

Methodik zur Erstellung reduzierter, elektrischer Netze für Zeitreihenberechnungen mit hohen Abbildungsgenauigkeiten

Anna Traupmann, Thomas Kienberger

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, +433842 4025414, anna.traupmann@unileoben.ac.at, www.evt-uniloeben.at

Kurzfassung: Um erneuerbare Energien möglichst effizient integrieren zu können, müssen alle Potentiale, die eine Speicherung der erneuerbar erzeugten, fluktuierenden Energie ermöglichen, genutzt werden. Hybriden Netze ermöglichen über intersektorische Lastverschiebungen die Nutzung von Potentialen und Synergien auch in anderen Energieträgernetzen. Berechnungen in hybriden Netzmodellen geben daher Auskunft über mögliche, zukünftige Entwicklungsszenarien des gesamten Energiesystems und bedingen geeignete Modelle für jeden Energieträger sowie entsprechende Verknüpfungstechnologien sowie –strategien. Für den Energieträger Strom soll in der folgenden Arbeit eine Methodik vorgestellt werden, die es ermöglicht zeiteffiziente Berechnungen ausgedehnter, elektrischer Netze mit feiner zeitlicher Auflösung (z.B. Jahresrechnungen mit 15-Minuten-Werten) durchzuführen. Dieses elektrische Netzmodell ist dann im hybriden Ansatz einsetzbar.

Keywords: Netzreduktion, zellulärer Ansatz, Netzmodellierung, Zeitreihenberechnungen, Abbildungsgenauigkeiten

1 Einleitung

Um auch in Österreich das globale Ziel eines dekarbonisierten Energiesektors zu erreichen, muss die Nutzung langfristig verfügbarer, erneuerbarer Energien weiter ausgebaut werden. Aufgrund der wetter- und jahreszeitbedingt fluktuierenden Einspeisungen erneuerbarer Energien werden die heutigen Netzstrukturen, vor allem elektrischer Netze, stark belastet, was die Netzstabilität beeinträchtigt. Daher kommt es zunehmend zur Abregelung oder sogar Abschaltung von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarem Stroms, um das Gleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Energie sowie die Versorgungssicherheit aufrechtzuerhalten. Um dennoch einen weiteren Ausbau erneuerbarer Energien voranzutreiben, müssen Flexibilisierungsmaßnahmen in der Energieversorgungs- sowie Verbraucherstruktur implementiert werden. Auf Seiten der Energienetze wird u.a. der Ansatz hybrider, energieträgerübergreifender Netze verfolgt, welche die derzeit noch unabhängig voneinander betriebenen Energieträgernetze über Koppelungstechnologien verbinden. In Hybridnetzen ist es möglich, erneuerbar erzeugten Strom, welcher zu einem bestimmten Zeitpunkt im elektrischen Netz nicht verbraucht werden kann, über intersektorische Lastverschiebungen in anderen Energieträgernetzen zu nutzen oder zu speichern. Um herauszufinden welchen Beitrag hybride Netze zur Erreichung des Ziels der Dekarbonisierung leisten können, müssen Szenarien über lange Zeiträume mit genauen Modellen für die einzelnen Energieträgernetze berechnet werden. [1] [2]

Daher soll im Rahmen dieser Arbeit eine Methode vorgestellt werden, welche unter Anwendung des zellulären Ansatzes die Erstellung eines solchen Netzmodells für den

Energieträger Strom ermöglicht. Mit diesem Modell sollen schnelle, aber gleichzeitig exakte Berechnungen über lange Zeiträume mit hoher zeitlicher und örtlicher Auflösung der Erzeuger-, Verbraucher- und Speicherstrukturen (Verwendung von Zeitreihen z.B. mit 15-Minuten-Werten) durchgeführt werden. Dieses Stromnetzmodell kann dann im hybriden Gesamtansatz eingesetzt werden.

