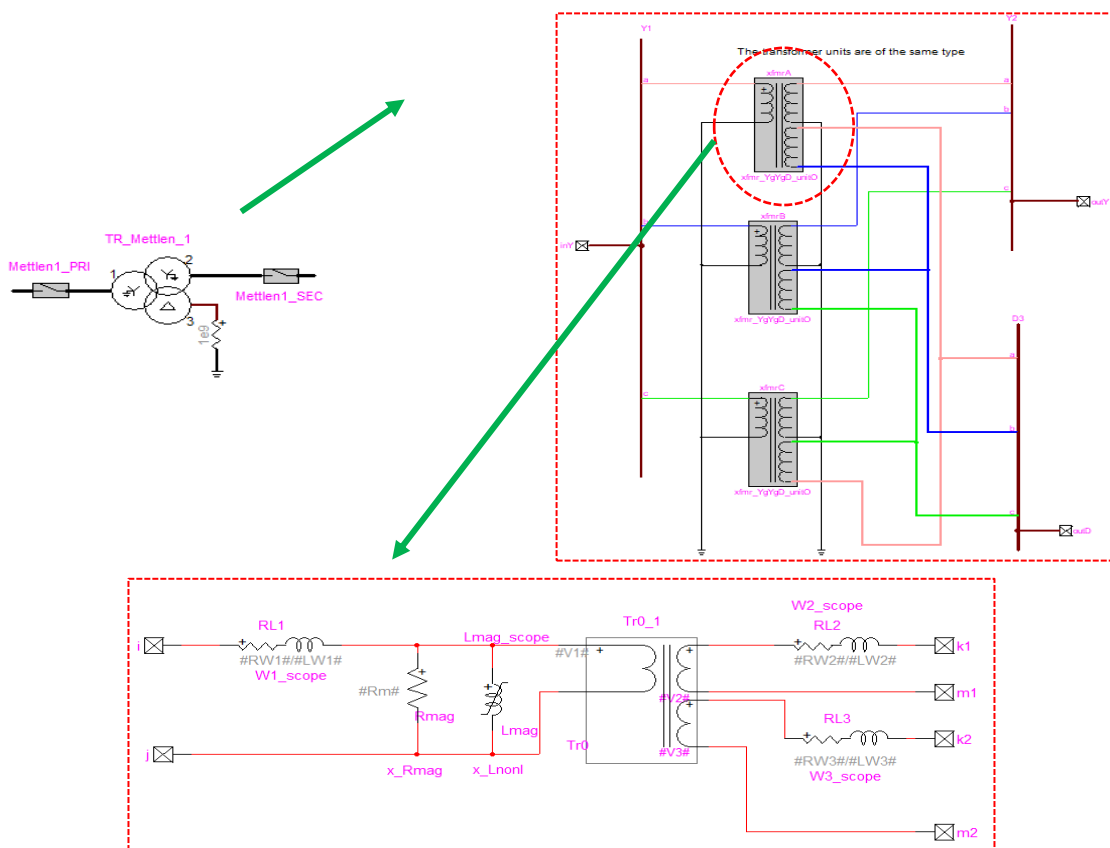


Abb. 4-19: EMTP-Modell eines Transformators in Mettlen und der Schaltungskomponenten in jeder Phase

Der Kupferverlust (Wicklungswiderstand) und der Streuflussverlust (Wicklungsreaktanz) jedes Zweiges, bezeichnet als RL_1 , RL_2 und RL_3 , werden anhand der Ergebnisse von Kurzschlussprüfungen berechnet, während die Verluste im Kern, hauptsächlich einschliesslich der Wirbelstromverluste (bezeichnet als R_m), da die Hysterese nicht dargestellt ist, anhand der Ergebnisse von Leerlaufprüfungen berechnet werden.

4.4.2.6.1 Berechnung des Wicklungswiderstands und der Streureaktanz

Die Berechnung des Wicklungswiderstands und der Streureaktanz der Primär- und Sekundärwicklungen basiert auf Messungen, die einem Kurzschlussstest entnommen wurden, bei dem die Spannung an die Primärwicklung mit der kurzgeschlossenen Sekundärwicklung und dem Stufenschalter an die Sekundärwicklung an ihrem Mittelpunkt angelegt wurde, wobei:

$$R_{12} = \frac{P_{sc}}{I_N^2} \quad (4.11)$$

$$Z_{12} = \frac{V_{sc}}{I_N} \quad (4.12)$$

$$X_{12} = \sqrt{Z_{12}^2 - R_{12}^2} \quad (4.13)$$

wobei:

- R_{12} : Gesamtwiderstand an beiden Wicklungen
- X_{12} : Gesamtstreureaktanz an beiden Wicklungen
- I_N : Nennstrom an der Primärwicklung

- P_{sc} : gemessene Wirkleistung umgerechnet in 75°
- V_{sc} : Spannung der Primärwicklung, die an den Nennstrom angelegt wird

Unter der Annahme einer Gleichverteilung des Wicklungswiderstandes und der pu-Streudrossel für beide Wicklungen lassen sich daher die Kupfer- und Streuflussverluste für beide Wicklungen ableiten, wie in Abb. 4-19 gezeigt.

Die gleiche Methodik kann auf einen weiteren Kurzschlussstest angewendet werden, bei dem die Spannung an die Primärwicklung mit der kurzgeschlossenen Tertiärwicklung angelegt wird, um den Gesamtwiderstand und den Streureaktanzwert an beiden Wicklungen zu erhalten. Da der Widerstand und die Streureaktanz der Primärwicklung im vorherigen Schritt berechnet wurden, müssen sie nur von den Gesamtwerten subtrahiert werden, um die Werte der Tertiärwicklung zu erhalten, wie in Abb. 4-19 gezeigt.

4.4.2.6.2 Berechnung der Kernverluste und der Magnetisierungsinduktivität

Die Berechnung der Kernverluste und der Magnetisierungsinduktivität kann mithilfe von Messungen erfolgen, die einem Leerlaufversuch entnommen werden, bei dem eine Spannung an die Tertiärwicklung angelegt wird und die Primär- und Sekundärwicklungen in einem offenen Stromkreis liegen. Die Ausdrücke, die verwendet werden können, um diese Parameter zu erhalten, sind die folgenden:

$$R_m = \frac{V_{OC}^2}{P_{OC}} \quad (4.14)$$

$$Z_m = |Z_m| = \frac{V_{OC}}{I_{OC}} \quad (4.15)$$

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Z_m^2} - \frac{1}{R_m^2}}} \quad (4.16)$$

wobei:

- R_m : Verlust im Kern (Widerstand auf dem magnetisierenden Zweig)
- V_{OC} : während der Leerlaufprüfung angelegte Nennspannung
- I_{OC} : gemessener Leerlaufstrom
- P_{OC} : Leerlaufverluste
- X_m : Magnetisierungsinduktivität

Der Widerstand, der den Kernverlust darstellt R_m kann leicht anhand der Ergebnisse der Vakuumtests des Herstellers ermittelt werden. Dabei handelt es sich in der Regel um einen extrem grossen Widerstand (d. h. einige hundert bis einige tausend pu), der sich daher nur wenig oder gar nicht auf das dynamische Übergangsverhalten des Transformators auswirkt. Die magnetisierende Induktivität ist jedoch eine nichtlineare Komponente, die das dynamische Verhalten des Transformators über den gesamten Betriebsspannungsbereich diktiert. Die Merkmale $\phi - I$ typischen Merkmale, die in EMTP verwendet werden, sind in Abb. 4-20 dargestellt.

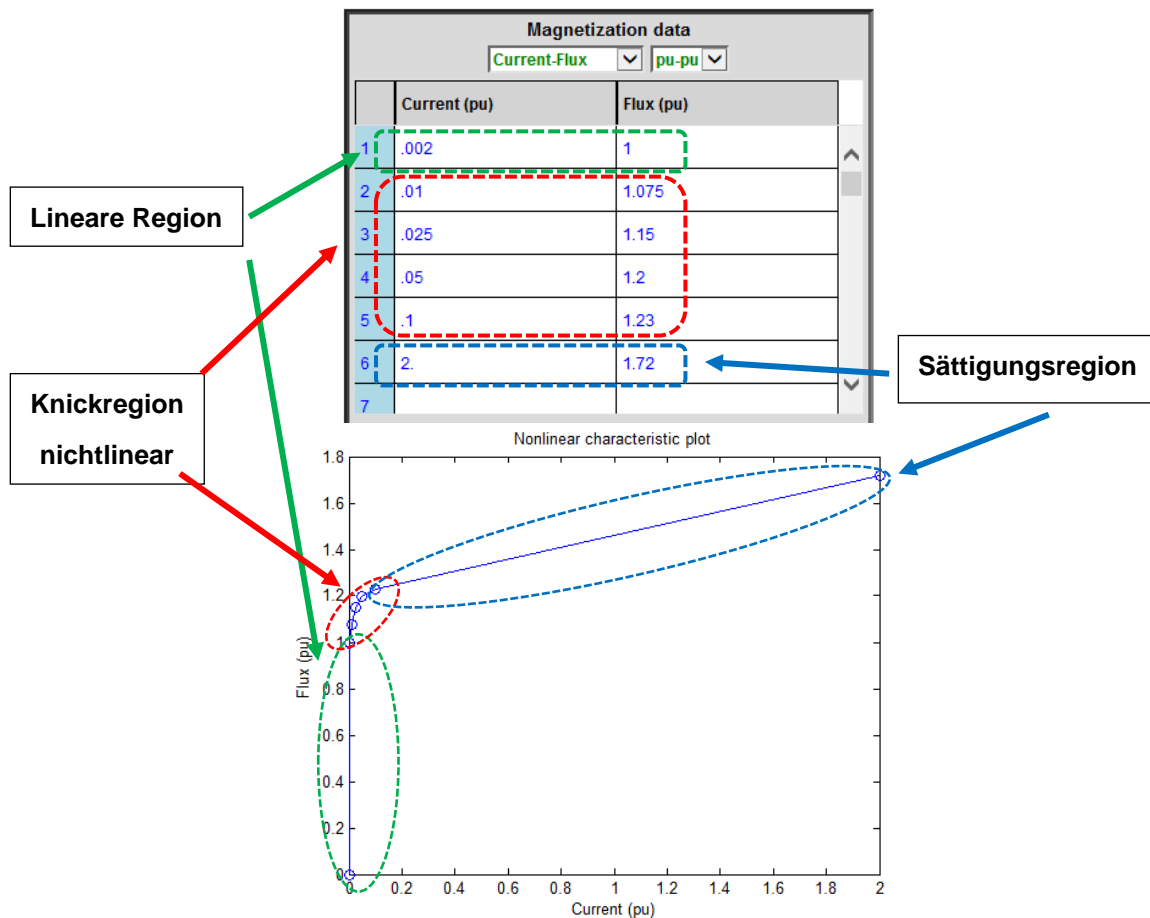


Abb. 4-20: Typische ϕ -I-Merkmale und Verlauf eines nicht idealen Transformators in EMTF

Es sei darauf hingewiesen, dass die in Abb. 4-20 dargestellten Merkmale $\phi - I$ den drei Bereichen der Merkmale des Eisenkerns des Transformators $\phi - I$ des Transformators entsprechen:

- **Linearer Bereich (Normalbetrieb)**

Im linearen Bereich (Flussverbindung gleich oder kleiner als 1 pu) ist der Fluss relativ gering, und eine starke Erhöhung des Flusses würde nur zu einem geringen Anstieg des Magnetisierungsstroms führen.

- **Nichtlinearer Knickbereich**

Der nichtlineare Knickbereich ist ein Bereich, in dem ein Transformator vom Normalbetrieb in die Sättigung und umgekehrt übergeht. Seine korrekte Definition ist bei der Untersuchung des dynamischen Übergangsverhaltens eines Transformators von grösster Bedeutung.

- **Sättigungszone**

Wenn der Fluss einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, der durch eine höhere angelegte Spannung als normal oder durch einen Restfluss aus einer früheren Entregung verursacht wird, gelangt der Transformator in den Sättigungsbereich, in dem eine einfache kleine Erhöhung der Flussverbindung zu einem deutlichen Anstieg des Magnetisierungsstroms führen würde.

Entsprechend den Eigenschaften des Transformators $\phi - I$, die in Abb. 4-20 definiert sind, wird seine magnetisierende Induktivität als nichtlinear betrachtet, da der magnetisierende Strom in den verschiedenen Betriebsbereichen nicht proportional zum Fluss ist. In EMTP wird üblicherweise ein «piecewise linear» (stückweise linear) Ansatz gewählt, um eine nichtlineare Komponente zu modellieren, wobei ihre nichtlinearen Merkmale in mehrere lineare Segmente unterteilt werden. Iterationen in den Zeitbereichssimulationen werden durchgeführt, um den richtigen Betriebspunkt in jedem Zeitschritt der numerischen Simulation zu finden.

Obwohl die Magnetisierungskurve eines Transformators idealerweise unter Verwendung der Leerlaufprüfungen des Herstellers abgeleitet werden sollte, ist die angelegte Spannung, die in der Regel zwischen 0,9 pu und 1,1 pu liegt, zu schmal, um das transiente dynamische Verhalten des Transformators in den drei Betriebsbereichen vollständig darzustellen, wie wir bereits gesehen haben. Daher wird beschlossen, für alle modellierten Transformatoren im Netz die Standardmerkmale $\phi - I$ von EMTP zu übernehmen. Es ist zu beachten, dass der magnetisierende Strom in pu in Bezug auf den Nennstrom an der Tertiärwicklung berechnet wird, und dass der Fluss mithilfe:

$$\phi = \frac{V_{\text{peak,ph}}}{2\pi f} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{LL}}{2\pi f} \quad (4.17)$$

4.4.3 Frequenz-Scans für Szenario 3

4.4.3.1 220 kV Romanel

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Romanel berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Banlieue Ouest – Romanel
3	N-1 bei 220 kV Romanel – Vaux
4	N-2 bei 220 kV Banlieue Ouest – Romanel und Romanel – Vaux

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Romanel für die 4 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-21 dargestellt.

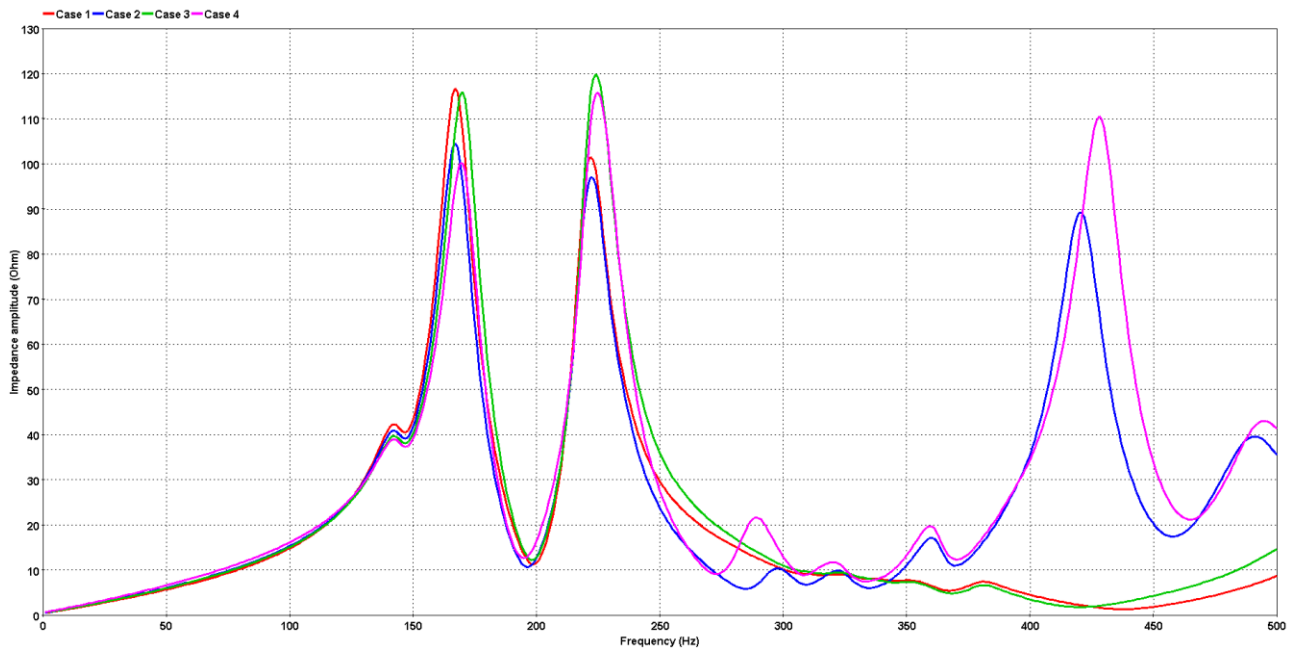


Abb. 4-21: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Romanel für alle 4 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.2 380 kV Châtelard

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Châtelard berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Châtelard – La Bâtiaz
3	N-1 bei 380 kV Chamoson – La Bâtiaz
4	N-1 bei 380 kV Bois Tollot – Romanel
5	N-2 bei 380 kV Châtelard – La Bâtiaz und Chamoson – La Bâtiaz

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 380 kV Châtelard für die 5 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-22 dargestellt.

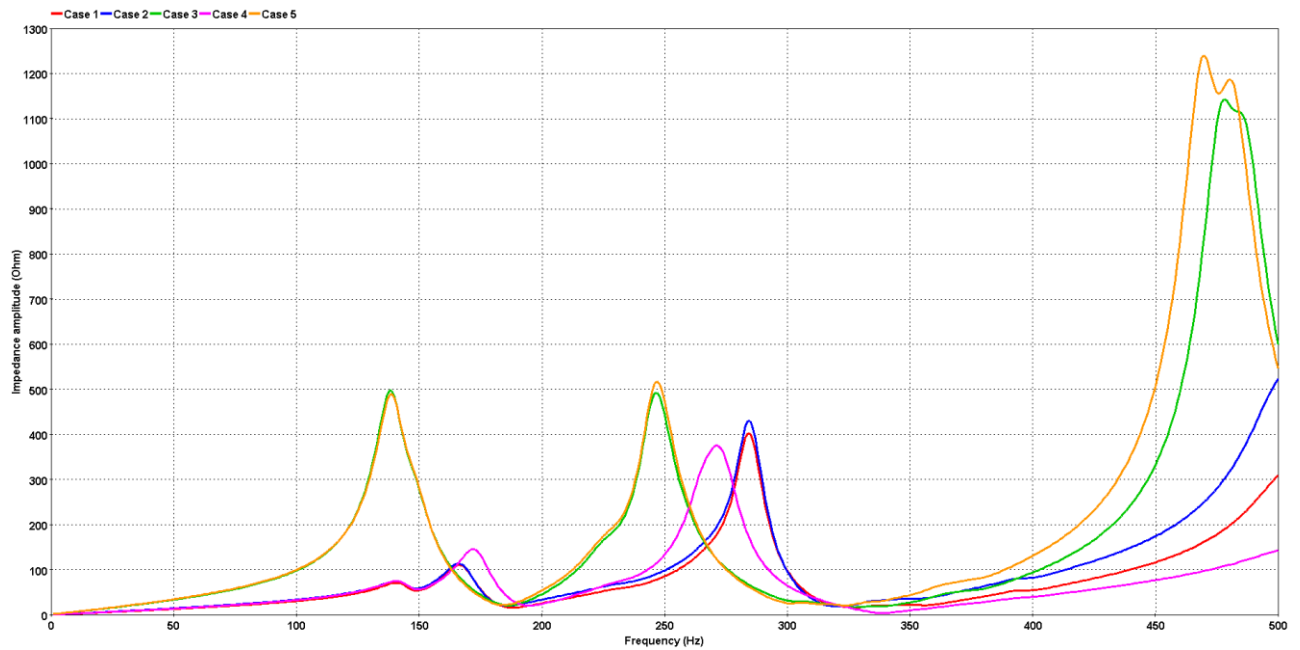


Abb. 4-22: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Châtelard für alle 5 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.3 220 kV Chamoson

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Chamoson berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Chamoson – Fionnay GD
3	N-1 bei 220 kV Chamoson – Riddes
4	N-2 bei 220 kV Chamoson – Fionnay GD

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Chamoson für die 4 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-23 dargestellt.

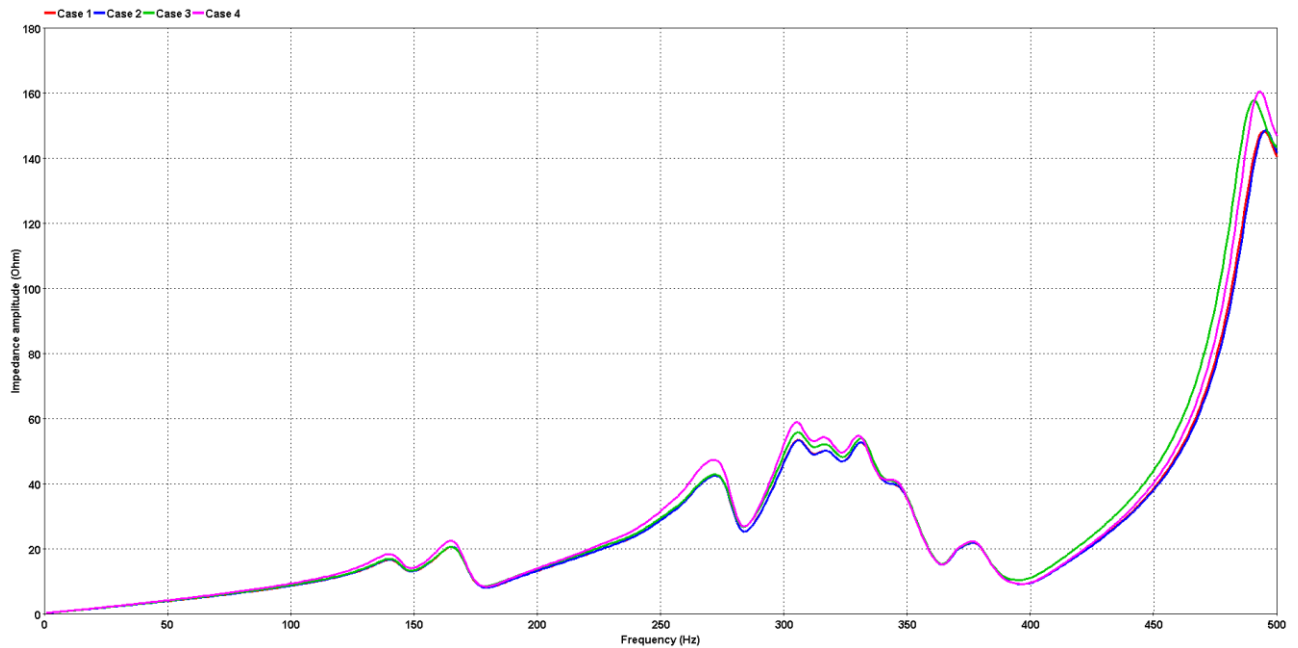


Abb. 4-23: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Chamoson für alle 4 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.4 220 kV Mühleberg

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Mühleberg berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Bickigen – Mühleberg
3	N-1 bei 220 kV Lindenholz – Mühleberg
4	N-2 bei 220 kV Bickigen – Mühleberg und Lindenholz – Mühleberg

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Mühleberg für die 4 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-24 dargestellt.

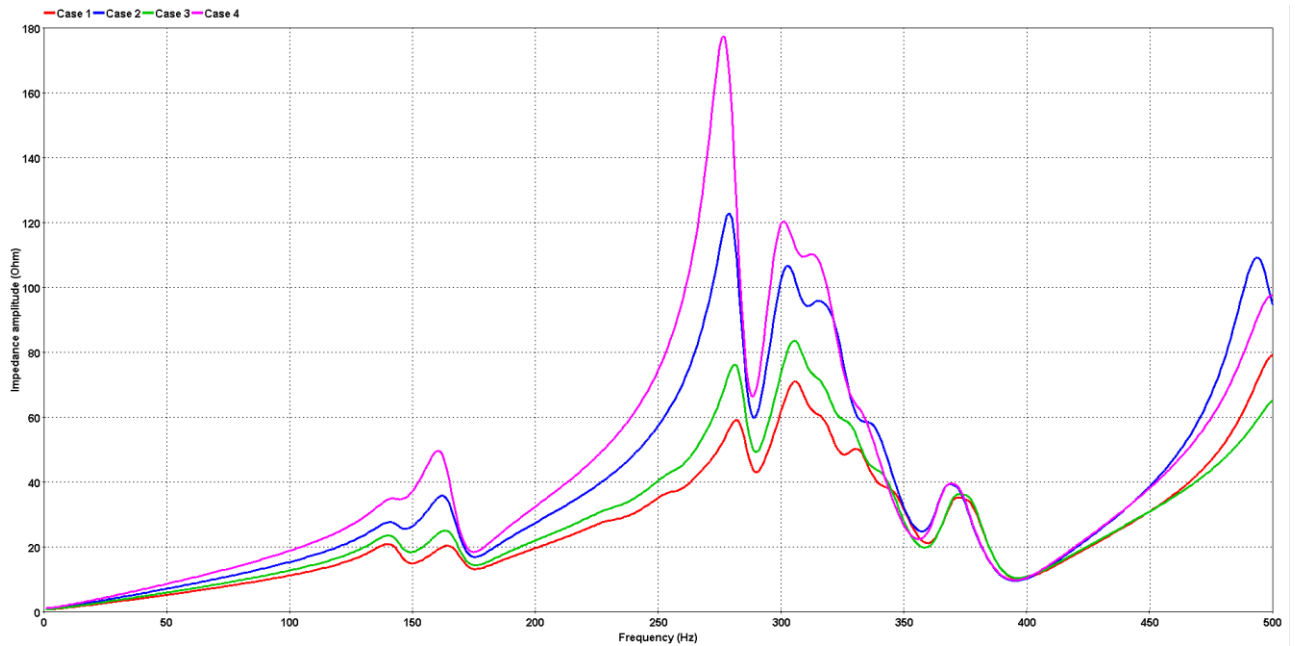


Abb. 4-24: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Mühleberg für alle 4 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.5 220 kV Flumenthal

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Flumenthal berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Flumenthal – Bickigen
3	N-1 bei 220 kV Flumenthal – Gösgen
4	N-2 bei 220 kV Flumenthal – Bickigen und Flumenthal – Gösgen

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Flumenthal für die 4 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-25 dargestellt.

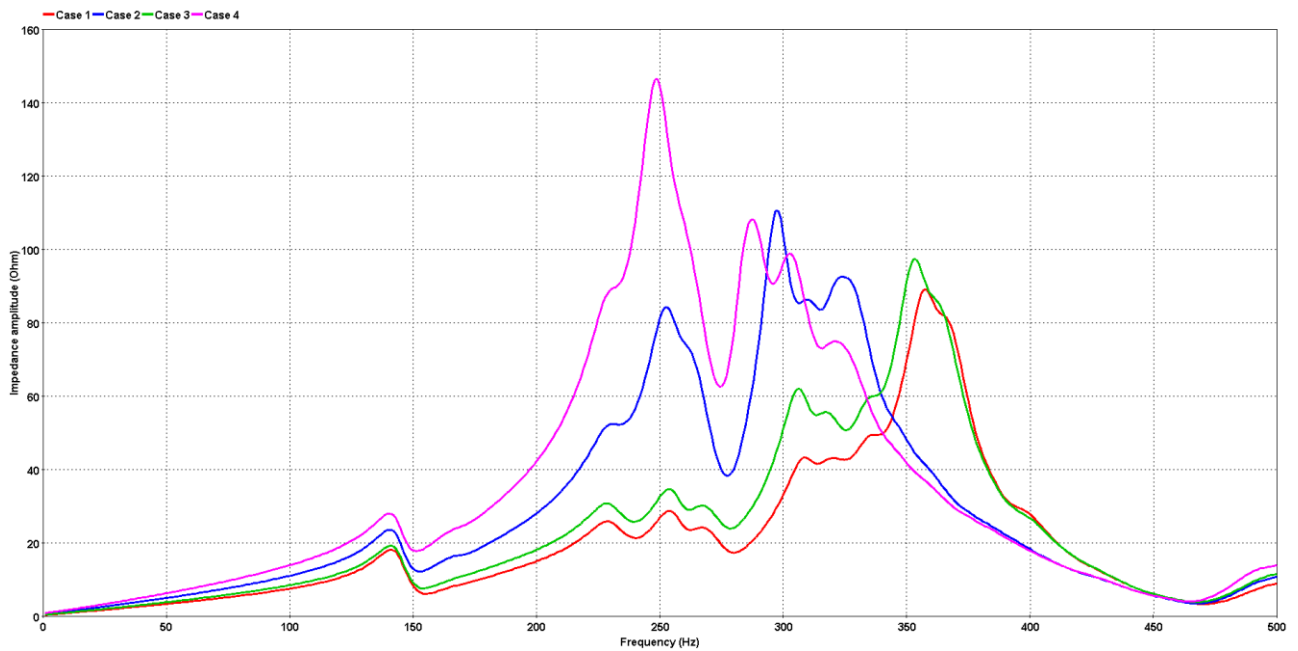


Abb. 4-25: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Flumenthal für alle 4 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.6 220 kV Froloo

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Froloo berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Froloo – Lachmatt
3	N-1 bei 220 kV Froloo – Flumenthal
4	N-1 bei 220 kV Lachmatt – Münchwilen
5	N-2 bei 220 kV Froloo – Lachmatt und Lachmatt – Münchwilen

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Froloo für die 5 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-26 dargestellt.

