

Wirk- und blindleistungsgenaue Modellierung von reduzierten Netzen im zellularen Ansatz

Anna Traupmann¹⁽¹⁾, Julia Vopava⁽¹⁾, Thomas Kienberger⁽¹⁾

⁽¹⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik

Kurzfassung:

Die Energiewende bezeichnet den Umstieg von fossilen Energieträgern auf eine nachhaltige Energieerzeugung mittels erneuerbarer Energiequellen. Diese Umgestaltung der Energieversorgungsstruktur ist mit maßgeblichen technischen sowie energiepolitischen Veränderungen verbunden, die insbesondere für das elektrische Netz große Herausforderungen darstellen. Es ist notwendig eine effiziente Integration der erneuerbaren Energiequellen zu ermöglichen, wobei trotz der damit verbundenen Fluktuationen in der Energieerzeugung die Verfügbarkeit von Strom zu jeder Tages- und Jahreszeit sowie die Einhaltung definierter Stabilitätsgrenzen gegeben sein muss. Vereinfachte Ersatzmodelle realer Netzinfrastrukturen bieten hinsichtlich dieser Problemstellungen eine Möglichkeit die zukünftige Weiterentwicklung der Netze effizient zu unterstützen. Um verlässliche Aussagen treffen zu können, muss daher die Modellierung der relevanten, elektrischen Größen möglichst exakt erfolgen. Derartige, komplexe Modelle großer Netzbereiche mit feiner Zeitauflösung bedeuten in der Regel einen hohen Rechenaufwand, weshalb häufig Vereinfachungen hinsichtlich der modellierten Größen getroffen werden, durch die es aber nicht möglich ist die realen Netze auch in den aggregierten Modellen vollständig zu beschreiben. Aufgrund dieser beiden Punkte – Zeiteffizienz und Genauigkeit – wird in dieser Arbeit eine Methode der Modellierung von elektrischen Netzen im zellularen Ansatz vorgestellt, mit der sowohl das Wirk- als auch das Blindleistungsverhalten äquivalent nachgebildet werden können.

Keywords: Netzreduktion, zellularer Ansatz, Energiesystemmodellierung, Blindleistung

1 Einleitung

Der Übergang zu einem dekarbonisierten Energiesektor bedingt einerseits Anpassungen in der Energiepolitik und andererseits technische sowie strukturelle Veränderungen in zukünftigen Energieerzeugungssystemen, sodass eine Energieversorgung größtenteils oder sogar vollständig auf erneuerbaren Energien basieren kann [1]. Die zunehmende Stromproduktion aus volatilen, meist dezentralen erneuerbaren Energien, sowie der zusätzlich wachsende Anteil an Elektromobilität stellt elektrische Übertragungs- und Verteilsysteme vor große Herausforderungen. Aufgrund der starren, zeitlichen Anforderungen hinsichtlich des zu jedem Zeitpunkt erforderlichen Gleichgewichts zwischen erzeugter und verbrauchter Energie sowie der heute noch zu geringen Speicher- und Transportmöglichkeiten wird es im elektrischen Energieversorgungsnetz, sofern kein Ausbau erfolgt, immer häufiger zu Stabilitätsproblemen kommen [2] (Einhaltung der zulässigen statischen und transienten Stabilitätsgrenzen zur Spannungs- und Frequenzhaltung [1]). Eine weiterhin sichere

¹ Jungautorin, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Tel.: +43 3842 402 5414, E-Mail: anna.traupmann@unileoben.ac.at, Web: evt.unileoben.ac.at

Energieversorgung und die gleichzeitige Implementierung der Umgestaltungen im Rahmen der Energiewende bedingen u.a. die Entwicklung neuer Planungs- und Betriebssteuerungstools. Wirk- und vor allem blindleistungsgenaue, zeitaufgelöst rechnende Modelle elektrischer Netzstrukturen unterstützen in diesem Zusammenhang ein effizientes Design und Betriebsmanagement zukünftiger Netze [1, 2]. Diese Arbeit behandelt daher die Modellierung elektrischer Netze im zellularen Ansatz über verschiedene Netzreduktionsmethoden, sodass das Wirk- und Blindleistungsverhalten des Originalnetzes in der vereinfachten Netzabbildung erhalten bleibt.