2 Methodische Vorgehensweise

2.1 Der zellulare Ansatz

Der zellulare Modellierungsansatz erlaubt eine möglichst generische und modulare Betrachtung von Netzstrukturen verschiedener Energieträger mit örtlicher Auflösung des energieträgerübergreifenden Energieausgleichs. Er definiert damit den Detaillierungsgrad für die Netzberechnungen mit diesen Modellen. Das jeweilige Energieträgernetz wird dabei nach geografischen Gesichtspunkten in Energiezellen eingeteilt, welche die niedrigste Systemebene darstellen, auf der je nach Netzsituation ein möglichst effizienter Energieausgleich erfolgen kann. Um in diesem Ansatz schnelle Netzberechnungen zu ermöglichen, muss die Systemkomplexität und –größe des Originalnetzes verringert werden, weshalb alle Netzknoten innerhalb einer Energiezelle in einen fiktiven Netzknoten aggregiert und die Leistungen der in diesen Netzknoten vorhandenen Betriebsmittel aufsummiert werden. Übrig bleiben im reduzierten Netz die fiktiven Zellenknoten mit aggregierten Betriebsmitteln sowie die Verbindungsleitungen zwischen den Zellen. [3] [4] [5] Die Herausforderung für die Modellierung der elektrischen Netze bei der Anwendung des zellularen Ansatzes ist, dass aufgrund des Aggregationsschrittes die ursprüngliche Netzstruktur verändert wird. Da dabei Informationen über das Gesamtnetz verloren gehen, müssen diese über entsprechende Kompensationsmethoden ausgeglichen werden. In der nachstehenden Abbildung (Abbildung 1) sind beispielhaft die Schritte für die Anwendung des zellularen Ansatzes ersichtlich.

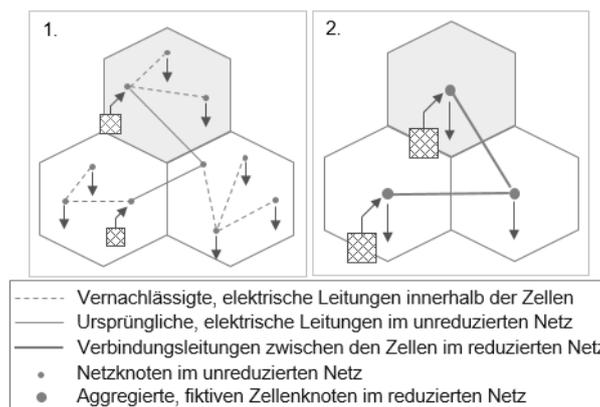


Abbildung 1: Beispielhafte Anwendung des zellularen Ansatzes auf ein elektrisches Netz

Die Abweichungen zwischen dem realen, nicht reduzierten Netz und dem reduzierten Zellenmodell sind auf die vernachlässigten Leitungen innerhalb der Zellen zurückzuführen, welche bei der Aggregation aus dem Netz „entfernt“ werden. Bei den Abweichungen handelt es sich daher um die Summe der (belastungsabhängigen) Verlustleistungen, welche in den vernachlässigten Leitungen der jeweiligen Zelle entstehen. Diese Verlustleistungen

beeinflussen die Lastflüsse zwischen den Zellen, die Gesamtnetzverluste sowie die Leistung im Slack-Knoten.