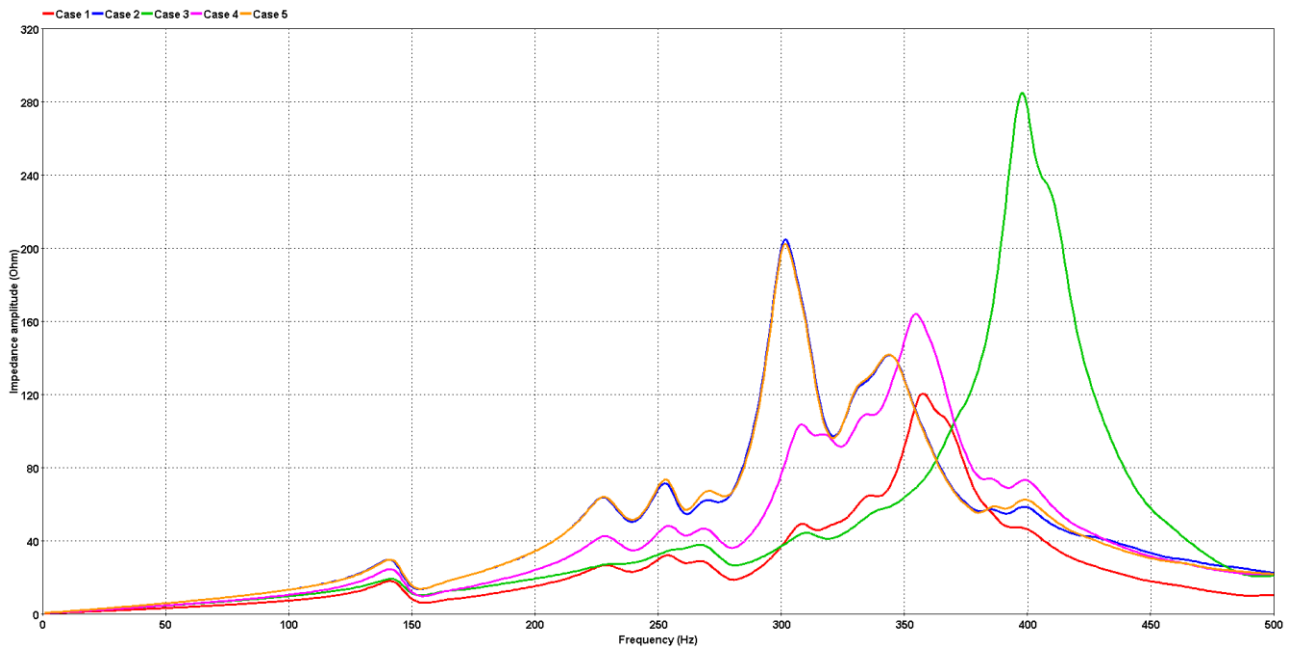


Abb. 4-26: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Froloo für alle 5 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.7 220 kV Lachmatt

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Lachmatt berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Lachmatt – Münchwilen
3	N-1 bei 220 kV Lachmatt – Froloo

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Lachmatt für die 3 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-27 dargestellt.

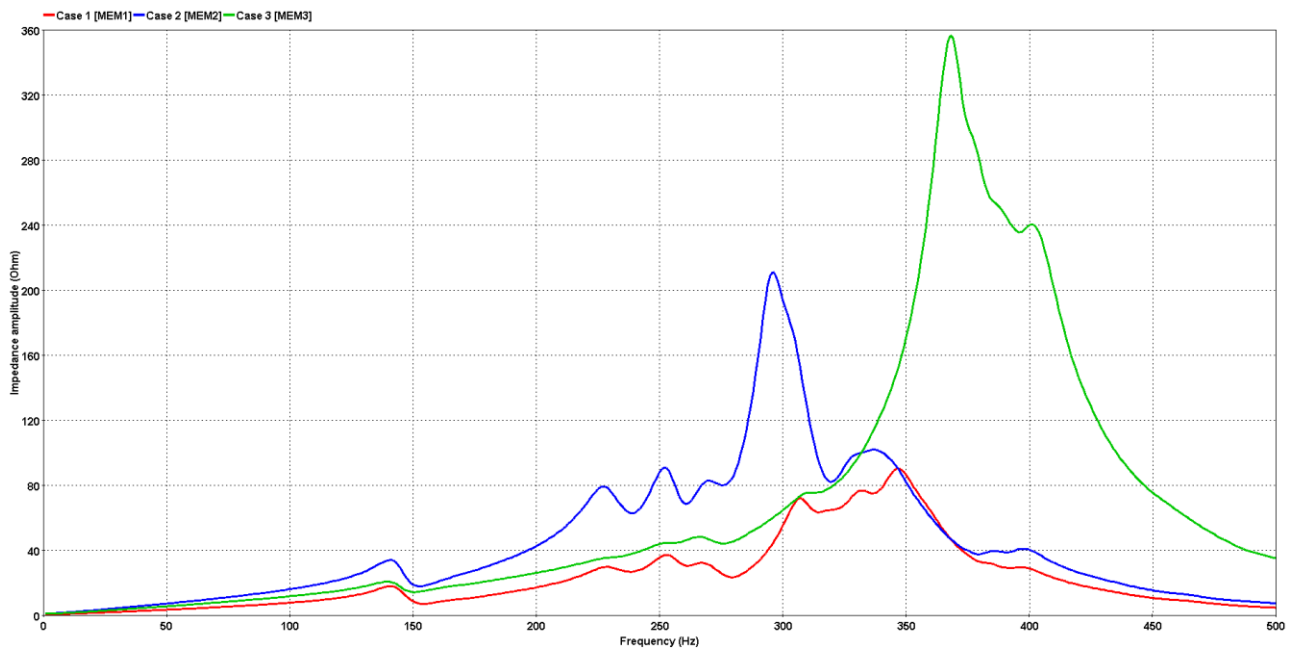


Abb. 4-27: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Lachmatt für alle 3 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.8 380 kV Lachmatt

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Lachmatt berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Lachmatt – Gösgen
3	N-1 bei 380 kV Asphard – Sierentz
4	N-1 bei 380 kV Asphard – Kühmoos
5	N-2 bei 380 kV Lachmatt – Gösgen und Asphard – Sierentz

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 380 kV Lachmatt für die 5 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-28 dargestellt.

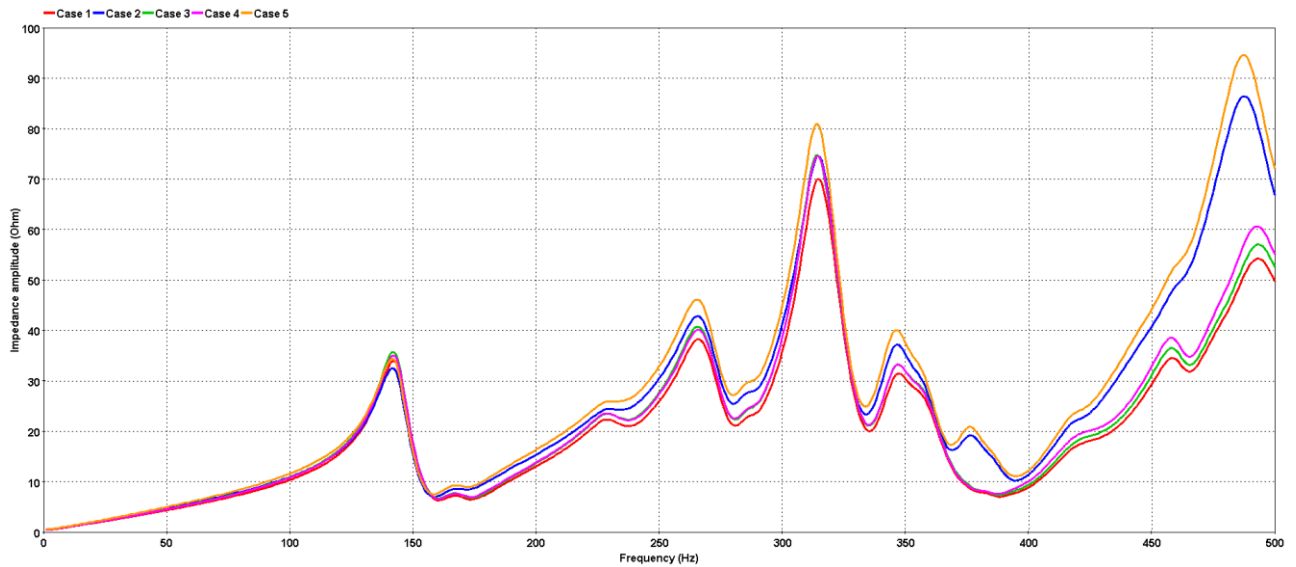


Abb. 4-28: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Lachmatt für alle 5 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.9 220 kV Laufenburg

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Laufenburg berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Laufenburg – Gösgen
3	N-2 bei 220 kV Laufenburg – Kühmoos
4	N-2 bei 220 kV Laufenburg – Gurtweil
5	N-2 bei 220 kV Laufenburg – Münchwilen und Laufenburg – Beznau

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Laufenburg für die 5 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-29 dargestellt.

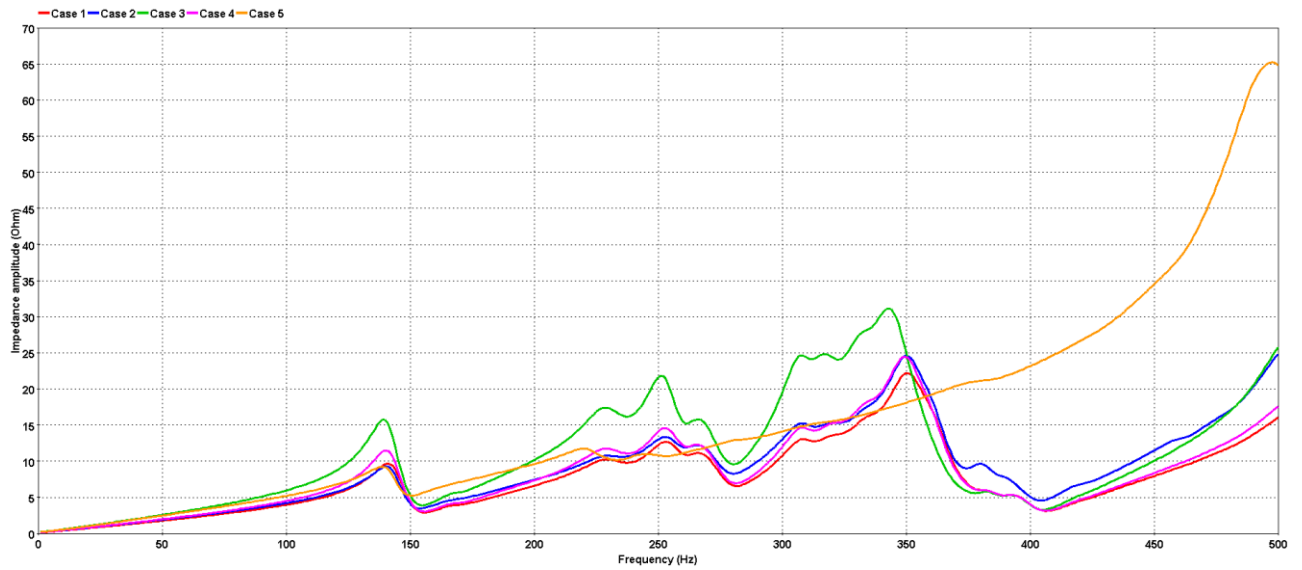


Abb. 4-29: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Laufenburg für alle 5 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.10 380 kV Laufenburg

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Laufenburg berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-2 bei 380 kV Laufenburg – Kühmoos
3	N-2 bei 380 kV Laufenburg – Trossingen und Laufenburg – Tiengen
4	N-2 bei 380 kV Laufenburg – Sierentz und Laufenburg – Leibstadt
5	N-2 bei 380 kV Laufenburg – Bassecourt und Laufenburg – Bickingen

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Laufenburg für die 5 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-30 dargestellt.

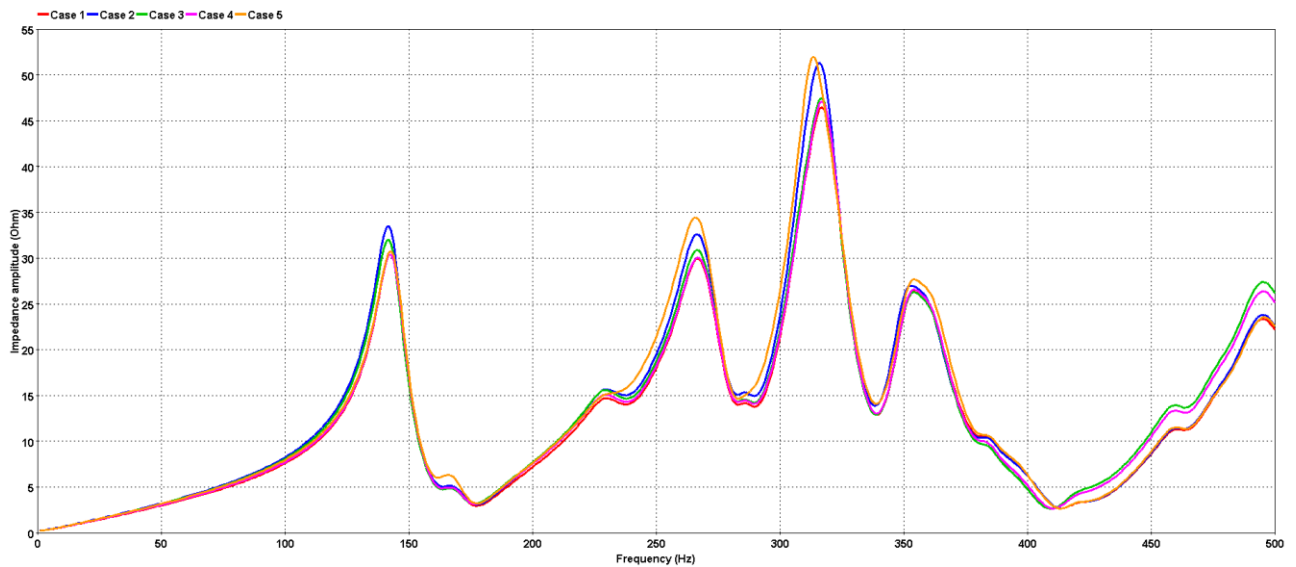


Abb. 4-30: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Laufenburg für alle 5 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.11 220 kV Bickigen

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Bickigen berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Bickigen – Mühleberg
3	N-1 bei 220 kV Bickigen – Oftringen
4	N-1 bei 220 kV Bickigen – Mettlen
5	N-1 bei 220 kV Bickigen – Innertkirchen
6	N-2 bei 220 kV Bickigen – Mühleberg und Bickigen – Oftringen

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Bickigen für die 6 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-31 dargestellt.

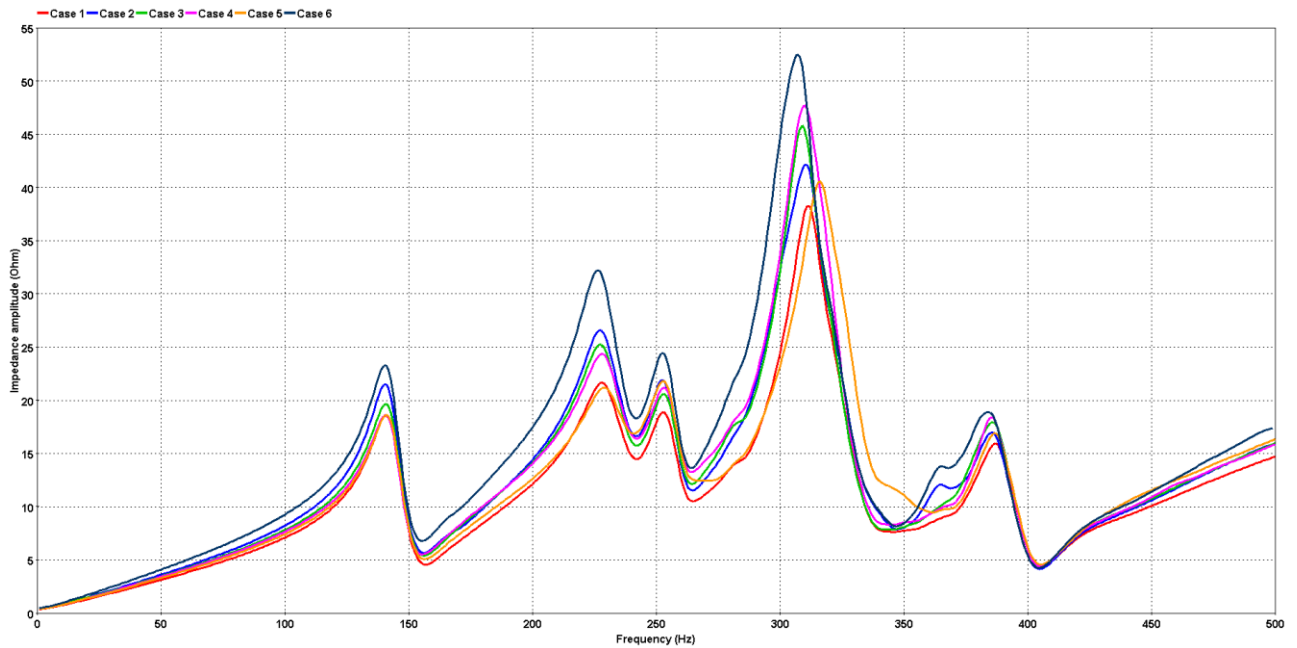


Abb. 4-31: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Bickigen für alle 3 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.12 380 kV Bickigen

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Bickigen berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Bickigen – Bassecourt
3	N-1 bei 380 kV Bickigen – Laufenburg
4	N-2 bei 380 kV Bickigen – Laufenburg und Bassecourt – Laufenburg
5	N-2 bei 380 kV Bickigen – Laufenburg und Bassecourt – Mambelin

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Bickigen für die 6 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-32 dargestellt.

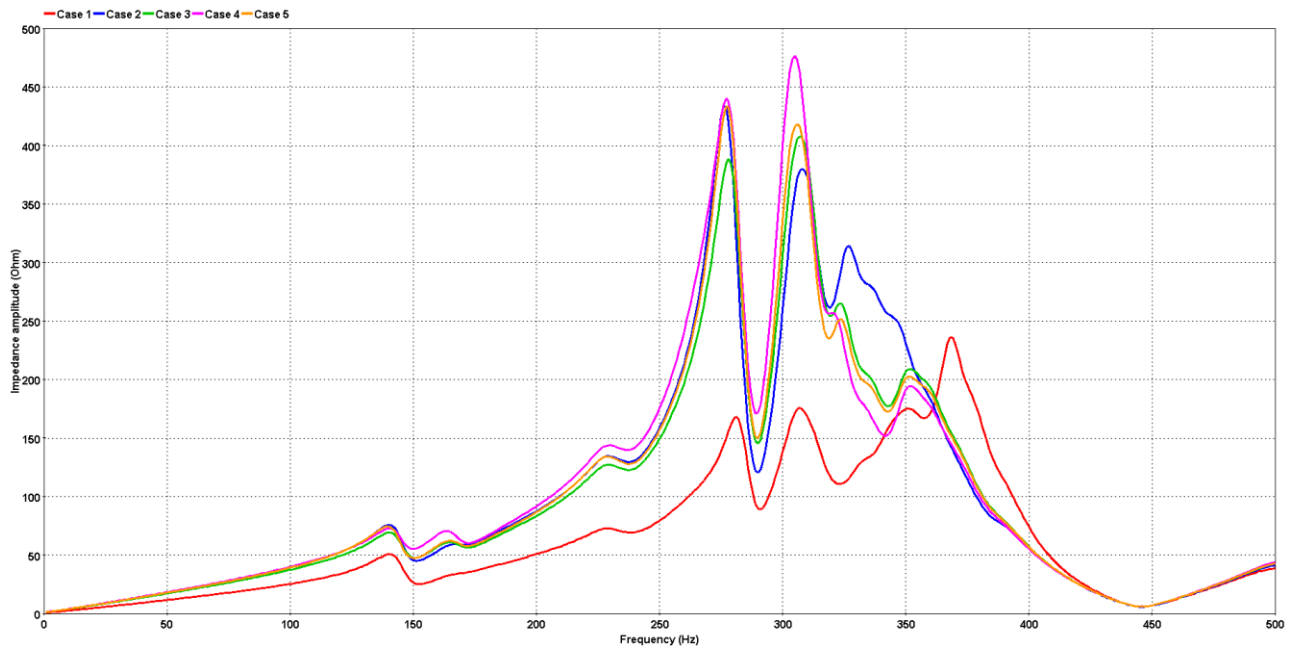


Abb. 4-32: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Bickigen für alle 5 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.13 220 kV Wimmis

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Wimmis berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Chippis – Wimmis
3	N-1 bei 220 kV Innertkirchen – Wimmis

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Wimmis für die 3 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-33 dargestellt.

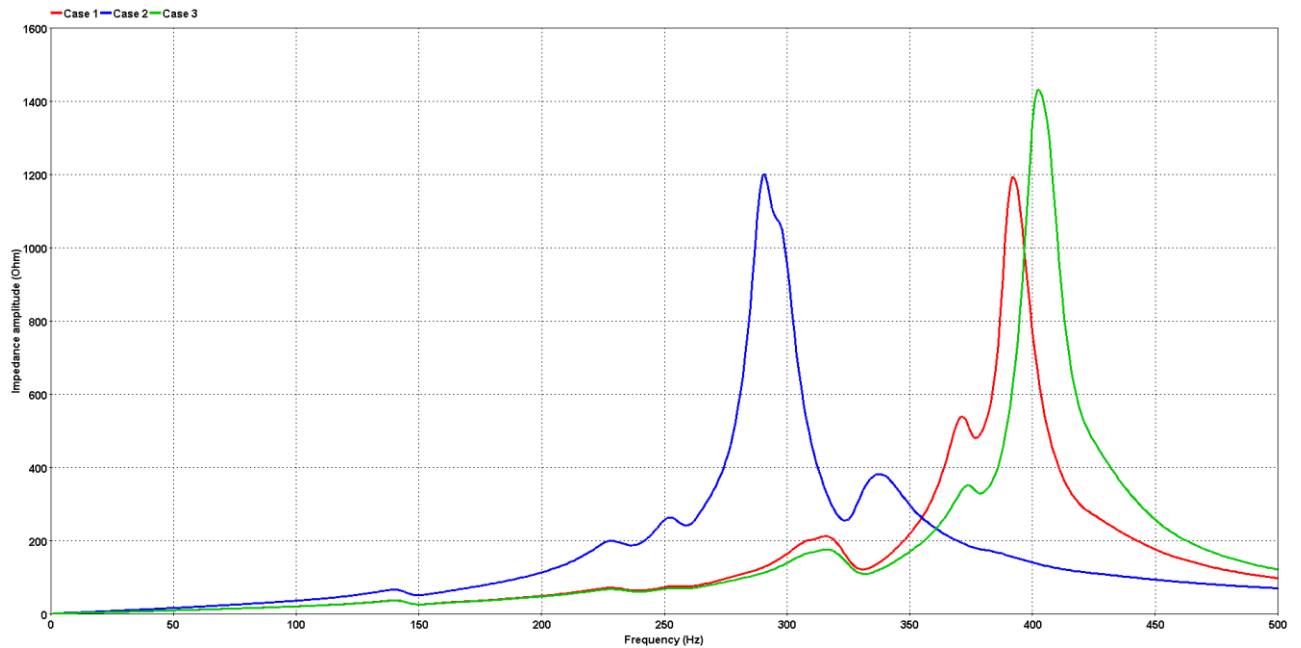


Abb. 4-33: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Wimmis für alle 3 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.14 220 kV Mettlen

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Mettlen berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-2 bei 220 kV Mettlen – Obfelden und Mettlen – Sursee
3	N-2 bei 220 kV Mettlen – Innertkirchen und Mettlen – Littau
4	N-2 bei 220 kV Mettlen – Bickigen

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Mettlen für die 4 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-34 dargestellt.

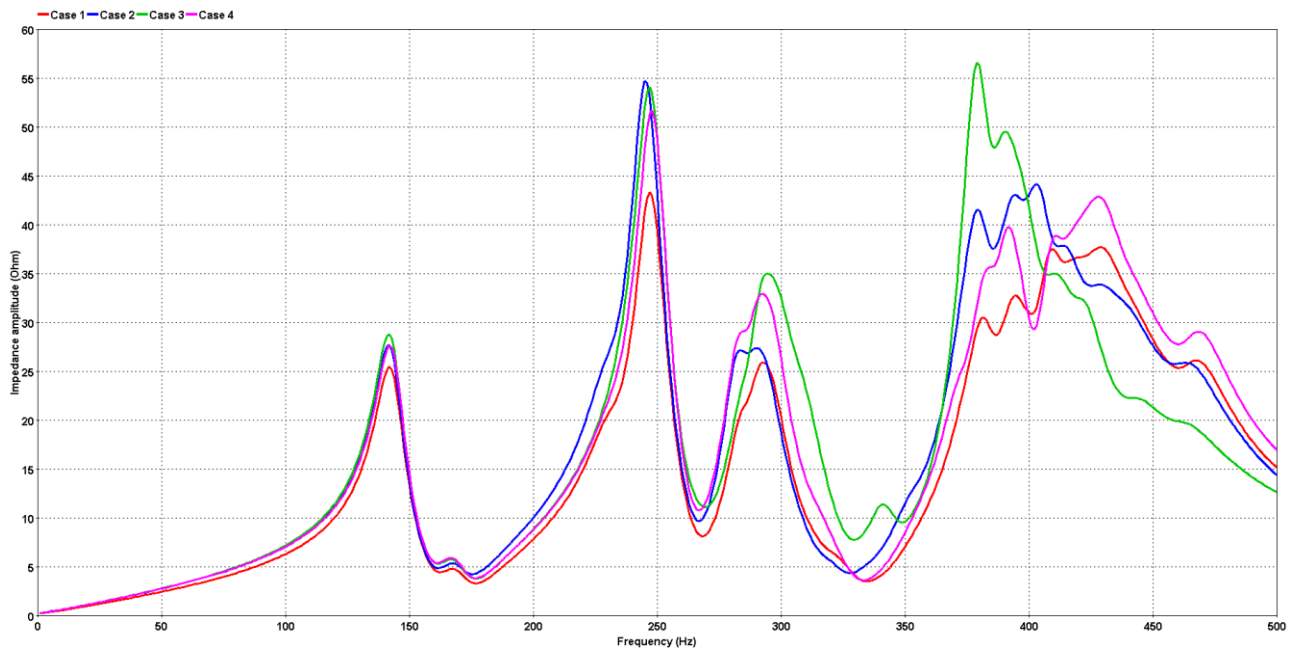


Abb. 4-34: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Mettlen für alle 4 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.15 380 kV Mettlen

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Mettlen berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Mettlen – Beznau
3	N-1 bei 380 kV Gösgen – Laufenburg
4	N-1 bei 380 kV Benken – Sils
5	N-1 bei 380 kV Lavorgo – Magadino
6	N-1 bei 380 kV Mettlen – Gösgen
7	N-2 bei 380 kV Mettlen – Beznau und Gösgen – Laufenburg

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Mettlen für die 7 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-35 dargestellt.

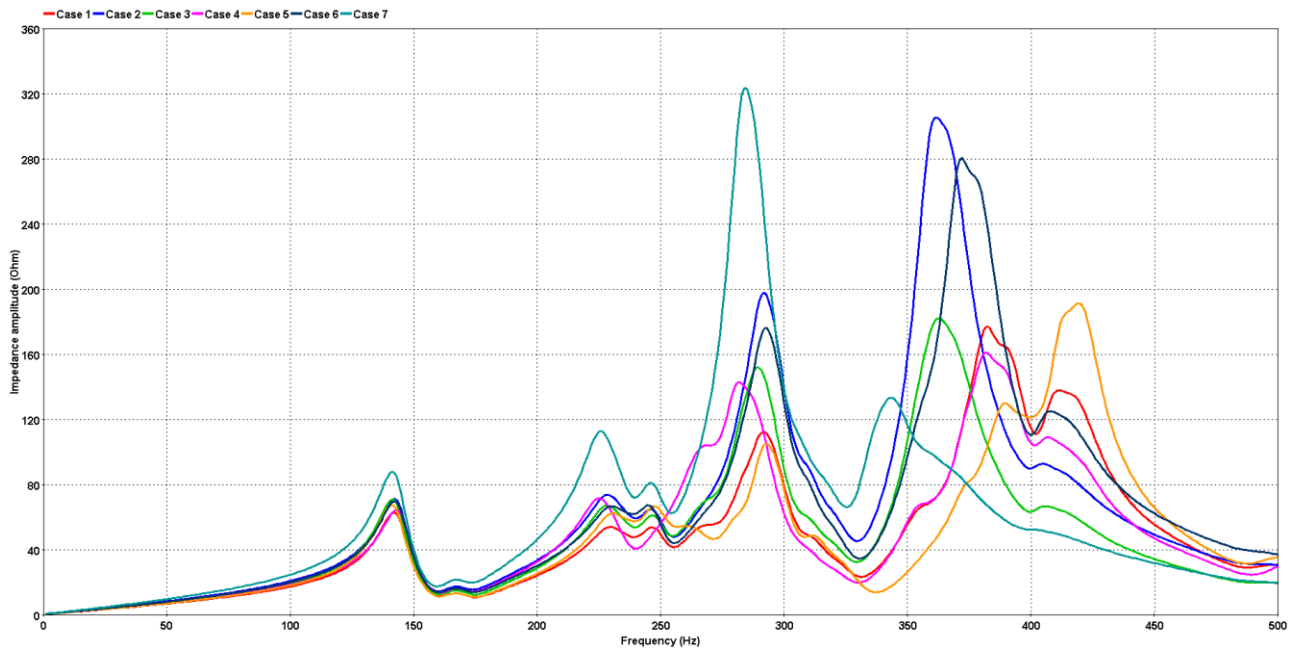


Abb. 4-35: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Mettlen für alle 7 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.16 220 kV Gösgen

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Gösgen berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Gösgen – Laufenburg
3	N-1 bei 220 kV Gösgen – Ormalingen
4	N-1 bei 220 kV Gösgen – Flumenthal
5	N-2 bei 220 kV Gösgen – Laufenburg und Gösgen – Ormalingen

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Gösgen für die 5 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-36 dargestellt.

