

Ein Beitrag zur automatisierten Netzrekonfiguration in der Niederspannung

Daniel HERBST, Robert SCHÜRHubER, Ernst SCHMAUTZER

TU Graz – Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Inffeldgasse 18/I, A-8010 Graz,
+43 316 873-7551, office.ian@tugraz.at, ian.tugraz.at

Kurzfassung: Gemeinsam mit den politischen Zielen, die mit einer möglichst ökonomischen und ökologisch verträglichen Stromversorgung einhergehen, ergeben sich neuartige Herausforderungen für die elektrischen Stromverteilernetze zB in Hinblick auf bidirektionale Lastflüsse oder lokale Überlastungen. Eine mögliche Lösung ist dabei eine temporäre, automatisierte Netzrekonfiguration bzw. eine (Teil-)Vermaschung in der Niederspannungsebene. Dieser Beitrag stellt einen dafür im Kontext des Forschungsprojekts Power System Cognification (PoSyCo) entwickelten Algorithmus vor und vermittelt einen Eindruck der praktischen Umsetzung sowie der Bewertungsmöglichkeiten von Netzrekonfigurationen und der zu bevorzugenden Lastverteilung im Verteilernetz anhand eines eigens dafür aufgebauten Labordemonstrators. Ebenso werden die Auswirkungen auf den Netzschutz und die Schutzmaßnahmen berücksichtigt.

Keywords: Niederspannung, Verteilernetz, Schutz, Netzrekonfiguration, automatisierte Rekonfiguration

1 Einleitung

Einhergehend mit den politischen Zielen einer möglichst ökonomischen und ökologisch verträglichen Stromversorgung ergeben sich unter anderem neuartige Herausforderungen für die elektrischen Energieversorgungsnetze. Beispielsweise resultiert dies in der vermehrten Durchdringung der Niederspannungsverteilernetze (d.h. sowohl Niederspannungsverteil- als auch -verteilernetze, 230/400 V) mit dezentralen, erneuerbaren Energiequellen wie beispielsweise Photovoltaikanlagen oder aber auch leistungsstarken Verbrauchern, zB Ladestationen für Elektrofahrzeuge, Klimaanlage bzw. Wärmepumpen [1]. Traditionelle Planungskriterien, wonach im Wesentlichen mit Lastflüssen von großen Erzeugungseinrichtungen (situiert in höheren Spannungsebenen) hin zu dezentralen Verbrauchern (im Niederspannungsnetz) kalkuliert wird, sind dabei nicht mehr anwendbar. Die Umkehr des Lastflusses verursacht durch dezentrale Erzeuger bis in die übergeordneten Netzebenen sowie die bereits genannten, neu hinzukommenden leistungsstarken Verbraucher können dabei zu lokalen Überlastungen des konventionellen, radial betriebenen Niederspannungsnetzes führen [2].

Eine mögliche Abhilfe ist dabei eine temporäre, automatisierte Netzrekonfiguration und eine Vermaschung auf der Niederspannungsverteilernetzebene. Dieser Beitrag stellt einen dafür im Kontext des Forschungsprojekts Power System Cognification (PoSyCo) entwickelten Algorithmus vor und vermittelt einen Eindruck der praktischen Umsetzung sowie der Bewertungsmöglichkeiten von Netzrekonfigurationen und der zu bevorzugenden

Umschalt- bzw. Rekonfigurationsmöglichkeiten (sprich Schaltelemente) bietet, ergeben sich im Sinne der Booleschen Algebra $2^4 = 16$ unterschiedliche Netzkonfigurationen, wofür der in Python entwickelte Algorithmus mit Hilfe der Netzberechnungssoftware DIgSILENT PowerFactory 16 Lastflussberechnungen der einzelnen Netzkonfigurationen durchführt.

Die Ergebnisse dieser, für jede Konfiguration durchgeführten Berechnungen bilden die Eingangsgrößen für das Submodul **Priorisierung**, wo weiterführend die bereits genannten KPIs kalkuliert werden, welche in Tabelle 2-1 zusammengefasst sind.

