

Bestimmung praxistauglicher Schaltzustandswechsel im Übertragungsnetz

Felix Preuschoff*¹, Luna Zirkel*², Albert Moser

IAEW der RWTH Aachen University, Schinkelstraße 6, 52062 Aachen,
f.preuschoff@iaew.rwth-aachen.de, iaew.rwth-aachen.de

Kurzfassung:

Topologische Maßnahmen sind Teil der Engpassbehebung in modernen Übertragungsnetzen, doch ihre Optimierung ist aufgrund komplexer Wechselwirkungen herausfordernd. Diese Arbeit präsentiert ein erweitertes Modell zur Schaltzustandsoptimierung, das durch einen „Topologiefahrplan“ Schalthandlungen zeitlich verteilt und den operativen Aufwand reduziert. Ein binäres lineares Optimierungsmodell berücksichtigt dabei maximale Schaltaufwände und bestimmt die zeitliche Planung der topologischen Maßnahmen.

Untersuchungen in einem modifizierten IEEE 118-Knoten-Netz zeigen, dass der Schaltaufwand effektiv reduziert werden kann. Die Engpassbehebung erzielte gemischte Ergebnisse; in einigen Fällen erhöhte sich der Redispatch-Bedarf, in anderen wurde er reduziert. Zukünftig ist durch Nutzung von Sensitivitäten geplant, das Reduktionsverfahren weiter zu verbessern.

Keywords: Topologiemassnahmen, Schaltzustandsoptimierung, Engpassmanagement

1 Motivation und Fragestellung

Im Netzengpassmanagement deutscher Übertragungsnetze sind Engpässe in steigender Häufigkeit und hohem Schweregrad zu verzeichnen [1]. Zur Behebung der Engpässe stehen den deutschen Übertragungsnetzbetreibern neben marktbezogenen Maßnahmen (bspw. Redispatch) auch netzbezogene Maßnahmen (bspw. PST-Stufungen, HGÜ-Arbeitspunktänderungen) zur Verfügung [§13 EnWG]. Eine weitere netzbezogene Maßnahme besteht in der Ausnutzung bestehender topologischer Freiheitsgrade zur Engpassbehebung, sog. Topologiemassnahmen. Durch Änderung des Schaltzustands können Leistungsfluss und die Sensitivitäten im Netz systematisch beeinflusst werden. [2]

Im Netzengpassmanagement spielen topologische Maßnahmen eine entscheidende Rolle, um Überlastungen zu minimieren und die Stabilität des Stromnetzes zu gewährleisten. In Deutschland basieren die Entscheidungen über solche Maßnahmen auf Erfahrungswissen der Schaltungsingenieur*innen und umfangreichen Netzsimulationen. Angesichts der ständig

¹Jungautor

²Jungautorin

*Autor:innen haben gleichermaßen zur Veröffentlichung beigetragen

steigenden Komplexität der Stromnetze wird jedoch deutlich, dass diese Herangehensweise an ihre Grenzen stößt. [3]

Die größten Herausforderungen ergeben sich aus den komplexen, nichtlinearen Wechselwirkungen verschiedener topologischer Maßnahmen auf den Systemzustand. Eine systematische und mathematisch fundierte Bestimmung optimaler Topologiemassnahmen ist daher äußerst anspruchsvoll. Zur Reduzierung dieser Komplexität haben sich Ansätze basierend auf robusten Topologien als vielversprechend erwiesen. Diese Ansätze ermöglichen es, Lösungen zu finden, die gegenüber verschiedenen Netznutzungssituationen robust sind. [4]

Allerdings führen diese Methoden oft dazu, dass mehrere Schaltmaßnahmen für jeden Topologiewechsel berücksichtigt werden müssen. In der Praxis resultiert daraus in kurzer Zeit ein hoher Schaltaufwand, der die verfügbaren personellen und zeitlichen Ressourcen übersteigt. Dies stellt die Netzbetreiber vor operative Herausforderungen, da die Umsetzung jeder Schalthandlung eine vorherige, gründliche Prüfung technischer und betrieblicher Randbedingungen erfordert. [3]

Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Notwendigkeit, einen „Topologiefahrplan“ zu entwickeln, der mit den vorhandenen personellen Ressourcen vereinbar ist. Es bedarf einer Methode, die robuste Topologien auf eine geringere Anzahl von topologischen Maßnahmen bzw. auf praxistaugliche Schaltzustandswechsel reduziert. Dabei sollte sichergestellt werden, dass die Netzsicherheit weiterhin gewährleistet ist und Engpässe effektiv gemanagt werden.