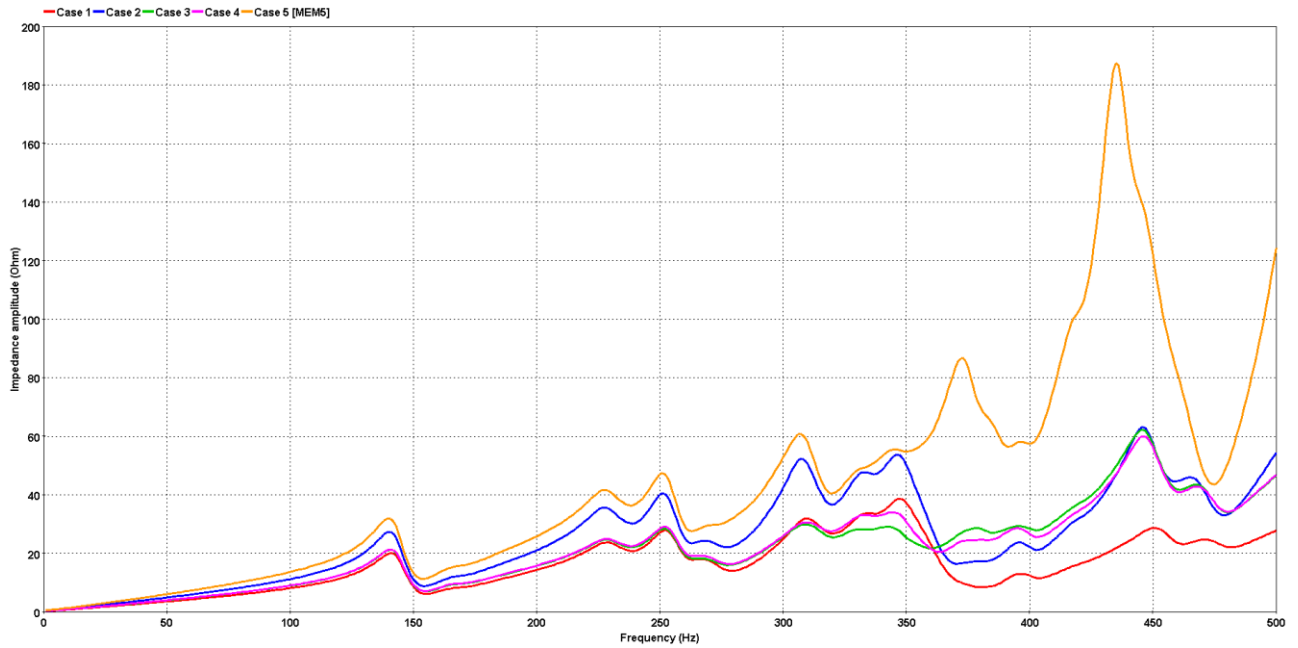


Abb. 4-36: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Gösgen für alle 5 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.17 380 kV Gösgen

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Gösgen berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Gösgen – Laufenburg
3	N-1 bei 380 kV Gösgen – Lachmatt
4	N-2 bei 380 kV Gösgen – Laufenburg und Gösgen – Lachmatt

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Gösgen für die 4 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-37 dargestellt.

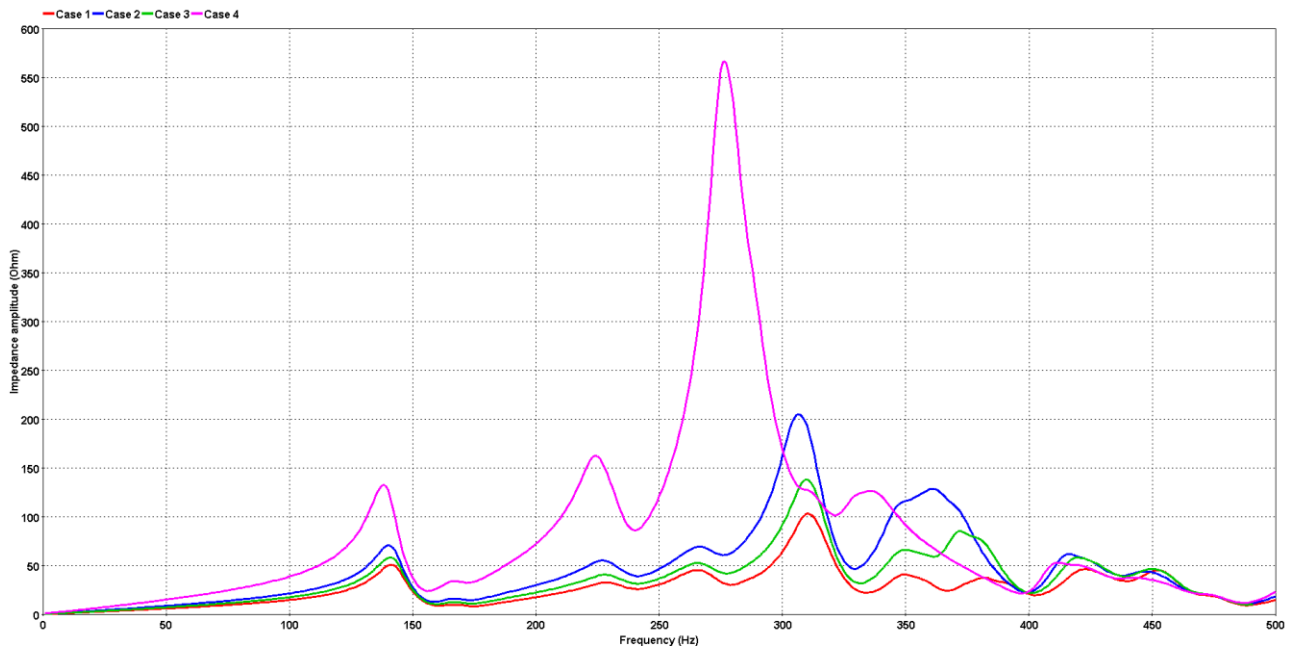


Abb. 4-37: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Gösgen für alle 4 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.18 220 kV Altgass

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Altgass berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Altgass – Mettlen
3	N-2 bei 220 kV Altgass – Mettlen und Samstagern – Siebnen
4	N-2 bei 220 kV Altgass – Mettlen und Obfelden – Mettlen

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Altgass für die 4 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-38 dargestellt.

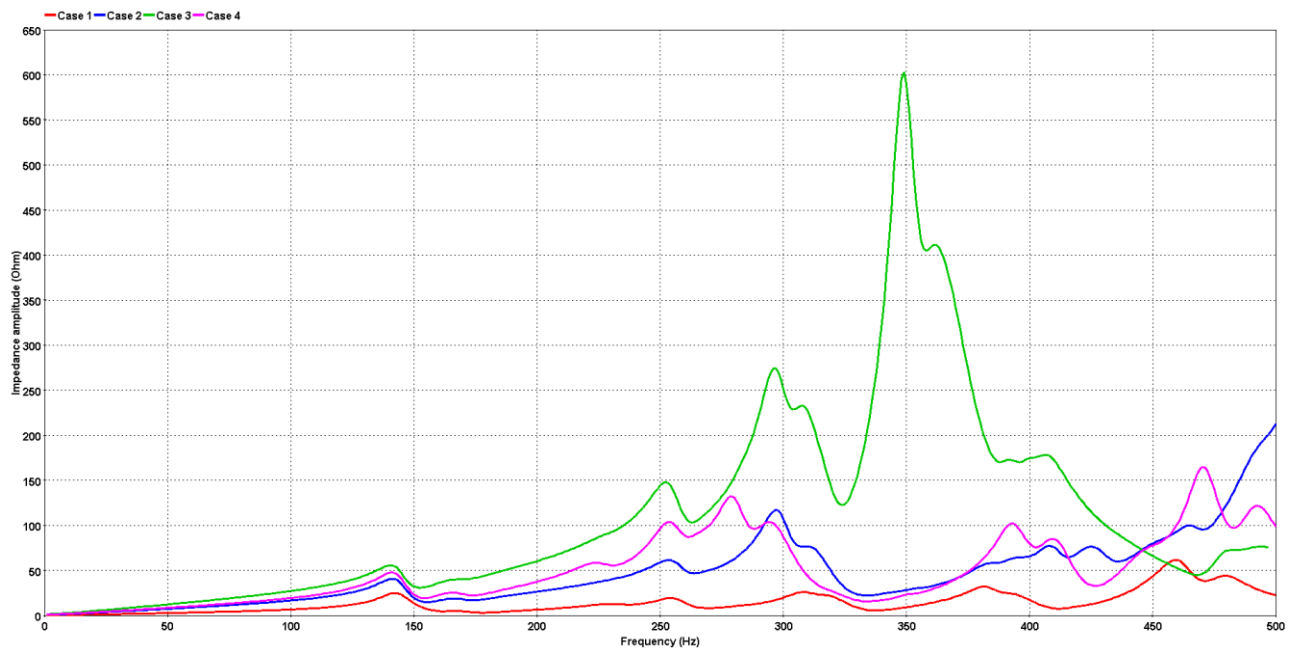


Abb. 4-38: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Altgass für alle 4 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.19 380 kV Lavorgo

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Lavorgo berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Lavorgo – Magadino
3	N-1 bei 380 kV Lavorgo – Mörel

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 380 kV Lavorgo für die 3 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-39 dargestellt.

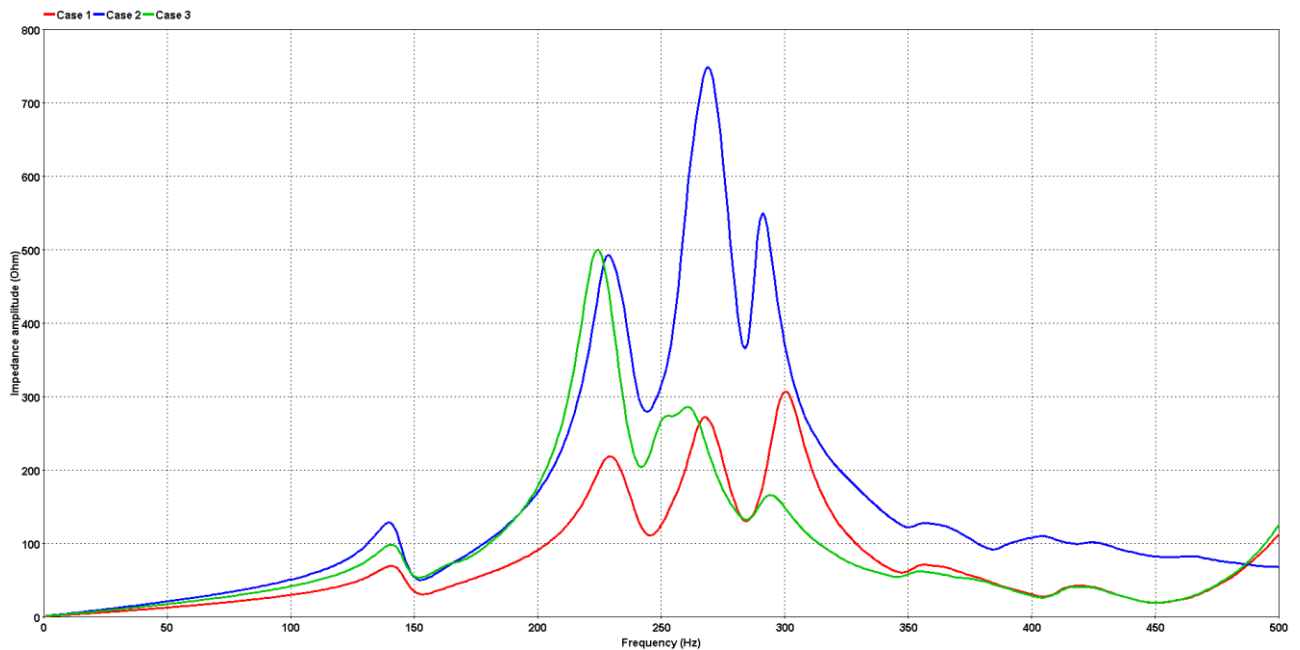


Abb. 4-39: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Lavorgo für alle 3 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.20 220 kV Auwiesen

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Auwiesen berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Auwiesen – Seebach
3	N-1 bei 220 kV Auwiesen – Fällanden
4	N-1 bei 220 kV Niederwil – Regensdorf
5	N-1 bei 220 kV Fällanden – Breite
6	N-1 bei 220 kV Fällanden – Grynau
7	N-1 bei 220 kV Niederwil – Regensdorf
8	N-2 bei 220 kV Fällanden – Breite und Fällanden – Grynau

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Auwiesen für die 8 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-40 dargestellt.

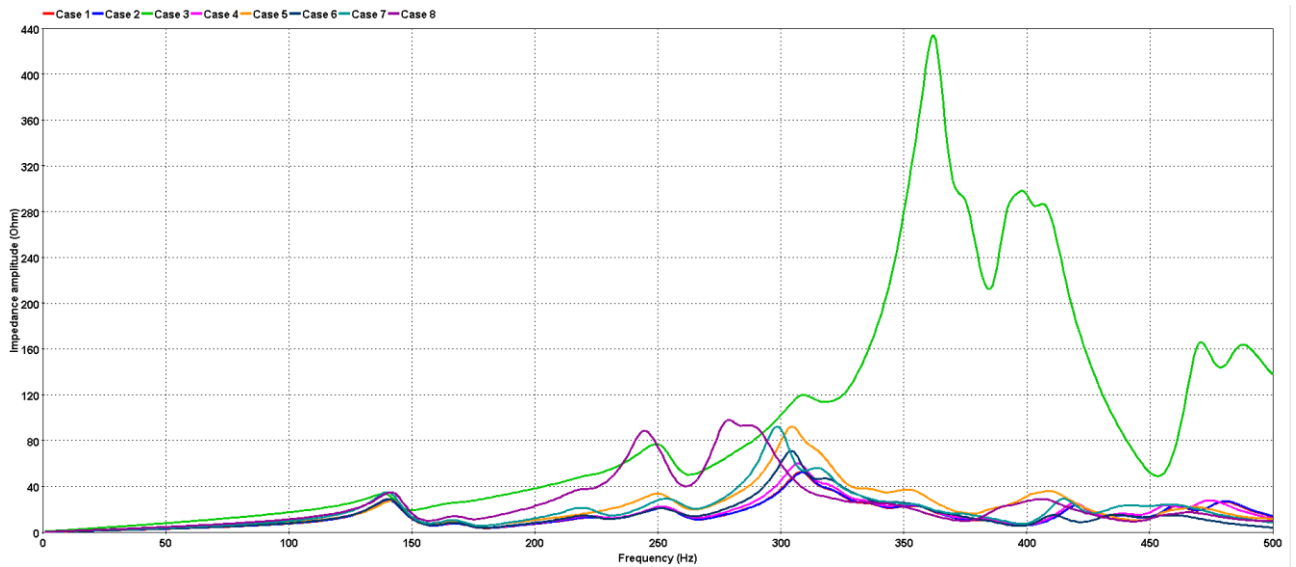


Abb. 4-40: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Auwiesen für alle 8 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.21 220 kV Fällanden

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Fällanden berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Fällanden – Auwiesen
3	N-1 bei 220 kV Fällanden – Breite
4	N-2 bei 220 kV Benken – Siebnen und Benken – Sils
5	N-2 bei 220 kV Benken – Siebnen und Grynau – Mettlen

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Fällanden für die 5 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-41 dargestellt.

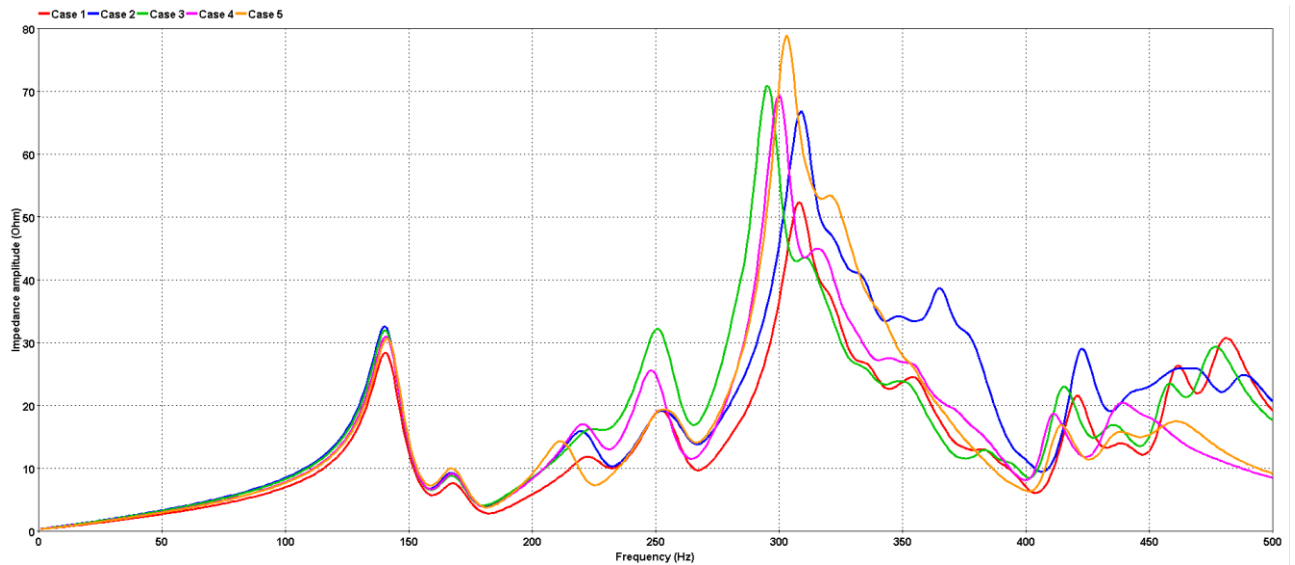


Abb. 4-41: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Fällanden für alle 5 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.22 220 kV Benken

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Benken berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Benken – Siebnen
3	N-1 bei 380 kV Benken – Sils
4	N-1 bei 220 kV Fällanden – Auwiesen
5	N-1 bei 220 kV Fällanden – Breite
6	N-2 bei 220 kV Benken – Siebnen und Benken – Sils

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Benken für die 6 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-42 dargestellt.

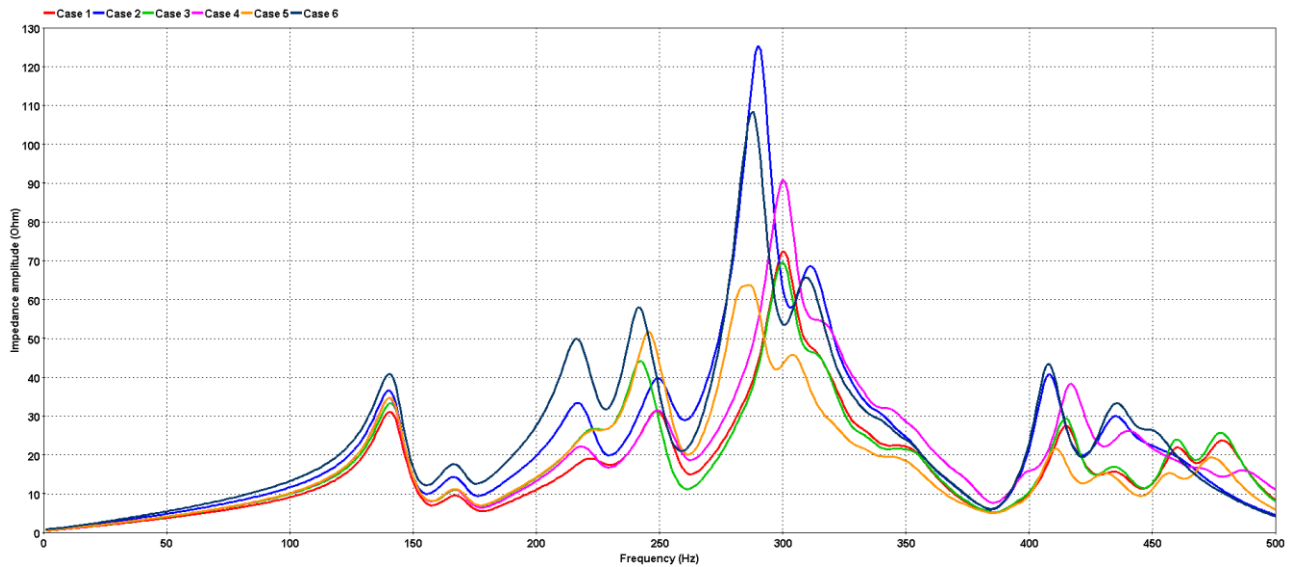


Abb. 4-42: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Benken für alle 6 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.23 220 kV Winkeln

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Winkeln berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Winkeln – Weinfeld
3	N-1 bei 220 kV Winkeln – Wittenwil
4	N-1 bei 220 kV Winkeln – Rüthi
5	N-1 bei 220 kV Winkeln – Mörschwil
6	N-2 bei 220 kV Winkeln – Weinfeld und Winkeln – Wittenwil

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Winkeln für die 6 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-43 dargestellt.

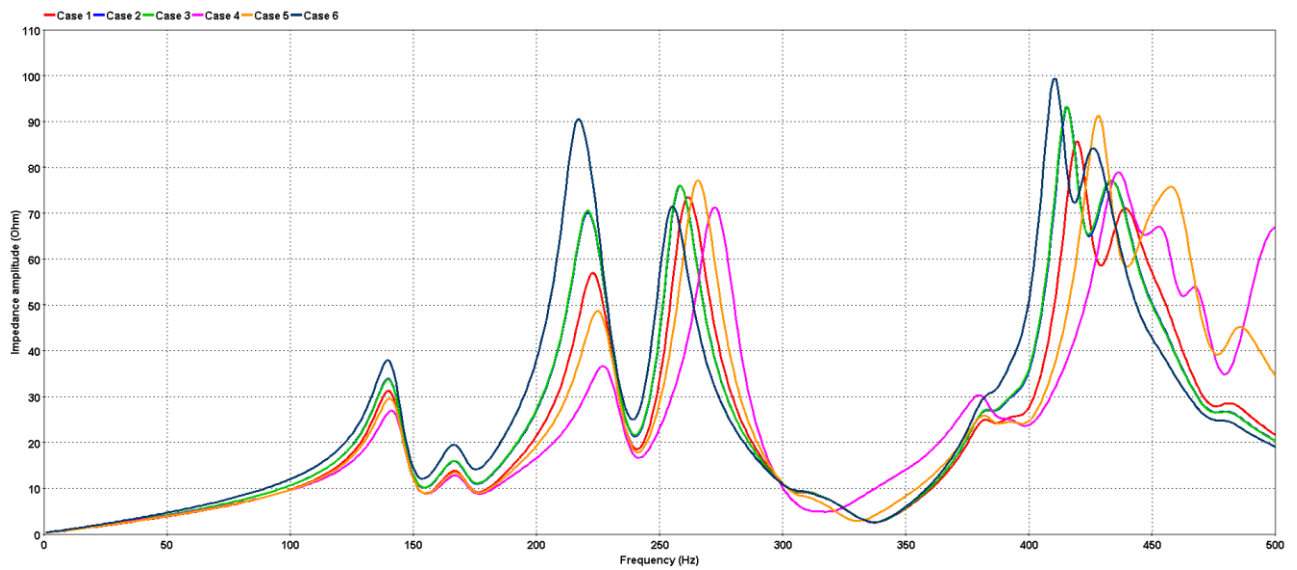


Abb. 4-43: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Winkeln für alle 6 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.24 220 kV Sarelli

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 220 kV Sarelli berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Sarelli – Rothenbrunnen
3	N-2 bei 220 kV Sarelli – Rothenbrunnen und Rüthi – Montlingen

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 220 kV Sarelli für die 3 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-44 dargestellt.

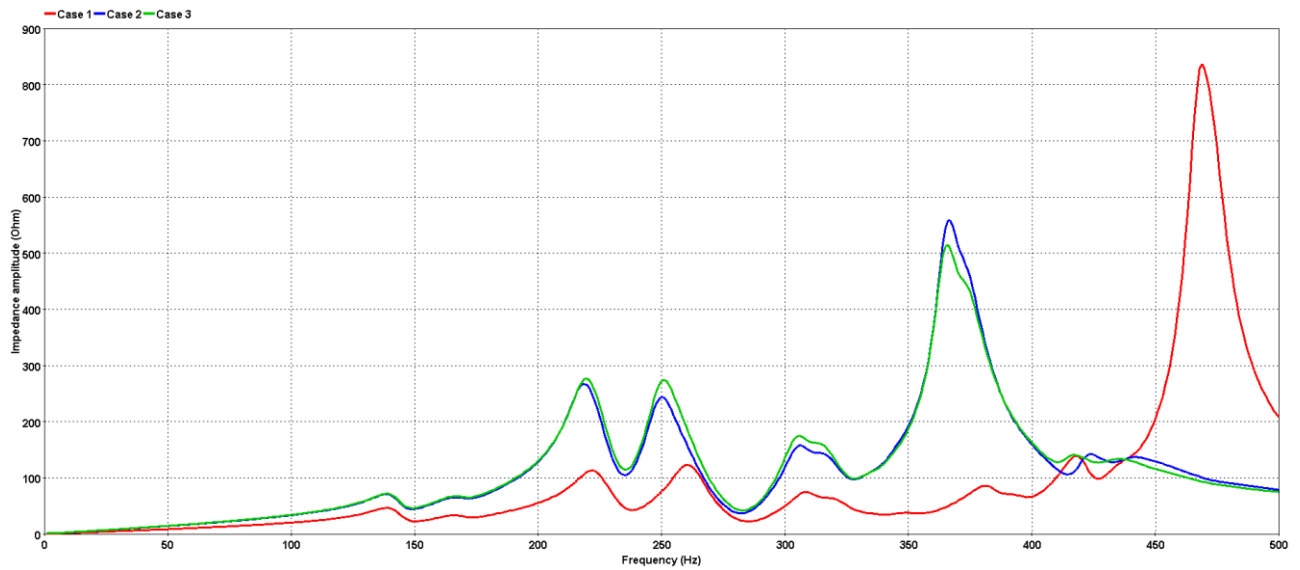


Abb. 4-44: Oberschwingungsimpedanz bei 220 kV Sarelli für alle 3 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.25 380 kV Sils

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Sils berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Sils – Filisur
3	N-1 bei 380 kV Sils – Pradella
4	N-1 bei 380 kV Bonaduz – Mapragg
5	N-1 bei 380 kV Bonaduz – Breite
6	N-2 bei 380 kV Sils – Filisur und Sils – Pradella

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 380 kV Sils für die 6 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-45 dargestellt.