Tabelle 2-1: Übersicht der zur Priorisierung verwendeten KPIs [3-5]

Kennzahl	Beschreibung
KPI ₁	Verletzung der vorgegebenen Spannungsgrenzen ($V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$)
KPI ₂	Verletzung der zulässigen Auslastungsgrenzen einer Leitung
KPI ₃	Gesamtverluste des jeweiligen Netzabschnitts
KPI ₄	Reduktion der Auslastung der (basierend auf der QDS-Worst-Case-Betrachtung) am öftesten ausgelasteten Leitung
KPI ₅	Abstand/Distanz der (basierend auf der QDS-Worst-Case-Betrachtung) am öftesten ausgelasteten Leitung und dem jeweiligen Schaltelement
KPI ₆	Vermaschung des jeweiligen Netzabschnitts

Somit werden je Lastflussberechnung für die jeweilige Netzkonfiguration die KPIs 1 bis 6 berechnet, wobei aufgrund entsprechender Normierung die einzelnen Werte der Kennzahlen im Bereich von 0 bis 1 liegen können. Zur Priorisierung bzw. Bewertung der einzelnen Netzkonfigurationen werden die zugehörigen KPIs (welche in einem weiteren Bewertungsschritt auch gewichtet werden können) summiert und in aufsteigender Reihenfolgen sortiert. Aufgrund der definierten KPI-Berechnungsvorschriften ist dabei eine niedrige Summe der KPIs mit einer zu bevorzugenden Netzkonfiguration und eine hohe Summe mit einer nicht optimalen Netzkonfiguration gleichzusetzen.

Weiters besteht die Möglichkeit eines Eingriffs des Bedienpersonals in die Priorisierungsreihenfolge mittels des Submoduls **Auswahl** sodass der/die Betreiber*in etwaiges Expertenwissen oder Informationen über bevorstehende notwendige Wartungsarbeiten einbringen kann. Dabei wird die nach Prioritäten sortierte Liste der Netzkonfigurationen angezeigt und dem/der Betreiber*in eine manuelle Auswahl der zu bevorzugenden Netzkonfiguration ermöglicht.

Darüber hinaus ist mit dem Submodul **Bestätigung** die manuelle Freigabe der bevorstehenden Rekonfiguration vorgesehen, welche die dafür erforderliche Umschaltung und die/den Zuständige*n samt Zeitstempel dokumentiert.

Abschließend wird die tatsächliche Rekonfiguration mittels des Submoduls **Ausführung** initiiert und die dafür erforderlichen Schaltelemente (bspw. Leistungsschalter) automatisiert angesteuert. Wesentlich dabei ist auch noch die Implementierung einer zeitlichen Verzögerung, durch die ein zu häufiges Umschalten unter den einzelnen Netzkonfigurationen vermieden werden soll. [3-5]

3 Simulationen mit digitalen Netzmodellen

Die Entwicklung sowie die software-basierten Tests des Algorithmus werden mit Hilfe digitaler Netzmodelle realisiert. Neben synthetischen Netzen samt generierten Lastdaten und einem Kerber-Netz [6] wird dafür exemplarisch das in Abbildung 3.1 dargestellte urbane Teilnetz TS10 aus dem Wiener Stadtentwicklungsgebiet aspern Seestadt verwendet. Der von zwei Transformatoren T1 und T2 (jeweils 630 kVA @ 20/0,4 kV) gespeiste Netzabschnitt versorgt über 22 Knoten 17 Haushaltskunden. Die dabei zur Anwendung kommende gesamte Länge der 21 Leitungen beträgt 1,58 km. Weiters kann das Teilnetz theoretisch an 4 Stellen mittels den Leistungsschaltern LS1 bis LS5 rekonfiguriert werden.