Die zentrale Fragestellung dieser Veröffentlichung lautet daher:

- Wie kann ein Verfahren gestaltet werden, das unter Berücksichtigung der begrenzten personellen und zeitlichen Ressourcen des Betriebspersonals die Anzahl der notwendigen Schaltmaßnahmen minimiert und gleichzeitig eine effiziente Netzbetriebsführung ermöglicht?

Ziel ist es, eine Methode zu entwickeln, die den Schaltaufwand durch optimierte Planung und Priorisierung von Schalthandlungen reduziert. Dadurch soll ein Gleichgewicht zwischen operativer Machbarkeit und effektiver Netzengpassbehebung erreicht werden. Die Lösung soll es ermöglichen, Schaltzustandswechsel strategisch zu planen und gegebenenfalls vorbereitende Maßnahmen zu weniger kritischen Zeiten durchzuführen, um die Belastung des Betriebspersonals zu Spitzenzeiten zu verringern.

2 Topologiemassnahmen

Topologiemassnahmen sind gezielte Veränderungen der Netzkonfiguration in elektrischen Übertragungsnetzen, die dazu dienen, Engpässe zu beheben und die Netzstabilität zu verbessern. Sie nutzen die vorhandenen Schaltmöglichkeiten innerhalb von Schaltanlagen, um den Leistungsfluss zu beeinflussen und Überlastungen zu vermeiden. [4]

Umspannwerke europäischer Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) verfügen in der Regel über Schaltanlagen mit mehreren Sammelschienen je Spannungsebene. Diese Sammelschienen können über Sammelschienenkupplungen (Leistungsschalter) miteinander verbunden oder getrennt werden. Jeder Abzweig, der Verbindungen zu Generatoren, Leitungen oder Transformatoren darstellt, kann über Trenner flexibel an jede Sammelschiene angeschlossen

werden. Durch vielfältige Umbelegungsmöglichkeiten sowie Kombinationen von Kupplungsschaltungen und Abzweig-Trennerschaltungen ergeben sich unterschiedliche Schaltkomplexitäten für einen Topologiewechsel. [2]

Topologieänderungen beeinflussen die Netzimpedanzen und nach durchgeführter Schaltung stellt sich gemäß der neuen Impedanzverhältnisse ein veränderter Leistungsfluss ein. [5]

Die wichtigsten Arten von Topologiemassnahmen sind:

- Leitungsschaltungen: Hierbei werden Schalter geöffnet oder geschlossen, um bestimmte Leitungsabschnitte vom Netz zu trennen oder in das Netz einzubinden.
- Umkonfiguration von Schaltanlagen:
 - Sammelschienen-(Ent)Kupplung: Durch das Öffnen oder Schließen von Sammelschienenkupplungen können Sammelschienen innerhalb einer Schaltanlage miteinander verbunden oder getrennt werden.
 - Umbelegung: Abzweige werden auf andere Sammelschienen umgelegt. Dies ist nur effektiv in Kombination mit entkuppelten Sammelschienen, da die Umbelegung erst nach der Entkupplung elektrisch wirksam wird. Ein Abzweig kann sowohl Quer- als auch Längszweige anbinden.

Durch mathematische Modellierung lassen sich optimierte Schaltentscheidungen treffen, um Engpässe kosteneffizient zu beheben und gleichzeitig die Netzsicherheit zu gewährleisten. Topologiemassnahmen sind netzbezogene Massnahmen und daher kosteneffizienter als marktbezogene Massnahmen (bspw. Redispatch). Sie bieten ein wirkungsvolles Instrument, um flexibel auf wechselnde Netzbedingungen zu reagieren und den Betrieb des Übertragungsnetzes effizient zu gestalten. Ihre Optimierung stellt aufgrund der kombinatorischen Komplexität eine Herausforderung dar.

3 Modellaufbau

Zur Bewältigung der komplexen Anforderungen im Netzengpassmanagement wird ein mehrstufiges Modell entwickelt, welches eine effiziente Planung und Umsetzung von topologischen Massnahmen ermöglicht. Dieses Modell integriert verschiedene Optimierungsschritte und Leistungsflussberechnungen, um einen "Topologiefahrplan" zu erstellen, der den operativen Einschränkungen und Ressourcen des Netzbetriebs entspricht. Die Kerninnovation besteht in der Reduktion des Schaltaufwands durch eine optimierte Sequenzierung der Schalthandlungen. Das Modell besteht aus den folgenden neun Schritten:

3.1 Netzmodellauflbereitung

Zu Beginn wird das detaillierte Netzmodell aus einer zentralen Datenbank exportiert und in ein Knoten-Zweig-Modell überführt. Dabei werden die aktuellen Marktdaten mit dem Netzmodell verknüpft, um eine realitätsgetreue Simulation des Netzzustandes zu gewährleisten.

