

Methoden der Erklärbarkeit von Reinforcement Learning Modellen zur Topologieoptimierung in Übertragungsnetzen

19. Symposium Energieinnovation @ TU Graz

Harald Jendrian, Reinaldo Tonkoski Junior, Ilja Krybus*

Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungsnetze

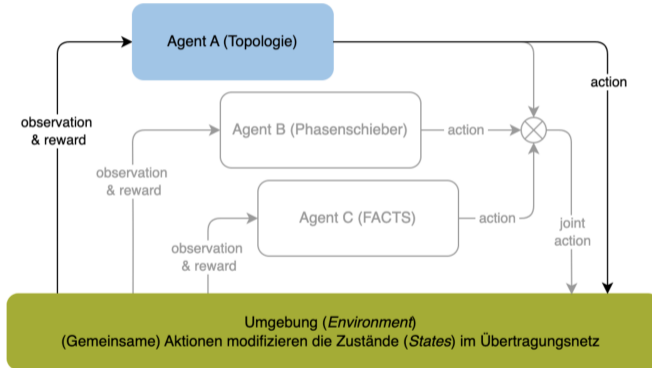
TUM School of Engineering and Design

*BearingPoint GmbH

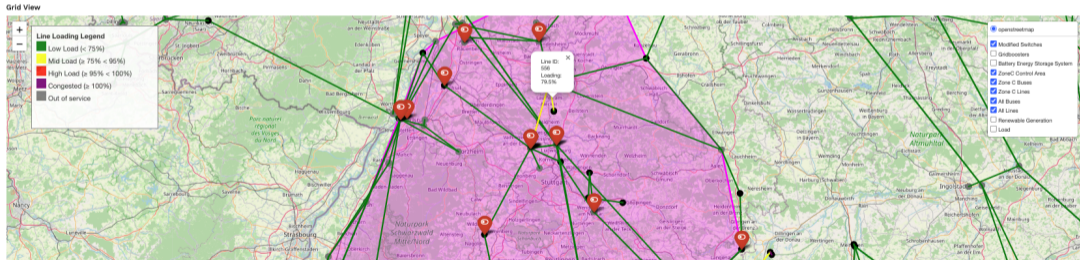
11.02.2026

Problem - Solution - Fit

- Übertragungsnetze werden zunehmend an den **Betriebsgrenzen** betrieben
- Entstehende **Netzengpässe** werden hauptsächlich durch **Redispatch** behoben
- Intelligente **Schalthandlungen** können eine kostengünstige Ergänzung sein
- Die **kombinatorische Komplexität** mit hunderten Schaltgeräten macht das Auffinden optimaler Topologien schwierig
- Folge: In der Systemführung bleibt die **Topologieoptimierung** oftmals ungenutzt



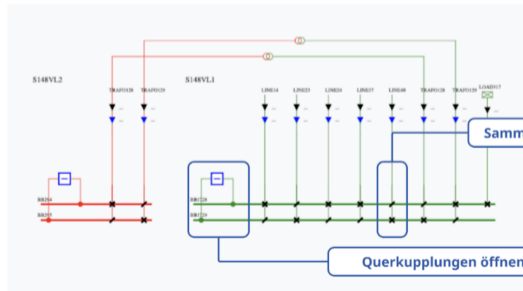
Das untersuchte Netz (max. Erzeugungsleistung: 4,6 GW, Jahreshöchstlast: 7,7 GW) entspricht einer Regelzone in Deutschland mit folgendem Netzmengengerüst: 99 Leitungen, 51 Lasten, 29 Transformatoren, 38 Generatoren und 498 Schaltgeräten.



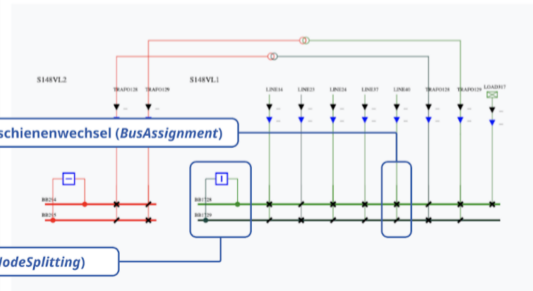
Case Study: Topologieoptimierung/Schalthandlungen

Das elektrische Netz wird als **Node-Breaker Modell** mit expliziter Schalterrepräsentation modelliert, wobei die Umspannwerke üblicherweise mit Doppelsammelschienensystemen abgebildet werden. Die Schaltgeräte sind entweder als Leistungsschalter oder Lasttrennschalter definiert und ergeben mit ihren diskrete Schaltzuständen die jeweilige **Topologieoption**.