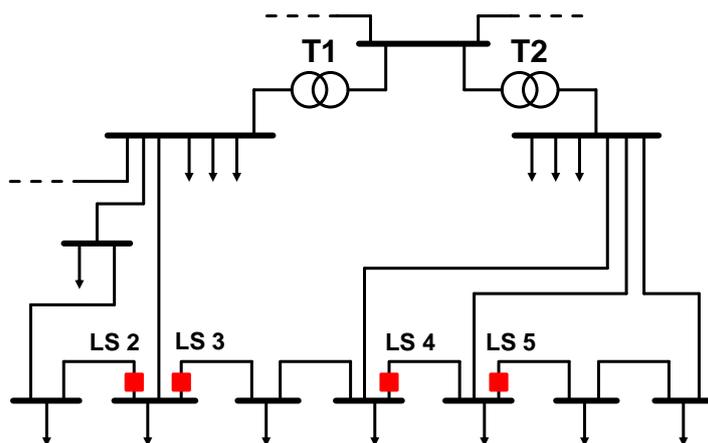


Abbildung 3.1: Vereinfachte Darstellung des Niederspannungsteilnetzes TS10, aspern Seestadt, Wien [7]

Für die genannten vier Schaltstellen LS2 bis LS5 ergeben sich im Sinne der Booleschen Algebra $2^4 = 16$ unterschiedliche Netzkonfigurationen welche in der folgenden Tabelle 3-1 exemplarisch veranschaulicht werden.

Tabelle 3-1: Übersicht der möglichen Netzkonfigurationen samt den zugehörigen Schalterstellungen [7]

Netz-konfiguration	Schalterstellung der Leistungsschalter			
	LS 2	LS 3	LS 4	LS 5
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8	1	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

Nach der automatisierten Priorisierung der 16 Netzkonfigurationen mit Hilfe des SMM-Algorithmus ergibt sich die in Abbildung 3.2 dargestellte Reihung der Konfigurationen (= äußerer Zahlenkreis) im Uhrzeigersinn in Form eines Radar Charts. Gemäß der erwähnten

Definition weist ein niedriger Wert eines KPIs auf eine zu bevorzugende Konfiguration hin, ein hoher Wert auf eine nicht optimale.