2.2 Netzreduktionsmethoden

Zur Kompensation dieser Abweichungen zwischen dem realen Netz und dem Zellennetzmodell und damit dem Ausgleich der Strukturänderungen aufgrund der Aggregation, werden Netzreduktionsmethoden eingesetzt. Diese Methoden haben als Ziel, die aufgrund der Vereinfachung der Netzgröße und –komplexität verlorenen Informationen auszugleichen und damit das reduzierte Netz dem Originalnetz anzupassen. Für die Netzmodelle im zellularen Ansatz ist es wichtig, dass der Ausgleich für jede Zelle einzeln erfolgen kann, weshalb hier eine Methode vorgestellt werden soll, die speziell für diesen Ansatz anwendbar ist. Da es sich bei den verlorenen Informationen um die in den vernachlässigten Leitungen entstehenden Verluste handelt, müssen diese in den fiktiven Zellenknoten kompensiert werden. Ein solches Modell für Zeitreihenberechnungen mit Kompensationselementen in jeder Zelle und äquivalenten Lastflüssen der Verbindungsleitungen sowie der Slack- und Verlustleistungen ist in der nachstehenden Abbildung (Abbildung 2) beispielhaft dargestellt.

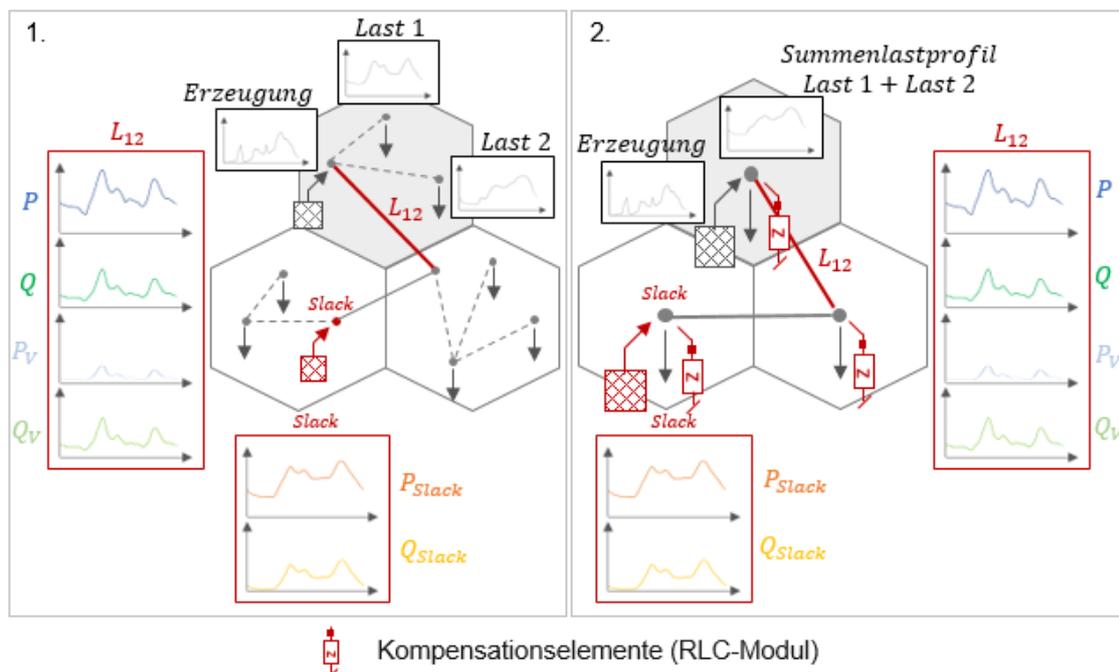


Abbildung 2: Beispielhafte Anwendung der Kompensationsmethode für Zeitreihenberechnung im Zellenmodell

Dazu werden bei dieser Methode Kompensationselemente für jede Zelle berechnet, die den interzellularen Lastfluss über die Verbindungsleitungen, sowie die Netzverluste und damit den Leistungsbedarf im Netz über den Slack-Knoten ausgleichen. Die Parametrierung der Kompensationselemente erfolgt über die Leitungsparameter der vernachlässigten Leitungen innerhalb der Zellen. Nachdem jede Leitung über ihre π -Ersatzschaltung hinsichtlich Leitermaterial, Isolierung sowie elektromagnetischem Feldaufbau und damit Wirk- und Blindleistungsverlusten vollständig charakterisiert werden kann, parametrieren die Summe aller Leitungswiderstände R , aller Leitungsinduktivitäten L und aller Leitungskapazitäten C innerhalb einer Zelle das Kompensationselement der jeweiligen Zelle. Da auch die Leitungsparameter belastungsabhängig unterschiedliche große Leitungsverluste verursachen,

