



BLACKOUT GRUNDLAGENPAPIER

ENTSTEHUNG UND ABLAUF EINES BLACKOUTS

NUTZUNG DIESES DOKUMENTES

Dieses Dokument dient dem Kunden von RESILIENT X als Orientierung und Planungsgrundlage. Die Angaben in diesem Dokument sind als Planungsgrundlage zu verstehen und haben nicht Anspruch an Richtigkeit und Vollständigkeit.

ÄNDERUNGSNACHWEIS

DATUM	VERSION	ÄNDERUNG DURCH	VERWEIS ÄNDERUNG
04.07.2025	0.1	Joel Schweiker	Dokument Initialisierung
07.01.2026	1.0	Joel Schweiker	Dokument freigegeben

NUTZUNG DIESES DOKUMENTES.....	2
ÄNDERUNGSNACHWEIS	2
WIE DAS STROMSYSTEM IN DER SCHWEIZ FUNKTIONIERT	4
VORAUSSETZUNG FÜR EIN STABILES STROMNETZ.....	4
STÖRFAKTOREN FÜR EIN STABILES NETZ.....	6
PHASEN EINES BLACKOUTS	8
ZUSAMMENBRUCHSPHASE.....	9
BLACKOUT-PHASE (TOTALAUSFALL)	9
ABLAUF STAATLICHE HILFESTELLUNG.....	10
STABILISIERUNGS- UND WIEDERAUFBAUPHASE	12
NORMALISIERUNGSPHASE.....	13

WIE DAS STROMSYSTEM IN DER SCHWEIZ FUNKTIONIERT

Das elektrische Stromsystem funktioniert nur stabil, wenn Erzeugung und Verbrauch zu jedem Zeitpunkt exakt im Gleichgewicht sind. Strom lässt sich im Netz praktisch nicht speichern, weshalb jede Abweichung sofort physikalische Folgen hat. Dieses Gleichgewicht drückt sich in der Netzfrequenz von 50,0 Hertz aus, die im kontinentaleuropäischen Verbundnetz gilt, dem auch die Schweiz angehört.

Die Netzfrequenz ist das unmittelbare Abbild dieses Gleichgewichts. Steigt der Verbrauch stärker als die Erzeugung, sinkt die Frequenz. Ist mehr Erzeugung als Verbrauch im System, steigt sie. Schon Abweichungen im Bereich von Zehntel-Hertz sind für Netzbetreiber relevant, da sie anzeigen, dass Angebot und Nachfrage nicht mehr sauber übereinstimmen.

In der Schweiz übernimmt Swissgrid als Übertragungsnetzbetreiber die Verantwortung für die Systemstabilität. Sie koordiniert Kraftwerke, Regelenergie und den internationalen Stromhandel. Der Stromhandel ist integraler Bestandteil des Systems, da die Schweiz stark mit den Nachbarländern vernetzt ist und permanent Strom importiert und exportiert. Handelsfahrpläne werden im Voraus geplant, können aber physikalische Ungleichgewichte nicht verhindern, wenn ungeplante Ereignisse auftreten, etwa Kraftwerksausfälle, Wetterextreme oder Leitungsstörungen.

Der Stromhandel arbeitet mit Fahrplänen, das physikalische Netz jedoch folgt ausschliesslich den Gesetzen der Physik. Wenn Handelsmengen und reale Einspeisung oder Last nicht mehr übereinstimmen, reagiert das System nicht wirtschaftlich, sondern physikalisch – über die Frequenz. Alle Schutz- und Abschaltmechanismen orientieren sich deshalb letztlich an der Netzfrequenz.