3.2 Basis-Leistungsflussberechnung

Auf Grundlage des exportierten Netzmodells wird für alle Zeitschritte eine Leistungsflussberechnung durchgeführt. Dieser Schritt dient zur Bestimmung der Grundausslastung der Betriebsmittel.

3.3 Basis-Engpassbehebung

In diesem Schritt wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (MILP) gelöst, um die kosteneffiziente Einsatzplanung von Engpassbehebungsmaßnahmen (EBM) zu bestimmen. Die Zielfunktion minimiert die kalkulatorischen Kosten der EBMs unter Berücksichtigung folgender Freiheitsgrade:

- Anpassung der Wirkleistungseinspeisung je Erzeugungsanlage
- Anpassungen der Betriebszustände von Erzeugungsanlagen (Ein-/Ausschalten)
- Stufung von Phasenschiebertransformatoren
- Anpassungen von HGÜ-Arbeitspunkten

Die Nebenbedingungen sichern die Einhaltung des (n-1)-Kriteriums, wobei die Auswirkungen der EBM auf die Betriebsmittelauslastungen mittels linearer Sensitivitätsfaktoren (PTDF und LODF) abgeschätzt werden. Das Ergebnis umfasst die optimalen Anpassungen der Betriebsmittel, die Betriebszustände der Quersysteme und den minimalen Zielfunktionswert.

3.4 Schaltzustandsoptimierung

Dieser Schritt zielt darauf ab, geeignete topologische Maßnahmen auszuwählen und zu kombinieren, um Engpässe weiter zu reduzieren. Aufgrund der hohen Kombinationsvielfalt möglicher Schaltmaßnahmen wird eine heuristische Vorselektion durchgeführt:

- Vorselektion von Schaltmaßnahmen: Es werden alle zulässigen Schaltmaßnahmen anhand von Sensitivitätsanalysen und vereinfachten linearen Optimierungen bewertet. Maßnahmen, die eine Überlastungsreduktion und/oder eine Senkung der erwarteten EBM-Einsätze versprechen, werden weiter berücksichtigt.
- Kombination zu Topologien: Die ausgewählten Maßnahmen werden zu kompatiblen und zusammenhängenden Netztopologien kombiniert. Dabei wird die Anzahl geänderter Schaltanlagenkonfigurationen und die maximal erlaubte Anzahl von Umbelegungen je Schaltanlage beschränkt, um Praktikabilität und Nähe zur Ausgangstopologie zu gewährleisten.

Die resultierenden Topologien enthalten jeweils mehrere topologische Maßnahmen und dienen als zusätzliche Freiheitsgrade in der weiteren Optimierung.

3.5 Leistungsflussberechnung je Ergebnistopologie

Für jede der im vorigen Schritt generierten Topologien wird eine separate Leistungsflussberechnung für alle Zeitschritte durchgeführt. Dies ist notwendig, da Topologieänderungen signifikante Auswirkungen auf die initialen Betriebsmittelauslastungen haben können.

3.6 Engpassbehebungsoptimierung mit zusätzlichem Topologie-Freiheitsgrad

In diesem erweiterten Optimierungsschritt wird das MILP-Modell aus Schritt 3.3 um die Wahl der Topologie als zusätzlichem Freiheitsgrad ergänzt. Die Zielfunktion strebt weiterhin die Minimierung der EBMs an, jedoch unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte:

- **Topologiewahl:** Für jeden Zeitschritt wird genau eine der vorselektierten Topologien oder die Ausgangstopologie gewählt.
- **Mindestschaltzeit ($T_{\min}$):** Um häufige Topologieänderungen zu vermeiden und die Praktikabilität zu erhöhen, wird eine Mindestdauer eingeführt, während der eine gewählte Topologie beibehalten werden muss.
- **Nebenbedingungen:** Alle vorherigen Nebenbedingungen bleiben gültig, wobei das (n-1)-Kriterium für jede mögliche Topologie berücksichtigt wird.

Das Ergebnis dieses Schritts ist ein Topologie-Ablauf, der sowohl die zeitliche Abfolge der Topologien als auch die notwendigen EBMs enthält.

3.7 Bestimmung der Schaltübergänge

Dieser Schritt stellt die Kerninnovation des Verfahrens dar. Ziel ist es, den Schaltaufwand pro Zeitschritt auf ein praktikables Niveau zu reduzieren, indem die Schalthandlungen über mehrere Zeitschritte verteilt werden.