stellen die Kompensationselemente für jede Zelle einen mit der Last veränderbaren, komplexen Widerstand dar. Aufgrund dieser Veränderbarkeit wird genau die Summe der (belastungsabhängigen) Verlustleistungen der Leitungen nachgebildet, sodass auch für Zeitreihenberechnungen in jedem Zeitschritt ein an den Lastzustand angepasstes Modell entsteht.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.1 Beschreibung des Beispielnetzes

Anhand eines Beispielnetzes auf der Mittelspannungsebene (5.25 kV) wird gezeigt, mit welcher Genauigkeit das reduzierte Zellenmodell das reale Mittelspannungsnetz nachbilden kann. Jeder Verbraucher bzw. Erzeuger an einem Netzknoten in diesem Mittelspannungsnetz entspricht einem untergelagerten Niederspannungsnetz und/oder einer direkt angeschlossenen Verbraucher- bzw. Erzeugereinheit. Die Summen der hinterlegten Standardlast- bzw. Standarderzeugungsprofile des jeweiligen Niederspannungsnetzes stellen die Verbraucher- und Erzeugereinheiten im Mittelspannungsnetz dar.

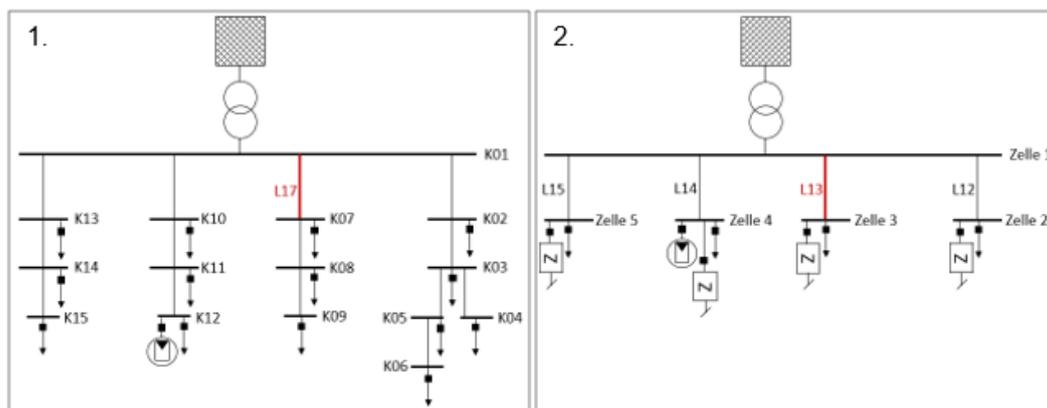


Abbildung 3: Beispielnetz - 1. reales, nicht reduziertes Netz, 2. reduziertes Zellenetz

Die in Abbildung 3 gezeigten Netze stellen das reale Netz vor der Reduktion und das Zellenetz nach der Reduktion dar. Das ursprüngliche, nicht reduzierte Netz besteht aus 15 Knoten und wird um 60% reduziert, sodass das Zellenetz nur mehr aus 5 Knoten besteht.

3.2 Vorgehensweise

Mit Hilfe eines MATLAB®-Berechnungsprogrammes wird eine AC-Lastflussrechnung für das reale, nicht reduzierte Netz durchgeführt, in der die zugehörigen Lastflüsse, Gesamtnetzverluste sowie Slack-Leistungen bestimmt werden. Danach erfolgt die Aggregation der zuvor eingeteilten Zellen, sowie der Ausgleich der vernachlässigten Leitungen mittels Serien-RLC-Moduls, welches in den fiktiven Netzknoten im Zellenmittelpunkt angebracht wird und sich entsprechend der Methodik in 2.2 berechnet. Anschließend wird eine AC-Lastflussrechnung für das reduzierte Netz durchgeführt und damit ein Vergleich zwischen den berechneten, elektrischen Größen ermöglicht. Die dabei erhaltenen Abweichungen zwischen reduziertem und nicht reduziertem Netzmodell geben dann die Abbildungsgenauigkeit des reduzierten Zellenetzes wieder.