VORAUSSETZUNG FÜR EIN STABILES STROMNETZ

Primäre, sekundäre und tertiäre Frequenzregelung (Regelenergie)

Die Stabilität hängt direkt von der Netzfrequenz (50 Hz) ab. Wenn Angebot und Nachfrage nicht übereinstimmen, ändert sich die Frequenz. Kraftwerke reagieren auf diese Abweichungen in verschiedenen Zeitskalen:

- **Primärregelung:** innerhalb von Sekunden. Rotierende Maschinen (z. B. Wasserkraft, Gasturbinen) erhöhen oder verringern ihre Leistung automatisch, abhängig von der Frequenzabweichung. Dies stabilisiert die Frequenz kurzfristig.
- **Sekundärregelung:** innerhalb von Minuten. Leitstellen greifen ein, um die Frequenz wieder auf exakt 50 Hz zurückzubringen. Dies passiert zentral gesteuert durch den Übertragungsnetzbetreiber (Swissgrid).

- Tertiärregelung: innerhalb von 15–30 Minuten. Reservekraftwerke oder flexible Verbraucher werden zugeschaltet oder abgeschaltet, um das Netz langfristig stabil zu halten und Handelsfahrpläne einzuhalten.

Diese schwingende Energie, also die kinetische Energie der rotierenden Generatoren, wirkt wie ein Puffer: Sie glättet kurzfristige Lastspitzen und Abfälle, bevor Regelenenergie greift.

Rotierende Massen / Schwungmassen (Schwingende Energie)

Rotierende Generatoren speichern kinetische Energie. Bei plötzlicher Laständerung wird diese Energie spontan abgegeben oder aufgenommen, wodurch die Frequenz nicht sofort zusammenbricht. In der Schweiz spielt Wasserkraft eine Schlüsselrolle, da grosse Turbinen grosse Schwungmassen haben, die das Netz stabilisieren.

Wenn zu viele nicht-synchronisierte Quellen wie PV- oder Windanlagen ohne geeignete Speicher einspeisen, sinkt diese schwingende Energie, und das Netz wird anfälliger für Frequenzschwankungen. Deshalb müssen moderne Speicher oder „synthetische Schwungmassen“ in erneuerbaren Anlagen implementiert werden.

Spannungsregelung / Blindleistung

Neben der Frequenz muss auch die Spannung im Netz stabil bleiben. Spannungsschwankungen entstehen, wenn Strom fliesst, Leitungen lang sind oder Erzeugung und Verbrauch ungleich verteilt sind. Transformatoren, Kondensatoren und Blindleistungskompensation stabilisieren die Spannung und verhindern, dass das Netz punktuell zusammenbricht.

Netzstruktur und Redundanz

Die Schweiz ist Teil des europäischen Verbundnetzes (UCTE / ENTSO-E). Ein stabiles Netz erfordert:

- Redundante Leitungen (mehrere Wege für Stromfluss)
- Last- und Erzeugungsverteilung über die Schweiz und die Nachbarländer
- Inselbetriebfähigkeit einzelner Kraftwerke oder Regionen, falls Teile des Netzes abgetrennt werden müssen

Eine starke, meshed* Netzstruktur verhindert, dass ein einzelner Leitungs- oder Kraftwerksausfall sofort zu einem grossflächigen Blackout führt.

* Wenn man vom „meshed network“ spricht, meint man ein vermaschtes Stromnetz. Das ist das Gegenteil von einem linear oder sternförmig aufgebauten Netz, bei dem Strom nur auf einem einzigen Weg von der Erzeugung zum Verbraucher fliesst.

In einem vermaschten Netz gibt es viele redundante Leitungen und Kreuzverbindungen, sodass Strom über mehrere Routen fliessen kann, wenn eine Leitung ausfällt. Dieses Design erhöht die Netzstabilität.

Marktmechanismen und Handelsfahrpläne

Auch der Strommarkt trägt indirekt zur Stabilität bei. In der Schweiz plant man Handelsfahrpläne für Im- und Exporte im Voraus. Diese sind theoretisch wirtschaftlich motiviert, wirken aber physikalisch auf die Netzfrequenz, weil physisch eingespeister Strom die Frequenz beeinflusst. Wenn Handelsfahrpläne und reale Einspeisung stark auseinanderlaufen, steigt das Risiko von Frequenzabweichungen. Deshalb gibt es Marktregeln, die Reservekraftwerke für Notfälle und kurzfristige Regelernergie bereithalten.