- **Identifikation von Schaltübergängen:** Basierend auf den Topologieänderungen identifiziert aus Schritt 3.6 werden Zeitfenster definiert, innerhalb derer die erforderlichen Schalthandlungen geplant werden (z. B. zwei Stunden vor und nach dem geplanten Topologieübergang).
- **Bewertung des Schaltaufwands:** Jede Schalthandlung wird hinsichtlich ihres Aufwands bewertet. Es wird angenommen, dass der Aufwand für eine Kupplungsöffnung als Basiseinheit dient, während komplexere Maßnahmen (bspw. Umbelegungen) mit höheren Faktoren (in Abh. der Basiseinheit) gewichtet werden.
- **Optimierung der Schaltsequenz:** Ein binäres lineares Optimierungsproblem wird formuliert, welches die Verteilung der Schalthandlungen innerhalb des definierten Zeitfensters optimiert. Die Zielfunktion setzt Anreize für eine zeitlich möglichst frühe Umsetzung der Schalthandlungen und kann angepasst werden, um einzelne Maßnahmen zu bevorzugen.

3.7.1 Nebenbedingungen:

- **Maximaler Schaltaufwand je Zeitschritt:** Sicherstellung, dass die Arbeitsbelastung für das Betriebspersonal in jedem Zeitschritt unter einem festgelegten Maximum bleibt.
- **Kohärenz der Schalthandlungen:** Gewährleistung, dass zusammenhängende Schalthandlungen (z. B. Umbelegung und nachfolgende Kupplungsöffnung) korrekt sequenziert werden.
- **Vorbereitung von Maßnahmen:** Ermöglichung der frühzeitigen Durchführung von Schalthandlungen (z. B. Umbelegungen zu weniger kritischen Zeiten), um die Spitzenbelastung zu reduzieren.

Das Ergebnis ist ein detaillierter Topologiefahrplan, in dem die Schalthandlungen über die Zeit so verteilt sind, dass der operative Aufwand minimiert wird.

3.7.2 Optimierungsproblem:

Das Optimierungsproblem ist wie folgt aufgebaut mit

- T : Mindestschaltzeit,
- T_d : Zeitintervall für Topologiewechsel $T_d \subseteq T$
- T_{slack} : Virtueller Zeitschritt; repräsentiert Nicht-Umsetzung,
- S : Menge der Schaltkombinationen,
- s_i : Score einer elementaren Schaltmaßnahme,
- $maxScore_t$: Zeitlich variabler Maximalscore je Stunde t ,
- x_{it} : Binärvariable; Schaltkombination i in Stunde t vollendet,
- y_{ijt} : Binärvariable; Umbelegung j der Schaltkombination i in Zeitschritt t ,
- K_i : Anzahl der Umbelegungen je Schaltkombination i ,
- λ : Strafterm je nicht umgesetzter Schaltkombination:

$$\text{Zielfunktion: } \min \sum_{i \in T} t \cdot \left(\sum_{i \in S} \left(\sum_{j=1}^{K_i} y_{ijt} \right) + x_{it} \right) + \lambda \cdot \left(\sum_{i \in S} \left(\sum_{j=1}^{K_i} y_{ijT_{slack}} \right) + x_{iT_{slack}} \right)$$

Die Zielfunktion stellt im ersten Term einen Anreiz, Schaltmaßnahmen möglichst frühzeitig umzusetzen und minimiert im zweiten Term die Anzahl nicht umgesetzter Schaltkombinationen.

Nebenbedingungen:

1. Führe jede Schaltkombination genau einmal durch
 $\sum_{t \in T \cup T_{slack}} x_{it} = 1 \quad \forall i \in S$ und $\sum_{t \in T \cup T_{slack}} y_{ijt} = 1 \quad \forall i \in S, \forall j \in \{1, \dots, K_i\}$
2. Berücksichtige Maximal-Score je Zeitschritt
 $\sum_{i \in S} \left(\sum_{j=1}^{K_i} s_j \cdot y_{ijt} \right) + s_i \cdot x_{it} \leq maxScore_t \quad \forall t \in T_d, \forall T_d \in T$
3. Umbelegungen vor (Ent-)Kupplungen erzwingen
 $\sum_{t \in T} t \cdot y_{ijt} \leq \sum_{t \in T} t \cdot x_{it} \quad \forall i \in S, \forall j \in \{1, \dots, K_i\}$
4. Falls (Ent-)Kupplung in Zeitschritt t durchgeführt wird müssen alle zugehörigen Umbelegungen bis Zeitpunkt t erfolgt sein
 $\sum_{t \in T} \sum_{j=1}^{K_i} y_{ijt} \leq K_i \sum_{t \in T} x_{it} \quad \forall i \in S$

Entscheidungsvariablen:

1. $x_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in S, \forall t \in T \cup T_{slack}$
2. $y_{ijt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in S, \forall j \in \{1, \dots, K_i\}, \forall t \in T \cup T_{slack}$

Nicht-Umgesetzte Schalthandlungen werden im Optimierungsproblem dem Hilfs-Zeitschritt T_{slack} zugeordnet. Nach Lösung des Optimierungsproblems werden die jedem Zeitschritt zugeordneten Schaltmaßnahmen in einzelne Topologien übersetzt um den folgenden Ablaufschritten zur Verfügung zu stehen.