3.3 Abbildungsgenauigkeiten des reduzierten Zellennetzmodells

Für die Betrachtung der Abbildungsgenauigkeiten im reduzierten Zellennetz werden beispielhaft eine Verbindungsleitung, sowie zusätzlich Einspeiseleistungen im Slack-Knoten und Gesamtnetzverluste herangezogen. Dazu werden die absoluten und relativen Abweichungen zwischen reduziertem und nicht reduziertem Netz für die jeweilige elektrische Größe in jedem Zeitschritt berechnet und über den Betrachtungszeitraum (1 Tag in 15-Minuten-Werten d.h. 96 Zeitschritte) aufgetragen. Die Verbindungsleitung, welche zur Darstellung der Abbildungsgenauigkeiten der interzellularen Lastflüsse zwischen nicht reduziertem Netz (L17) und reduziertem Zellenmodell (L13) herangezogen wird, ist in Abbildung 3 jeweils markiert. Da die Aggregation und damit die Netzstrukturänderung vor allem das Blindverhalten im Netz beeinflusst, was damit zusammenhängt, dass Blindverluste im Netz deutlich größer sind als Wirkverluste, werden für die Abbildungsgenauigkeiten in den Verbindungsleitungen auch im Folgenden nur die Blindleistungsflüsse und die Blindleistungsverluste betrachtet. Die relative (orange Balken) und absolute (blaue Balken) Abweichungen dieser beiden Größen sind in den nachstehenden Abbildungen (Abbildung 4 und Abbildung 5) dargestellt.

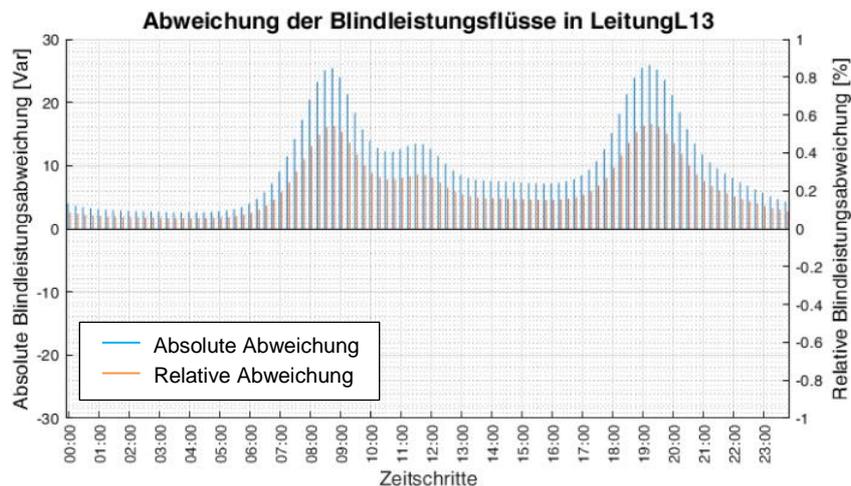


Abbildung 4: Absolute (blau) und relative (orange) Abweichungen der Blindleistungsflüsse in Leitung L13 für den betrachteten Berechnungszeitraum