Schutz- und Lastabwurfssysteme

Falls trotz aller Massnahmen die Frequenz zu stark abweicht (unter 49,5 Hz in der CH), greifen automatische Lastabwürfe, d. h. bestimmte Verbraucher werden gezielt abgeschaltet, um das Netz zu stabilisieren. Diese Massnahmen sichern die verbleibenden Netzteile, bevor ein grossflächiger Blackout entsteht.

STÖRFAKTOREN FÜR EIN STABILES NETZ

Fluktuierende Einspeisung aus erneuerbaren Quellen

Wind- und Solarenergie sind nicht steuerbar, sondern wetterabhängig. Stark schwankende Einspeisung kann Frequenz und Spannung destabilisieren, besonders wenn gleichzeitig schwingende Energie durch konventionelle Kraftwerke reduziert wird. Wenn die Schwankungen grösser sind als die vorhandene Primärregelung und Speicherkapazität, steigt das Risiko von Unterfrequenz oder Überfrequenz.

Störungen im Ausland / Verbundnetz

Die Schweiz ist stark mit dem europäischen Netz verbunden. Probleme in Nachbarländern wirken sich sofort auf die Schweiz aus, z. B. Netzausfälle, Frequenzabweichungen oder unerwartete Handelsflüsse. Der internationale Stromhandel kann zusätzliche Unsicherheiten erzeugen, wenn Fahrpläne und tatsächliche Einspeisungen nicht übereinstimmen.

Kraftwerksausfälle und technische Defekte

Ein plötzlicher Ausfall grosser Kraftwerke, insbesondere Kernkraftwerke oder grosse Wasserkraftwerke, kann das Gleichgewicht sofort stören. Turbinenstörungen, Leitungsdefekte oder ungeplante Wartungen erhöhen das Risiko von Frequenzabfällen und erfordern schnelle Reaktion der Regelreserve.

Leitungsengpässe und Netzüberlastungen

Engpässe in Hochspannungsleitungen können lokal zu Überlastungen führen. Um Schäden zu vermeiden, schalten Schutzsysteme Leitungen ab, was wiederum Lastflüsse verschiebt und die Netzstabilität weiter belastet. Besonders in Winterspitzen oder bei Extremen in der Schweiz, wenn viele Netze parallel genutzt werden, ist dies kritisch.

Mangel an Schwungmassen / synthetischer Trägheit

Mit steigender Einspeisung von nicht-synchronisierten Quellen wie PV und Wind nimmt die physikalische Trägheit ab. Geringere Schwungmasse bedeutet, dass die Frequenz schneller abweicht, wenn es eine Störung gibt. Die Primärregelung kann dann überfordert sein, selbst bei kurzen Lastspitzen.

Verzögerungen oder Fehler im Regelbetrieb

Wenn die Primär-, Sekundär- oder Tertiärregelung nicht richtig funktioniert, z. B. durch Kommunikationsfehler, Softwareprobleme oder fehlerhafte Messungen, kann die Frequenz nicht rechtzeitig stabilisiert werden. Auch menschliche Fehler in Leitstellen tragen zu Unsicherheiten bei.

Extreme Verbrauchssituationen / Lastspitzen

Plötzliche Lastspitzen, z. B. durch Wetterextreme (Heizung im Winter, Klimaanlage im Sommer), können das Netz belasten, insbesondere wenn parallel Erzeugung aus erneuerbaren Quellen schwankt. In der Schweiz kann das regional zu Unterfrequenz führen, bevor Reservekraftwerke hochgefahren werden können.

Externe Ereignisse und Naturkatastrophen

Unwetter, Lawinen, Überschwemmungen, Erdbeben oder Blitzeinschläge können Leitungen, Umspannwerke und Kraftwerke beschädigen. Solche Ereignisse wirken sich direkt auf die physikalische Netzstabilität aus und können Notabschaltungen auslösen.

Cyber- und Sicherheitsrisiken

Digitale Steuerungen und Fernwartungen sind anfällig für Cyberangriffe, die gezielt Frequenz- oder Laststeuerung stören könnten. Auch Ausfälle von Kommunikationssystemen können die manuelle Koordination von Reservekraftwerken und Netzsteuerungen erschweren.