SLD Before



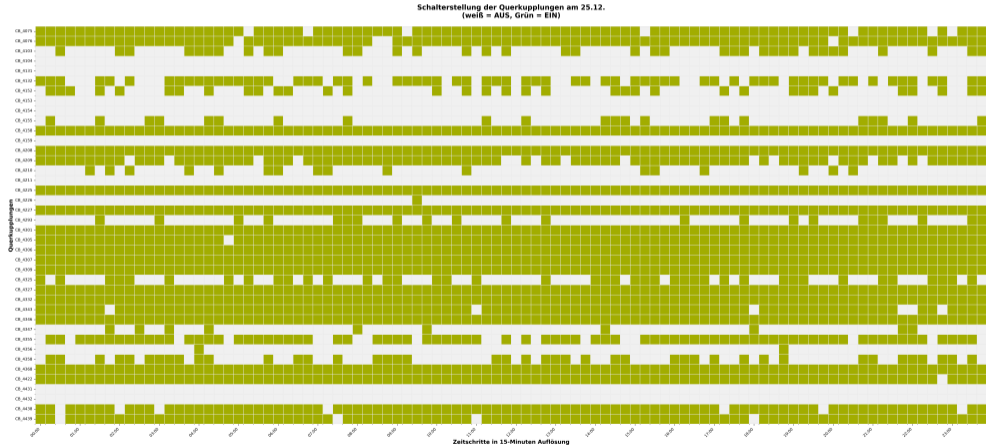
SLD After



Die Tabelle zeigt einen beispielhaften Dezembertag, an dem **12–21 Querkupplungen** geöffnet und **12–27 Sammelschienenwechsel** vorgeschlagen werden; in den frühen Abendstunden empfiehlt der Agent zusätzlich das kurzfristige Ausschalten einer Leitung. Dadurch sinkt die **durchschnittliche maximale Leitungsauslastung** von **108,99%** auf **85,57%**. Zudem zeigt der Tagesverlauf, dass diese Maßnahmen zwischen 00:30 und 5:30 Uhr N-1-Befunde beseitigen und Redispatchabrufe vermeiden.

Topology Options	Indicator	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30
Reference Topology	N-1 max loading (before)	135.0	133.4	159.7	128.1	134.4	136.1	157.3	129.3	131.9
Agent 1	N-1 max loading (after)	94.0	140.4	118.2	93.2	152.9	86.7	129.3	96.9	100.6
	Reduction rate	41.0	-7.0	41.5	34.9	-18.5	49.4	28.0	32.4	31,3
	#NodeSplitting	16	19	14	16	18	17	17	15	15
	#BusAssignment	18	20	19	21	20	23	20	24	17
	#LineDisconnect	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	#LineConnect	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Case Study: Topologieoptimierung an einem 25.12.



Über den Tagesverlauf werden die **Querkupplungen** in **1571** von **3840** Fällen offen betrieben (40.91%):

- Der Agent betätigt **durchschnittlich 16,36 Querkupplungen**; Spitzenwert: 21 Querkupplungen um 08:00 Uhr
- **8 von 40 Querkupplungen** sind ständig offen, **14 von 40 Querkupplungen** stets eingeschaltet
- Bei **18 von 40 Querkupplungen** wechselt der Agent zwischen offen und geschlossen
- Die **Querkupplungen** die am **häufigsten betätigt werden** sind: CB_4358 mit 57 Schaltspielen (geöffnet zu 52.1% der Zeit), CB_4103 mit 50 Schaltspielen (geöffnet zu 57.3% der Zeit), CB_4152 mit 47 Schaltspielen (geöffnet zu 66.7% der Zeit)

Explainable AI - Methoden der Erklärbarkeit

Zielsetzung: Identifikation der 10 effektivsten Querkupplungen (aka TOPTENCBs)

Methodik der Ablationsstudie:

- Systematisches "Wiedereinschalten" einzelner Querkupplungen zur Quantifizierung ihrer individuellen, marginalen Beiträge
- Vergleich der maximalen Leitungsauslastung mit und ohne spezifischer Querkupplung
- Analyse für einen 25.12. (96 Zeitschritte, 15-Minuten-Auflösung)