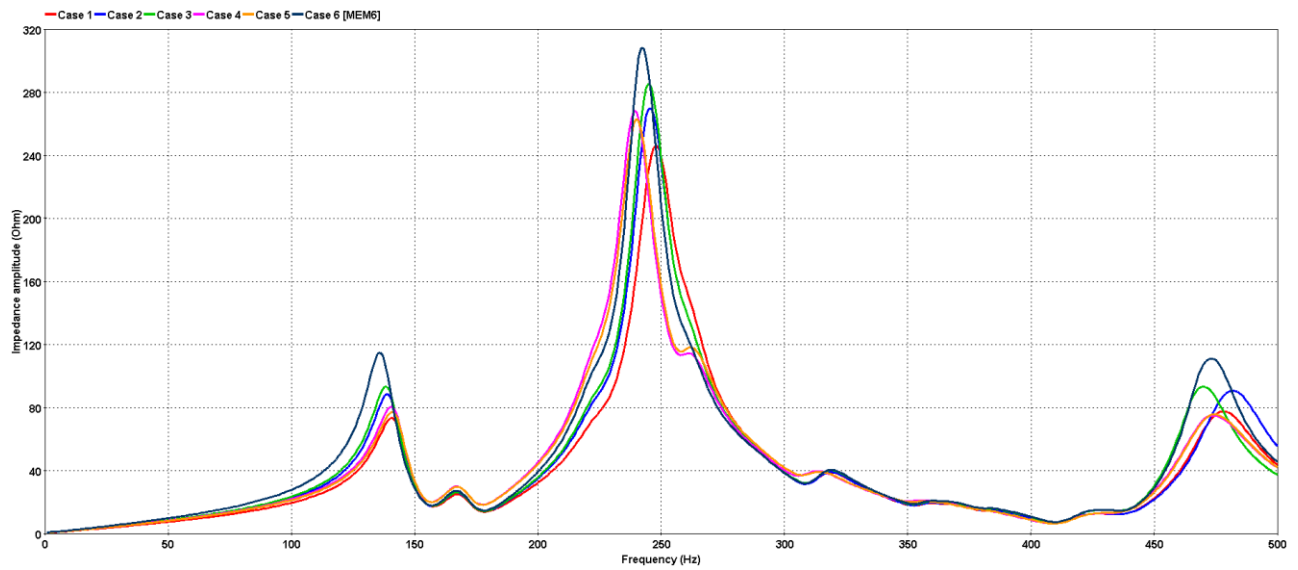


Abb. 4-45: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Sils für alle 6 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.3.26 380 kV Soazza

Die folgenden Fälle wurden in den Studien zu Frequenz-Scans für 380 kV Soazza berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Soazza – Mese
3	N-2 bei 380 kV Soazza – Mese und Sils – Filisur

Die Netzimpedanz als Funktion der beobachteten Frequenz bei 380 kV Soazza für die 3 Fälle in Szenario 3 ist in Abb. 4-46 dargestellt.

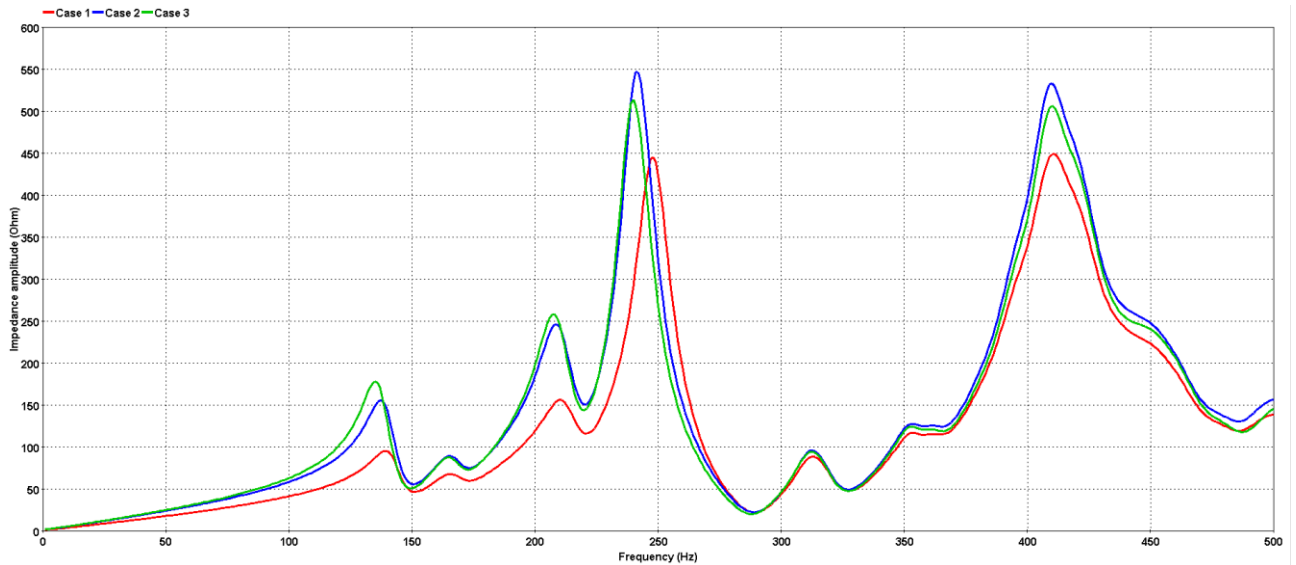


Abb. 4-46: Oberschwingungsimpedanz bei 380 kV Soazza für alle 3 Fälle – niedriger SCL, Szenario 3

4.4.4 Verstärkungsfaktoren für die 3 Szenarien und die verschiedenen Oberschwingungseinspeisepunkte

4.4.4.1 Szenario 3

4.4.4.1.1 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Regensdorf – Seebach
3	N-1 bei 220 kV Auwiesen – Seebach
4	N-1 bei 220 kV Benken – Siebnen
5	N-1 bei 380 kV Benken – Sils
6	N-1 bei 220 kV Grynau – Mettlen
7	N-2 bei 220 kV Benken – Sils und Benken – Siebnen
8	N-2 bei 220 kV Grynau – Tierfehd
9	N-2 bei 220 kV Grynau – Winkeln
10	N-1 bei 220 kV Niederwil – Regensdorf

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-6 bzw. Tabelle 4-7 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:		Fall 9:		Fall 10:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0,972	1,030	0,963	1,001	0,971	1,021	0,966	1,009	0,976	1,029	0,972	1,025	0,969	1,007	0,978	1,032	0,958	1,034	1,037	1,090
220 kV Seebach	0,965	1,033	0,964	1,003	0,900	1,042	0,957	1,008	0,969	1,033	0,964	1,027	0,960	1,005	0,972	1,036	0,947	1,038	1,045	1,108
220 kV Regensdorf	0,920	1,015	0,856	0,941	0,887	1,015	0,907	0,974	0,928	1,014	0,919	1,004	0,913	0,970	0,932	1,019	0,892	1,022	1,054	1,134
220 kV Aathal	0,512	0,879	0,505	0,875	0,508	0,877	0,470	0,798	0,630	0,885	0,479	0,855	0,584	0,804	0,768	0,948	0,602	1,188	0,449	0,850
220 kV Grynau	0,514	0,845	0,506	0,841	0,510	0,843	0,466	0,766	0,644	0,848	0,475	0,813	0,591	0,768	0,820	0,922	0,619	1,177	0,447	0,814
220 kV Benken	0,791	1,216	0,790	1,208	0,791	1,215	0,860	1,252	0,901	1,263	0,792	1,171	0,985	1,309	0,800	1,239	0,801	1,221	0,784	1,154
380 kV Benken	0,164	0,525	0,159	0,518	0,161	0,524	0,126	0,399	0,171	0,560	0,146	0,430	0,128	0,426	0,235	0,564	0,106	0,544	0,119	0,470
220 kV Benken	0,791	1,216	0,790	1,208	0,791	1,215	0,860	1,252	0,901	1,263	0,792	1,171	0,985	1,309	0,800	1,239	0,801	1,221	0,784	1,154
380 kV Benken	0,164	0,525	0,159	0,518	0,161	0,524	0,126	0,399	0,171	0,560	0,146	0,430	0,128	0,426	0,235	0,564	0,106	0,544	0,119	0,470
220 kV Siebnen	0,732	1,110	0,728	1,098	0,730	1,108	0,476	0,775	0,834	1,147	0,726	1,039	0,536	0,791	0,764	1,135	0,695	1,136	0,696	1,015
220 kV Samstagern	0,613	0,949	0,602	0,929	0,607	0,948	0,482	0,781	0,694	0,972	0,590	0,787	0,542	0,797	0,730	0,980	0,464	1,039	0,503	0,786
220 kV Altgass	0,539	0,881	0,529	0,864	0,533	0,881	0,437	0,727	0,613	0,905	0,513	0,700	0,496	0,745	0,675	0,911	0,364	0,981	0,446	0,739
220 kV Thalwil	0,675	1,082	0,657	1,054	0,665	1,082	0,556	0,876	0,750	1,103	0,652	0,915	0,612	0,886	0,792	1,116	0,518	1,177	0,502	0,834
220 kV Waldegg	0,693	1,104	0,672	1,073	0,682	1,105	0,584	0,884	0,764	1,123	0,671	0,940	0,637	0,892	0,809	1,137	0,537	1,198	0,490	0,832
220 kV Obfelden	0,661	0,964	0,637	0,934	0,648	0,966	0,578	0,769	0,719	0,976	0,643	0,831	0,622	0,772	0,763	0,991	0,517	1,041	0,429	0,687
220 kV Niederwil	0,712	0,766	0,670	0,718	0,691	0,767	0,678	0,681	0,738	0,763	0,707	0,742	0,698	0,672	0,754	0,776	0,644	0,785	0,318	0,323
220 kV Mettlen	0,451	0,789	0,444	0,775	0,447	0,789	0,381	0,639	0,518	0,814	0,423	0,601	0,437	0,658	0,606	0,815	0,255	0,891	0,378	0,669
380 kV Mettlen	0,058	0,628	0,053	0,620	0,055	0,628	0,026	0,545	0,085	0,672	0,053	0,509	0,052	0,588	0,075	0,650	0,157	0,695	0,019	0,563
220 kV Breite	0,357	0,481	0,352	0,480	0,354	0,480	0,338	0,447	0,423	0,491	0,345	0,492	0,403	0,458	0,446	0,490	0,390	0,550	0,315	0,475
380 kV Breite	0,265	0,471	0,264	0,465	0,264	0,468	0,247	0,411	0,251	0,515	0,252	0,404	0,227	0,444	0,331	0,443	0,178	0,501	0,252	0,438

Tabelle 4-6: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden – niedriger SCL (Szenario 3)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:		Fall 9:		Fall 10:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0,926	1,038	0,921	1,007	0,928	1,028	0,912	1,003	0,932	1,039	0,925	1,029	0,917	1,003	0,929	1,039	0,925	1,044	1,027	1,078
220 kV Seebach	0,908	1,044	0,922	1,009	0,775	1,078	0,890	1,001	0,915	1,046	0,907	1,033	0,897	1,001	0,912	1,046	0,907	1,051	1,033	1,094
220 kV Regensdorf	0,829	1,038	0,737	0,973	0,764	1,050	0,800	0,967	0,841	1,040	0,828	1,018	0,811	0,967	0,836	1,040	0,826	1,050	1,037	1,115
220 kV Aathal	0,356	0,780	0,362	0,774	0,361	0,778	0,382	0,708	0,371	0,779	0,452	0,674	0,404	0,710	0,496	0,862	0,440	1,151	0,414	0,732
220 kV Grynau	0,371	0,779	0,377	0,772	0,375	0,776	0,394	0,691	0,387	0,777	0,481	0,657	0,416	0,691	0,536	0,868	0,468	1,175	0,433	0,723
220 kV Benken	0,692	1,266	0,690	1,254	0,691	1,262	0,847	1,241	0,792	1,325	0,690	1,213	0,955	1,311	0,694	1,283	0,704	1,280	0,680	1,172
380 kV Benken	0,367	0,543	0,360	0,536	0,362	0,544	0,306	0,470	0,333	0,584	0,353	0,490	0,265	0,512	0,372	0,591	0,353	0,553	0,297	0,484
220 kV Benken	0,692	1,266	0,690	1,254	0,691	1,262	0,847	1,241	0,792	1,325	0,690	1,213	0,955	1,311	0,694	1,283	0,704	1,280	0,680	1,172
380 kV Benken	0,367	0,543	0,360	0,536	0,362	0,544	0,306	0,470	0,333	0,584	0,353	0,490	0,265	0,512	0,372	0,591	0,353	0,553	0,297	0,484
220 kV Siebnen	0,541	1,236	0,535	1,217	0,537	1,230	0,136	1,017	0,641	1,288	0,517	1,143	0,063	1,018	0,556	1,257	0,584	1,283	0,478	1,080
220 kV Samstagern	0,232	1,322	0,211	1,289	0,217	1,319	0,140	1,041	0,325	1,358	0,134	1,091	0,064	1,041	0,267	1,365	0,408	1,466	0,026	1,029
220 kV Altgass	0,127	1,276	0,107	1,243	0,113	1,272	0,181	0,982	0,214	1,307	0,060	1,025	0,098	0,982	0,161	1,323	0,346	1,433	0,072	0,989
220 kV Thalwil	0,272	1,487	0,242	1,448	0,251	1,488	0,056	1,141	0,361	1,524	0,187	1,241	0,037	1,142	0,310	1,532	0,432	1,642	0,025	1,129
220 kV Waldegg	0,289	1,512	0,255	1,471	0,265	1,515	0,019	1,145	0,374	1,547	0,209	1,267	0,077	1,145	0,328	1,556	0,441	1,666	0,045	1,142
220 kV Obfelden	0,289	1,298	0,251	1,262	0,262	1,304	0,070	0,970	0,361	1,324	0,228	1,098	0,135	0,971	0,325	1,334	0,410	1,425	0,079	0,967
220 kV Niederwil	0,502	0,875	0,442	0,836	0,460	0,887	0,420	0,715	0,534	0,882	0,485	0,822	0,450	0,715	0,520	0,884	0,530	0,911	0,088	0,551
220 kV Mettlen	0,067	1,187	0,061	1,157	0,063	1,184	0,220	0,883	0,115	1,213	0,141	0,930	0,135	0,883	0,065	1,237	0,308	1,350	0,166	0,917
380 kV Mettlen	0,396	0,639	0,394	0,634	0,395	0,642	0,414	0,682	0,344	0,706	0,392	0,599	0,347	0,763	0,378	0,676	0,458	0,672	0,390	0,609
220 kV Breite	0,225	0,384	0,229	0,383	0,228	0,384	0,256	0,389	0,233	0,382	0,276	0,371	0,269	0,392	0,273	0,404	0,223	0,488	0,263	0,380
380 kV Breite	0,426	0,178	0,417	0,176	0,420	0,174	0,362	0,232	0,411	0,216	0,411	0,181	0,338	0,284	0,451	0,164	0,345	0,132	0,343	0,179

Tabelle 4-7: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden – optimaler SCL (Szenario 3)

4.4.4.1.2 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois wurden folgende Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Romanel – Veytaux
3	N-1 bei 220 kV Romanel – Vaux
4	N-1 bei 220 kV Vaux – Verbois
5	N-2 bei 220 kV Romanel – Vaux und Vaux – Verbois

Die Verstärkungsfaktoren auf die Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-8 bzw. Tabelle 4-9 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,854	0,853	0,979	0,787	0,638	0,797	0,601	0,835	0,633	0,796
220 kV Foretaille	0,854	1,475	0,858	2,472	0,829	1,398	0,827	1,397	0,829	1,398
220 kV Crans	0,619	1,844	0,635	3,532	0,570	1,694	0,566	1,748	0,570	1,694
220 kV Westliche Vororte	0,464	1,867	0,511	4,080	0,372	1,643	0,363	1,842	0,367	1,642
220 kV Romanel	0,561	1,685	0,607	3,812	0,482	1,467	0,474	1,695	0,477	1,466
380 kV Romanel	2,379	1,069	2,621	0,925	1,950	0,923	1,878	1,079	1,943	0,924
220 kV Vaux	0,450	1,560	0,493	3,503	0,939	0,938	0,447	1,685	0,000	0,000
220 kV Veytaux	0,755	1,225	0,807	1,192	0,660	1,045	0,652	1,247	0,656	1,046
220 kV St-Triphon	0,689	1,715	0,752	1,044	0,597	1,460	0,584	1,728	0,592	1,462
220 kV Riddes	0,678	1,956	0,742	1,609	0,575	1,683	0,559	1,954	0,572	1,683
380 kV La Batiаз	1,764	1,221	1,934	2,032	1,441	1,079	1,389	1,187	1,436	1,075
380 kV Nant de Drance	1,792	1,295	1,964	2,156	1,463	1,144	1,410	1,259	1,458	1,139
380 kV Châtelard	1,790	1,287	1,962	2,140	1,462	1,137	1,409	1,250	1,457	1,132
220 kV Châtelard	1,414	1,052	1,549	1,758	1,155	0,930	1,113	1,023	1,151	0,926
220 kV Vallorcine	1,399	1,042	1,532	1,741	1,142	0,921	1,100	1,012	1,138	0,917

Tabelle 4-8: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois – SCL niedrig (Szenario 3)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	1,237	0,467	1,479	0,321	0,931	0,485	0,868	0,481	0,920	0,490
220 kV Foretaille	1,005	0,747	1,052	1,611	0,923	0,730	0,910	0,619	0,920	0,730
220 kV Crans	0,984	0,915	1,120	2,044	0,805	0,823	0,772	0,639	0,799	0,822
220 kV Westliche Vororte	1,255	1,434	1,454	2,188	1,007	1,263	0,958	1,120	0,996	1,263
220 kV Romanel	1,365	1,531	1,563	2,043	1,125	1,357	1,078	1,246	1,114	1,358
380 kV Romanel	3,335	0,440	3,841	0,333	2,698	0,390	2,563	0,351	2,680	0,394
220 kV Vaux	1,150	1,303	1,321	1,875	0,735	0,792	1,019	1,207	0,000	0,000
220 kV Veytaux	1,340	3,019	1,112	3,055	1,111	2,659	1,076	2,455	1,103	2,663
220 kV St-Triphon	1,153	3,066	1,101	2,852	0,947	2,694	0,907	2,493	0,939	2,698
220 kV Riddes	0,888	1,628	0,916	1,562	0,725	1,429	0,693	1,325	0,719	1,430
380 kV La Batiatz	2,188	0,566	2,481	0,949	1,761	0,503	1,675	0,436	1,750	0,500
380 kV Nant de Drance	2,171	0,588	2,461	0,983	1,748	0,522	1,663	0,452	1,737	0,519
380 kV Châtelard	2,180	0,586	2,471	0,980	1,755	0,521	1,669	0,451	1,744	0,517
220 kV Châtelard	1,452	0,396	1,645	0,672	1,169	0,352	1,112	0,304	1,161	0,350
220 kV Vallorcine	1,422	0,388	1,611	0,659	1,144	0,345	1,089	0,297	1,137	0,343

Tabelle 4-9: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois – optimaler SCL (Szenario 3)

4.4.4.1.3 Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot

Folgende Fälle wurden für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV La Bâtiatz – Romanel
3	N-1 bei 380 kV La Bâtiatz – Chamoson
4	N-2 bei 380 kV Chamoson – Chippis

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingungen 5 und 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in der folgenden Tabelle Tabelle 4-10 bzw. Tabelle 4-11 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,825	0,870	0,825	0,905	0,905	0,901	0,826	0,945
220 kV Foretaille	1,147	1,062	1,217	0,359	0,384	0,263	1,091	0,896
220 kV Crans	1,301	1,127	1,366	0,417	0,468	0,340	1,248	0,882
220 kV Westliche Vororte	1,347	0,843	1,397	0,402	0,525	0,390	1,306	0,538
220 kV Romanel	1,310	0,692	1,352	0,367	0,516	0,371	1,271	0,414
380 kV Romanel	0,331	0,866	0,351	1,121	1,091	0,071	0,355	0,298
220 kV Vaux	1,229	0,652	1,282	0,340	0,451	0,313	1,188	0,422
220 kV Veytaux	1,319	1,273	1,346	0,893	0,598	0,352	1,295	1,230
220 kV St-Triphon	1,150	1,635	1,195	0,901	0,436	0,337	1,128	1,458
220 kV Riddes	0,622	1,377	0,658	0,365	0,250	0,292	0,616	1,028
380 kV La Batiaz	0,151	0,502	0,246	0,942	2,154	0,569	0,303	0,671
380 kV Nant de Drance	0,154	0,532	0,250	0,997	2,188	0,604	0,308	0,710
380 kV Châtelard	0,153	0,528	0,250	0,990	2,185	0,600	0,307	0,705
220 kV Châtelard	0,120	0,436	0,197	0,813	1,715	0,492	0,241	0,581
220 kV Vallorcine	0,118	0,432	0,195	0,806	1,696	0,488	0,238	0,576

Tabelle 4-10: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot – SCL niedrig (Szenario 3)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,782	0,936	0,805	0,897	0,826	0,919	0,766	0,931
220 kV Foretaille	2,016	0,301	3,159	0,384	1,043	0,158	2,120	0,248
220 kV Crans	2,254	0,238	3,473	0,464	1,232	0,166	2,377	0,174
220 kV Westliche Vororte	2,318	0,126	3,446	0,455	1,360	0,228	2,446	0,111
220 kV Romanel	2,272	0,154	3,339	0,416	1,353	0,245	2,396	0,155
380 kV Romanel	1,219	0,390	1,446	1,089	1,294	0,065	1,361	0,392
220 kV Vaux	2,088	0,091	3,137	0,386	1,188	0,178	2,200	0,078
220 kV Veytaux	1,937	0,605	2,686	0,787	1,122	0,485	2,016	0,468
220 kV St-Triphon	1,639	0,668	2,280	0,797	0,894	0,502	1,686	0,504
220 kV Riddes	0,878	0,514	1,067	0,475	0,430	0,312	0,873	0,352
380 kV La Batiaz	0,879	0,671	0,448	0,398	1,742	0,635	1,032	0,693
380 kV Nant de Drance	0,873	0,696	0,445	0,413	1,729	0,658	1,025	0,719
380 kV Châtelard	0,876	0,693	0,446	0,412	1,735	0,656	1,028	0,717
220 kV Châtelard	0,583	0,475	0,297	0,282	1,153	0,449	0,684	0,491
220 kV Vallorcine	0,571	0,466	0,291	0,276	1,129	0,440	0,670	0,481

Tabelle 4-11: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot – optimaler SCL (Szenario 3)

4.4.4.1.4 Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel wurden folgende Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV La Bâtiatz – Chamoson
3	N-1 bei 380 kV Bois Tollot – Romanel
4	N-2 bei 380 kV Chamoson – Chipps

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-12 bzw. Tabelle 4-13 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,183	0,877	0,213	0,361	0,574	0,672	0,197	0,636
220 kV Foretaille	1,538	1,129	1,368	0,496	0,947	1,118	1,620	0,886
220 kV Crans	1,639	1,046	1,461	0,529	0,955	1,054	1,724	0,841
220 kV Westliche Vororte	1,514	0,485	1,355	0,408	0,788	0,539	1,589	0,468
220 kV Romanel	1,424	0,288	1,278	0,335	0,716	0,348	1,493	0,337
380 kV Romanel	0,197	0,956	0,198	0,550	0,286	0,935	0,079	1,117
220 kV Vaux	1,429	0,368	1,282	0,348	0,724	0,423	1,499	0,399
220 kV Veytaux	1,365	1,927	1,283	0,349	0,659	1,814	1,397	1,298
220 kV St-Triphon	1,192	2,242	1,135	0,322	0,565	2,143	1,206	1,513
220 kV Riddes	0,546	1,445	0,622	0,286	0,216	1,451	0,517	1,057
380 kV La Batiatz	0,553	1,460	2,005	7,887	0,630	1,363	0,757	3,060
380 kV Nant de Drance	0,561	1,550	2,036	8,337	0,640	1,446	0,769	3,238
380 kV Châtelard	0,561	1,538	2,033	8,287	0,639	1,435	0,769	3,216
220 kV Châtelard	0,443	1,265	1,605	6,810	0,505	1,181	0,607	2,649
220 kV Vallorcine	0,438	1,253	1,587	6,745	0,499	1,170	0,600	2,624

Tabelle 4-12: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel – SCL niedrig (Szenario 3)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	1,109	0,350	1,008	0,358	1,039	0,232	1,101	0,302
220 kV Foretaille	3,645	0,444	3,207	0,306	2,334	0,531	3,534	0,420
220 kV Crans	3,908	0,469	3,433	0,343	2,462	0,521	3,783	0,459
220 kV Westliche Vororte	3,648	0,347	3,204	0,286	2,257	0,299	3,529	0,368
220 kV Romanel	3,473	0,290	3,051	0,250	2,139	0,214	3,360	0,313
380 kV Romanel	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
220 kV Vaux	3,385	0,309	2,974	0,249	2,080	0,241	3,276	0,325
220 kV Veytaux	2,832	0,509	2,474	0,466	1,741	0,467	2,709	0,309
220 kV St-Triphon	2,412	0,554	2,101	0,522	1,487	0,590	2,294	0,252
220 kV Riddes	1,129	0,481	0,996	0,320	0,678	0,616	1,046	0,141
380 kV La Batiatz	0,549	1,572	1,364	11,260	0,512	1,621	0,657	1,612
380 kV Nant de Drance	0,545	1,627	1,355	11,660	0,509	1,678	0,652	1,670
380 kV Châtelard	0,547	1,623	1,360	11,627	0,511	1,674	0,654	1,665
220 kV Châtelard	0,364	1,112	0,906	7,972	0,340	1,147	0,435	1,141
220 kV Vallorcine	0,356	1,091	0,887	7,819	0,333	1,125	0,426	1,119

Tabelle 4-13: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel – optimaler SCL (Szenario 3)

4.4.4.1.5 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Ernen – Seehalten
3	N-1 bei 220 kV Airolo – Rotondo
4	N-1 bei 220 kV Airolo – Lavorgo
5	N-1 bei 220 kV Altgass – Samstagern
6	N-1 bei 220 kV Samstagern – Siebnen
7	N-1 bei 220 kV Samstagern – Thalwil
8	N-1 bei 220 kV Mettlen – Sursee
9	N-1 bei 380 kV Gösgen – Laufenburg

10	N-1 bei 220 kV Gösgen – Ormalingen
11	N-1 bei 220 kV Altgass – Mettlen
12	N-2 bei 220 kV Airolo – Rotondo und Airolo – Lavorgo
13	N-2 bei 220 kV Obfelden – Waldegg
14	N-2 bei 220 kV Birr – Niederwil und Mettlen – Obfelden
15	N-2 bei 220 kV Mettlen – Obfelden und Breite – Fällanden

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-14 bzw. Tabelle 4-15 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,349	1,104	0,341	0,695	0,347	0,483	0,333	0,575	0,356	0,849	0,359	0,845	0,349	1,100	0,322	1,177
220 kV Obfelden	0,976	0,409	0,979	0,370	0,975	0,407	0,982	0,359	0,880	0,143	0,985	0,620	0,998	0,470	0,961	0,471
220 kV Waldegg	1,054	0,368	1,058	0,441	1,054	0,526	1,060	0,464	0,916	0,276	1,093	0,914	1,089	0,438	1,042	0,402
220 kV Thalwil	1,047	0,331	1,050	0,449	1,046	0,543	1,051	0,483	0,890	0,333	1,103	0,985	1,109	0,441	1,036	0,340
220 kV Samstagern	0,992	0,357	0,995	0,496	0,992	0,585	0,994	0,539	0,802	0,450	1,082	1,070	0,981	0,359	0,985	0,316
220 kV Altgass	1,008	0,656	1,009	0,737	1,008	0,786	1,009	0,764	1,009	1,023	1,053	1,062	1,002	0,669	1,004	0,622
220 kV Niederwil	0,750	1,497	0,755	1,155	0,750	0,987	0,765	1,028	0,683	0,519	0,698	0,327	0,760	1,490	0,724	1,619
220 kV Regensdorf	0,785	2,426	0,796	1,961	0,784	1,707	0,799	1,769	0,715	0,761	0,685	0,818	0,790	2,359	0,762	2,622
220 kV Seebach	0,789	2,553	0,802	2,080	0,789	1,817	0,802	1,880	0,720	0,796	0,680	0,902	0,794	2,477	0,767	2,759
220 kV Auwiesen	0,786	2,570	0,800	2,097	0,786	1,834	0,799	1,897	0,717	0,799	0,675	0,919	0,790	2,492	0,764	2,777
220 kV Fällanden	0,770	2,611	0,785	2,146	0,770	1,885	0,782	1,946	0,704	0,803	0,651	0,981	0,773	2,527	0,750	2,820
220 kV Aathal	0,683	1,747	0,708	1,522	0,682	1,400	0,688	1,419	0,675	0,332	0,685	0,462	0,683	1,683	0,661	1,830
220 kV Grynau	0,743	1,616	0,771	1,374	0,743	1,244	0,746	1,267	0,739	0,300	0,752	0,425	0,744	1,556	0,724	1,709
220 kV Benken	0,636	2,276	0,645	1,832	0,636	1,588	0,645	1,637	0,548	0,767	0,437	1,062	0,635	2,191	0,628	2,489
220 kV Siebnen	0,739	1,553	0,745	1,223	0,739	1,040	0,745	1,072	0,621	0,671	0,433	1,059	0,735	1,478	0,731	1,722
220 kV Giswil	0,643	1,231	0,736	0,770	0,654	0,497	0,791	0,454	0,645	0,862	0,646	0,867	0,643	1,179	0,644	1,008
220 kV Innertkirchen	0,561	1,909	0,687	1,399	0,585	1,060	0,713	1,012	0,574	1,233	0,584	1,297	0,562	1,843	0,541	1,613
220 kV Handeck	0,497	1,979	0,630	1,502	0,524	1,183	0,643	1,125	0,514	1,279	0,527	1,345	0,497	1,913	0,473	1,684
220 kV Grimsel	0,461	1,973	0,595	1,521	0,490	1,222	0,598	1,160	0,481	1,272	0,496	1,338	0,461	1,908	0,434	1,688
220 kV Seehalten	0,436	1,954	0,568	1,523	0,466	1,244	0,562	1,178	0,457	1,256	0,474	1,322	0,436	1,890	0,405	1,679
220 kV Airolo	0,675	1,406	0,711	0,885	0,636	1,296	0,446	1,786	0,701	0,955	0,733	0,992	0,674	1,367	0,559	1,264
220 kV Sils	1,406	0,653	1,423	0,477	1,405	0,425	1,416	0,400	1,378	0,274	1,380	0,341	1,409	0,630	1,335	0,794