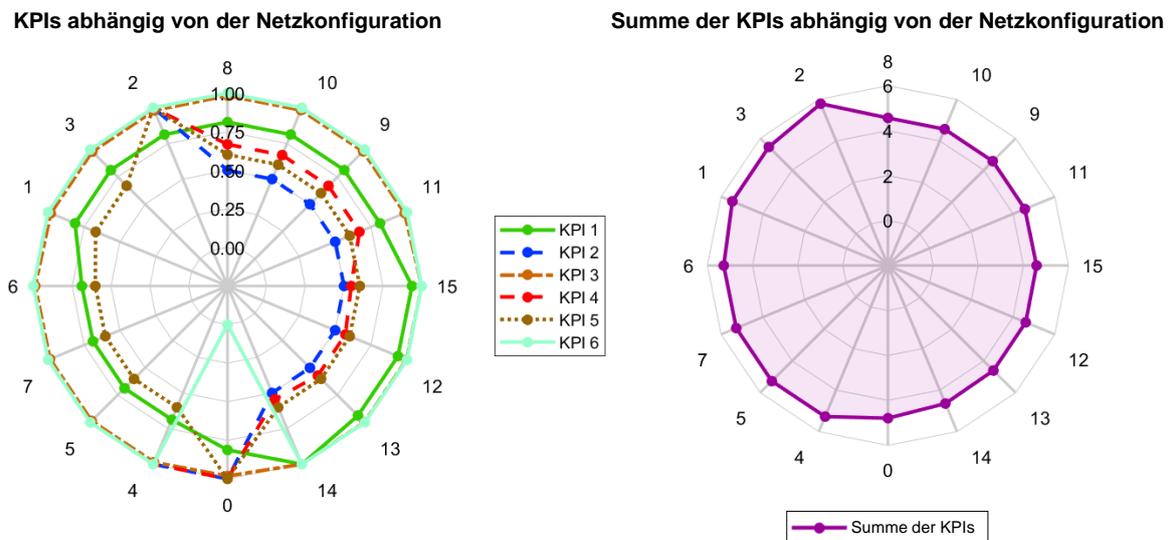


Abbildung 3.2: Ergebnis der automatisierten Netzrekonfiguration für das Teilnetz TS10 (aspers Seestadt, Wien), Szenario 3 (angereichert mit Photovoltaik und Elektromobilität) – 6 KPIs einzeln dargestellt, ungewichtet (links); Summe der 6 KPIs, ungewichtet (rechts); im Uhrzeigersinn absteigend sortiert nach deren Priorität [7]

Es ist zu erkennen, dass die einzelnen KPIs unterschiedliche Beiträge zur Gesamtpriorisierung leisten, wobei beispielsweise KPI₆ bei Netzkonfiguration 0 einen geringen (und damit guten) Wert annimmt (keine Vermaschung) aber zB KPI₄ (Reduktion der Auslastung der am öftesten ausgelasteten Leitung) einen hohen (und damit nicht optimalen) Wert ergibt. Das rechte Radar Chart aus Abbildung 3.2 zeigt demnach die Summe der einzelnen KPIs je Netzkonfiguration absteigend gereiht nach der sich ergebenden Prioritäten.

Aufgrund der im ersten Schritt nicht vorgenommenen Gewichtung der einzelnen sechs KPIs ergibt die maximale Summe im schlechtesten Fall den Wert 6,0 und im besten Fall 0,0. Im gewählten Beispiel errechnet der SMM-Algorithmus den niedrigsten Wert im Bereich von 4,0 bis 5,0 für Konfiguration 8 (12 Uhr am Radar Chart) bzw. den höchsten Wert knapp unter 6,0 für Konfiguration 2 (11 Uhr am Radar Chart). Gemäß den vorgenommenen Definitionen bedeutet dies, dass sich Konfiguration 8 (gemäß Tabelle 3-1 LS 2 ein und LS 3/4/5 aus) als die zu bevorzugende ergibt, Konfiguration 2 (gemäß Tabelle 3-1 LS 4 ein und LS 2/3/5 aus) hingegen als die am wenigsten optimale.

Abbildung 3.3 stellt das Ergebnis einer weiterführenden Untersuchung in Form einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich verschiedener Gewichtungen im Bereich von 0,05 bis 4,0 des in Abbildung 3.1 dargestellten Netzmodells basierend auf den beschriebenen sechs KPIs in Form eines Carpet Plots dar. Man erkennt im oberen Teil die einzelnen Netzkonfigurationen in Abhängigkeit der Variation der Gewichtungsfaktoren $k_{KPI,m}$ jeweils von 0,05 bis 4,0 wobei die dabei dargestellte Priorisierung in Form der diskreten Farbskalierung (grün bis rot) zu verstehen ist. Ein niedriger Wert (grün) stellt eine bevorzugte Konfiguration dar, ein hoher Wert (rot) eine zu vermeidende. Die untere Grafik zeigt hingegen den aktuellen Wert der Variation der einzelnen KPI-Gewichtungsfaktoren $k_{KPI,m}$ in Form der Farblegende von blau (0,05) bis gelb (4,0) mit jeweils 10 Zwischenschritten (6 KPIs · 10 Schritte = 60 Variationen).