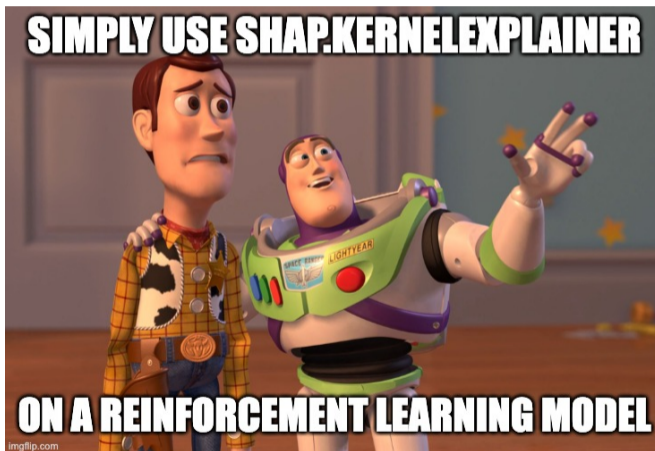
Experimentelles Vorgehen:

- **Baseline:** Evaluation der max. Leitungsauslastung mit allen 40 Querkupplungen aktiv
- **Ablation:** Für jede Querkupplung i :
 - Einschalten der Querkupplung + Lastflussrechnung mit Evaluation der max. Leitungsauslastung
 - Berechnung des marginalen Effekts: $\Delta_i = \text{Auslastung}_{\text{ohne},i} - \text{Auslastung}_{\text{mit},i}$

Bewertungskriterium:

- *Positiver Effekt* ($\Delta > 0$): Verschlechterung ohne Querkupplung \rightarrow Vorteilhaft
- *Negativer Effekt* ($\Delta < 0$): Verbesserung ohne Querkupplung \rightarrow Nachteilig
- *Neutraler Effekt* ($\Delta = 0$): keinen Einfluss ohne Querkupplung \rightarrow Nachteilig

Rang	Index	Marginaler Effekt	Kategorie	Schaltspiele
1	CB_4210	+5.90%	*** KRITISCH	OFFEN 79.2% der Zeit (76/96)
2	CB_4152	+3.77%	*** KRITISCH	OFFEN 66.7% der Zeit (64/96)
3	CB_4293	+3.70%	*** KRITISCH	OFFEN 70.8% der Zeit (68/96)
4	CB_4211	-0.92%	△ NACHTEILIG	OFFEN 99.0% der Zeit (95/96)
5	CB_4103	-0.85%	△ NACHTEILIG	OFFEN 57.3% der Zeit (55/96)
6	CB_4104	-0.79%	△ NACHTEILIG	immer OFFEN (100%)
7	CB_4153	+0.68%	✓ VORTEILHAFT	immer OFFEN (100%)
8	CB_4154	+0.58%	✓ VORTEILHAFT	immer OFFEN (100%)
9	CB_4431	-0.55%	△ NACHTEILIG	immer OFFEN (100%)
10	CB_4209	+0.43%	✓ VORTEILHAFT	OFFEN 18.8% der Zeit (18/96)



Methodik

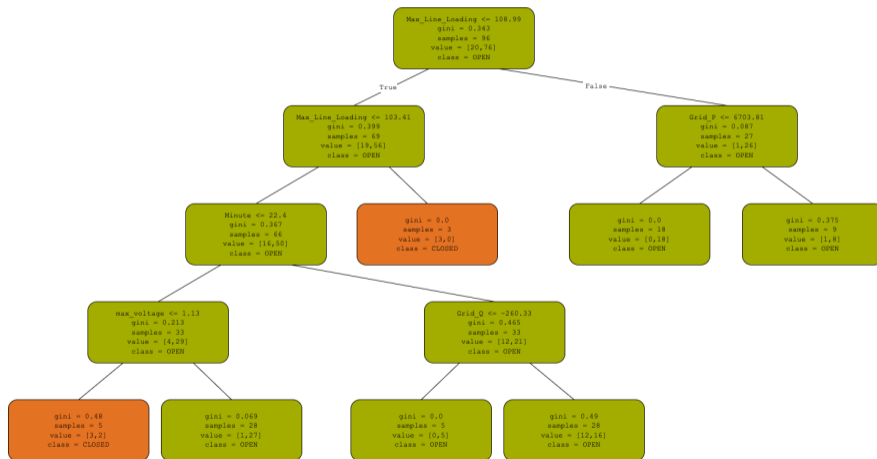
- Training eines DecisionTreeClassifier auf Basis der vom Agenten beobachteten Netzzustände und durchgeführten Schalthandlungen (NODESPLITTING)