3.8 Leistungsflussberechnung basierend auf Topologiefahrplan

Mit dem angepassten Topologiefahrplan aus Schritt 3.7 wird für jeden Zeitschritt eine Leistungsflussberechnung durchgeführt, um die Auswirkungen der neu geplanten Schalthandlungen auf die Netzlastflüsse zu analysieren.

3.9 Engpassbehebungsoptimierung mit Topologiefahrplan

Im finalen Schritt wird erneut eine Engpassbehebungsoptimierung durchgeführt, ähnlich zu Schritt 3.3. Dabei wird jedoch in jedem Zeitschritt die spezifische Topologie aus dem detaillierten Fahrplan berücksichtigt. Dadurch werden die EBMs an die tatsächlich geplanten Schalthandlungen angepasst.

3.10 Zusammenfassung des Modells

Das vorgestellte Modell ermöglicht eine integrierte Planung von Schaltzustandswechseln und Engpassbehebungsmaßnahmen unter Berücksichtigung operativer Randbedingungen. Durch die Einführung eines zusätzlichen Optimierungsschritts zur Sequenzierung der Schalthandlungen wird der Schaltaufwand auf ein umsetzbares Maß reduziert.

Besonders hervorzuheben ist die Flexibilität des Modells hinsichtlich der Anpassung an betriebliche Anforderungen:

- **Variable Schaltaufwandsgrenzen:** Der maximale Schaltaufwand kann zeitlich variabel festgelegt werden, um beispielsweise Schichtwechsel oder Verfügbarkeiten von Personal zu berücksichtigen.
- **Priorisierung von Schalthandlungen:** Durch Anpassung der Zielfunktionskoeffizienten können wichtige Maßnahmen zeitlich priorisiert werden.
- **Operative Praktikabilität:** Die Möglichkeit, vorbereitende Schalthandlungen in weniger kritische Zeiten zu verlagern, erhöht die Praktikabilität und Sicherheit der Netzbetriebsführung.

Zur Bestimmung eines „Topologiefahrplans“ entsprechend der betrieblich zur Verfügung stehenden personellen Ressourcen bedarf es einer Methode, welche die robusten Topologien auf eine kleinere Anzahl topologischer Maßnahmen bzw. praxistaugliche Schaltzustandswechsel reduziert.

4 Exemplarische Untersuchungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 350 verschiedene Netznutzungsfälle (NNF) in einem modifizierten IEEE 118 Knoten-Netz [6] simuliert und ein Topologiefahrplan durch das vorgestellte Verfahren berechnet. Dabei wurde auf eine Priorisierung einzelner Schalthandlungen durch Sensitivitäten verzichtet, um die Auswirkungen des Verfahrens isoliert zu betrachten.

Die folgenden Parametereinstellungen wurden für die Untersuchungen verwendet:

- *maxScore* je Zeitschritt:
 - Schichtwechsel (8, 16, 24 Uhr): 1
 - Nachtstunden (20-6 Uhr): 1
 - Tagstunden (6-20 Uhr): 6
 - Wochenende: 2
- Aufwand (Score) je Schalttyp:
 - Leitung Ein-/Ausschaltung: 6
 - Umbelegung: 4

- Kupplungsschaltung: 1
- Schaltübergangszeit: 4 Stunden

Die Scores je Schalttyp wurden gewählt, sodass eine Kupplungsschaltung die Schaltung mit dem geringsten Aufwand ist (lediglich ein Leistungsschalter ist zu bewegen). Leitungsschaltungen und Umbelegungen wurden mit einem höheren Aufwand eingeschätzt, da Trenner geschaltet werden müssen und ein deutlich erhöhter Prüfungs- und Koordinationsaufwand vom Personal zu leisten ist.

Die zentrale Hypothese der Untersuchung ist, dass der Topologiefahrplan nach Reduktion der Schaltmaßnahmen im Mittel zu einer Erhöhung des Redispatchabrufs führt, verglichen mit dem Ergebnis der Engpassbehebung unter vollständiger Ausnutzung der topologischen Freiheitsgrade. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurden die Ergebnisse der Engpassbehebung in den drei Teil-Verfahren miteinander verglichen:

- Basis: Initiale Engpassbehebung ohne topologische Maßnahmen (Schritt 3.3)
- Vor Reduktion: Engpassbehebung nach initialer Schaltzustandsoptimierung mit vollständigen topologischen Maßnahmen (Schritt 3.6)
- Nach Reduktion: Engpassbehebung nach Erstellung des reduzierten Topologiefahrplans (Schritt 3.9)

Zusätzlich wurde validiert, ob das Verfahren gemäß der gewählten Parametrierung in der Lage ist, die operative Praktikabilität sicherzustellen.