Der durchwegs konstante Farbverlauf des oberen Plots in horizontaler Richtung (zB hellgrün bei Netzkonfiguration 8, vgl. auch Abbildung 3.2) lässt dabei z.B. auf ein stabiles Verhalten der entsprechenden Konfiguration in Bezug auf unterschiedliche KPI-Gewichtungen schließen. Netzkonfiguration 2 (vgl. ebenso Abbildung 3.2) hat hingegen einen konstanten roten horizontalen Verlauf auf. Dies weist durchgehend auf eine eher nicht zu bevorzugende Konfiguration hin. Weiters lässt sich erkennen, dass beispielsweise eine Gewichtung des KPIs 1 mit dem Faktor 4,0 einen wesentlichen Einfluss auf die Priorisierung hat, dies veranschaulicht der vertikale Farbverlauf der Variation 10 (auf der Abszisse des oberen Plots in Abbildung 3.3).

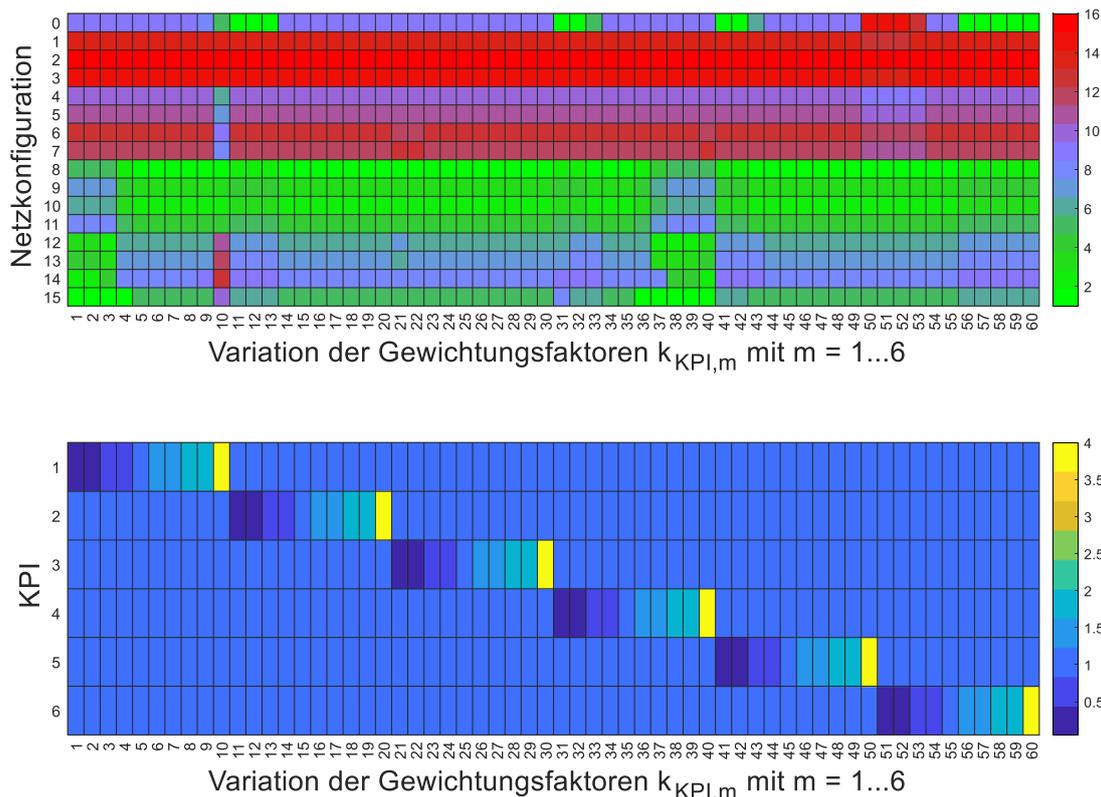


Abbildung 3.3: Carpet Plot der Priorisierung der unterschiedlichen Netzkonfigurationen 0 bis 15 anhand der sechs KPIs in Abhängigkeit von Gewichtungsfaktoren $k_{KPI,m}$ für das Teilnetz TS10 (aspern Seestadt, Wien) vgl. [4-5]

Allgemein kann durch die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse auf ein stabiles Verhalten des SMM-Algorithmus hinsichtlich der Priorisierungsreihenfolge bei unterschiedlichen Gewichtungen der einzelnen KPIs geschlossen werden. Es ist jedoch zu bemerken, dass die Variation der einzelnen Gewichtungsfaktoren jeweils unabhängig voneinander durchgeführt worden ist. Dies hat zur Auswirkung, dass mögliche Abhängigkeiten der Gewichtungsfaktoren untereinander zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags noch nicht evaluiert werden konnten.