2 Methodische Vorgehensweise

2.1 Der zellulare Ansatz

Um für ausgedehnte Netze, die zeitlich fein aufgelöst über einen langen Zeitraum betrachtet werden, dennoch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist es von Vorteil je nach Aufgabenstellung einen Kompromiss zwischen Abbildungsgenauigkeit und Berechnungsaufwand zu finden [3, 4]. Unter Anwendung des zellularen Ansatzes wird das Netz nach geografischen Gesichtspunkten in sogenannte Energiezellen eingeteilt. Da innerhalb einer Zelle alle Erzeuger-, Verbraucher- und Speicherstrukturen für die vorhandenen Energieträger in einen Zellenknoten aggregiert werden, verringert sich die örtliche Auflösung und damit im Vergleich zum Ausgangsmodell die Komplexität des Gesamtnetzes [3, 4]. Die Grundidee des zellularen Ansatzes ist es einen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch auf niedrigster Systemebene ermöglichen zu können. Dabei stellt eine Zelle die niedrigste Ebene dar, auf der Erzeugung und Verbrauch ausbalanciert werden. Ob dieser Ausgleich tatsächlich erfolgt hängt von der jeweils betrachteten Systemkonfiguration ab. Informationen über die im Netz bzw. in den einzelnen Energiezellen vorhandenen Energiemengen ermöglichen die Identifikation jener Zellen, in denen zeitlich aufgelöst Lastüber- bzw. Lastunterdeckungen auftreten. Dadurch können infrastrukturelle Bewertungen für die Netze gemacht werden, um je nach Situation einen möglichst effizienten Energieausgleich zu erreichen [5].

Zur Modellierung elektrischer Ersatznetze im zellularen Ansatz kommen Netzreduktionsmethoden zum Einsatz. Über diese sollen die Verbindungsleitungen zwischen den Zellen neu berechnet werden, sodass die aufgrund der Aggregation entstandenen Netzstrukturänderungen im Zellenmodell kompensiert werden. Einerseits müssen die verlorenen Informationen aufgrund der vernachlässigten Leitungen innerhalb der Zellen ausgeglichen, andererseits die Lastflüsse zwischen den Zellen an die aggregierten Knotengrößen so angepasst werden, dass sie jenen der realen Netzstrukturen entsprechen. Dadurch ist es möglich, jede Zelle nach außen hin durch ihren aggregierten Zellenknoten, sowie die modifizierten Leitungsparameter ihrer Verbindungsleitungen abzubilden. Alle Informationen, die aus den Ersatznetzen gewonnen werden, können direkt auf das Originalsystem übertragen werden.

2.2 Netzreduktionsmethoden

Ersatznetze, die über heute eingesetzte Netzreduktionsmethoden berechnet werden, haben verschiedenste technische sowie strommarktbezogene Anwendungen. Je nach Verwendungszweck sind daher auch nur spezifische Methoden geeignet, die Ersatzparameter

für den jeweiligen Anwendungsfall im Modell abzubilden. Für die Erstellung des Ersatznetzes im zellularen Ansatz werden in dieser Arbeit die REI-Methode, die Ward-injection-method und die Ward-admittance-method auf ihre Anwendbarkeit untersucht [6, 7].

Voraussetzungen der Ersatznetzbildung sind bei allen Methoden die Ergebnisse einer zuvor durchgeführten, vollständigen Lastflussrechnung des Originals für einen bestimmten Betriebszustand [6]. Zusätzlich müssen die Kenngrößen aller im Originalnetz vorhandenen Betriebsmittel (vor allem Längs- und Queradmittanzen der elektrischen Leitungen, Abbildung 3), sowie die vollständige Netztopologie zur Verfügung stehen [6]. Auch die Einteilung der Zellen muss vor der Reduktion erfolgen. Für die Reduktion müssen diese Informationen mathematisch in Beziehung gesetzt werden. Der mathematische Zusammenhang wird über das Knotengleichungssystem des Originalnetzes (Formel 1) beschrieben [7]. In diesem wird über die Knotenadmittanzmatrix \underline{Y} eine Beziehung zwischen Knotenströmen \underline{I} und Knotenspannungen \underline{U} , welche aus der Lastflussrechnung des Originals bekannt sind, hergestellt [7]. Die Topologie ist im Besetzungsmuster der Knotenadmittanzmatrix \underline{Y} enthalten, während sich alle Nichtnullelemente der Matrix aus den Betriebsmittelkenngrößen berechnen [7].