	Fall 9:		Fall 10:		Fall 11:		Fall 12:		Fall 13:		Fall 14:		Fall 15:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,352	1,103	0,339	1,197	0,356	0,833	0,309	0,559	0,350	1,110	0,298	0,926	0,348	0,842
220 kV Obfelden	0,973	0,379	0,973	0,454	0,946	0,141	0,977	0,360	0,832	0,600	1,288	0,591	1,120	0,465
220 kV Waldegg	1,052	0,346	1,052	0,348	1,013	0,286	1,053	0,468	1,257	0,811	1,315	0,313	1,188	0,203
220 kV Thalwil	1,045	0,319	1,044	0,268	1,000	0,348	1,044	0,487	1,206	0,752	1,261	0,120	1,167	0,040
220 kV Samstagern	0,991	0,369	0,990	0,231	0,935	0,478	0,987	0,545	1,061	0,565	1,113	0,343	1,082	0,362
220 kV Altgass	1,007	0,667	1,007	0,593	0,943	0,487	1,005	0,767	1,043	0,785	1,068	0,685	1,053	0,698
220 kV Niederwil	0,744	1,452	0,746	1,648	0,729	0,469	0,761	1,023	0,686	1,585	1,179	1,109	0,931	0,958
220 kV Regensdorf	0,781	2,343	0,781	2,687	0,760	0,674	0,776	1,762	0,747	2,438	1,099	1,346	1,050	1,364
220 kV Seebach	0,787	2,464	0,786	2,830	0,764	0,703	0,772	1,873	0,760	2,552	1,063	1,363	1,074	1,409
220 kV Auwiesen	0,784	2,480	0,783	2,850	0,761	0,706	0,768	1,890	0,759	2,565	1,048	1,356	1,075	1,410
220 kV Fällanden	0,769	2,518	0,768	2,896	0,745	0,707	0,743	1,940	0,753	2,590	0,977	1,314	1,074	1,403
220 kV Aathal	0,686	1,701	0,680	1,862	0,674	0,258	0,581	1,427	0,676	1,741	0,661	0,738	0,665	0,534
220 kV Grynau	0,749	1,568	0,742	1,744	0,736	0,230	0,617	1,273	0,738	1,606	0,717	0,678	0,771	0,568
220 kV Benken	0,635	2,180	0,635	2,572	0,605	0,686	0,639	1,631	0,640	2,189	0,821	1,071	0,884	1,179
220 kV Siebnen	0,738	1,478	0,738	1,783	0,700	0,622	0,739	1,066	0,761	1,422	0,904	0,655	0,940	0,725
220 kV Littau	0,862	0,404	0,861	0,665	0,864	0,691	0,883	0,550	0,862	0,413	0,884	0,586	0,867	0,696
220 kV Giswil	0,640	1,254	0,636	0,990	0,648	0,887	0,671	0,478	0,641	1,226	0,688	0,851	0,652	0,865
220 kV Innertkirchen	0,562	1,936	0,552	1,399	0,571	1,245	0,538	1,042	0,562	1,899	0,574	1,339	0,566	1,210
220 kV Handeck	0,498	2,006	0,486	1,462	0,508	1,289	0,450	1,157	0,499	1,970	0,501	1,393	0,499	1,254
220 kV Grimsel	0,464	2,000	0,450	1,460	0,473	1,280	0,398	1,193	0,464	1,964	0,458	1,391	0,462	1,246
220 kV Seehalten	0,439	1,979	0,424	1,447	0,448	1,263	0,358	1,213	0,440	1,945	0,423	1,378	0,435	1,229
220 kV Airolo	0,689	1,427	0,650	1,082	0,681	0,957	6,143	1,912	0,679	1,406	0,469	1,045	0,641	0,924
220 kV Sils	1,405	0,603	1,396	0,866	1,396	0,255	1,303	0,392	1,383	0,626	1,404	0,319	1,350	0,440

Tabelle 4-14: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen – niedriger SCL (Szenario 3)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,408	1,357	0,413	0,980	0,414	0,752	0,388	0,907	0,448	0,828	0,458	0,883	0,409	1,369	0,423	1,398
220 kV Obfelden	0,691	1,176	0,688	1,012	0,690	0,988	0,700	1,026	0,398	0,327	0,735	0,705	0,692	1,263	0,692	1,197
220 kV Waldegg	0,778	1,296	0,775	1,063	0,776	1,067	0,786	1,074	0,342	0,527	0,886	0,978	0,779	1,437	0,780	1,312
220 kV Thalwil	0,791	1,233	0,788	0,987	0,790	1,007	0,799	0,997	0,289	0,606	0,934	1,032	0,792	1,475	0,794	1,245
220 kV Samstagern	0,786	1,032	0,784	0,788	0,785	0,831	0,793	0,790	0,185	0,730	0,992	1,092	0,784	0,981	0,790	1,035
220 kV Altgass	0,900	0,930	0,899	0,763	0,900	0,814	0,904	0,759	0,185	0,740	1,004	1,070	0,900	0,909	0,903	0,920
220 kV Niederwil	0,285	1,693	0,278	1,882	0,282	1,680	0,299	1,902	0,119	0,550	0,222	0,487	0,286	1,729	0,283	1,769
220 kV Regensdorf	0,144	2,584	0,132	2,956	0,141	2,664	0,159	3,013	0,128	0,817	0,098	0,984	0,145	2,584	0,146	2,716
220 kV Seebach	0,107	2,739	0,095	3,130	0,105	2,829	0,120	3,192	0,158	0,866	0,139	1,091	0,108	2,732	0,108	2,880
220 kV Auwiesen	0,100	2,759	0,087	3,153	0,097	2,851	0,111	3,217	0,167	0,872	0,154	1,112	0,101	2,750	0,099	2,901
220 kV Fällanden	0,079	2,815	0,073	3,221	0,080	2,920	0,078	3,289	0,210	0,891	0,224	1,192	0,080	2,799	0,072	2,962
220 kV Aathal	0,305	1,579	0,320	1,929	0,311	1,748	0,276	1,978	0,343	0,377	0,334	0,558	0,305	1,568	0,288	1,666
220 kV Grynau	0,304	1,480	0,321	1,791	0,311	1,617	0,274	1,837	0,344	0,323	0,337	0,504	0,305	1,469	0,285	1,564
220 kV Benken	0,267	0,451	0,273	0,129	0,143	2,660	0,154	2,992	0,200	0,896	0,287	1,317	0,144	2,554	0,150	2,715
220 kV Siebnen	0,296	1,994	0,287	2,164	0,293	1,985	0,311	2,220	0,121	0,839	0,284	1,304	0,295	1,954	0,307	2,090
220 kV Littau	0,913	1,196	0,948	0,759	0,908	0,840	0,924	0,698	0,924	0,883	0,927	0,946	0,913	1,185	0,909	1,200
220 kV Giswil	0,860	2,376	0,988	2,379	0,840	1,668	0,898	1,726	0,898	1,230	0,907	1,491	0,860	2,358	0,846	2,393
220 kV Innertkirchen	0,779	2,779	0,955	3,169	0,751	2,120	0,828	2,332	0,829	1,415	0,843	1,727	0,779	2,765	0,760	2,801
220 kV Handeck	0,731	2,753	0,926	3,260	0,701	2,182	0,785	2,415	0,785	1,406	0,799	1,712	0,731	2,740	0,714	2,779
220 kV Grimsel	0,679	2,674	0,900	3,237	0,667	2,167	0,754	2,412	0,753	1,369	0,767	1,665	0,698	2,662	0,682	2,702
220 kV Seehalten	0,676	2,605	0,887	3,212	0,644	2,151	0,734	2,423	0,733	1,337	0,747	1,627	0,676	2,594	0,662	2,635
220 kV Airolo	0,570	1,500	0,672	1,624	0,699	0,909	0,757	3,029	0,656	0,719	0,673	0,888	0,570	1,495	0,568	1,509
220 kV Sils	0,898	0,972	1,250	0,306	1,243	0,344	1,235	0,279	0,999	0,204	0,792	0,262	1,241	0,487	1,208	0,478

	Fall 9:		Fall 10:		Fall 11:		Fall 12:		Fall 13:		Fall 14:		Fall 15:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,429	0,975	0,410	0,968	0,452	0,972	0,365	0,332	0,414	0,972	0,424	1,062	0,411	0,923
220 kV Obfelden	0,683	0,986	0,688	1,045	0,390	0,316	0,709	0,702	0,539	0,979	0,482	1,064	0,529	0,816
220 kV Waldegg	0,770	1,035	0,775	1,093	0,330	0,571	0,796	0,751	1,048	1,386	0,610	0,786	0,654	0,614
220 kV Thalwil	0,784	0,962	0,788	1,012	0,276	0,665	0,808	0,709	1,003	1,274	0,657	0,550	0,698	0,454
220 kV Samstagern	0,781	0,771	0,784	0,798	0,169	0,823	0,800	0,615	0,879	0,926	0,723	0,287	0,756	0,357
220 kV Altgass	0,898	0,760	0,900	0,750	0,170	0,834	0,908	0,730	0,947	0,876	0,869	0,609	0,885	0,648
220 kV Niederwil	0,269	1,852	0,278	1,957	0,108	0,640	0,316	1,503	0,221	1,917	0,205	1,586	0,268	1,240
220 kV Regensdorf	0,122	2,904	0,132	3,089	0,131	0,937	0,182	2,460	0,111	2,972	0,075	1,828	0,197	1,814
220 kV Seebach	0,087	3,073	0,094	3,273	0,165	0,985	0,142	2,615	0,086	3,141	0,054	1,845	0,174	1,893
220 kV Auwiesen	0,080	3,096	0,086	3,297	0,176	0,991	0,132	2,637	0,083	3,163	0,054	1,833	0,167	1,900
220 kV Fällanden	0,073	3,161	0,071	3,370	0,221	1,005	0,091	2,708	0,081	3,225	0,075	1,776	0,140	1,916
220 kV Aathal	0,331	1,904	0,318	1,991	0,360	0,396	0,239	1,722	0,328	1,934	0,323	0,919	0,313	0,780
220 kV Grynau	0,332	1,763	0,319	1,857	0,362	0,361	0,235	1,567	0,328	1,793	0,324	0,857	0,291	0,790
220 kV Benken	0,128	2,858	0,132	3,070	0,208	1,013	0,171	1,427	0,147	2,884	0,099	1,523	0,208	1,678
220 kV Siebnen	0,281	2,113	0,287	2,280	0,123	0,952	0,330	1,739	0,324	2,114	0,242	1,035	0,340	1,133
220 kV Littau	0,950	0,755	0,947	0,754	0,961	0,609	0,931	0,516	0,948	0,765	0,949	0,561	0,914	0,857
220 kV Giswil	0,994	2,361	0,986	2,164	1,033	1,196	0,923	1,066	0,988	2,375	0,993	1,549	0,862	1,238
220 kV Innertkirchen	0,965	3,146	0,953	2,883	1,015	1,719	0,864	1,650	0,956	3,158	0,962	2,207	0,782	1,474
220 kV Handeck	0,935	3,237	0,923	2,978	0,990	1,772	0,827	1,773	0,927	3,250	0,934	2,268	0,735	1,468
220 kV Grimsel	0,910	3,213	0,898	2,965	0,967	1,761	0,798	1,801	0,901	3,227	0,910	2,254	0,702	1,435
220 kV Seehalten	0,897	3,188	0,885	2,950	0,955	1,748	0,781	1,821	0,888	3,202	0,897	2,237	0,174	1,893
220 kV Airolo	0,684	1,605	0,671	1,593	0,765	0,813	4,198	2,063	0,675	1,623	0,694	1,038	0,578	1,729
220 kV Sils	1,250	0,304	1,247	0,291	1,004	0,051	1,222	0,401	1,234	0,303	1,187	0,114	1,207	0,255

Tabelle 4-15: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen – optimaler SCL (Szenario 3)

4.4.4.1.6 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Gerlafingen

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Gerlafingen wurden folgende Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Froloo – Lachmatt
3	N-1 bei 220 kV Froloo – Ormalingen
4	N-1 bei 220 kV Lachmatt – Münchwilen
5	N-1 bei 220 kV Laufenburg – Münchwilen

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingungen 5 und 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Gerlafingen unter niedrigen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-16 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Flumenthal	0,699	0,903	0,829	1,415	0,710	0,958	0,752	1,053	1,053	0,624
220 kV Froloo	0,618	1,028	0,895	1,950	0,657	1,152	0,737	1,279	1,419	1,529
220 kV Lachmatt	0,518	0,888	0,155	0,221	0,545	0,989	0,679	1,165	1,572	1,956
380 kV Lachmatt	0,131	0,347	0,093	0,283	0,127	0,327	0,116	0,317	0,247	0,272
380 kV Asphard	0,125	0,356	0,091	0,286	0,121	0,336	0,109	0,328	0,230	0,278
220 kV Münchwilen	0,328	0,527	0,145	0,142	0,333	0,569	0,122	0,059	1,772	2,346
220 kV Ormalingen	0,447	0,655	0,575	1,169	0,274	0,263	0,488	0,770	0,892	0,874
220 kV Bickigen	0,293	0,139	0,333	0,240	0,292	0,148	0,299	0,176	0,411	0,125
380 kV Bickigen	0,168	0,313	0,161	0,205	0,164	0,300	0,161	0,254	0,248	0,307
220 kV Mühleberg	0,151	0,351	0,140	0,349	0,150	0,327	0,134	0,393	0,203	0,377
380 kV Muehleberg	0,136	0,223	0,114	0,224	0,133	0,222	0,121	0,216	0,203	0,207
220 kV Gösigen	0,331	0,387	0,357	0,594	0,275	0,262	0,319	0,402	0,529	0,391
380 kV Gosgen	0,141	0,337	0,124	0,202	0,132	0,341	0,128	0,310	0,238	0,295
220 kV Sursee	0,265	0,217	0,288	0,329	0,232	0,154	0,254	0,238	0,408	0,230
220 kV Laufenburg	0,242	0,328	0,135	0,100	0,240	0,343	0,122	0,059	0,204	0,061
380 kV Laufenburg	0,102	0,332	0,077	0,257	0,098	0,314	0,085	0,314	0,174	0,271
220 kV Lindenholz	0,230	0,193	0,159	0,168	0,227	0,190	0,148	0,208	0,236	0,194
220 kV Oftringen	0,257	0,207	0,221	0,069	0,250	0,232	0,200	0,067	0,303	0,030
220 kV Innertkirchen	0,259	0,877	0,264	1,063	0,244	0,828	0,258	0,918	0,378	0,568
220 kV Handeck	0,256	0,875	0,251	1,079	0,241	0,824	0,254	0,920	0,384	0,561
220 kV Grimsel	0,254	0,848	0,244	1,055	0,240	0,797	0,251	0,894	0,386	0,547
220 kV Seehalten	0,254	0,817	0,240	1,024	0,240	0,768	0,250	0,863	0,390	0,531

Tabelle 4-16: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Gerlafingen – niedriger SCL (Szenario 3)

4.4.4.1.7 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mühleberg

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mühleberg wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Hauterive – St. Triphon
3	N-1 bei 220 kV Botterens – St. Triphon
4	N-1 bei 220 kV Chamoson – Gstaad
5	N-1 bei 220 kV Chamoson – Riddes
6	N-1 bei 220 kV Chamoson – Riddes
7	N-2 bei 220 kV Chamoson – Mühleberg und Chamoson – Gstaad
8	N-2 bei 220 kV Botterens – St. Triphon und Hauterive – St. Triphon

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingungen 5 und 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mühleberg unter niedrigen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-17 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Muehleberg	0,456	0,617	0,457	0,553	0,457	0,553	0,458	0,569	0,456	0,617	0,456	0,616	0,460	0,525	0,457	0,497
220 kV Bickigen	0,216	0,183	0,216	0,116	0,216	0,118	0,214	0,128	0,216	0,182	0,216	0,181	0,211	0,090	0,217	0,072
380 kV Bickigen	0,148	1,263	0,157	0,798	0,158	0,801	0,144	0,882	0,148	1,259	0,148	1,254	0,139	0,607	0,168	0,459
220 kV Lindenholz	0,614	0,514	0,610	0,452	0,610	0,454	0,617	0,449	0,614	0,512	0,614	0,510	0,620	0,458	0,607	0,477
220 kV Flumenthal	0,255	1,188	0,254	0,832	0,254	0,832	0,256	0,881	0,255	1,185	0,255	1,183	0,258	0,656	0,254	0,566
220 kV Gerlafingen	0,240	1,115	0,239	0,780	0,239	0,780	0,241	0,826	0,240	1,112	0,240	1,110	0,242	0,615	0,238	0,531
220 kV Froloo	0,262	1,506	0,260	1,048	0,260	1,048	0,264	1,113	0,262	1,502	0,262	1,499	0,267	0,825	0,259	0,706
220 kV Kerzers	0,982	0,984	0,982	0,984	0,982	0,984	0,982	0,984	0,982	0,984	0,982	0,984	0,982	0,984	0,982	0,984
220 kV Galmiz	0,976	0,978	0,976	0,978	0,976	0,978	0,976	0,978	0,976	0,978	0,976	0,978	0,976	0,978	0,976	0,978
220 kV Wimmis	0,229	2,240	0,231	1,399	0,231	1,408	0,207	1,491	0,229	2,232	0,228	2,223	0,185	0,958	0,234	0,793
220 kV Gstaad	0,606	2,279	0,572	1,632	0,571	1,635	1,176	1,525	0,605	2,272	0,603	2,268	1,180	1,507	0,535	1,155
220 kV Chamoson	0,280	1,989	0,237	1,266	0,236	1,272	0,181	1,257	0,279	1,982	0,277	1,976	0,081	0,746	0,190	0,741
380 kV Chamoson	0,146	1,134	0,102	0,695	0,101	0,699	0,153	0,780	0,147	1,130	0,148	1,127	0,161	0,529	0,063	0,377
220 kV Chandoline	0,187	1,774	0,161	1,121	0,161	1,126	0,114	1,135	0,186	1,767	0,185	1,762	0,048	0,687	0,134	0,647
220 kV Botterens	0,771	2,401	0,683	1,654	0,986	1,145	0,750	1,966	0,771	2,397	0,772	2,393	0,729	1,632	0,990	1,142
220 kV Hauterive	0,860	1,828	0,969	1,098	0,810	1,416	0,849	1,596	0,860	1,826	0,861	1,824	0,837	1,409	0,972	1,095
220 kV Botterens	0,771	2,401	0,683	1,654	0,986	1,145	0,750	1,966	0,771	2,397	0,772	2,393	0,729	1,632	0,990	1,142
220 kV Riddes	0,282	1,984	0,231	1,247	0,230	1,253	0,192	1,277	0,282	1,975	0,284	1,963	0,100	0,781	0,175	0,713
220 kV St-Triphon	0,387	2,304	0,244	1,306	0,241	1,316	0,352	1,690	0,387	2,297	0,389	2,289	0,317	1,241	0,088	0,590
220 kV Veytaux	0,294	1,990	0,186	1,135	0,183	1,144	0,275	1,450	0,294	1,984	0,295	1,977	0,255	1,055	0,067	0,526
220 kV Romanel	0,054	0,275	0,047	0,117	0,047	0,118	0,026	0,224	0,054	0,274	0,054	0,272	0,011	0,189	0,048	0,009
380 kV Romanel	0,435	1,058	0,284	0,690	0,279	0,693	0,389	0,690	0,435	1,054	0,436	1,050	0,343	0,429	0,113	0,425

Tabelle 4-17: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mühleberg – niedriger SCL (Szenario 3)

4.4.4.1.8 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Sils

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Sils wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Castasegna – Löbbia
3	N-1 bei 220 kV Bärenburg – Sils
4	N-1 bei 220 kV Sils – Tiefencastel
5	N-1 bei 220 kV Sils – Tinzen
6	N-1 bei 220 kV Benken – Siebnen
7	N-1 bei 380 kV Benken – Sils
8	N-2 bei 220 kV Bärenburg – Sils

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingungen 5 und 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Sils unter niedrigen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-18 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Barenburg	0,962	0,965	0,962	0,965	0,924	0,929	0,962	0,965	0,962	0,965	0,962	0,965	0,962	0,965	0,000	0,000
220 kV Ferrera	0,940	0,944	0,940	0,944	0,903	0,908	0,940	0,944	0,940	0,944	0,940	0,944	0,940	0,944	0,000	0,000
220 kV Tiefencastel	1,003	1,034	1,007	1,038	1,003	1,034	1,012	1,166	1,007	1,070	1,003	1,034	1,003	1,034	1,003	1,034
220 kV Tinzen	1,013	1,085	1,023	1,095	1,013	1,085	1,019	1,173	1,022	1,172	1,013	1,085	1,013	1,085	1,013	1,085
220 kV Lobbia	1,045	1,229	1,075	1,256	1,045	1,229	1,050	1,328	1,054	1,327	1,045	1,229	1,045	1,229	1,045	1,229
220 kV Castasegna	1,029	1,212	0,000	0,000	1,029	1,212	1,034	1,310	1,037	1,310	1,029	1,212	1,029	1,212	1,029	1,212
380 kV Sils	0,798	0,148	0,798	0,148	0,798	0,148	0,798	0,148	0,798	0,148	0,793	0,158	0,942	0,154	0,798	0,148
380 kV Soazza	0,862	0,339	0,862	0,339	0,862	0,339	0,862	0,339	0,862	0,339	0,866	0,364	1,036	0,374	0,862	0,339
220 kV Soazza	0,496	0,174	0,496	0,174	0,496	0,174	0,496	0,174	0,496	0,174	0,514	0,180	0,630	0,206	0,496	0,174
380 kV Tavanasa	0,542	0,159	0,542	0,159	0,542	0,159	0,542	0,159	0,542	0,159	0,532	0,166	0,662	0,153	0,542	0,159
220 kV Tavanasa	0,152	0,029	0,152	0,029	0,152	0,029	0,152	0,029	0,152	0,029	0,144	0,017	0,201	0,058	0,152	0,029
220 kV Benken	0,208	0,173	0,208	0,173	0,208	0,173	0,208	0,173	0,208	0,173	0,176	0,221	0,424	0,081	0,208	0,173
220 kV Siebnen	0,232	0,141	0,232	0,141	0,232	0,141	0,232	0,141	0,232	0,141	0,328	0,120	0,417	0,068	0,232	0,141
220 kV Samstagern	0,299	0,084	0,299	0,084	0,299	0,084	0,299	0,084	0,299	0,084	0,331	0,121	0,405	0,037	0,299	0,084
220 kV Grynau	0,378	0,142	0,378	0,142	0,378	0,142	0,378	0,142	0,378	0,142	0,393	0,174	0,398	0,029	0,378	0,142
220 kV Tierfehd	0,102	0,161	0,102	0,161	0,102	0,161	0,102	0,161	0,102	0,161	0,111	0,191	0,076	0,073	0,102	0,161
380 kV Tierfehd	0,251	0,217	0,251	0,217	0,251	0,217	0,251	0,217	0,251	0,217	0,244	0,235	0,324	0,162	0,251	0,217
380 kV Limmern	0,251	0,218	0,251	0,218	0,251	0,218	0,251	0,218	0,251	0,218	0,244	0,236	0,323	0,162	0,251	0,218
380 kV Bonaduz	0,775	0,155	0,775	0,155	0,775	0,155	0,775	0,155	0,775	0,155	0,769	0,165	0,920	0,161	0,775	0,155
220 kV Rothenbrunnen	0,244	0,168	0,244	0,168	0,244	0,168	0,244	0,168	0,244	0,168	0,268	0,209	0,208	0,040	0,244	0,168
220 kV Sarelli	0,500	0,287	0,500	0,287	0,500	0,287	0,500	0,287	0,500	0,287	0,559	0,350	0,349	0,074	0,500	0,287
220 kV Ilanz	0,176	0,071	0,176	0,071	0,176	0,071	0,176	0,071	0,176	0,071	0,178	0,087	0,205	0,048	0,176	0,071
220 kV Winkeln	0,588	0,045	0,588	0,045	0,588	0,045	0,588	0,045	0,588	0,045	0,635	0,048	0,511	0,066	0,588	0,045

Tabelle 4-18: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Sils – niedriger SCL (Szenario 3)

4.4.4.1.9 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV St. Triphon

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV St. Triphon wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Romanel – Vaux
3	N-1 bei 220 kV Vaux – Verbois
4	N-1 bei 220 kV Crans – Foretaille
5	N-1 bei 220 kV Banlieue Ouest – Foretaille
6	N-1 bei 220 kV Cornier – Riddes
7	N-1 bei 220 kV Botterens – Mühleberg
8	N-1 bei 220 kV Hauterive – Mühleberg
9	N-1 bei 220 kV Chamoson – Mühleberg
10	N-1 bei 220 kV Gstaad – Mühleberg
11	N-2 bei 220 kV Riddes – St. Triphon

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingungen 5 und 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV St. Triphon unter niedrigen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-19 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:		Fall 9:		Fall 10:		Fall 11:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Botterens	0,839	1,438	0,838	1,438	0,839	1,437	0,839	1,455	0,837	1,506	0,837	1,428	1,133	1,577	0,770	1,278	0,832	1,313	0,834	1,351	0,786	1,398
220 kV Hauterive	0,654	1,276	0,653	1,275	0,654	1,274	0,654	1,298	0,652	1,362	0,652	1,263	0,547	1,028	0,947	1,329	0,645	1,116	0,648	1,165	0,581	1,229
220 kV Chamoson	0,367	1,062	0,365	1,064	0,367	1,058	0,356	1,119	0,346	1,305	0,354	1,020	0,344	0,965	0,347	0,981	0,326	0,772	0,358	1,023	0,090	1,033
380 kV Chamoson	0,364	0,587	0,373	0,595	0,364	0,581	0,398	0,689	0,433	1,048	0,366	0,575	0,362	0,549	0,362	0,556	0,372	0,495	0,365	0,571	0,465	0,556
220 kV Gstaad	0,453	1,477	0,451	1,478	0,453	1,473	0,444	1,542	0,435	1,750	0,442	1,430	0,378	1,243	0,387	1,283	0,417	1,097	0,405	1,386	0,061	1,412
220 kV Romanel	0,126	0,146	0,124	0,137	0,124	0,112	0,112	0,258	0,124	0,978	0,125	0,152	0,131	0,164	0,131	0,161	0,122	0,191	0,125	0,153	0,132	0,194
380 kV Romanel	1,085	0,578	1,102	0,576	1,084	0,576	1,157	0,612	1,226	0,728	1,084	0,555	1,083	0,511	1,083	0,522	1,081	0,414	1,084	0,548	1,048	0,588
220 kV Muehleberg	0,432	0,959	0,431	0,958	0,431	0,957	0,431	0,984	0,428	1,058	0,429	0,943	0,285	0,664	0,301	0,714	0,418	0,766	0,423	0,826	0,331	0,917
380 kV Muehleberg	0,190	0,547	0,190	0,547	0,190	0,545	0,191	0,580	0,188	0,675	0,189	0,537	0,123	0,413	0,131	0,436	0,185	0,439	0,187	0,486	0,155	0,520
220 kV Riddes	0,418	1,035	0,416	1,036	0,418	1,032	0,408	1,086	0,399	1,252	0,403	0,992	0,397	0,949	0,400	0,964	0,382	0,780	0,409	1,000	0,081	1,009
380 kV Batiaz	0,653	0,317	0,666	0,329	0,653	0,310	0,706	0,421	0,757	0,832	0,655	0,316	0,650	0,312	0,651	0,313	0,658	0,306	0,654	0,315	0,730	0,302
380 kV Nant de Drance	0,663	0,333	0,676	0,346	0,663	0,326	0,716	0,444	0,769	0,874	0,664	0,332	0,660	0,328	0,660	0,329	0,668	0,322	0,664	0,332	0,741	0,317
380 kV Châtelard	0,662	0,332	0,675	0,344	0,662	0,325	0,716	0,442	0,768	0,871	0,664	0,330	0,659	0,326	0,660	0,327	0,667	0,320	0,663	0,330	0,740	0,315
220 kV Châtelard	0,521	0,273	0,531	0,283	0,522	0,268	0,564	0,363	0,606	0,714	0,523	0,272	0,519	0,269	0,520	0,270	0,526	0,264	0,522	0,272	0,582	0,261
220 kV Veytaux	0,771	0,851	0,783	0,852	0,780	0,864	0,773	0,820	0,773	0,643	0,772	0,849	0,772	0,844	0,771	0,846	0,774	0,834	0,772	0,849	0,827	0,843

Tabelle 4-19: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV St. Triphon – SCL niedrig (Szenario 3)

4.4.4.1.10 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Wimmis

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Wimmis wurden folgende Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Bickigen – Mühleberg
3	N-1 bei 220 kV Bickigen – Oftringen
4	N-1 bei 220 kV Bickigen – Flumenthal
5	N-1 bei 220 kV Bickigen – Mettlen
6	N-1 bei 220 kV Bickigen – Innertkirchen
7	N-2 bei 220 kV Airolo – Lavorgo und Airolo – Rotondo
8	N-2 bei 220 kV Ernen – Seehalten und Rotondo – Seehalten