4.1 Operative Praktikabilität

Das Verfahren zeigte sich dazu in der Lage, einen Topologiefahrplan zu erstellen und dabei die festgelegten maximalen Schaltaufwände einzuhalten (siehe Abbildung 1). Es wurde eine Reduktion sowohl der Anzahl umgesetzter Maßnahmen als auch des gesamten Schaltaufwands beobachtet. Darüber hinaus konnte das Verfahren durch zeitliches Verzögern einzelner Maßnahmen hohe einmalige Schaltaufwände verringern. So wurde beispielsweise im NNF 13 ein zuvor hoher einmaliger Aufwand durch geringere Aufwände in aufeinanderfolgenden Stunden ersetzt. Infolgedessen weisen nun auch Netznutzungsfälle, die zuvor keine Schalthandlungen erforderten, im Rahmen des Topologiefahrplans Schalthandlungen auf.

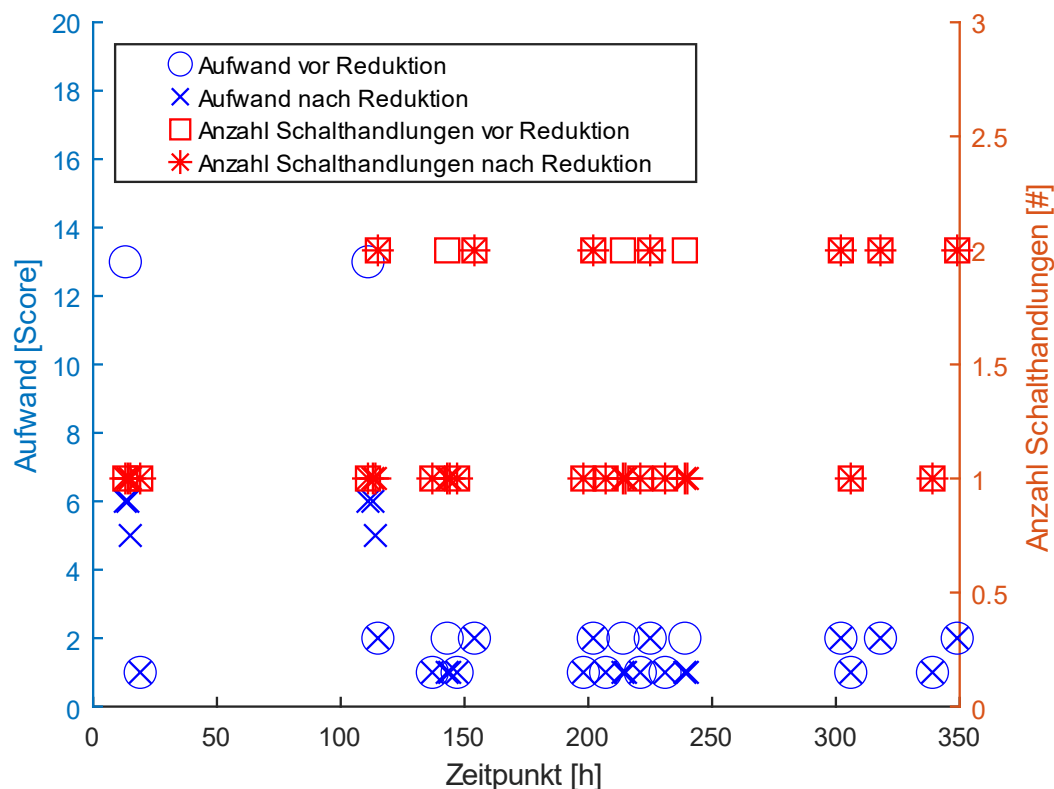


Abbildung 1: Schaltaufwand vor bzw. nach Anwendung des Verfahrens. Die Anzahl der umgesetzten Schaltaktionen (Leitungsschaltungen oder Umkonfigurationen) sind in Rot dargestellt.

4.2 Wirkung auf die Effizienz der Engpassbehebung

Aufgrund der zeitlichen Verzögerung von Schaltaktionen und der Nicht-Umsetzung einiger Maßnahmen ist ein Einfluss auf den zur Engpassbehebung notwendigen Redispatchabruf zu erwarten. In Abbildung 2 ist die abgerufene positive Redispatchleistung über die betrachteten Netznutzungsfälle dargestellt. In vielen Fällen (z. B. NNF 291 ff.) führte das Verfahren zu einer Verschlechterung der Ergebnisse im Vergleich zur initialen Schaltzustandsoptimierung, was sich in höheren Redispatch-Leistungen zeigt. In einigen Netznutzungsfällen (z. B. NNF 111 ff.) konnte hingegen eine Verringerung der Redispatchleistung erzielt werden.