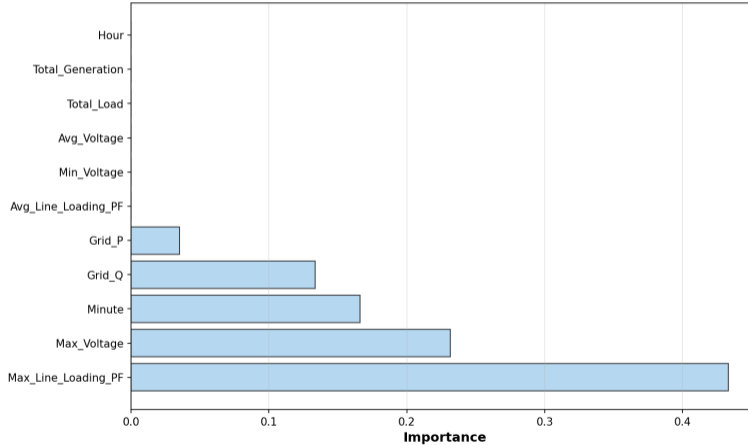
Eingangsmerkmale (11 Features):

- *Leitungsauslastung*: Max./Mittelwert der Leitungsauslastung (in %)
- *Spannungsprofil*: Max./Min./Mittelwert der Knotenspannungen (p.u.)
- *Leistungsbilanz*: Gesamtlast, Erzeugung, Randnetze P/Q (MW/MVAr)
- *Zeitliche Merkmale*: Stunde, Minute

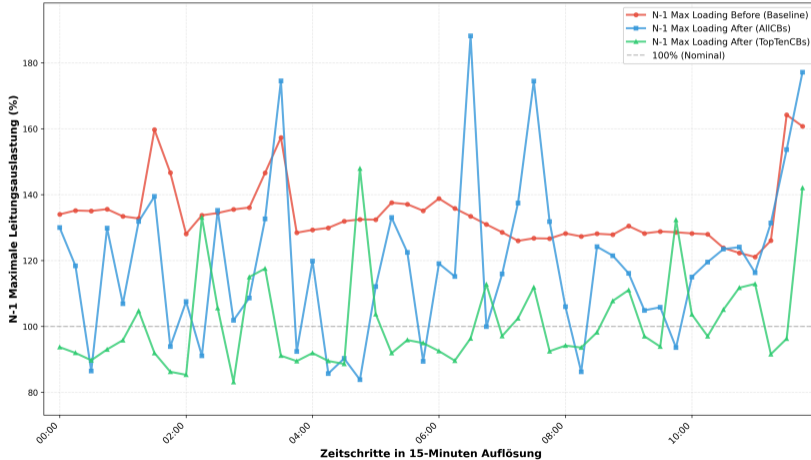
Ergebnisse:

- Visualisierung der Entscheidungsbäume
- Feature Importance Ranking (Gini-Impurity)





- Die Leitungsauslastung im Netzgebiet ist das wesentliche Merkmal wenn Querkuppungen betätigt werden (NODESPLITTING)
- Die Querkuppungen werden unterschiedlich stark von der Leitungsauslastung beeinflusst:
 - **CB4210** wird überwiegend von der max. Leitungsauslastung getrieben (43.4%)
 - **CB4293** wird überwiegend von die max. Leitungsauslastung (35.3%) + durchschn. Leitungsauslastung getrieben (20.9%)
 - **CB4103** wird überwiegend von die durchschn. Leitungsauslastung getrieben (26.2%)
 - **CB4152** wird nur moderat von der durchschn. Leitungsauslastung getrieben (12.3%)
 - **CB4209** wird nur kaum von der durchschn. Leitungsauslastung getrieben 3.9%)
- Die Querkuppungen **CB4211**, **CB4104**, **CB4153**, **CB4154**, **CB4431** sind herausgenommen, da sie zu 99% - 100% offen betrieben werden



Problemstellung & Lösung:

- Prototypische Anwendung eines Reinforcement Learning Agenten zur Topologieoptimierung in Übertragungsnetzen; verdeutlicht an einer deutschen Regelzone
- Case Study für einen 25.12.: Reduktion der durchschnittlichen maximalen Leitungsauslastung von 108,99% auf 85,57%

Angewandte XAI Methoden:

- *Ablation Programming*: Identifikation der Top 10 effektivsten Querkupplungen
- *Decision Trees*: Baumstruktur zur Extraktion interpretierbarer Wenn-Dann-Regeln
- *SHapley Additive exPlanations*: Die SHAP Werte lassen sich nicht vollständig ermitteln, da die notwendigen Probabilities nicht zielführend extrahiert werden können

Nächste Schritte:

- Ausweitung der Ablation Programming und Decision Tree Analysen auf Jahresbasis
- Integration von SHAP Explainer in den Training Loop
- GNN-basiertes Surrogate Model zur Integration von N-1 Befunden in die Reward Function

Danke für die Aufmerksamkeit!