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingungen 5 und 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Wimmis unter niedrigen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-20 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Airolo	0,197	0,152	0,203	0,183	0,201	0,154	0,141	0,163	0,200	0,156	0,200	0,176	0,805	0,052	0,060	0,210
220 kV Bickigen	0,171	0,040	0,185	0,061	0,180	0,041	0,189	0,056	0,184	0,045	0,187	0,064	0,126	0,095	0,128	0,117
380 kV Bickigen	0,090	0,085	0,092	0,015	0,092	0,085	0,077	0,131	0,095	0,084	0,100	0,086	0,064	0,094	0,077	0,088
220 kV Chamoson	0,070	0,230	0,058	0,114	0,071	0,231	0,077	0,220	0,073	0,232	0,073	0,238	0,068	0,254	0,070	0,321
380 kV Chamoson	0,046	0,093	0,049	0,025	0,049	0,093	0,065	0,094	0,050	0,093	0,046	0,094	0,050	0,107	0,069	0,120
220 kV Chippis	0,180	0,100	0,176	0,117	0,180	0,100	0,205	0,058	0,182	0,099	0,180	0,089	0,193	0,101	0,225	0,119
380 kV Chippis	0,056	0,095	0,058	0,021	0,059	0,095	0,077	0,098	0,060	0,094	0,057	0,094	0,059	0,110	0,081	0,112
220 kV Giswil	0,142	0,213	0,151	0,243	0,145	0,213	0,125	0,261	0,138	0,221	0,130	0,259	0,136	0,164	0,383	0,119
220 kV Grimsel	0,127	0,240	0,134	0,270	0,131	0,241	0,127	0,298	0,126	0,247	0,120	0,293	0,112	0,218	0,444	0,176
220 kV Gstaad	0,084	0,346	0,058	0,214	0,085	0,347	0,084	0,336	0,089	0,348	0,091	0,358	0,072	0,376	0,067	0,483
220 kV Handeck	0,133	0,245	0,140	0,276	0,137	0,246	0,131	0,304	0,131	0,252	0,124	0,299	0,117	0,218	0,441	0,173
220 kV Innertkirchen	0,141	0,242	0,149	0,273	0,144	0,243	0,138	0,302	0,138	0,250	0,128	0,297	0,123	0,206	0,427	0,160
220 kV Lavorgo	0,222	0,019	0,230	0,021	0,227	0,020	0,152	0,019	0,224	0,018	0,223	0,016	0,117	0,070	0,061	0,038
380 kV Lavorgo	0,264	0,157	0,274	0,179	0,271	0,158	0,193	0,191	0,266	0,163	0,256	0,190	0,149	0,144	0,033	0,193
220 kV Littau	0,123	0,095	0,131	0,114	0,123	0,095	0,088	0,109	0,117	0,102	0,117	0,113	0,145	0,047	0,250	0,026
220 kV Magadino	0,234	0,062	0,242	0,079	0,237	0,064	0,149	0,052	0,234	0,060	0,240	0,063	0,101	0,089	0,091	0,122
220 kV Mettlen	0,117	0,042	0,124	0,055	0,115	0,042	0,077	0,040	0,110	0,047	0,114	0,047	0,153	0,027	0,198	0,043
380 kV Mettlen	0,126	0,057	0,131	0,039	0,128	0,056	0,118	0,021	0,126	0,058	0,116	0,067	0,125	0,075	0,123	0,172
220 kV Morel	0,079	0,042	0,078	0,011	0,081	0,043	0,114	0,063	0,081	0,043	0,070	0,050	0,089	0,038	0,145	0,071
380 kV Morel	0,083	0,053	0,086	0,059	0,087	0,053	0,082	0,014	0,085	0,053	0,076	0,051	0,048	0,066	0,068	0,013
220 kV Plattischaen	0,115	0,044	0,122	0,058	0,113	0,043	0,075	0,042	0,108	0,049	0,112	0,049	0,150	0,027	0,192	0,045
220 kV Rotondo	0,183	0,193	0,190	0,230	0,188	0,196	0,132	0,214	0,186	0,198	0,189	0,227	0,103	0,267	0,074	0,260
220 kV Seehalten	0,123	0,234	0,129	0,264	0,127	0,235	0,123	0,290	0,122	0,241	0,118	0,285	0,109	0,217	0,446	0,177
220 kV Stalden	0,131	0,065	0,128	0,069	0,133	0,064	0,163	0,033	0,134	0,063	0,129	0,053	0,146	0,065	0,191	0,101

Tabelle 4-20: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Wimmis – SCL niedrig (Szenario 3)

4.4.4.1.11 Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Musignano

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Musignano wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Lavorgo – Magadino
3	N-1 bei 380 kV Lavorgo – Mettlen
4	N-1 bei 380 kV Lavorgo – Mörel
5	N-2 bei 380 kV Lavorgo – Mörel und Lavorgo – Mettlen

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingungen 5 und 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Musignano unter niedrigen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-21 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Lavorgo	0,786	2,043	0,227	0,378	0,795	0,815	1,079	2,127	0,997	0,977
220 kV Lavorgo	0,641	1,373	0,312	0,051	0,692	0,576	0,806	1,392	0,818	0,644
380 kV Magadino	1,018	1,078	1,067	1,189	1,034	1,131	1,081	0,939	1,081	1,165
220 kV Magadino	0,729	1,074	0,605	0,517	0,797	0,729	0,822	1,001	0,874	0,759
220 kV Manno	0,712	1,094	0,590	0,527	0,778	0,743	0,802	1,019	0,854	0,773
220 kV Avegno	0,708	1,559	0,557	0,474	0,797	0,819	0,796	1,551	0,875	0,860
220 kV Bavona	0,625	2,008	0,451	0,385	0,736	0,876	0,699	2,062	0,812	0,936
220 kV Verbanò	0,701	1,546	0,552	0,471	0,790	0,812	0,789	1,539	0,867	0,853
220 kV Robiei	0,583	1,872	0,408	0,325	0,689	0,791	0,649	1,935	0,760	0,849
220 kV Cavergno	0,681	2,063	0,503	0,439	0,790	0,937	0,762	2,107	0,869	0,995
220 kV Rotondo	0,516	1,650	0,338	0,234	0,614	0,653	0,570	1,726	0,674	0,710
220 kV Peccia	0,655	2,055	0,478	0,414	0,766	0,915	0,733	2,105	0,844	0,975
220 kV Airolo	0,525	1,580	0,309	0,173	0,611	0,612	0,609	1,646	0,693	0,668
220 kV Seehalten	0,352	1,264	0,133	0,325	0,369	0,624	0,321	1,343	0,345	0,720
380 kV Soazza	0,510	0,785	0,411	0,109	0,498	0,346	0,625	0,740	0,593	0,330
220 kV Soazza	0,596	0,257	0,447	0,129	0,622	0,195	0,708	0,244	0,707	0,224
220 kV Gnosca	0,650	0,754	0,476	0,245	0,695	0,461	0,763	0,721	0,783	0,497
220 kV Biasca	0,629	0,984	0,395	0,130	0,676	0,496	0,760	0,970	0,776	0,544

Tabelle 4-21: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Musignano – niedriger SCL (Szenario 3)

4.4.4.1.12 Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Mettlen

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Mettlen wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV Lavorgo – Mörel
3	N-1 bei 380 kV Lavorgo – Magadino
4	N-1 bei 380 kV Gösgen – Laufenburg
5	N-1 bei 380 kV Gösgen – Lachmatt
6	N-1 bei 380 kV Benken – Sils
7	N-2 bei 380 kV Lavorgo – Mörel und Lavorgo – Magadino

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Mettlen unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-22 bzw. Tabelle 4-23 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Mettlen	0,745	0,459	0,885	0,350	0,924	0,653	0,741	0,427	0,718	0,433	1,297	0,441	0,931	0,333
380 kV Lavorgo	1,729	0,852	1,909	0,697	1,223	3,736	1,688	0,530	1,672	0,670	1,589	0,972	1,678	1,532
220 kV Lavorgo	1,823	0,275	1,822	0,144	1,526	1,484	1,777	0,280	1,765	0,277	1,701	0,271	1,815	0,439
380 kV Mörel	1,214	0,163	0,722	0,232	1,039	1,227	1,200	0,113	1,185	0,128	1,228	0,195	0,825	0,232
220 kV Mörel	1,162	0,374	0,911	0,399	1,136	0,340	1,145	0,264	1,134	0,299	1,268	0,399	1,064	0,399
220 kV Gosgen	0,697	0,399	0,903	0,492	0,888	0,436	0,693	0,234	0,667	0,227	1,128	0,428	0,889	0,503
380 kV Breite	0,136	0,542	0,208	0,364	0,150	1,035	0,065	0,645	0,099	0,538	0,156	0,515	0,139	0,341
380 kV Sils	0,663	0,125	0,960	0,097	0,846	0,272	0,726	0,138	0,658	0,118	2,124	0,185	0,941	0,098
380 kV Bonaduz	0,649	0,107	0,941	0,080	0,832	0,243	0,712	0,120	0,645	0,103	2,076	0,172	0,922	0,082
380 kV Maprugg	0,525	0,034	0,762	0,057	0,677	0,044	0,591	0,026	0,527	0,028	1,769	0,058	0,755	0,065
380 kV Benken	0,519	0,577	0,532	0,556	0,524	0,616	0,521	0,632	0,522	0,595	0,861	0,699	0,514	0,553
380 kV Tavanasa	0,536	0,050	0,752	0,067	0,685	0,059	0,582	0,044	0,532	0,045	1,572	0,047	0,746	0,074
380 kV Pradella	0,427	0,143	0,623	0,113	0,547	0,311	0,468	0,158	0,424	0,135	1,380	0,212	0,610	0,113
380 kV Filisur	0,630	0,127	0,914	0,099	0,804	0,276	0,690	0,140	0,625	0,120	2,021	0,188	0,895	0,100
220 kV Tinzen	0,541	0,313	0,746	0,355	0,671	0,436	0,588	0,200	0,536	0,238	1,649	0,323	0,752	0,364
220 kV Obfelden	0,652	0,163	0,842	0,144	0,839	0,290	0,650	0,134	0,627	0,127	1,315	0,178	0,846	0,143
220 kV Waldegg	0,709	0,198	0,909	0,138	0,907	0,379	0,707	0,195	0,682	0,167	1,420	0,190	0,916	0,132
220 kV Giswil	1,640	1,155	1,534	1,000	1,767	1,463	1,605	0,660	1,590	0,891	2,033	1,244	1,789	1,000
220 kV Innertkirchen	1,913	1,206	1,741	1,070	2,008	1,491	1,876	0,612	1,859	0,893	2,241	1,324	2,045	1,079
220 kV Handeck	1,944	1,182	1,738	1,069	2,013	1,422	1,904	0,579	1,889	0,864	2,213	1,303	2,054	1,080

220 kV Grimsel	1,934	1,138	1,715	1,039	1,989	1,350	1,894	0,547	1,879	0,826	2,168	1,257	2,033	1,051
220 kV Seehalten	1,926	1,092	1,697	1,005	1,967	1,280	1,885	0,516	1,871	0,788	2,131	1,209	2,015	1,018
220 kV Rotondo	2,167	0,476	1,981	0,576	2,114	0,364	2,114	0,055	2,102	0,245	2,152	0,576	2,295	0,605
220 kV Ernen	1,376	0,572	1,130	0,571	1,368	0,542	1,352	0,326	1,340	0,430	1,509	0,623	1,331	0,574
220 kV Wimmis	1,453	0,592	1,402	0,330	1,625	1,447	1,443	0,493	1,425	0,531	1,871	0,622	1,550	0,319
220 kV Ingenbohl	0,744	0,476	0,884	0,364	0,922	0,676	0,740	0,442	0,717	0,449	1,293	0,457	0,933	0,345
220 kV Plattisachen	0,739	0,474	0,876	0,363	0,912	0,674	0,735	0,441	0,713	0,448	1,277	0,455	0,929	0,344

Tabelle 4-22: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Mettlen – niedriger SCL (Szenario 3)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Mettlen	0,485	0,615	0,478	0,712	0,521	0,472	0,521	0,489	0,491	0,549	0,705	0,720	0,562	0,308
380 kV Lavorgo	0,819	1,780	1,253	1,870	1,416	3,229	0,833	1,489	0,822	1,626	0,824	1,946	4,053	1,708
220 kV Lavorgo	0,557	0,371	0,819	0,332	0,804	0,833	0,573	0,336	0,561	0,365	0,548	0,397	2,227	0,402
380 kV Mörel	0,444	0,566	0,191	0,361	0,694	1,473	0,448	0,468	0,442	0,516	0,477	0,649	0,259	0,247
220 kV Mörel	0,325	0,463	0,257	0,775	0,426	0,544	0,333	0,435	0,323	0,429	0,382	0,473	0,380	0,319
220 kV Gosgen	0,459	0,072	0,442	0,423	0,486	0,424	0,516	0,190	0,466	0,122	0,576	0,099	0,480	0,283
380 kV Breite	0,222	1,124	0,234	1,320	0,234	0,900	0,263	0,911	0,238	1,004	0,238	1,215	0,300	0,585
380 kV Sils	0,775	0,463	0,767	0,398	0,811	0,291	0,775	0,372	0,765	0,414	1,231	0,476	0,838	0,201
380 kV Bonaduz	0,785	0,426	0,778	0,358	0,821	0,265	0,786	0,343	0,775	0,381	1,228	0,436	0,852	0,188
380 kV Mapragg	0,683	0,185	0,680	0,110	0,715	0,161	0,692	0,155	0,678	0,167	1,054	0,160	0,754	0,166
380 kV Benken	0,374	0,514	0,371	0,531	0,363	0,422	0,383	0,531	0,381	0,521	0,819	0,751	0,333	0,494

380 kV Tavanasa	0,748	0,189	0,748	0,125	0,781	0,165	0,747	0,159	0,738	0,172	1,046	0,167	0,836	0,156
380 kV Pradella	0,334	0,269	0,331	0,231	0,350	0,169	0,335	0,216	0,330	0,240	0,533	0,277	0,362	0,117
380 kV Filisur	0,713	0,449	0,706	0,386	0,746	0,282	0,713	0,361	0,704	0,401	1,134	0,462	0,772	0,195
220 kV Tinzen	0,612	0,492	0,614	0,442	0,639	0,502	0,602	0,413	0,600	0,446	0,849	0,485	0,685	0,391
220 kV Obfelden	0,332	0,414	0,318	0,440	0,357	0,347	0,349	0,348	0,331	0,374	0,550	0,525	0,355	0,269
220 kV Waldegg	0,360	0,497	0,345	0,538	0,388	0,351	0,383	0,408	0,361	0,442	0,608	0,622	0,385	0,270
220 kV Giswil	0,575	1,768	0,539	2,044	0,643	1,524	0,604	1,452	0,576	1,589	0,754	1,962	0,843	0,872
220 kV Innertkirchen	0,586	1,948	0,615	2,249	0,663	1,702	0,612	1,614	0,586	1,756	0,742	2,142	0,921	0,959
220 kV Handeck	0,573	1,883	0,608	2,212	0,653	1,664	0,598	1,563	0,573	1,697	0,714	2,070	0,936	0,963
220 kV Grimsel	0,561	1,802	0,598	2,134	0,641	1,604	0,584	1,498	0,561	1,624	0,692	1,980	0,935	0,942
220 kV Seehalten	0,555	1,732	0,595	2,076	0,636	1,553	0,578	1,442	0,555	1,562	0,679	1,902	0,943	0,923
220 kV Rotondo	0,544	0,963	0,683	1,367	0,618	1,135	0,564	0,818	0,546	0,874	0,600	1,056	1,272	0,805
220 kV Ernen	0,387	0,811	0,350	1,140	0,480	0,682	0,399	0,707	0,386	0,739	0,462	0,867	0,535	0,471
220 kV Wimmis	0,496	1,629	0,442	1,218	0,581	1,433	0,508	1,437	0,488	1,484	0,633	1,645	0,559	0,761
220 kV Ingenbohl	0,458	0,605	0,451	0,700	0,493	0,466	0,492	0,481	0,464	0,540	0,667	0,707	0,536	0,302
220 kV Plattischnen	0,434	0,584	0,428	0,675	0,469	0,449	0,466	0,464	0,440	0,520	0,632	0,681	0,518	0,291
220 kV Airolo	0,588	0,679	0,761	1,052	0,717	0,678	0,611	0,579	0,591	0,618	0,647	0,753	1,604	0,568

Tabelle 4-23: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Mettlen – optimaler SCL (Szenario 3)

4.4.4.2 Szenario 2

4.4.4.2.1 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Regensdorf – Seebach
3	N-1 bei 220 kV Auwiesen – Seebach
4	N-1 bei 220 kV Benken – Siebnen
5	N-1 bei 380 kV Benken – Sils
6	N-1 bei 220 kV Grynav – Mettlen
7	N-2 bei 220 kV Benken – Sils und Benken – Siebnen
8	N-2 bei 220 kV Grynav – Tierfehnd
9	N-2 bei 220 kV Grynav – Winkeln
10	N-1 bei 220 kV Niederwil – Regensdorf

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-24 bzw. Tabelle 4-25 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:		Fall 9:		Fall 10:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0,929	0,837	0,931	0,855	0,931	0,856	0,906	0,815	0,930	0,840	0,917	0,834	0,904	0,819	0,928	0,840	0,930	0,838	0,984	0,989
220 kV Seebach	0,919	0,805	0,931	0,855	0,861	0,596	0,893	0,778	0,919	0,809	0,904	0,802	0,890	0,783	0,918	0,808	0,920	0,806	0,982	0,988
220 kV Regensdorf	0,887	0,682	0,857	0,590	0,860	0,593	0,852	0,638	0,887	0,689	0,864	0,677	0,846	0,646	0,884	0,688	0,889	0,684	0,974	0,980
220 kV Aathal	0,729	0,497	0,714	0,497	0,715	0,497	0,682	0,524	0,719	0,471	0,642	0,569	0,667	0,491	0,718	0,454	0,753	0,495	0,597	0,506
220 kV Grynau	0,777	0,553	0,761	0,554	0,761	0,553	0,727	0,582	0,765	0,522	0,662	0,645	0,710	0,543	0,764	0,502	0,824	0,559	0,635	0,564
220 kV Benken	0,927	0,628	0,909	0,622	0,910	0,622	0,842	0,767	0,935	0,632	0,892	0,631	0,863	0,767	0,919	0,613	0,930	0,630	0,771	0,579
380 kV Benken	0,935	0,412	0,915	0,407	0,916	0,407	0,841	0,459	0,916	0,375	0,889	0,442	0,815	0,407	0,920	0,383	0,939	0,406	0,744	0,386
220 kV Benken	0,927	0,628	0,909	0,622	0,910	0,622	0,842	0,767	0,935	0,632	0,892	0,631	0,863	0,767	0,919	0,613	0,930	0,630	0,771	0,579
380 kV Benken	0,935	0,412	0,915	0,407	0,916	0,407	0,841	0,459	0,916	0,375	0,889	0,442	0,815	0,407	0,920	0,383	0,939	0,406	0,744	0,386
220 kV Siebnen	0,962	0,568	0,943	0,555	0,944	0,556	1,192	0,207	0,965	0,572	0,926	0,560	1,161	0,216	0,954	0,557	0,967	0,570	0,783	0,477
220 kV Samstagerm	1,086	0,430	1,065	0,406	1,066	0,407	1,206	0,209	1,077	0,436	1,052	0,397	1,175	0,218	1,073	0,429	1,093	0,435	0,884	0,252
220 kV Altgass	1,095	0,244	1,074	0,229	1,075	0,230	1,163	0,159	1,081	0,246	1,073	0,201	1,132	0,155	1,079	0,242	1,104	0,249	0,894	0,139
220 kV Thalwil	1,150	0,467	1,130	0,433	1,132	0,434	1,229	0,248	1,141	0,475	1,115	0,428	1,199	0,263	1,137	0,469	1,158	0,472	0,953	0,227
220 kV Waldegg	1,161	0,468	1,141	0,432	1,143	0,433	1,222	0,258	1,151	0,478	1,126	0,427	1,192	0,274	1,147	0,471	1,169	0,474	0,966	0,217
220 kV Obfelden	1,079	0,390	1,063	0,354	1,064	0,356	1,101	0,237	1,070	0,400	1,047	0,353	1,075	0,252	1,067	0,395	1,087	0,396	0,913	0,169
220 kV Niederwil	0,863	0,454	0,847	0,397	0,849	0,399	0,830	0,378	0,859	0,463	0,830	0,443	0,817	0,391	0,856	0,461	0,866	0,457	0,748	0,148
220 kV Mettlen	1,148	0,155	1,127	0,151	1,128	0,151	1,141	0,173	1,130	0,140	1,145	0,155	1,109	0,156	1,129	0,129	1,159	0,154	0,940	0,135
380 kV Mettlen	0,940	0,252	0,921	0,241	0,922	0,241	0,895	0,230	0,923	0,242	0,910	0,247	0,869	0,217	0,924	0,241	0,946	0,249	0,758	0,172
220 kV Breite	0,695	0,437	0,681	0,437	0,681	0,437	0,650	0,462	0,686	0,416	0,638	0,486	0,636	0,435	0,685	0,404	0,690	0,426	0,570	0,443
380 kV Breite	0,738	0,411	0,722	0,405	0,722	0,405	0,686	0,437	0,722	0,386	0,679	0,458	0,665	0,398	0,723	0,394	0,739	0,400	0,586	0,386

Tabelle 4-24: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden – niedriger SCL (Szenario 2)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:		Fall 9:		Fall 10:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0,866	0,883	0,881	0,893	0,881	0,894	0,857	0,868	0,867	0,884	0,864	0,880	0,857	0,869	0,866	0,883	0,867	0,883	0,965	0,969
220 kV Seebach	0,841	0,862	0,881	0,893	0,681	0,724	0,831	0,845	0,843	0,864	0,839	0,859	0,830	0,845	0,842	0,862	0,842	0,863	0,960	0,965
220 kV Regensdorf	0,747	0,781	0,678	0,717	0,680	0,721	0,729	0,753	0,749	0,784	0,743	0,776	0,728	0,754	0,747	0,781	0,748	0,782	0,943	0,949
220 kV Aathal	0,411	0,489	0,408	0,484	0,408	0,484	0,406	0,484	0,408	0,480	0,408	0,495	0,402	0,473	0,431	0,489	0,443	0,517	0,384	0,452
220 kV Grynau	0,436	0,520	0,432	0,515	0,432	0,515	0,430	0,514	0,432	0,510	0,433	0,529	0,425	0,502	0,469	0,526	0,495	0,574	0,409	0,484
220 kV Benken	0,683	0,723	0,675	0,713	0,675	0,714	0,749	0,783	0,720	0,747	0,677	0,716	0,804	0,817	0,681	0,718	0,685	0,724	0,626	0,649
380 kV Benken	0,377	0,442	0,370	0,434	0,370	0,434	0,390	0,447	0,378	0,430	0,369	0,436	0,394	0,435	0,371	0,428	0,380	0,444	0,328	0,380
220 kV Benken	0,683	0,723	0,675	0,713	0,675	0,714	0,749	0,783	0,720	0,747	0,677	0,716	0,804	0,817	0,681	0,718	0,685	0,724	0,626	0,649
380 kV Benken	0,377	0,442	0,370	0,434	0,370	0,434	0,390	0,447	0,378	0,430	0,369	0,436	0,394	0,435	0,371	0,428	0,380	0,444	0,328	0,380
220 kV Siebnen	0,644	0,691	0,633	0,678	0,633	0,679	0,425	0,512	0,675	0,713	0,636	0,680	0,423	0,514	0,643	0,688	0,647	0,694	0,563	0,585
220 kV Samstagern	0,567	0,637	0,548	0,614	0,548	0,616	0,436	0,524	0,585	0,651	0,554	0,614	0,434	0,526	0,567	0,635	0,573	0,641	0,427	0,457
220 kV Altgass	0,446	0,439	0,430	0,423	0,431	0,424	0,361	0,377	0,457	0,448	0,430	0,413	0,359	0,379	0,447	0,438	0,452	0,443	0,332	0,313
220 kV Thalwil	0,591	0,716	0,566	0,686	0,567	0,688	0,481	0,606	0,606	0,730	0,577	0,690	0,479	0,609	0,592	0,715	0,597	0,721	0,407	0,477
220 kV Waldegg	0,593	0,730	0,565	0,698	0,565	0,700	0,495	0,624	0,605	0,743	0,578	0,703	0,493	0,626	0,593	0,729	0,599	0,735	0,389	0,475
220 kV Obfelden	0,544	0,628	0,514	0,598	0,515	0,599	0,474	0,549	0,552	0,638	0,531	0,604	0,473	0,552	0,545	0,627	0,549	0,633	0,327	0,387
220 kV Niederwil	0,582	0,644	0,536	0,601	0,537	0,603	0,551	0,599	0,585	0,648	0,575	0,633	0,549	0,600	0,582	0,643	0,584	0,646	0,251	0,320
220 kV Mettlen	0,326	0,256	0,314	0,247	0,314	0,248	0,291	0,237	0,329	0,258	0,307	0,230	0,289	0,236	0,328	0,254	0,334	0,261	0,238	0,185
380 kV Mettlen	0,248	0,280	0,241	0,272	0,241	0,272	0,238	0,264	0,249	0,276	0,239	0,266	0,236	0,258	0,247	0,273	0,253	0,282	0,197	0,216
220 kV Breite	0,415	0,483	0,411	0,477	0,411	0,477	0,411	0,478	0,411	0,474	0,412	0,486	0,406	0,468	0,419	0,476	0,416	0,481	0,385	0,442
380 kV Breite	0,262	0,388	0,258	0,381	0,258	0,382	0,259	0,382	0,254	0,370	0,259	0,386	0,250	0,362	0,251	0,365	0,266	0,390	0,232	0,337

Tabelle 4-25: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden – optimaler SCL (Szenario 2)

4.4.4.2.2 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois wurden folgende Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Romanel – Veytaux
3	N-1 bei 220 kV Romanel – Vaux
4	N-1 bei 220 kV Vaux – Verbois
5	N-2 bei 220 kV Romanel – Vaux und Vaux – Verbois

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-26 bzw. Tabelle 4-27 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,606	0,767	0,616	0,774	0,593	0,751	0,589	0,741	0,593	0,748
220 kV Foretaille	0,960	1,013	0,967	1,019	0,951	1,006	0,949	1,003	0,951	1,006
220 kV Crans	0,839	0,934	0,859	0,952	0,812	0,914	0,806	0,904	0,812	0,913
220 kV Westliche Vororte	0,608	0,779	0,657	0,821	0,541	0,731	0,525	0,706	0,540	0,728
220 kV Romanel	0,576	0,758	0,630	0,805	0,502	0,705	0,484	0,678	0,501	0,703
380 kV Romanel	0,484	0,801	0,505	0,816	0,449	0,764	0,439	0,741	0,447	0,757
220 kV Vaux	0,642	0,794	0,685	0,832	0,900	0,932	0,470	0,658	0,000	0,000
220 kV Veytaux	0,319	0,497	0,164	0,315	0,279	0,464	0,269	0,447	0,278	0,462
220 kV St-Triphon	0,239	0,419	0,177	0,337	0,209	0,392	0,202	0,377	0,208	0,390
220 kV Riddes	0,138	0,325	0,114	0,285	0,123	0,306	0,119	0,296	0,122	0,304
380 kV Batiaz	0,232	0,682	0,234	0,674	0,214	0,648	0,209	0,629	0,213	0,643
380 kV Nant de Drance	0,235	0,722	0,238	0,713	0,217	0,687	0,212	0,666	0,216	0,681
380 kV Châtelard	0,235	0,717	0,237	0,709	0,217	0,682	0,212	0,661	0,216	0,677
220 kV Châtelard	0,186	0,590	0,187	0,583	0,171	0,561	0,167	0,544	0,170	0,556
220 kV Vallorcine	0,184	0,584	0,185	0,577	0,169	0,555	0,165	0,538	0,168	0,551

Tabelle 4-26: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois – SCL niedrig (Szenario 2)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,481	0,525	0,488	0,533	0,473	0,515	0,469	0,509	0,473	0,514
220 kV Foretaille	0,934	0,971	0,940	0,977	0,926	0,963	0,923	0,959	0,926	0,963
220 kV Crans	0,775	0,824	0,792	0,842	0,752	0,801	0,743	0,790	0,751	0,800
220 kV Westliche Vororte	0,512	0,574	0,554	0,619	0,452	0,517	0,430	0,490	0,451	0,515
220 kV Romanel	0,479	0,543	0,527	0,594	0,412	0,479	0,387	0,448	0,411	0,477
380 kV Romanel	0,377	0,471	0,394	0,491	0,348	0,438	0,334	0,418	0,345	0,432
220 kV Vaux	0,547	0,604	0,584	0,643	0,782	0,806	0,361	0,420	0,000	0,000
220 kV Veytaux	0,240	0,285	0,112	0,139	0,207	0,251	0,194	0,236	0,206	0,250
220 kV St-Triphon	0,176	0,215	0,129	0,159	0,152	0,190	0,143	0,178	0,151	0,189
220 kV Riddes	0,087	0,116	0,070	0,095	0,076	0,104	0,072	0,098	0,076	0,103
380 kV Bâtiâz	0,157	0,256	0,160	0,260	0,144	0,237	0,138	0,225	0,143	0,233
380 kV Nant de Drance	0,156	0,265	0,159	0,269	0,143	0,245	0,137	0,233	0,142	0,242
380 kV Châtelard	0,157	0,264	0,160	0,269	0,144	0,244	0,138	0,233	0,142	0,241
220 kV Châtelard	0,104	0,181	0,106	0,184	0,096	0,167	0,092	0,159	0,095	0,165
220 kV Vallorcine	0,102	0,177	0,104	0,180	0,094	0,164	0,090	0,156	0,093	0,162