4 Realitätsnahe Tests mit Labordemonstrator

Um die Praxistauglichkeit sowie eine realitätsnahe Analyse des SMM-Algorithmus zu ermöglichen, hat das Projektteam den Aufbau eines entsprechenden Labordemonstrators initiiert. Mit Hilfe dessen soll die Methode der automatisierten Rekonfiguration auf Ebene der Niederspannung unter Laborbedingungen mit realen, industriell verfügbaren Komponenten evaluiert werden. Das zugrundeliegende, in Abbildung 4.1 dargestellte Konzept sieht vier Niederspannungskompaktleistungsschalter samt der zugehörigen Sekundärtechnik (Steuerspannungsversorgung, Motorantriebe, Kommunikation) vor.

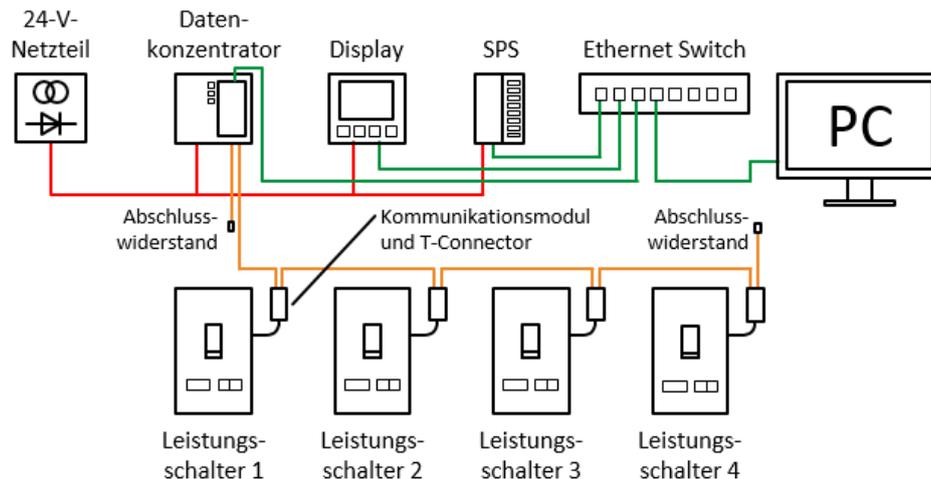


Abbildung 4.1: Prinzipschema des Labordemonstrators mit vier NS-Kompaktleistungsschaltern, Steuerspannungsversorgung und Kommunikationstechnik (Datenkonzentrator, Display, SPS, Ethernet Switch) ähnlich [5, 8-9]

Die vier genannten Kompaktleistungsschalter sind im finalen Aufbau des Labordemonstrators gemäß Abbildung 4.2 in Form einer offenen Ringstruktur verschaltet, wobei sich an unterschiedlichen Punkten Abgänge für Quellen/Einspeiser sowie Lasten/Verbraucher befinden. Diese können je nach Anwendungsfall mittels konventioneller CEE- bzw. Schukosteckverbinder, mittels 4-mm-Sicherheitslaborsteckverbinder oder aber auch mittels 6-mm-Leistungslaborsteckverbinder an den Demonstrator angeschlossen werden. Darüber hinaus verfügt der Aufbau über die Möglichkeit, im oberen und im unteren Stich über Industrieleistungssteckverbinder zur Integration von Leitungsmodellen zur Simulation von entsprechenden Leitungslängen einzusetzen. [5, 8]

Die im Demonstrator implementierte Kommunikationstechnik samt den entsprechenden Motorantrieben ermöglichen die Fernsteuerung der Leistungsschalter mittels der entsprechenden Herstellersoftware. Zur Anwendung des entwickelten SMM-Algorithmus am Labordemonstrator wird der im Zuge von [9] entwickelte Code samt der dafür erforderlichen zusätzlichen Hardware (SPS) als Übersetzungs- bzw. Schnittstellenlösung verwendet.