Die aggregierte Betrachtung über alle 350 NNF zeigt, dass das Verfahren in diesem Untersuchungsszenario die insgesamt benötigte positive Redispatch-Energiemenge reduzieren konnte (siehe Abbildung 3).

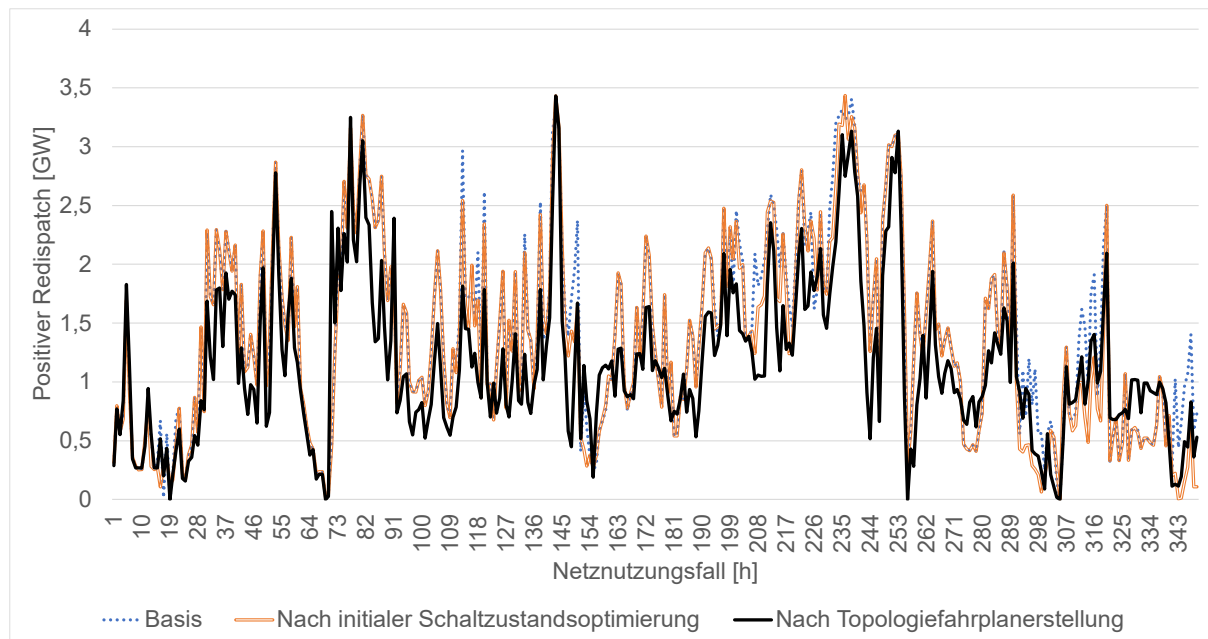


Abbildung 2: Dargestellt ist die zur Engpassbehebung benötigte positive Redispatchleistung über 350 Netznutzungsfälle.

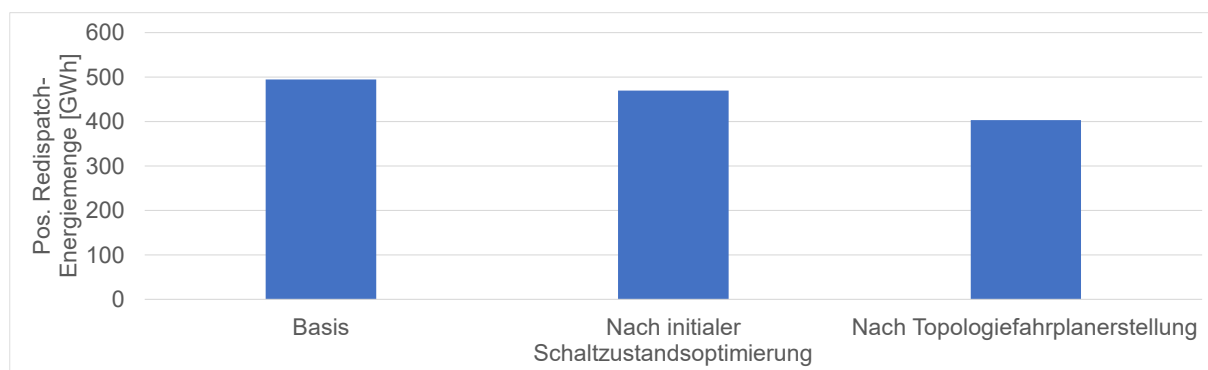


Abbildung 3: Zur Engpassbehebung in allen NNF benötigte positive Energiemenge.