Tabelle 4-27: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois – optimaler SCL (Szenario 2)

4.4.4.2.3 Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot

Folgende Fälle wurden für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV La Bâtiâz – Romanel
3	N-1 bei 380 kV La Bâtiâz – Chamoson
4	N-2 bei 380 kV Chamoson – Chippis

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-28 bzw. Tabelle 4-29 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,971	1,000	0,975	0,998	0,980	0,956	0,974	1,007
220 kV Foretaille	0,689	1,028	0,732	0,995	0,787	0,546	0,718	1,114
220 kV Crans	0,632	0,968	0,681	0,930	0,743	0,452	0,665	1,064
220 kV Westliche Vororte	0,532	0,853	0,595	0,803	0,678	0,287	0,575	0,970
220 kV Romanel	0,521	0,839	0,587	0,787	0,674	0,270	0,566	0,961
380 kV Romanel	0,682	0,983	0,863	0,971	1,078	0,545	0,763	1,203
220 kV Vaux	0,553	0,864	0,607	0,816	0,678	0,330	0,591	0,970
220 kV Veytaux	0,296	0,560	0,317	0,467	0,364	0,159	0,335	0,657
220 kV St-Triphon	0,227	0,477	0,228	0,361	0,264	0,127	0,264	0,568
220 kV Riddes	0,149	0,381	0,100	0,204	0,116	0,067	0,180	0,482
380 kV Batiаз	0,312	0,827	0,050	0,199	1,361	2,598	0,503	1,379
380 kV Nant de Drance	0,317	0,875	0,051	0,211	1,382	2,756	0,511	1,460
380 kV Châtelard	0,317	0,869	0,051	0,210	1,380	2,736	0,510	1,450
220 kV Châtelard	0,250	0,715	0,040	0,172	1,089	2,248	0,402	1,193
220 kV Vallorcine	0,247	0,708	0,040	0,171	1,077	2,227	0,398	1,182

Tabelle 4-28: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot – SCL niedrig (Szenario 2)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,957	0,970	0,960	0,972	0,960	0,980	0,958	0,971
220 kV Foretaille	0,534	0,675	0,563	0,701	0,560	0,820	0,537	0,687
220 kV Crans	0,476	0,608	0,510	0,636	0,507	0,780	0,479	0,621
220 kV Westliche Vororte	0,398	0,511	0,448	0,547	0,443	0,755	0,404	0,528
220 kV Romanel	0,396	0,505	0,449	0,544	0,443	0,767	0,401	0,524
380 kV Romanel	0,631	0,738	0,807	0,871	0,791	1,512	0,648	0,783
220 kV Vaux	0,414	0,525	0,455	0,555	0,450	0,735	0,418	0,540
220 kV Veytaux	0,204	0,272	0,218	0,274	0,215	0,388	0,206	0,285
220 kV St-Triphon	0,154	0,212	0,154	0,198	0,152	0,278	0,155	0,222
220 kV Riddes	0,091	0,132	0,060	0,081	0,060	0,113	0,091	0,143
380 kV Batiаз	0,250	0,387	0,019	0,033	0,693	2,634	0,297	0,503
380 kV Nant de Drance	0,249	0,401	0,019	0,034	0,688	2,726	0,295	0,521
380 kV Châtelard	0,249	0,399	0,019	0,034	0,690	2,718	0,296	0,519
220 kV Châtelard	0,166	0,274	0,013	0,023	0,459	1,866	0,197	0,356

220 kV Vallorcine	0,162	0,268	0,013	0,023	0,449	1,831	0,193	0,349
-------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabelle 4-29: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot – optimaler SCL (Szenario 2)

4.4.4.2.4 Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel wurden folgende Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV La Bâtiaz – Chamoson
3	N-1 bei 380 kV Bois Tollot – Romanel
4	N-2 bei 380 kV Chamoson – Chipps

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-30 bzw. Tabelle 4-31 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,684	0,810	0,681	0,793	0,227	0,383	0,688	0,813
220 kV Foretaille	0,616	0,911	0,607	0,865	0,364	0,609	0,625	0,917
220 kV Crans	0,597	0,870	0,587	0,821	0,388	0,614	0,607	0,876
220 kV Westliche Vororte	0,580	0,793	0,567	0,739	0,456	0,635	0,592	0,800
220 kV Romanel	0,583	0,786	0,569	0,731	0,472	0,643	0,596	0,793
380 kV Chippis	0,268	0,534	0,048	0,077	0,262	0,520	0,082	0,122
220 kV Vaux	0,565	0,792	0,553	0,739	0,440	0,627	0,577	0,799
220 kV Veytaux	0,339	0,531	0,308	0,427	0,280	0,449	0,360	0,544
220 kV St-Triphon	0,267	0,456	0,223	0,322	0,225	0,393	0,289	0,470
220 kV Riddes	0,192	0,371	0,098	0,167	0,174	0,339	0,211	0,398
380 kV Batiatz	0,452	0,831	1,262	4,542	0,448	0,817	0,653	1,139
380 kV Nant de Drance	0,459	0,880	1,282	4,809	0,455	0,865	0,664	1,206
380 kV Châtelard	0,458	0,874	1,280	4,777	0,455	0,860	0,663	1,197
220 kV Châtelard	0,362	0,719	1,011	3,931	0,359	0,707	0,523	0,985
220 kV Vallorcine	0,358	0,712	0,999	3,894	0,355	0,700	0,518	0,976

Tabelle 4-30: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel – SCL niedrig (Szenario 2)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,506	0,554	0,504	0,551	0,104	0,137	0,506	0,554
220 kV Foretaille	0,406	0,522	0,399	0,512	0,225	0,296	0,405	0,523
220 kV Crans	0,400	0,503	0,393	0,492	0,256	0,321	0,399	0,504
220 kV Westliche Vororte	0,427	0,501	0,417	0,487	0,349	0,399	0,427	0,502
220 kV Romanel	0,444	0,512	0,432	0,497	0,374	0,421	0,443	0,513
380 kV Chippis	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
220 kV Vaux	0,399	0,478	0,389	0,464	0,327	0,379	0,398	0,480
220 kV Veytaux	0,235	0,282	0,210	0,249	0,201	0,237	0,233	0,285
220 kV St-Triphon	0,183	0,225	0,149	0,179	0,159	0,192	0,180	0,228
220 kV Riddes	0,121	0,154	0,059	0,072	0,112	0,141	0,118	0,160
380 kV Batiаз	0,394	0,519	0,877	1,728	0,392	0,516	0,456	0,637
380 kV Nant de Drance	0,391	0,537	0,871	1,789	0,389	0,534	0,453	0,659
380 kV Châtelard	0,392	0,536	0,874	1,784	0,390	0,533	0,455	0,657
220 kV Châtelard	0,261	0,367	0,582	1,223	0,260	0,365	0,303	0,450
220 kV Vallorcine	0,256	0,360	0,570	1,200	0,254	0,358	0,296	0,442

Tabelle 4-31: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Romanel – optimaler SCL (Szenario 2)

4.4.4.2.5 Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Mettlen

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Mettlen wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Ernen – Seehalten
3	N-1 bei 220 kV Airolo – Rotondo
4	N-1 bei 220 kV Airolo – Lavorgo
5	N-1 bei 220 kV Altgass – Samstagern
6	N-1 bei 220 kV Samstagern – Siebnen
7	N-1 bei 220 kV Samstagern – Thalwil
8	N-1 bei 220 kV Mettlen – Sursee
9	N-1 bei 380 kV Gösgen – Laufenburg

10	N-1 bei 220 kV Gösgen – Ormalingen
11	N-1 bei 220 kV Altgass – Mettlen
12	N-2 bei 220 kV Airolo – Rotondo und Airolo – Lavorgo
13	N-2 bei 220 kV Obfelden – Waldegg
14	N-2 bei 220 kV Birr – niederwil und Mettlen – Obfelden
15	N-2 bei 220 kV Mettlen – Obfelden und Breite – Fällanden

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-32 bzw. Tabelle 4-33 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,811	0,617	0,846	0,527	0,807	0,638	0,877	0,336	0,889	0,297	0,867	0,314	0,884	0,354	0,872	0,244
220 kV Obfelden	1,000	0,988	1,011	0,942	1,001	0,915	1,041	0,661	1,067	0,454	1,072	0,910	1,061	0,702	1,035	0,737
220 kV Waldegg	1,080	1,134	1,091	1,077	1,079	1,049	1,120	0,744	1,159	0,485	1,178	1,148	1,152	0,812	1,115	0,838
220 kV Thalwil	1,071	1,108	1,083	1,050	1,070	1,025	1,110	0,718	1,154	0,471	1,182	1,169	1,172	0,839	1,104	0,813
220 kV Samstagern	1,013	0,970	1,026	0,915	1,012	0,898	1,049	0,611	1,103	0,412	1,144	1,139	1,023	0,571	1,044	0,703
220 kV Altgass	0,997	0,909	1,003	0,897	0,996	0,861	1,015	0,769	0,978	0,982	1,067	1,067	1,002	0,743	1,013	0,825
220 kV Niederwil	0,794	0,804	0,806	0,709	0,793	0,755	0,855	0,351	0,875	0,344	0,851	0,354	0,865	0,381	0,847	0,354
220 kV Regensdorf	0,776	0,841	0,792	0,726	0,774	0,808	0,836	0,338	0,856	0,377	0,814	0,287	0,842	0,368	0,828	0,314
220 kV Seebach	0,768	0,863	0,785	0,739	0,766	0,838	0,827	0,343	0,847	0,403	0,797	0,306	0,831	0,374	0,819	0,299
220 kV Auwiesen	0,765	0,869	0,784	0,742	0,764	0,847	0,825	0,346	0,845	0,411	0,792	0,317	0,828	0,377	0,816	0,296
220 kV Fällanden	0,758	0,910	0,779	0,772	0,756	0,901	0,817	0,374	0,838	0,455	0,774	0,403	0,818	0,407	0,809	0,293
220 kV Aathal	0,660	1,023	0,685	0,865	0,659	1,048	0,720	0,532	0,731	0,565	0,696	0,593	0,721	0,569	0,711	0,373
220 kV Grynau	0,697	1,064	0,723	0,900	0,696	1,087	0,752	0,515	0,764	0,549	0,728	0,524	0,753	0,552	0,745	0,355
220 kV Benken	0,866	0,936	0,894	0,802	0,864	0,920	0,920	0,335	0,952	0,463	0,817	0,569	0,913	0,360	0,913	0,310
220 kV Siebnen	0,906	0,899	0,929	0,787	0,904	0,859	0,954	0,331	0,993	0,412	0,812	0,565	0,941	0,335	0,948	0,384
220 kV Littau	1,169	0,888	1,384	0,915	1,179	0,918	1,238	0,919	1,181	0,940	1,178	0,944	0,181	0,946	1,179	0,907
220 kV Giswil	1,628	0,695	2,407	0,725	1,674	0,806	1,881	0,693	1,675	0,761	1,663	0,774	1,674	0,780	1,666	0,654
220 kV Innertkirchen	1,759	0,569	2,814	0,519	1,826	0,696	2,104	0,391	1,842	0,474	1,809	0,491	1,822	0,504	1,812	0,344
220 kV Handeck	1,767	0,520	2,886	0,444	1,838	0,640	2,132	0,296	1,836	0,381	1,819	0,397	1,834	0,409	1,823	0,249
220 kV Grimsel	1,747	0,485	2,887	0,395	1,820	0,596	2,119	0,235	1,818	0,318	1,801	0,334	1,815	0,346	1,804	1,190
220 kV Seehalten	1,730	0,457	2,885	0,355	1,803	0,559	2,107	0,184	1,801	0,265	1,784	0,280	1,799	0,291	1,788	0,141
220 kV Airolo	1,734	0,703	2,480	0,731	1,541	0,653	2,440	0,232	1,815	0,325	1,793	0,314	1,811	0,291	1,799	0,395
220 kV Sils	0,764	1,766	0,848	1,560	0,762	1,882	0,834	1,143	0,845	1,170	0,803	1,193	0,832	1,167	0,823	0,825

	Fall 9:		Fall 10:		Fall 11:		Fall 12:		Fall 13:		Fall 14:		Fall 15:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,892	0,347	0,891	0,255	0,886	0,297	0,837	0,351	0,895	0,377	0,906	0,208	0,889	0,236
220 kV Obfelden	1,036	0,629	1,047	0,916	1,053	0,500	1,026	0,643	0,903	0,491	1,471	0,741	1,138	0,548
220 kV Waldegg	1,116	0,707	1,126	1,053	1,138	0,478	1,103	0,724	1,554	1,823	1,520	0,712	1,214	0,551
220 kV Thalwil	1,106	0,683	1,116	1,030	1,130	0,463	1,093	0,699	1,490	1,678	1,471	0,621	1,197	0,497
220 kV Samstagern	1,047	0,582	1,055	0,903	1,075	0,403	1,032	0,595	1,307	1,263	1,315	0,403	1,167	0,377
220 kV Altgass	1,014	0,754	1,019	0,932	1,055	0,396	1,007	0,758	1,153	1,060	1,154	0,381	1,049	0,519
220 kV Niederwil	0,846	0,325	0,864	0,519	0,865	0,341	0,835	0,350	0,803	0,351	1,302	0,731	0,930	0,509
220 kV Regensdorf	0,828	0,322	0,845	0,490	0,846	0,375	0,813	0,347	0,815	0,413	1,185	0,695	0,919	0,503
220 kV Seebach	0,820	0,333	0,836	0,474	0,837	0,400	0,803	0,357	0,822	0,448	1,125	0,671	0,915	0,496
220 kV Auwiesen	0,818	0,337	0,833	0,470	0,835	0,408	0,800	0,361	0,824	0,457	1,109	0,664	0,913	0,494
220 kV Fällanden	0,812	0,371	0,826	0,455	0,828	0,453	0,790	0,393	0,837	0,509	1,037	0,636	0,912	0,489
220 kV Aathal	0,714	0,543	0,728	0,470	0,725	0,563	0,691	0,559	0,731	0,651	0,799	0,594	0,713	0,574
220 kV Grynau	0,748	0,522	0,760	0,440	0,758	0,547	0,724	0,541	0,765	0,642	0,839	0,584	0,760	0,546
220 kV Benken	0,919	0,319	0,928	0,544	0,937	0,460	0,890	0,346	1,022	0,619	1,119	0,581	0,988	0,456
220 kV Siebnen	0,952	0,303	0,962	0,632	0,974	0,407	0,928	0,329	1,102	0,747	1,173	0,515	1,022	0,399
220 kV Littau	1,182	0,948	1,182	0,852	1,181	0,940	1,160	0,982	1,182	0,953	1,183	0,927	1,180	0,930
220 kV Giswil	1,677	0,786	1,680	0,478	1,673	0,760	1,609	0,895	1,678	0,806	1,681	0,721	1,673	0,731
220 kV Innertkirchen	1,826	0,508	1,831	0,134	1,822	0,473	1,741	0,641	1,829	0,537	1,833	0,423	1,822	0,435
220 kV Handeck	1,838	0,413	1,843	0,037	1,834	0,379	1,748	0,548	1,841	0,442	1,846	0,334	1,834	0,344
220 kV Grimsel	1,820	0,350	1,824	0,026	1,815	0,317	1,728	0,482	1,822	0,378	1,828	0,277	1,815	0,285
220 kV Seehalten	1,804	0,295	1,808	0,068	1,799	0,264	1,711	0,422	1,806	0,322	1,812	0,229	1,799	0,235
220 kV Airolo	1,816	0,270	1,821	0,567	1,812	0,326	11,32	1,306	1,821	0,278	1,832	0,392	1,813	0,366
220 kV Sils	0,832	1,132	0,842	0,695	0,839	1,167	0,771	1,163	0,855	1,291	0,898	1,163	0,842	1,130

Tabelle 4-32: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen – niedriger SCL (Szenario 2)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,532	0,658	0,533	0,785	0,534	0,767	0,524	0,786	0,525	0,676	0,513	0,619	0,531	0,660	0,517	0,631
220 kV Obfelden	0,814	1,178	0,814	1,263	0,814	1,228	0,813	1,260	0,764	1,289	0,881	1,308	0,829	1,260	0,808	1,144
220 kV Waldegg	0,874	1,351	0,874	1,453	0,874	1,413	0,872	1,450	0,799	1,525	0,990	1,572	0,899	1,478	0,868	1,313
220 kV Thalwil	0,864	1,317	0,865	1,418	0,865	1,379	0,863	1,416	0,778	1,515	1,006	1,567	0,914	1,526	0,859	1,280
220 kV Samstagern	0,814	1,152	0,815	1,243	0,814	1,209	0,812	1,243	0,709	1,378	0,999	1,451	0,792	1,102	0,809	1,119
220 kV Altgass	0,881	1,053	0,882	1,101	0,882	1,082	0,881	1,101	0,953	0,957	0,979	1,218	0,870	1,026	0,879	1,034
220 kV Niederwil	0,538	0,871	0,538	0,974	0,538	0,934	0,536	0,968	0,507	0,956	0,545	0,885	0,544	0,912	0,530	0,834
220 kV Regensdorf	0,489	0,804	0,490	0,910	0,490	0,871	0,488	0,905	0,461	0,889	0,468	0,771	0,493	0,832	0,482	0,769
220 kV Seebach	0,470	0,770	0,471	0,877	0,471	0,840	0,469	0,873	0,442	0,855	0,433	0,715	0,472	0,791	0,463	0,736
220 kV Auwiesen	0,465	0,761	0,465	0,868	0,466	0,831	0,463	0,864	0,437	0,846	0,423	0,700	0,466	0,780	0,458	0,727
220 kV Fällanden	0,446	0,727	0,446	0,836	0,446	0,801	0,444	0,833	0,418	0,812	0,383	0,639	0,445	0,737	0,438	0,694
220 kV Aathal	0,321	0,555	0,322	0,655	0,322	0,626	0,319	0,652	0,310	0,598	0,297	0,506	0,321	0,560	0,315	0,528
220 kV Grynau	0,360	0,581	0,361	0,683	0,361	0,655	0,358	0,681	0,349	0,623	0,335	0,529	0,360	0,587	0,354	0,554
220 kV Benken	0,562	0,843	0,534	0,966	0,563	0,930	0,559	0,966	0,513	0,980	0,382	0,630	0,554	0,831	0,555	0,807
220 kV Siebnen	0,631	0,922	0,632	1,036	0,632	1,000	0,628	1,036	0,566	1,087	0,377	0,623	0,619	0,899	0,624	0,886
220 kV Littau	0,919	0,467	0,966	0,458	0,911	0,437	0,932	0,523	0,918	0,459	0,918	0,478	0,919	0,466	0,918	0,474
220 kV Giswil	0,867	1,015	1,037	0,772	0,839	0,998	0,913	0,596	0,866	0,996	0,865	0,972	0,867	1,015	0,865	0,958
220 kV Innertkirchen	0,775	1,638	1,007	1,395	0,737	1,644	0,838	1,151	0,774	1,625	0,772	1,851	0,775	1,639	0,772	1,570
220 kV Handeck	0,742	1,778	0,991	1,529	0,701	1,786	0,809	1,279	0,741	1,764	0,738	1,718	0,742	1,778	0,739	1,708
220 kV Grimsel	0,717	1,810	0,973	1,566	0,675	1,819	0,786	1,319	0,716	1,798	0,713	1,752	0,717	1,811	0,714	1,741
220 kV Seehalten	0,702	1,833	0,966	1,593	0,659	1,843	0,773	1,348	0,701	1,821	0,698	1,775	0,702	1,833	0,699	1,765
220 kV Airolo	0,678	2,340	0,804	1,613	0,830	1,043	0,891	2,259	0,675	2,336	0,671	2,282	0,678	2,341	0,674	2,269
220 kV Sils	0,289	0,600	0,296	0,689	0,291	0,701	0,284	0,691	0,279	0,670	0,258	0,562	0,288	0,602	0,282	0,587

	Fall 9:		Fall 10:		Fall 11:		Fall 12:		Fall 13:		Fall 14:		Fall 15:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,525	0,682	0,517	0,448	0,523	0,665	0,515	0,764	0,537	0,769	0,527	0,793	0,522	0,695
220 kV Obfelden	0,806	1,130	0,809	0,923	0,746	1,231	0,810	1,236	0,710	0,934	0,818	3,903	0,638	1,803
220 kV Waldegg	0,866	1,298	0,868	1,061	0,772	1,441	0,869	1,421	1,186	4,090	0,881	4,092	0,717	1,978
220 kV Thalwil	0,857	1,266	0,859	1,035	0,747	1,425	0,860	1,387	1,137	3,767	0,873	3,782	0,728	1,878
220 kV Samstagern	0,808	1,108	0,809	0,907	0,671	1,280	0,809	1,217	0,997	2,835	0,824	2,890	0,722	1,550
220 kV Altgass	0,878	1,025	0,879	0,920	0,644	1,231	0,879	1,086	0,978	1,915	0,886	1,787	0,833	1,211
220 kV Niederwil	0,526	0,829	0,530	0,585	0,496	0,917	0,533	0,941	0,498	0,874	0,670	3,190	0,460	1,291
220 kV Regensdorf	0,479	0,766	0,483	0,534	0,450	0,852	0,485	0,879	0,472	0,932	0,582	2,660	0,446	1,212
220 kV Seebach	0,460	0,735	0,463	0,508	0,432	0,819	0,465	0,847	0,463	0,964	0,543	2,386	0,444	1,157
220 kV Auwiesen	0,455	0,727	0,458	0,501	0,426	0,810	0,460	0,838	0,461	0,972	0,532	2,312	0,443	1,144
220 kV Fällanden	0,436	0,696	0,439	0,474	0,408	0,777	0,443	0,808	0,456	1,025	0,488	1,980	0,445	1,098
220 kV Aathal	0,313	0,537	0,315	0,360	0,306	0,580	0,316	0,630	0,325	0,713	0,323	1,061	0,282	0,625
220 kV Grynau	0,353	0,559	0,355	0,372	0,345	0,604	0,355	0,660	0,365	0,745	0,366	1,101	0,334	0,676
220 kV Benken	0,555	0,809	0,555	0,568	0,495	0,927	0,554	0,937	0,630	1,602	0,583	2,110	0,528	1,180
220 kV Siebnen	0,624	0,883	0,625	0,650	0,542	1,021	0,624	1,007	0,732	1,948	0,649	2,321	0,580	1,277
220 kV Littau	0,919	0,459	0,918	0,543	0,919	0,463	0,903	0,500	0,919	0,429	0,919	0,430	0,919	0,452
220 kV Giswil	0,866	0,934	0,865	0,609	0,866	0,990	0,813	0,878	0,868	1,068	0,866	0,879	0,865	0,960
220 kV Innertkirchen	0,774	1,558	0,773	1,137	0,773	1,615	0,701	1,459	0,776	1,727	0,774	1,527	0,773	1,592
220 kV Handeck	0,741	1,696	0,739	1,262	0,740	1,754	0,663	1,593	0,743	1,870	0,741	1,665	0,740	1,731
220 kV Grimsel	0,715	1,731	0,714	1,301	0,715	1,787	0,635	1,627	0,718	1,903	0,715	1,701	0,715	1,765
220 kV Seehalten	0,700	1,755	0,699	1,329	0,700	1,810	0,618	1,652	0,703	1,925	0,700	1,726	0,699	1,789
220 kV Airolo	0,675	2,270	0,674	1,793	0,675	2,324	7,322	1,387	0,670	2,448	0,676	2,289	0,674	2,315
220 kV Sils	0,283	0,629	0,699	1,330	0,275	0,650	0,271	0,694	0,299	0,828	0,289	1,180	0,272	0,746

Tabelle 4-33: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen – optimaler SCL (Szenario 2)

4.4.4.3 Szenario 1

4.4.4.3.1 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Regensdorf – Seebach
3	N-1 bei 220 kV Auwiesen – Seebach
4	N-1 bei 220 kV Benken – Siebnen
5	N-1 bei 380 kV Benken – Sils
6	N-1 bei 220 kV Grynav – Mettlen
7	N-2 bei 220 kV Benken – Sils und Benken – Siebnen
8	N-2 bei 220 kV Grynav – Tierfehnd
9	N-2 bei 220 kV Grynav – Winkeln
10	N-1 bei 220 kV Niederwil – Regensdorf

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-34 bzw. Tabelle 4-35 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:		Fall 9:		Fall 10:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0,894	0,823	0,906	0,844	0,906	0,845	0,886	0,811	0,894	0,825	0,891	0,822	0,885	0,814	0,894	0,825	0,895	0,823	0,984	0,989
220 kV Seebach	0,874	0,788	0,906	0,844	0,740	0,560	0,865	0,773	0,874	0,791	0,871	0,787	0,863	0,777	0,873	0,791	0,874	0,788	0,982	0,988
220 kV Regensdorf	0,796	0,653	0,737	0,555	0,739	0,558	0,781	0,629	0,796	0,658	0,790	0,651	0,778	0,635	0,795	0,658	0,797	0,654	0,974	0,980
220 kV Aathal	0,591	0,448	0,585	0,450	0,585	0,450	0,583	0,477	0,582	0,428	0,585	0,538	0,572	0,452	0,593	0,426	0,609	0,448	0,545	0,467
220 kV Grynau	0,619	0,491	0,613	0,494	0,613	0,494	0,611	0,523	0,609	0,468	0,613	0,608	0,599	0,494	0,626	0,468	0,658	0,500	0,574	0,517
220 kV Benken	0,748	0,548	0,742	0,547	0,742	0,547	0,824	0,741	0,765	0,559	0,738	0,555	0,853	0,755	0,743	0,539	0,749	0,549	0,696	0,541
380 kV Benken	0,536	0,282	0,528	0,282	0,529	0,282	0,550	0,353	0,526	0,256	0,521	0,314	0,541	0,314	0,525	0,260	0,536	0,277	0,474	0,292
220 kV Benken	0,748	0,548	0,742	0,547	0,742	0,547	0,824	0,741	0,765	0,559	0,738	0,555	0,853	0,755	0,743	0,539	0,749	0,549	0,696	0,541
380 kV Benken	0,536	0,282	0,528	0,282	0,529	0,282	0,550	0,353	0,526	0,256	0,521	0,314	0,541	0,314	0,525	0,260	0,536	0,277	0,474	0,292
220 kV Siebnen	0,704	0,457	0,696	0,453	0,696	0,453	0,460	0,089	0,718	0,467	0,691	0,456	0,453	0,076	0,700	0,452	0,705	0,458	0,635	0,430
220 kV Samstagern	0,606	0,243	0,592	0,233	0,592	0,233	0,465	0,089	0,611	0,252	0,585	0,221	0,459	0,077	0,601	0,247	0,608	0,246	0,494	0,169
220 kV Altgass	0,526	0,107	0,513	0,102	0,514	0,102	0,434	0,141	0,527	0,106	0,500	0,078	0,427	0,122	0,522	0,106	0,529	0,110	0,425	0,069
220 kV Thalwil	0,596	0,223	0,578	0,207	0,579	0,208	0,482	0,071	0,599	0,232	0,575	0,199	0,476	0,066	0,591	0,228	0,598	0,226	0,458	0,114
220 kV Waldegg	0,584	0,204	0,564	0,184	0,565	0,185	0,493	0,067	0,585	0,213	0,563	0,178	0,487	0,071	0,580	0,211	0,586	0,207	0,425	0,077
220 kV Obfelden	0,568	0,181	0,545	0,158	0,546	0,159	0,502	0,078	0,568	0,191	0,547	0,154	0,496	0,087	0,564	0,189	0,570	0,185	0,389	0,068
220 kV Niederwil	0,649	0,392	0,609	0,332	0,610	0,334	0,622	0,351	0,648	0,400	0,639	0,389	0,618	0,361	0,647	0,400	0,650	0,394	0,333	0,080
220 kV Mettlen	0,444	0,178	0,433	0,175	0,433	0,175	0,406	0,212	0,441	0,160	0,411	0,210	0,398	0,191	0,440	0,153	0,449	0,174	0,353	0,158
380 kV Mettlen	0,401	0,193	0,393	0,185	0,393	0,185	0,388	0,175	0,395	0,184	0,383	0,185	0,379	0,162	0,394	0,183	0,403	0,191	0,334	0,136
220 kV Breite	0,575	0,402	0,569	0,403	0,569	0,403	0,569	0,429	0,567	0,387	0,569	0,462	0,559	0,409	0,571	0,382	0,569	0,391	0,528	0,414
380 kV Breite	0,465	0,292	0,458	0,293	0,459	0,293	0,459	0,332	0,451	0,271	0,455	0,349	0,442	0,298	0,448	0,271	0,464	0,284	0,411	0,303