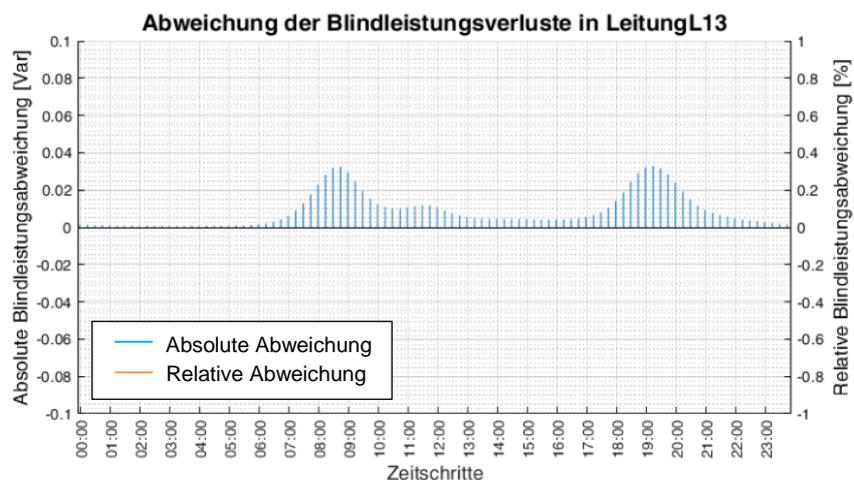


Abbildung 5: Absolute (blau) und relative (orange) Abweichungen der Blindleistungsverluste in Leitung L13 für den betrachteten Berechnungszeitraum

Die maximale, absolute Abweichung der Blindleistungsflüsse in Leitung L13 beträgt 25.88 Var, was einer relativen Abweichung von 0.55 % entspricht. Die maximale, absolute Abweichung der Blindverluste in Leitung L13 beträgt 0.03 Var mit einer relativen Abweichung von 0.002 %. Diese Abweichungen befinden sich in einem vernachlässigbaren Bereich, sodass der Lastfluss über diese Verbindungsleitung im reduzierten Zellennetz vollständig nachgebildet werden kann.

Bezüglich der Einspeiseleistungen im Slack-Knoten befinden sich die absoluten Abweichungen für die Wirkleistungen bei 531.07 W (0.08 %) bzw. für die Blindleistungen bei 124.86 Var (0.54 %). Diese Abweichungen über den gesamten Berechnungszeitraum sind in den nachstehenden Abbildungen (Abbildung 6 und Abbildung 7) ersichtlich.

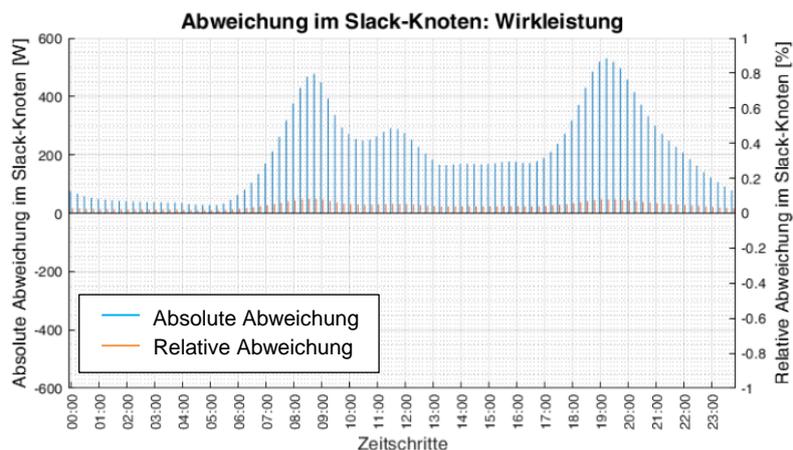


Abbildung 6: Absolute (blau) und relative (orange) Abweichungen der Wirkleistungseinspeisung im Slack-Knoten für den betrachteten Berechnungszeitraum