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I} \rightarrow \begin{pmatrix} Y_{00} & Y_{01} & \dots & Y_{0n} \\ Y_{10} & Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n0} & Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_0 \\ U_1 \\ \dots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ \dots \\ I_n \end{pmatrix}$$

Formel 1: Knotengleichungssystem des Gesamtnetzes vor der Reduktion in Matrizenform

Um eine systematische Reduktion des Gesamtsystems zu ermöglichen, wird dieses in drei Subsysteme eingeteilt, denen jeweils, entsprechend der Zelleneinteilung, Netzknoten zugeordnet werden. Da jede Zelle für sich reduziert werden muss, erfolgt die Unterteilung jeweils in ein externes, ein internes und ein Grenzknotensystem, wonach sich auch der Aufbau der Zellenknotenadmittanzmatrix vor der Reduktion orientiert. Die externen Knoten befinden sich innerhalb der jeweiligen Zelle und werden im Reduktionsschritt in den Zellenknoten aggregiert. Die internen Knoten sowie die Grenzknoten befinden sich außerhalb der betrachteten Zellen und werden nicht reduziert. [6, 8]

Die einzelnen Methoden nutzen zur Ersatznetzbildung einen Zwischenschritt vor der eigentlichen Reduktion, durch den sie sich unterscheiden. Der Reduktionsschritt und das erhaltene reduzierte Zellenmodell sind für alle drei Methoden gleich. Die REI-Methode baut in diesem Zwischenschritt ein sogenanntes verlustloses Netzwerk (ZPBN – Zero Power Balance Network) auf [6–8]. Die Ward-injection-method ersetzt die Knotenleistungen aller externen Knoten durch Knotenströme, während die Ward-admittance-method diese Knotenleistungen in Queradmittanzen zu einem fiktiven Erdknoten umwandelt [6]. Dieser Zwischenschritt verändert die Werte für die Knotenströme sowie die Matrixelemente der ursprünglichen Zellenknotenadmittanzmatrix. Die Reduktion erfolgt jeweils mittels Gauss Elimination, einem Lösungsverfahren für lineare Gleichungssysteme, welches auf elementaren Umformungen beruht. Nach Anwendung dieses Verfahrens zur Reduktion befindet sich die Zellenknotenadmittanzmatrix in Stufenform, wodurch alle Matrixelemente links unterhalb der Hauptdiagonale im externen System Null werden (Abbildung 1) und die Ersatzparameter für die jeweilige Zelle im Modell bestimmt sind [6, 8]. Die Schritte der Reduktion sind für die drei Netzreduktionsverfahren in Abbildung 2 anschaulich für eine Zelle dargestellt.

$$\begin{array}{c|c} \underline{I}_e \\ \hline \underline{I}_b \end{array} = \begin{array}{c|c} Y_{ee} & Y_{eb} \\ \hline Y_{be} & Y_{bb} \end{array} \cdot \begin{array}{c|c} \underline{U}_e \\ \hline \underline{U}_b \end{array} \Rightarrow \begin{array}{c|c} \text{shaded} & 0 \\ \hline \underline{I}' & 0 \end{array} = \begin{array}{c|c} 0 & \text{shaded} \\ \hline 0 & \underline{Y}' \end{array} \cdot \begin{array}{c|c} \underline{U}_e \\ \hline \underline{U}_b \end{array}$$

Abbildung 1: Reduktionsschritt mittels Gauss Elimination für eine Zelle (Index e...externes System, Index b...System entsprechend dem jeweiligen Zwischenschritt, \underline{I}' und \underline{Y}' Knotenströme und Knotenadmittanzmatrixelemente im reduzierten System)