Tabelle 4-34: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden – niedriger SCL (Szenario 1)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:		Fall 9:		Fall 10:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0,848	0,878	0,866	0,890	0,866	0,890	0,840	0,868	0,848	0,879	0,846	0,875	0,840	0,867	0,848	0,878	0,848	0,880	0,965	0,969
220 kV Seebach	0,820	0,857	0,866	0,890	0,636	0,719	0,810	0,844	0,820	0,857	0,818	0,853	0,810	0,843	0,820	0,856	0,820	0,858	0,960	0,965
220 kV Regensdorf	0,711	0,775	0,634	0,713	0,635	0,717	0,695	0,755	0,712	0,775	0,708	0,768	0,694	0,753	0,711	0,774	0,712	0,778	0,943	0,949
220 kV Aathal	0,391	0,592	0,387	0,584	0,387	0,584	0,387	0,580	0,387	0,581	0,396	0,554	0,382	0,565	0,410	0,580	0,420	0,628	0,368	0,529
220 kV Grynau	0,412	0,641	0,409	0,632	0,409	0,633	0,407	0,627	0,409	0,628	0,422	0,589	0,402	0,610	0,445	0,628	0,468	0,709	0,390	0,574
220 kV Benken	0,629	0,776	0,623	0,767	0,623	0,767	0,735	0,852	0,663	0,783	0,623	0,761	0,790	0,871	0,627	0,768	0,631	0,781	0,589	0,703
380 kV Benken	0,322	0,679	0,317	0,665	0,317	0,665	0,349	0,672	0,323	0,655	0,315	0,647	0,354	0,645	0,317	0,658	0,324	0,687	0,288	0,571
220 kV Benken	0,629	0,776	0,623	0,767	0,623	0,767	0,735	0,852	0,663	0,783	0,623	0,761	0,790	0,871	0,627	0,768	0,631	0,781	0,589	0,703
380 kV Benken	0,322	0,679	0,317	0,665	0,317	0,665	0,349	0,672	0,323	0,655	0,315	0,647	0,354	0,645	0,317	0,658	0,324	0,687	0,288	0,571
220 kV Siebnen	0,568	0,734	0,560	0,722	0,560	0,723	0,257	0,539	0,597	0,738	0,560	0,715	0,256	0,526	0,567	0,726	0,571	0,740	0,512	0,641
220 kV Samstagern	0,437	0,659	0,423	0,642	0,424	0,643	0,264	0,552	0,453	0,655	0,424	0,631	0,263	0,539	0,437	0,649	0,441	0,668	0,339	0,525
220 kV Altgass	0,335	0,605	0,323	0,589	0,324	0,590	0,227	0,539	0,344	0,597	0,317	0,573	0,226	0,525	0,336	0,594	0,340	0,616	0,254	0,479
220 kV Thalwil	0,424	0,650	0,406	0,631	0,406	0,632	0,286	0,559	0,436	0,646	0,411	0,622	0,285	0,546	0,424	0,641	0,428	0,659	0,296	0,498
220 kV Waldegg	0,411	0,636	0,389	0,615	0,390	0,616	0,303	0,559	0,420	0,631	0,397	0,608	0,302	0,547	0,411	0,627	0,415	0,645	0,258	0,473
220 kV Obfelden	0,394	0,614	0,369	0,591	0,370	0,593	0,320	0,554	0,401	0,609	0,381	0,586	0,319	0,543	0,395	0,605	0,398	0,623	0,217	0,443
220 kV Niederwil	0,518	0,642	0,468	0,603	0,469	0,606	0,490	0,609	0,520	0,640	0,512	0,628	0,489	0,604	0,518	0,638	0,520	0,647	0,166	0,374
220 kV Mettlen	0,231	0,585	0,222	0,569	0,223	0,570	0,194	0,548	0,234	0,573	0,208	0,548	0,193	0,532	0,233	0,570	0,238	0,599	0,168	0,462
380 kV Mettlen	0,186	0,538	0,180	0,525	0,181	0,525	0,179	0,512	0,186	0,523	0,176	0,507	0,178	0,494	0,184	0,522	0,189	0,547	0,149	0,433
220 kV Breite	0,396	0,571	0,392	0,563	0,392	0,563	0,393	0,560	0,393	0,561	0,398	0,548	0,389	0,546	0,401	0,558	0,397	0,571	0,370	0,508
380 kV Breite	0,235	0,571	0,231	0,559	0,231	0,559	0,234	0,554	0,227	0,549	0,234	0,537	0,225	0,527	0,224	0,544	0,238	0,577	0,210	0,481

Tabelle 4-35: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Fällanden – optimaler SCL (Szenario 1)

4.4.4.3.2 Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois wurden folgende Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Romanel – Veytaux
3	N-1 bei 220 kV Romanel – Vaux
4	N-1 bei 220 kV Vaux – Verbois
5	N-2 bei 220 kV Romanel – Vaux und Vaux – Verbois

Die Verstärkungsfaktoren auf die Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-36 bzw. Tabelle 4-37 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,628	0,754	0,636	0,763	0,614	0,737	0,609	0,727	0,613	0,734
220 kV Foretaille	0,924	0,951	0,931	0,959	0,912	0,941	0,909	0,936	0,912	0,940
220 kV Crans	0,819	0,881	0,837	0,900	0,790	0,855	0,782	0,845	0,789	0,854
220 kV Westliche Vororte	0,621	0,743	0,664	0,786	0,554	0,686	0,537	0,662	0,553	0,684
220 kV Romanel	0,595	0,725	0,642	0,773	0,521	0,663	0,501	0,637	0,519	0,660
380 kV Romanel	0,531	0,775	0,546	0,791	0,492	0,732	0,481	0,710	0,490	0,725
220 kV Vaux	0,657	0,767	0,695	0,806	0,899	0,934	0,485	0,618	0,000	0,000
220 kV Veytaux	0,358	0,470	0,207	0,293	0,315	0,431	0,303	0,415	0,314	0,429
220 kV St-Triphon	0,286	0,392	0,223	0,314	0,252	0,361	0,243	0,347	0,252	0,359
220 kV Riddes	0,189	0,303	0,160	0,266	0,169	0,281	0,164	0,272	0,168	0,280
380 kV Batiaz	0,312	0,654	0,310	0,649	0,287	0,616	0,280	0,597	0,286	0,611
380 kV Nant de Drance	0,317	0,693	0,314	0,688	0,292	0,652	0,284	0,632	0,290	0,647
380 kV Châtelard	0,316	0,688	0,314	0,683	0,291	0,648	0,284	0,628	0,290	0,642
220 kV Châtelard	0,250	0,566	0,248	0,562	0,230	0,532	0,224	0,516	0,229	0,528
220 kV Vallorcine	0,247	0,561	0,245	0,556	0,227	0,527	0,221	0,511	0,226	0,523

Tabelle 4-36: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois – niedriger SCL (Szenario 1)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,479	0,521	0,485	0,529	0,469	0,509	0,466	0,503	0,469	0,508
220 kV Foretaille	0,885	0,900	0,892	0,908	0,875	0,889	0,871	0,885	0,875	0,889
220 kV Crans	0,737	0,768	0,755	0,787	0,711	0,741	0,702	0,730	0,710	0,740
220 kV Westliche Vororte	0,493	0,546	0,535	0,589	0,430	0,483	0,408	0,456	0,429	0,481
220 kV Romanel	0,464	0,519	0,511	0,568	0,393	0,448	0,368	0,419	0,391	0,446
380 kV Romanel	0,370	0,461	0,387	0,481	0,339	0,425	0,326	0,405	0,335	0,418
220 kV Vaux	0,535	0,584	0,572	0,623	0,782	0,807	0,344	0,393	0,000	0,000
220 kV Veytaux	0,232	0,272	0,108	0,134	0,196	0,236	0,184	0,220	0,196	0,234
220 kV St-Triphon	0,169	0,206	0,124	0,153	0,144	0,179	0,135	0,168	0,143	0,178
220 kV Riddes	0,083	0,117	0,066	0,097	0,071	0,103	0,067	0,097	0,071	0,102
380 kV Bâtiâz	0,152	0,261	0,155	0,264	0,138	0,238	0,132	0,227	0,137	0,235
380 kV Nant de Drance	0,151	0,270	0,154	0,274	0,137	0,247	0,132	0,235	0,136	0,243
380 kV Châtelard	0,151	0,269	0,154	0,273	0,138	0,246	0,132	0,234	0,136	0,242
220 kV Châtelard	0,101	0,184	0,103	0,187	0,092	0,169	0,088	0,161	0,091	0,166
220 kV Vallorcine	0,099	0,181	0,101	0,183	0,090	0,165	0,086	0,157	0,089	0,163

Tabelle 4-37: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Verbois – optimaler SCL (Szenario 1)

4.4.4.3.3 Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot

Folgende Fälle wurden für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot berücksichtigt:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 380 kV La Bâtiâz – Romanel
3	N-1 bei 380 kV La Bâtiâz – Chamoson
4	N-2 bei 380 kV Chamoson – Chippis

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-38 bzw. Tabelle 4-39 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,967	0,979	0,969	0,978	0,973	0,947	0,968	0,985
220 kV Foretaille	0,629	0,764	0,649	0,743	0,698	0,411	0,638	0,829
220 kV Crans	0,590	0,739	0,613	0,714	0,671	0,340	0,601	0,815
220 kV Westliche Vororte	0,529	0,695	0,560	0,659	0,639	0,230	0,543	0,798
220 kV Romanel	0,525	0,693	0,557	0,655	0,640	0,223	0,539	0,801
380 kV Chippis	0,717	0,916	0,850	0,916	1,061	0,528	0,757	1,121
220 kV Vaux	0,546	0,706	0,571	0,672	0,638	0,268	0,558	0,798
220 kV Veytaux	0,328	0,463	0,314	0,385	0,360	0,131	0,334	0,553
220 kV St-Triphon	0,270	0,394	0,236	0,296	0,271	0,105	0,273	0,482
220 kV Riddes	0,198	0,324	0,121	0,163	0,138	0,055	0,201	0,419
380 kV Batiaz	0,401	0,757	0,071	0,153	1,339	2,520	0,508	1,270
380 kV Nant de Drance	0,407	0,802	0,072	0,162	1,360	2,674	0,516	1,345
380 kV Châtelard	0,406	0,796	0,072	0,161	1,358	2,655	0,515	1,336
220 kV Châtelard	0,321	0,654	0,057	0,133	1,072	2,181	0,406	1,099
220 kV Vallorcine	0,317	0,648	0,056	0,131	1,060	2,161	0,402	1,088

Tabelle 4-38: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot – niedriger SCL (Szenario 1)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0,782	0,936	0,956	0,962	0,956	0,968	0,954	0,960
220 kV Foretaille	2,016	0,301	0,503	0,556	0,501	0,653	0,479	0,544
220 kV Crans	2,254	0,238	0,463	0,518	0,459	0,641	0,433	0,505
220 kV Westliche Vororte	2,318	0,126	0,421	0,477	0,416	0,668	0,378	0,459
220 kV Romanel	2,272	0,154	0,425	0,480	0,419	0,688	0,378	0,461
380 kV Chippis	1,219	0,390	0,797	0,844	0,781	1,462	0,640	0,758
220 kV Vaux	2,088	0,091	0,429	0,485	0,425	0,649	0,394	0,471
220 kV Veytaux	1,937	0,605	0,206	0,241	0,203	0,347	0,194	0,251
220 kV St-Triphon	1,639	0,668	0,145	0,174	0,144	0,249	0,147	0,197
220 kV Riddes	0,878	0,514	0,056	0,071	0,056	0,102	0,087	0,131
380 kV Batiaz	0,879	0,671	0,017	0,038	0,684	2,546	0,293	0,484
380 kV Nant de Drance	0,873	0,696	0,017	0,039	0,679	2,635	0,291	0,501
380 kV Châtelard	0,876	0,693	0,017	0,039	0,681	2,627	0,292	0,500
220 kV Châtelard	0,583	0,475	0,011	0,027	0,453	1,804	0,194	0,342
220 kV Vallorcine	0,571	0,466	0,011	0,026	0,444	1,769	0,190	0,336

Tabelle 4-39: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Bois Tollot – optimaler SCL (Szenario 1)

4.4.4.3.4 Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Mettlen

Für die Oberschwingungseinspeisung bei 380 kV Mettlen wurden die folgenden Fälle betrachtet:

Fall	Beschreibung
1	Bedingung N
2	N-1 bei 220 kV Ernen – Seehalten
3	N-1 bei 220 kV Airolo – Rotondo
4	N-1 bei 220 kV Airolo – Lavorgo
5	N-1 bei 220 kV Altgass – Samstagern
6	N-1 bei 220 kV Samstagern – Siebnen
7	N-1 bei 220 kV Samstagern – Thalwil
8	N-1 bei 220 kV Mettlen – Sursee
9	N-1 bei 380 kV Gösigen – Laufenburg
10	N-1 bei 220 kV Gösigen – Ormalingen
11	N-1 bei 220 kV Altgass – Mettlen
12	N-2 bei 220 kV Airolo – Rotondo und Airolo – Lavorgo
13	N-2 bei 220 kV Obfelden – Waldegg
14	N-2 bei 220 kV Birr – niederwil und Mettlen – Obfelden
15	N-2 bei 220 kV Mettlen – Obfelden und Breite – Fällanden

Die Verstärkungsfaktoren der Oberschwingung 5 und Oberschwingung 7 für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen unter niedrigen und optimalen SCL-Bedingungen sind in Tabelle 4-40 bzw. Tabelle 4-41 dargestellt.

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,668	0,304	0,665	0,291	0,670	0,304	0,664	0,298	0,658	0,274	0,651	0,268	0,667	0,303	0,651	0,205
220 kV Obfelden	0,811	0,435	0,810	0,464	0,811	0,434	0,810	0,437	0,766	0,290	0,833	0,544	0,808	0,440	0,804	0,489
220 kV Waldegg	0,820	0,424	0,818	0,455	0,820	0,423	0,818	0,426	0,753	0,222	0,864	0,618	0,816	0,432	0,813	0,487
220 kV Thalwil	0,824	0,410	0,822	0,444	0,824	0,409	0,822	0,411	0,738	0,185	0,888	0,682	0,818	0,435	0,817	0,480
220 kV Samstagern	0,823	0,387	0,822	0,424	0,823	0,387	0,821	0,388	0,714	0,198	0,911	0,750	0,818	0,373	0,816	0,465
220 kV Altgass	0,897	0,657	0,896	0,675	0,897	0,657	0,896	0,658	0,978	0,981	0,944	0,861	0,895	0,649	0,893	0,704
220 kV Niederwil	0,634	0,259	0,632	0,261	0,634	0,259	0,632	0,248	0,603	0,285	0,622	0,209	0,632	0,257	0,621	0,186
220 kV Regensdorf	0,623	0,307	0,621	0,300	0,624	0,307	0,621	0,293	0,592	0,350	0,596	0,301	0,622	0,305	0,611	0,202
220 kV Seebach	0,619	0,335	0,617	0,324	0,620	0,336	0,617	0,321	0,587	0,386	0,584	0,363	0,617	0,334	0,606	0,214
220 kV Auwiesen	0,618	0,343	0,615	0,331	0,618	0,344	0,616	0,329	0,586	0,396	0,581	0,380	0,614	0,342	0,605	0,218
220 kV Fällanden	0,615	0,386	0,613	0,368	0,616	0,387	0,612	0,372	0,583	0,447	0,568	0,471	0,613	0,386	0,602	0,240
220 kV Aathal	0,551	0,554	0,549	0,518	0,552	0,556	0,548	0,540	0,532	0,565	0,525	0,570	0,549	0,554	0,538	0,354
220 kV Grynau	0,586	0,531	0,584	0,496	0,587	0,532	0,583	0,516	0,568	0,544	0,560	0,553	0,585	0,530	0,574	0,324
220 kV Benken	0,694	0,299	0,692	0,299	0,695	0,300	0,691	0,287	0,640	0,432	0,586	0,609	0,691	0,301	0,682	0,200
220 kV Siebnen	0,730	0,213	0,728	0,244	0,730	0,214	0,727	0,203	0,659	0,349	0,583	0,606	0,726	0,212	0,719	0,219
220 kV Littau	0,896	0,852	0,902	0,888	0,891	0,850	0,897	0,861	0,896	0,856	0,896	0,856	0,896	0,852	0,895	0,863
220 kV Giswil	0,699	0,504	0,725	0,646	0,680	0,494	0,703	0,537	0,697	0,517	0,697	0,521	0,699	0,504	0,696	0,547
220 kV Innertkirchen	0,594	0,310	0,630	0,500	0,568	0,297	0,600	0,353	0,592	0,328	0,592	0,334	0,594	0,310	0,591	0,365
220 kV Handeck	0,523	0,218	0,569	0,393	0,491	0,151	0,351	0,215	0,521	0,188	0,520	0,195	0,523	0,168	0,519	0,226
220 kV Grimsel	0,491	0,112	0,541	0,340	0,454	0,097	0,499	0,149	0,488	0,127	0,487	0,135	0,490	0,113	0,486	0,155
220 kV Seehalten	0,476	0,104	0,532	0,304	0,435	0,098	0,484	0,110	0,473	0,104	0,472	0,111	0,475	0,104	0,471	0,105
220 kV Airolo	0,498	0,134	0,518	0,128	0,625	0,142	0,532	0,181	0,495	0,115	0,492	0,112	0,498	0,135	0,453	0,100
220 kV Sils	0,540	1,098	0,539	1,016	0,543	1,099	0,535	1,094	0,522	1,111	0,509	1,156	0,539	1,098	0,527	0,723

	Fall 9:		Fall 10:		Fall 11:		Fall 12:		Fall 13:		Fall 14:		Fall 15:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,674	0,296	0,670	0,289	0,656	0,274	0,658	0,291	0,667	0,303	0,653	0,255	0,653	0,255
220 kV Obfelden	0,806	0,426	0,813	0,618	0,759	0,289	0,808	0,445	0,792	0,448	0,703	0,168	0,703	0,168
220 kV Waldegg	0,815	0,415	0,822	0,632	0,744	0,221	0,816	0,433	0,848	0,362	0,730	0,156	0,730	0,256
220 kV Thalwil	0,820	0,401	0,825	0,639	0,725	0,183	0,820	0,418	0,846	0,360	0,751	0,166	0,751	0,166
220 kV Samstagern	0,819	0,378	0,824	0,639	0,697	0,195	0,819	0,395	0,838	0,353	0,771	0,199	0,771	0,199
220 kV Altgass	0,895	0,655	0,897	0,794	0,684	0,191	0,895	0,662	0,904	0,636	0,869	0,544	0,869	0,544
220 kV Niederwil	0,623	0,233	0,638	0,304	0,599	0,284	0,629	0,243	0,626	0,252	0,650	0,272	0,650	0,272
220 kV Regensdorf	0,614	0,281	0,627	0,336	0,587	0,350	0,618	0,284	0,619	0,302	0,628	0,329	0,628	0,329
220 kV Seebach	0,610	0,309	0,623	0,352	0,582	0,386	0,613	0,310	0,615	0,333	0,616	0,358	0,616	0,358
220 kV Auwiesen	0,609	0,317	0,621	0,356	0,581	0,395	0,612	0,318	0,614	0,341	0,613	0,365	0,613	0,365
220 kV Fällanden	0,607	0,361	0,618	0,380	0,577	0,477	0,609	0,359	0,614	0,387	0,602	0,404	0,602	0,533
220 kV Aathal	0,543	0,531	0,554	0,410	0,530	0,565	0,544	0,523	0,550	0,554	0,529	0,533	0,529	0,404
220 kV Grynau	0,580	0,504	0,589	0,453	0,565	0,543	0,579	0,500	0,585	0,531	0,568	0,504	0,568	0,504
220 kV Benken	0,675	0,535	0,697	0,459	0,631	0,431	0,687	0,278	0,698	0,310	0,667	0,328	0,667	0,328
220 kV Siebnen	0,725	0,179	0,732	0,493	0,649	0,348	0,723	0,201	0,737	0,219	0,695	0,226	0,695	0,226
220 kV Littau	0,851	0,851	0,896	0,881	0,895	0,856	0,889	0,846	0,896	0,852	0,895	0,857	0,895	0,857
220 kV Giswil	0,699	0,499	0,700	0,618	0,697	0,517	0,673	0,479	0,699	0,504	0,696	0,524	0,696	0,524
220 kV Innertkirchen	0,595	0,303	0,596	0,462	0,592	0,328	0,558	0,275	0,594	0,311	0,591	0,337	0,591	0,337
220 kV Handeck	0,524	0,156	0,525	0,345	0,521	0,188	0,478	0,124	0,523	0,169	0,520	0,196	0,520	0,196
220 kV Grimsel	0,492	0,098	0,493	0,286	0,488	0,127	0,440	0,077	0,490	0,113	0,486	0,133	0,486	0,133
220 kV Seehalten	0,477	0,092	0,478	0,245	0,473	0,104	0,419	0,101	0,476	0,104	0,471	0,103	0,471	0,103
220 kV Airolo	0,500	0,121	0,501	0,281	0,454	0,115	1,058	1,191	0,498	0,134	0,493	0,104	0,493	0,104
220 kV Sils	0,538	1,064	0,544	0,709	0,519	1,111	0,499	0,855	0,511	0,880	0,491	0,833	0,491	0,833

Tabelle 4-40: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen – niedriger SCL (Szenario 1)

	Fall 1:		Fall 2:		Fall 3:		Fall 4:		Fall 5:		Fall 6:		Fall 7:		Fall 8:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,476	0,836	0,476	0,833	0,480	0,844	0,473	0,834	0,467	0,817	0,461	0,819	0,476	0,835	0,463	0,816
220 kV Obfelden	0,686	0,854	0,686	0,852	0,686	0,855	0,686	0,853	0,620	0,829	0,729	0,862	0,685	0,848	0,210	0,838
220 kV Waldegg	0,691	0,874	0,691	0,873	0,691	0,876	0,690	0,873	0,589	0,841	0,769	0,895	0,690	0,866	0,687	0,858
220 kV Thalwil	0,692	0,884	0,692	0,883	0,692	0,886	0,691	0,883	0,557	0,845	0,803	0,918	0,692	0,870	0,688	0,868
220 kV Samstagern	0,688	0,885	0,688	0,884	0,689	0,887	0,688	0,884	0,515	0,840	0,839	0,934	0,684	0,878	0,684	0,869
220 kV Altgass	0,815	0,917	0,815	0,916	0,816	0,918	0,815	0,916	0,953	0,957	0,894	0,947	0,813	0,913	0,813	0,907
220 kV Niederwil	0,425	0,731	0,425	0,729	0,426	0,734	0,425	0,729	0,386	0,718	0,419	0,715	0,425	0,727	0,471	0,712
220 kV Regensdorf	0,396	0,725	0,395	0,722	0,396	0,728	0,395	0,723	0,356	0,712	0,368	0,703	0,395	0,722	0,388	0,706
220 kV Seebach	0,384	0,723	0,384	0,721	0,385	0,727	0,384	0,721	0,344	0,711	0,345	0,699	0,384	0,720	0,377	0,704
220 kV Auwiesen	0,381	0,722	0,381	0,720	0,382	0,725	0,380	0,720	0,341	0,710	0,339	0,697	0,381	0,719	0,374	0,703
220 kV Fällanden	0,372	0,727	0,372	0,725	0,373	0,731	0,371	0,726	0,331	0,715	0,314	0,701	0,371	0,725	0,365	0,708
220 kV Aathal	0,282	0,654	0,282	0,652	0,283	0,658	0,281	0,652	0,266	0,644	0,260	0,635	0,282	0,652	0,276	0,636
220 kV Grynau	0,322	0,690	0,322	0,687	0,323	0,694	0,321	0,688	0,306	0,679	0,299	0,669	0,322	0,688	0,317	0,670
220 kV Benken	0,475	0,831	0,474	0,829	0,476	0,836	0,473	0,829	0,396	0,813	0,319	0,781	0,473	0,827	0,468	0,809
220 kV Siebnen	0,533	0,838	0,533	0,836	0,534	0,842	0,532	0,836	0,428	0,815	0,315	0,772	0,531	0,833	0,527	0,817
220 kV Littau	0,831	0,852	0,830	0,854	0,828	0,847	0,832	0,852	0,831	0,851	0,831	0,851	0,831	0,852	0,831	0,850
220 kV Giswil	0,557	0,627	0,579	0,625	0,543	0,606	0,562	0,626	0,557	0,625	0,556	0,625	0,557	0,627	0,556	0,621
220 kV Innertkirchen	0,427	0,509	0,459	0,518	0,407	0,480	0,434	0,508	0,427	0,507	0,426	0,506	0,427	0,509	0,426	0,509
220 kV Handeck	0,340	0,439	0,380	0,448	0,313	0,401	0,349	0,437	0,339	0,437	0,338	0,435	0,340	0,439	0,338	0,430
220 kV Grimsel	0,300	0,412	0,347	0,420	0,269	0,369	0,310	0,408	0,299	0,409	0,298	0,408	0,300	0,412	0,298	0,402
220 kV Seehalten	0,282	0,410	0,336	0,417	0,246	0,361	0,294	0,405	0,281	0,407	0,280	0,405	0,282	0,410	0,280	0,400
220 kV Airolo	0,310	0,476	0,328	0,477	0,460	0,686	0,361	0,462	0,308	0,472	0,307	0,469	0,310	0,476	0,308	0,464
220 kV Sils	0,219	0,676	0,219	0,674	0,221	0,683	0,217	0,675	0,197	0,668	0,178	0,655	0,219	0,675	0,214	0,659

	Fall 9:		Fall 10:		Fall 11:		Fall 12:		Fall 13:		Fall 14:		Fall 15:	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0,484	0,890	0,476	0,647	0,466	0,823	0,471	0,828	0,476	0,837	0,466	0,817	0,465	0,815
220 kV Obfelden	0,683	0,856	0,686	0,704	0,610	0,813	0,685	0,851	0,675	0,813	0,474	0,784	0,420	0,741
220 kV Waldegg	0,689	0,877	0,691	0,719	0,574	0,818	0,690	0,871	0,704	0,947	0,514	0,813	0,470	0,776
220 kV Thalwil	0,690	0,888	0,692	0,726	0,538	0,814	0,691	0,881	0,702	0,943	0,550	0,832	0,515	0,802
220 kV Samstagern	0,687	0,890	0,688	0,724	0,490	0,801	0,687	0,881	0,695	0,924	0,590	0,845	0,566	0,824
220 kV Altgass	0,815	0,918	0,815	0,822	0,470	0,770	0,815	0,915	0,819	0,936	0,763	0,891	0,0751	0,879
220 kV Niederwil	0,419	0,739	0,425	0,575	0,380	0,707	0,424	0,726	0,421	0,715	0,395	0,746	0,314	0,689
220 kV Regensdorf	0,391	0,735	0,396	0,565	0,350	0,701	0,394	0,720	0,393	0,716	0,365	0,730	0,319	0,696
220 kV Seebach	0,380	0,735	0,384	0,561	0,339	0,699	0,383	0,718	0,383	0,718	0,353	0,723	0,325	0,701
220 kV Auwiesen	0,377	0,734	0,381	0,560	0,335	0,698	0,380	0,716	0,380	0,717	0,350	0,721	0,327	0,701
220 kV Fällanden	0,368	0,742	0,372	0,560	0,325	0,704	0,370	0,722	0,371	0,727	0,340	0,719	0,339	0,716
220 kV Aathal	0,279	0,670	0,282	0,510	0,264	0,938	0,281	0,648	0,282	0,654	0,262	0,636	0,243	0,614
220 kV Grynau	0,320	0,704	0,322	0,522	0,303	0,673	0,321	0,684	0,322	0,690	0,304	0,673	0,292	0,656
220 kV Benken	0,473	0,849	0,475	0,627	0,384	0,793	0,472	0,824	0,477	0,845	0,425	0,811	0,415	0,801
220 kV Siebnen	0,532	0,852	0,533	0,638	0,412	0,790	0,531	0,833	0,537	0,860	0,469	0,814	0,456	0,801
220 kV Littau	0,831	0,852	0,831	0,837	0,831	0,851	0,827	0,846	0,831	0,852	0,831	0,851	0,831	0,851
220 kV Giswil	0,557	0,629	0,557	0,570	0,557	0,625	0,539	0,601	0,557	0,627	0,556	0,624	0,556	0,624
220 kV Innertkirchen	0,428	0,513	0,427	0,435	0,427	0,506	0,402	0,473	0,427	0,509	0,426	0,505	0,426	0,505
220 kV Handeck	0,340	0,446	0,340	0,352	0,339	0,436	0,306	0,392	0,340	0,439	0,338	0,434	0,338	0,434
220 kV Grimsel	0,300	0,420	0,300	0,320	0,299	0,408	0,261	0,358	0,300	0,412	0,298	0,407	0,298	0,407
220 kV Seehalten	0,283	0,421	0,282	0,312	0,281	0,406	0,237	0,349	0,282	0,410	0,280	0,404	0,280	0,404
220 kV Airolo	0,311	0,489	0,310	0,359	0,308	0,471	0,999	1,118	0,310	0,477	0,308	0,469	0,307	0,468
220 kV Sils	0,219	0,703	0,219	0,527	0,194	0,659	0,215	0,668	0,220	0,681	0,202	0,659	0,197	0,649

Tabelle 4-41: Verstärkungsfaktoren für die Oberschwingungseinspeisung bei 220 kV Mettlen – optimaler SCL (Szenario 1)