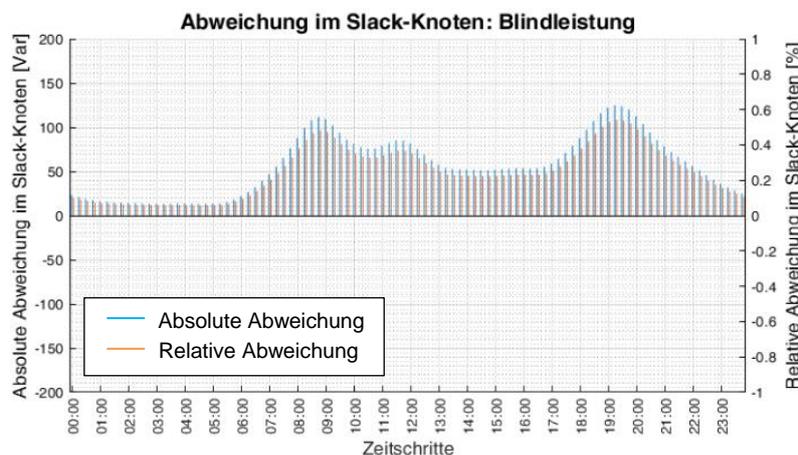


Abbildung 7: Absolute (blau) und relative (orange) Abweichungen der Blindleistungseinspeisung im Slack-Knoten für den betrachteten Berechnungszeitraum

Auch die Gesamtnetzverluste können mit ähnlichen Abbildungsgenauigkeiten im reduzierten Netz wiedergegeben werden (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9).

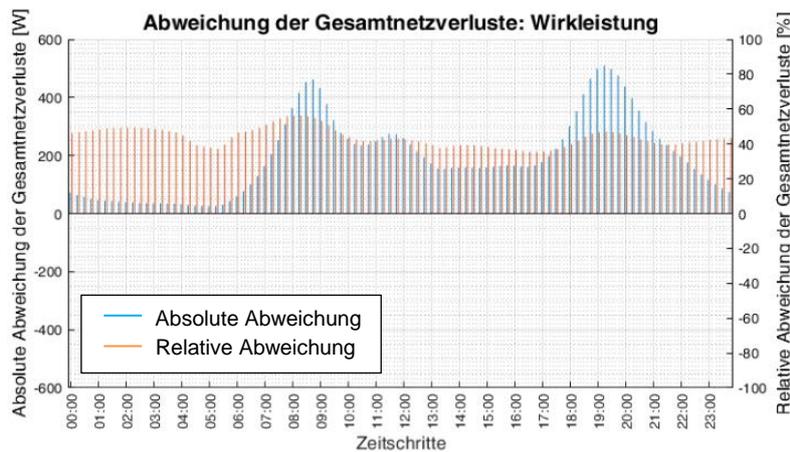


Abbildung 8: Absolute (blau) und relative (orange) Abweichungen der Wirkleistungsverluste im Gesamtnetz für den betrachteten Berechnungszeitraum

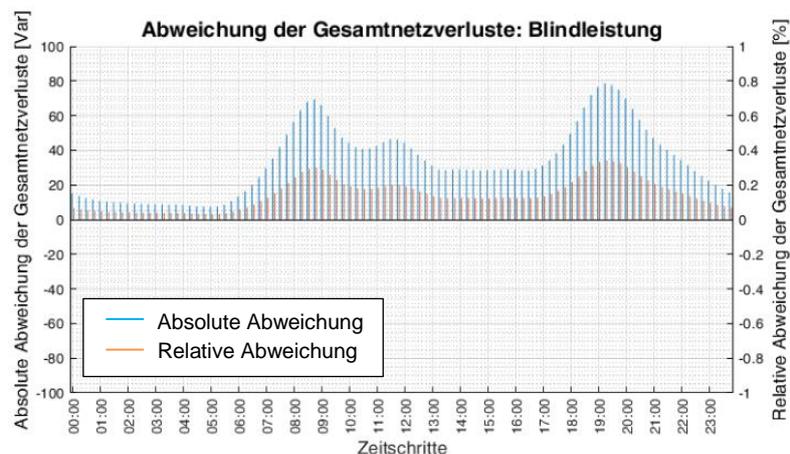


Abbildung 9: Absolute (blau) und relative (orange) Abweichungen der Blindleistungsverluste im Gesamtnetz für den betrachteten Berechnungszeitraum