5 Diskussion und weiterer Untersuchungsbedarf

Die gezeigten Ergebnisse der Engpassbehebung zeigen ein gemischtes Bild. Die teilweise nur partielle Umsetzung geplanter topologischer Maßnahmen führte zu starken Abweichungen der benötigten Redispatchleistung, sowohl nach oben als auch nach unten. Durch die Wahl einer Topologie mit mehreren simultan umgesetzten topologischen Maßnahmen in Schritt 3.6 führt die Reduktion um eine topologische Maßnahme entweder zu einer Verbesserung, in vielen Fällen aber auch zu einer Verschlechterung.

Im Rahmen dieser Untersuchungen nutzt das Reduktionsverfahren keine Informationen über die Effektivität einer Maßnahme und trifft daher ggf. suboptimale Entscheidungen (vgl. NNF 156). Dem gegenüber stehen viele Netznutzungsfälle, in denen die Entscheidungen des Verfahrens vorteilhaft sind.

Die Reduzierung der insgesamt benötigten Redispatch-Energiemenge nach der Reduktion ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass Zeitkopplungen im Optimierungsverfahren den Einsatz von Speichern beeinflussten und somit die verfügbaren Redispatchpotentiale in

späteren NNF durch die Anforderungen aus früheren NNF beeinflusst wurden. Ebenso hat der Anreiz im Verfahren, topologische Maßnahmen möglichst früh innerhalb der Schaltübergangszeit umzusetzen, eine Verzerrung der Auswirkungen zur Folge. Maßnahmen werden so ggf. zeitlich zu früh umgesetzt.

5.1 Weiterer Untersuchungsbedarf

Angesichts teilweise wenig sinnvoller Reduktionsentscheidungen besteht Bedarf an einer Verfeinerung des Verfahrens. Durch die Verwendung von Sensitivitäten soll ein Ranking der topologischen Maßnahmen erstellt werden, um besonders effektive Maßnahmen zu priorisieren. Zukünftig sollte das Verfahren stets zugunsten der stärker entlastenden topologischen Maßnahmen entscheiden.

Des Weiteren ist eine Ausweitung der Untersuchungen auf andere Szenarien und eine deutlich höhere Anzahl von Netznutzungsfällen geplant, um ein fundierteres Verständnis für die Performance des Verfahrens zu erhalten. Das verwendete Testnetz, ein bereits gut ausgebautes Übertragungsnetz, wies in vielen NNF lediglich einen geringen Engpassbehebungsbedarf auf. Angesichts des absehbar verzögerten Netzausbaus sind daher Untersuchungen auf einem stärker von Engpässen betroffenen System vorgesehen.

Die für diese Untersuchung genutzte Parametrierung ging von einer sehr geringen Aufwandsgrenze aus. Daher ist zukünftig geplant, eine Variation der Parameter durchzuführen und die verschiedenen Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

6 Fazit

Die exemplarischen Untersuchungen haben gezeigt, dass das vorgestellte Verfahren grundsätzlich in der Lage ist, einen operativ praktikablen Topologiefahrplan zu erstellen und dabei die festgelegten Schaltaufwände einzuhalten. Allerdings weisen die Ergebnisse darauf hin, dass ohne Priorisierung der topologischen Maßnahmen die Effektivität der Engpassbehebung nicht durchgängig gewährleistet ist. Zukünftige Arbeiten sollten daher die Effektivität einzelner Maßnahmen stärker berücksichtigen und das Verfahren entsprechend anpassen. Durch die geplanten Erweiterungen und weiteren Untersuchungen kann das Verfahren zu einem wertvollen Werkzeug für die Schaltzustandsoptimierung werden, welches operative Einschränkungen berücksichtigt.

Literatur

- [1] Bundesnetzagentur: „Monitoringbericht 2024“ und Quartalsberichte bis Q3 2024, Bonn, 2025
- [2] Moormann, Andreas: „Ermittlung robuster Schaltzustände für den Betrieb elektrischer Übertragungsnetze“, Dissertation, RWTH Aachen University, 2019
- [3] Preuschoff, Felix; Fester, Christian; Stein, Sebastian; Lichtinghagen, Julian; Hoffrichter, André: „Investigating Network Topology Optimization in the German Transmission Grid Using Real Operational Planning Data“, Konferenzbeitrag, VDE Netzregelung und Systemführung, München, 2024
- [4] Hoffrichter, André: „Verfahren zur Betriebssimulation zukünftiger elektrischer Übertragungsnetze“, Dissertation, RWTH Aachen University, 2020
- [5] Natemeyer, Hendrik: „Modellierung der Betriebsführung elektrischer Übertragungsnetze für Netzplanungsprozesse“, Dissertation, RWTH Aachen University, 2017
- [6] Meißner, Fabian et al.: „Developing a Benchmark Grid Model for Future Congestion Management and Stability Analysis“, ISGT, Dubrovnik, 2024