PHASEN EINES BLACKOUTS

VORPHASE / INSTABILITÄTSPHASE

Dauer: Sekunden bis wenige Minuten

- Für die Bevölkerung meist nicht wahrnehmbar
- Spannungsschwankungen, kurze Ausfälle, Netzschutz greift
- Diese Phase endet sehr abrupt

In der Vorphase bzw. Instabilitätsphase gerät das Stromnetz aus dem Gleichgewicht, etwa durch technische Störungen, Überlastung oder äussere Einflüsse. Schutzsysteme versuchen automatisch gegenzusteuern, was sich für die Bevölkerung höchstens durch kurze Spannungsschwankungen oder sehr kurze Stromunterbrüche bemerkbar macht. In der Regel wird diese Phase nicht bewusst wahrgenommen und dauert nur Sekunden bis wenige Minuten.

Netzbetreiber-Sicht

In der Vorphase beginnt das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch zu kippen. Aus Sicht des Netzbetreibers zeigt sich dies zuerst als leichte Frequenzabweichung von 50,0 Hz, typischerweise im Bereich von etwa 49,98 bis 50,02 Hz. Solche Abweichungen sind alltäglich und werden automatisch durch die Primärregelung ausgeglichen. Kraftwerke reagieren innerhalb von Sekunden, indem sie ihre Leistung minimal erhöhen oder reduzieren, ohne dass ein menschlicher Eingriff nötig ist.

Parallel greifen Sekundär- und Tertiärregelung, die innerhalb von Minuten gezielt Kraftwerke oder Speicher aktivieren. In dieser Phase versucht der Netzbetreiber aktiv, Handelsfahrpläne zu korrigieren, Reserven zu aktivieren oder Importe zu erhöhen. Für Endverbraucher bleibt diese Phase unbemerkt, da noch keine Schutzmechanismen ausgelöst werden und die Versorgung stabil erscheint.

ZUSAMMENBRUCHSPHASE

Dauer: Sekunden bis max. 1–2 Minuten

- Kaskadierende Abschaltungen im Verbundnetz
- Vollständiger Netzausfall tritt praktisch „sofort“ ein

In der Zusammenbruchphase kann das Netz nicht mehr stabil gehalten werden. Automatische Schutzabschaltungen greifen kaskadenartig, Kraftwerke trennen sich vom Netz und grosse Regionen verlieren innerhalb kürzester Zeit die Stromversorgung. Diese Phase läuft extrem schnell ab und führt praktisch unmittelbar zum grossflächigen Stromausfall.

Netzbetreiber-Sicht (Netzfrequenz kippt)

Kann das Ungleichgewicht nicht mehr ausgeglichen werden, sinkt oder steigt die Netzfrequenz schneller und stärker. Kritisch wird es ab etwa 49,8 Hz. In diesem Bereich beginnen erste automatische Schutzmechanismen, insbesondere frequenzabhängige Lastabwürfe bei grossen Verbrauchern und Industrieanlagen, die vertraglich zur Netzstabilisierung beitragen.

Fällt die Frequenz weiter auf etwa 49,5 Hz, greifen breit angelegte Unterfrequenz-Lastabwurfssysteme im Verteilnetz. Ganze Netzabschnitte werden automatisch vom Netz getrennt, um den verbleibenden Teil des Systems zu stabilisieren. Ziel ist es, durch Reduktion der Last die Frequenz wieder anzuheben. Diese Abschaltungen erfolgen ohne menschliches Zutun und innerhalb von Sekunden.

Sinkt die Frequenz unter etwa 49,0 Hz, wird es für Kraftwerke selbst gefährlich. Turbinen und Generatoren können bei zu niedriger Frequenz mechanisch beschädigt werden. Deshalb trennen sich viele Kraftwerke automatisch vom Netz. Dadurch verschärft sich das Problem weiter, da zusätzliche Erzeugung wegfällt. An diesem Punkt kommt es zur kaskadierenden Netzauftrennung, die in einen grossflächigen Blackout mündet.