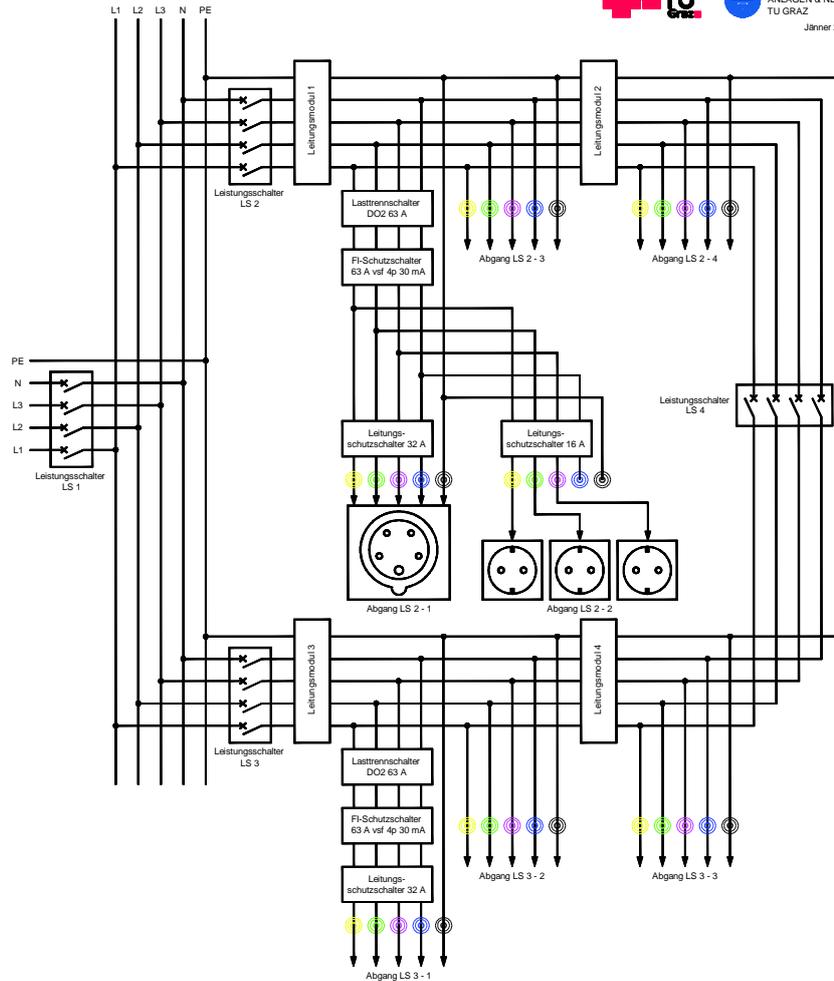


Abbildung 4.2: Basisverschaltung der vier Kompaktleistungsschalter im Demonstrator samt schematischer Darstellung der vorhandenen Abgänge [8]

In Abbildung 4.3 ist der reale, im Zuge von [8] und [9] entwickelte und konstruierte Aufbau des Labordemonstrators zu erkennen. Das linke Bild zeigt dabei den geschlossenen Verteiler mit den Bedienelementen (Taster und Display) im oberen Bereich und der schematischen Ansicht des Demonstrators unten samt 4-mm-Sicherheitslaborbuchsen für Messzwecke. Rechts ist der offene Verteiler dargestellt, wobei im oberen Teil diverse Klemmleisten sowie Schmelzsicherungen, Fehlerstrom- und Leitungsschutzschalter erkennbar sind. Im unteren Teil befinden sich neben weiteren Klemmleisten die vier tatsächlichen Leistungsschalter samt der zugehörigen Kommunikationstechnik (Datenkonzentrator, Bus-Adapter, SPS, Ethernet Switch).