Während die maximale, absolute Abweichung der Wirkleistungsverluste bei 509.87 W liegt und damit einer maximalen, relativen Abweichung von 56.30 % entspricht, liegt die maximale, absolute Abweichung der Blindleistungsverluste bei 78.65 Var und entspricht einer maximalen, relativen Abweichung von 0.34 %. Die hohen, relativen Abweichungen der Wirkleistungsverluste sind darauf zurückzuführen, dass Wirkleistungsverluste auf dieser Spannungsebene gering sind und daher auch kleine, absolute Abweichungen zu hohen relativen Abweichungen führen.

Damit kann das Gesamtverhalten des nicht reduzierten Netzes sowohl hinsichtlich Wirk- als auch Blindleitungsverhaltens mit vernachlässigbaren Ungenauigkeiten im reduzierten Zellenmodell nachgebildet werden.

3.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die über die vorgestellte Netzreduktionsmethode angepassten vereinfachten und weniger komplexen Zellenmodelle können das reale, nicht reduzierte Netz mit minimalen Abweichungen wiedergeben. Zusätzlich dazu kann die Berechnungszeit über lange Zeiträume mit feiner zeitlicher Auflösung mit reduzierten Netzdarstellungen wesentlich verkürzt werden.

Daher ist je nach Anwendungsfall zu entscheiden, wann der Aufwand der Zellennetzerstellung in Kauf genommen wird, um dadurch geringere Berechnungszeiten zu erreichen.

Bei der Anwendung dieser Methodik auf Netze anderer Spannungsebenen, können aber je nach Netztopologie und Lastzustand höhere Abbildungsgenauigkeiten auftreten. Daher sind der Modellierung reduzierter Netze mit hohen Abbildungsgenauigkeiten Grenzen gesetzt. Da aber Netze auf höheren Spannungsebenen weniger komplex sind und eine geringere Ausdehnung haben, ist die Erstellung von reduzierten Netzen auf diesen Spannungsebenen je nach Anwendungsfall nicht unbedingt notwendig.

Danksagungen:

Diese Arbeit wurde im Rahmen des NEFI_Lab-Projektes durchgeführt. NEFI_Lab ist ein Teilprojekt von NEFI – New Energie for Industry, eine vom österreichischen Klima- und Energiefonds finanzierte Vorzeigeregion Österreichs.

Literatur:

- [1] Zentrum für Energiewirtschaft und Umwelt (e-think), „Energie in Zahlen 2018 – Entwicklung in Österreich Datenbasis 2017“, Dezember 2018.
- [2] Hinterberger, R., „Hybridnetze und Synergiepotentiale mit kommunalen Infrastrukturen“, Visions- und Strategiepaper, BMVIT, NACHHALTIGWIRTSCHAFTEN, September 2014.
- [3] Böckl, B.; Greiml, M.; Leitner, L.; Pichler, P.; Kriechbaum, L.; Kienberger, T., „HyFlow – A Hybrid Load Flow-Modelling Framework to Evaluate the Effects of Energy Storage and Sector Coupling on the Electrical Load Flows“, energies, MDPI, Februar 2019.
- [4] Böckl, B.; Kriechbaum, L.; Kienberger, T., „Analysemethode für kommunale Energiesysteme unter Anwendung des zellularen Ansatzes“, 14.Symposium Energieinnovation (EnInnov 2016).
- [5] Vopava, J.; Böckl, B.; Kriechbaum, L.; Kienberger, T., „Anwendung zellulärer Ansätze bei der Gestaltung zukünftiger Energieverbundsysteme“, e&i Elektrotechnik und Informationstechnik 134, vol.3, pp. 229-237, 2017.