BLACKOUT-PHASE (TOTALAUSFALL)

Dauer: mehrere Stunden bis mehrere Tage

Typische Annahmen:

- Ballungsräume: 24–72 Stunden
- Ländliche Regionen / Randnetze: 2–7 Tage
- Einzelne Gebiete: auch länger möglich

Wichtig:

- Mobilfunk fällt meist nach 1–4 Stunden aus

- Tankstellen funktionieren ohne Notstrom sofort nicht
- Supermärkte schliessen nach wenigen Minuten bis Stunden

In der Blackout-Phase liegt die Stromversorgung grossräumig vollständig oder nahezu vollständig still. Haushalte, Betriebe und Verkehrssysteme sind ohne Strom, Kommunikationsnetze fallen nach einiger Zeit ebenfalls aus und viele Infrastrukturen funktionieren nur noch eingeschränkt über Notstrom. Die Versorgung mit Wasser, Lebensmitteln und Treibstoff wird zunehmend schwierig, während die Bevölkerung auf Eigenvorsorge angewiesen ist.

Netzbetreiber-Sicht (System getrennt, Frequenz lokal Null)

In der Blackout-Phase existiert kein zusammenhängendes Verbundnetz mehr. Grosse Teile des Netzes sind spannungslos, die Netzfrequenz ist dort faktisch nicht mehr vorhanden, da keine rotierenden Generatoren mehr synchron laufen. Einzelne Kraftwerke oder Regionen können als Inselnetze weiterlaufen, sofern sie sich rechtzeitig stabilisiert haben, etwa Wasserkraftwerke mit Schwarzstartfähigkeit.

Aus Sicht des Netzbetreibers liegt der Fokus nun nicht mehr auf Frequenzregelung, sondern auf Netzschutz und Schadensvermeidung. Leitungen bleiben abgeschaltet, um unkontrollierte Wiedereinschaltungen zu verhindern. Der Stromhandel ist in dieser Phase vollständig bedeutungslos, da keine physikalischen Austauschmöglichkeiten mehr bestehen und alle Fahrpläne aufgehoben sind.

ABLAUF STAATLICHE HILFESTELLUNG

Eigenverantwortung der Bevölkerung (0-12 Stunden)

Was der Staat tut (im Hintergrund):

- Aktivierung von Krisenstäben (Bund/Kantone/Gemeinden)
- Lagebilder über Polizei, Netzbetreiber, Katastrophenschutz
- Sicherung kritischer Infrastruktur (Krankenhäuser, Wasserwerke)
- Vorbereitung von Notfallplänen

Was der Bürger davon merkt: Fast nichts.

Erwartung an Bürger:

- Selbsthilfe
- Notfallvorräte nutzen
- Keine aktive staatliche Unterstützung

👉 Wichtig: In dieser Phase wird ausdrücklich davon ausgegangen, dass Haushalte mindestens 48–72 Stunden selbst zurechtkommen.

Koordination & Sicherung (12–24 Stunden)

Staatliche Massnahmen:

- Polizei & Ordnungskräfte verstärkt im Einsatz
- Schutz kritischer Objekte (Wasser, Energie, Lebensmittel)
- Erste Notstromstützpunkte für Behörden
- Vorbereitung von Notfallinformationen (Radio, Lautsprecher)

Was du merkst:

- Mehr Polizei / Einsatzfahrzeuge
- Eventuell Lautsprecherdurchsagen
- Noch keine flächendeckende Hilfe

👉 Hilfe ist punktuell, nicht allgemein verfügbar.

Beginn sichtbarer staatlicher Hilfe (24–72 Stunden)

Jetzt geht man davon aus, dass Eigenvorsorge erschöpft sein kann.

Staatliche Hilfe greift sichtbar:

- Einrichtung von Notfalltreffpunkten
- Information
- Erste medizinische Hilfe
- Notrufe absetzen
- Notversorgung für:
 - Pflegebedürftige
 - Kranke
 - Kinder
- Teilweise Trinkwasser- und Lebensmittelverteilung
- Einsatz von Armee zur Unterstützung

Einschränkung:

- Hilfe nicht flächendeckend
- Lange Wartezeiten möglich
- Priorisierung nach Schutzbedürftigkeit

Katastrophenmodus (ab 72 Stunden)

Ab hier spricht man offiziell von einer nationalen bzw. regionalen Katastrophe.