Abbildung 4.3: Realer Aufbau des Labordemonstrators, geschlossene Ansicht mit Bedienelementen und Buchsen für Messzwecke (links), offene Ansicht mit Sicherungseinbauten (rechts oben) und Leistungsschaltern samt Kommunikation (rechts unten)

Mit diesem Demonstrator werden der SMM-Algorithmus, die notwendigen Schnittstellenlösungen und praktische Aufgaben bzw. Anwendungsfälle im Labor vor dem Einsatz in der Praxis untersucht.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der entwickelte Algorithmus zur automatisierten Netz-Rekonfiguration zeigt in ersten Tests an digitalen Netzmodellen unterschiedlicher Niederspannungsverteilnetze (urban, rural und synthetisch) stabile Resultate hinsichtlich einer Verbesserung der Lastsituation (zB bessere Leitungsauslastung, Reduktion der Verluste, Vermeidung von Überlastung, Gewährleistung der Spannungsqualität, Sicherstellung des Netzschutzes und der Schutzmaßnahmen) sowie der Beständigkeit gegenüber unterschiedlichen KPI-Gewichtungsfaktoren. In einem weiteren Schritt sind Untersuchungen hinsichtlich Skalierbarkeit und Reproduzierbarkeit geplant. Weiters wurde ein Labordemonstrator mit vier Niederspannungskompaktleistungsschaltern entwickelt und aufgebaut, an welchem die Erprobung des Algorithmus vor dem Einsatz in der Praxis durchgeführt werden kann.

6 Danksagung

Die beschriebene Methode wurde im Zuge des von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und dem österreichischen Klima- und Energiefonds (KLIEN) finanzierten Leitprojekts PoSyCo – Power System Cognification (#867276) entwickelt.



7 Referenzen

- [1] Republic of Austria - Federal Ministry for Sustainability and Tourism, Republic of Austria - Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology, “#mission2030 - The Austrian Climate and Energy Strategy”, 2018.
- [2] Einfalt, A., Brunner, H., Prügler, W., et al., “Efficient Utilization Of Existing Grid Infrastructure Empowering Smart Communities”, IEEE ISGT NA, Washington DC/USA, 2020.
- [3] Herbst, D., Schürhuber, R., Lagler, M., et al., “Low-Voltage Grids in Transition – Automatic Grid Reconfiguration Approach for Future Smart Grid Challenges”, CIRED, 2021.
- [4] Herbst, D., Schürhuber, R., Schmautzer, E., et al., „Entwicklung und Evaluierung eines Algorithmus zur automatisierten Rekonfiguration von Niederspannungsnetzen“, e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Ausgabe 08.2021, Wien/AT, 2021, <https://doi.org/10.1007/s00502-021-00939-5> (aufgerufen am 12.November 2021).
- [5] Herbst, D., „Ein Beitrag zu neuen Ansätzen im Niederspannungsschutz“ (Arbeitstitel), Dissertation, Technische Universität Graz, laufend.
- [6] Kerber, G., „Kerber networks, <https://pandapower.readthedocs.io/en/v1.3.0/networks/kerber.html>, zuletzt abgerufen am 06.07.2021.
- [7] Herbst, D., „Ein Beitrag zur Bewältigung künftiger Herausforderungen in Niederspannungsverteilnetzen am Beispiel automatisierter Netzrekonfiguration“, ETG-CIRED-Workshop 2021 (D-A-CH) – „Innovationen im Verteilnetz“, München, 2021.
- [8] Promberger, M., „Labordemonstrator zur automatisierten Rekonfiguration im Niederspannungsnetz“, Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2021.
- [9] Griesser, R., „Automatisierung eines Kompaktleistungsschalter-Labordemonstrators mit Python Kommunikation“, Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2021.