Massnahmen:

- Voller Katastrophenschutz
- Rationierte Versorgung
- Feldküchen, Notunterkünfte
- Evakuierungen möglich (z. B. bei Wasser-/Heizungsausfall im Winter)
- Internationale Hilfe denkbar

Realität:

- Versorgung reicht nicht für Komfort
- Ziel ist Überleben & Stabilisierung, nicht Normalität

STABILISIERUNGS- UND WIEDERAUFBAUPHASE

Dauer: 12 Stunden bis mehrere Tage

- Erste Inselnetze nach 6–24 Stunden
- Kritische Infrastruktur zuerst
- Haushalte oft nur stundenweise Strom
- Vollständige Netzsynchronisation sehr komplex

In der Stabilisierungs- und Wiederaufbauphase beginnen die Netzbetreiber mit dem kontrollierten Wiederhochfahren des Stromnetzes. Zunächst werden Kraftwerke und kritische Einrichtungen versorgt, anschliessend schrittweise weitere Netzbereiche. Die Stromversorgung ist in dieser Zeit oft noch instabil und zeitlich begrenzt verfügbar, während Reparaturen und Abstimmungen im Hintergrund laufen.

Netzbetreiber-Sicht (Frequenzaufbau)

Der Wiederaufbau beginnt mit dem sogenannten Schwarzstart. Bestimmte Kraftwerke in der Schweiz, vor allem Wasserkraftwerke, können ohne externe Stromversorgung anlaufen. Diese bauen lokale Inselnetze mit stabiler Frequenz von 50 Hz auf. Erst wenn Frequenz, Spannung und Phasenlage stabil sind, können weitere Netzteile zugeschaltet werden.

Der Netzbetreiber achtet in dieser Phase extrem genau auf die Frequenz. Jede Zuschaltung von Verbrauchern oder Netzabschnitten bedeutet eine plötzliche Lastzunahme, die die Frequenz absenken kann. Deshalb erfolgt der Wiederaufbau schrittweise und langsam. Internationale Kuppelstellen werden erst dann wieder verbunden, wenn die Frequenz exakt synchronisiert ist, da sonst erneut Schutzabschaltungen ausgelöst würden.

Der Stromhandel wird erst sehr spät wieder aufgenommen, da zunächst die physikalische Stabilität Vorrang hat. Wirtschaftliche Optimierung spielt erst dann wieder eine Rolle, wenn das Netz als Ganzes sicher betrieben werden kann.

NORMALISIERUNGSPHASE

Dauer: mehrere Tage bis Wochen

- Logistik, Lebensmittelversorgung, IT-Systeme laufen verzögert an
- Produktionsausfälle, Lieferkettenprobleme
- Gesellschaftlich relevante Nachwirkungen deutlich länger als der Stromausfall selbst

In der Normalisierungsphase ist die Stromversorgung weitgehend wiederhergestellt, doch die Auswirkungen des Blackouts bleiben spürbar. Lieferketten müssen neu anlaufen, IT-Systeme werden synchronisiert und Schäden werden behoben. Erst nach und nach kehren Versorgung, Wirtschaft und öffentlicher Alltag in einen stabilen Normalbetrieb zurück.

Netzbetreiber-Sicht (Rückkehr zur Regelzone)

In der Normalisierungsphase arbeitet das Netz wieder als Teil des europäischen Verbundsystems. Die Frequenz pendelt stabil um 50,0 Hz, Regelenergie steht wieder vollumfänglich zur Verfügung und der Stromhandel läuft wieder nach normalen Marktmechanismen. Dennoch bleibt das System erhöht überwacht, da nach einem Blackout noch lange erhöhte Risiken bestehen, etwa durch verzögert auftretende Schäden oder fehlerhafte Wiederschaltungen.