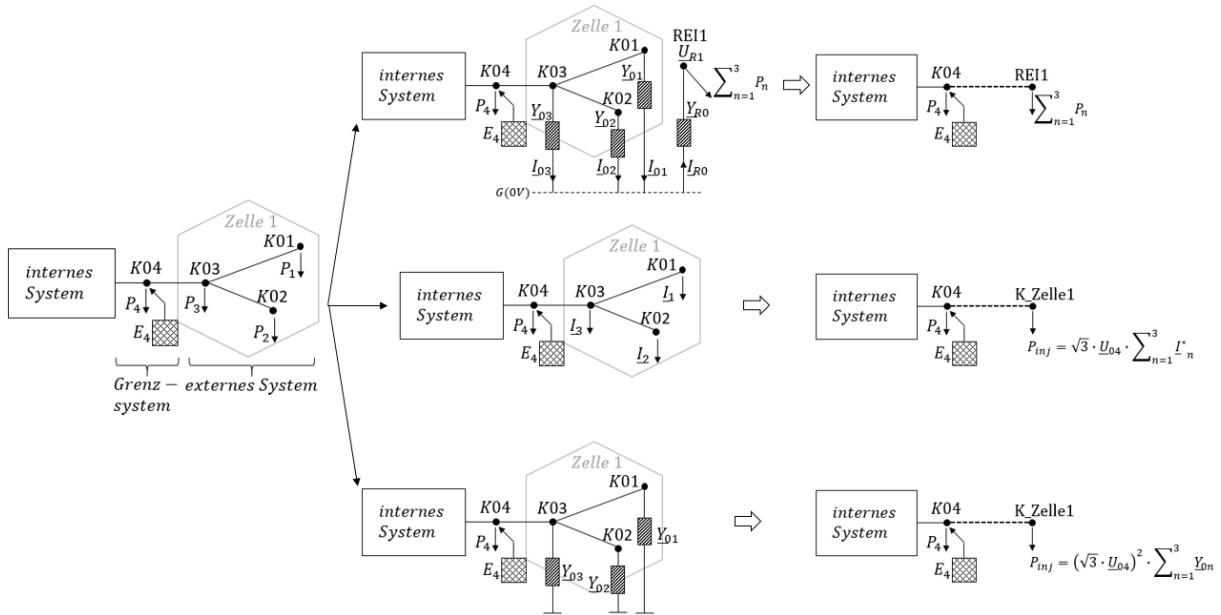


Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Ersatznetzerstellung (Zwischenschritt und reduziertesNetz) mittels REI-Methode (oben), Ward-injection-method (mitte) und Ward-admittance-method (unten)

Für alle drei Netzreduktionsmethoden ist aus der Literatur bekannt, dass vor allem hinsichtlich der Blindleistungsflüsse und Blindleistungsverluste in den Modellen erhebliche Abbildungsgenauigkeiten auftreten, während die Wirkleistungsflüsse mit vernachlässigbaren Abweichungen erfasst werden können [6, 8]. Entscheidend für die Abbildungsgenauigkeiten der Leistungsflüsse und -verluste ist eine korrekte Berücksichtigung der elektrischen Leitungen sowohl vor als auch nach der Reduktion. In der dazu herangezogenen Ersatzschaltung werden die physikalischen Effekte der Energieübertragung durch konzentrierte, auf die Leitungslänge l bezogene Leitungsparameter dargestellt (Abbildung 3) [9].

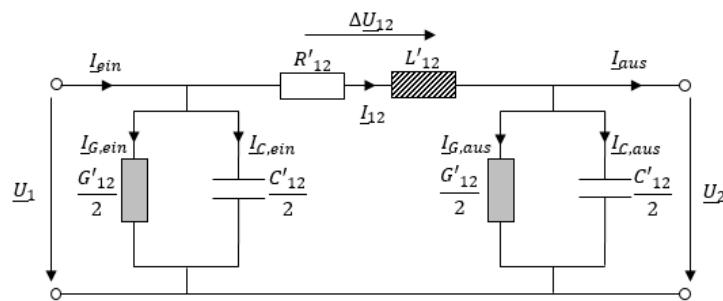


Abbildung 3: Einphasiges π -Ersatzschaltbild der elektrischen Leitungen

Diese Belagsgrößen charakterisieren die jeweilige Leitung hinsichtlich Leitermaterial, Dielektrikum und Isolation sowie elektromagnetischem Feldaufbau [9]. Nach der Reduktion mittels Gauss Elimination sind aber gewisse Informationen hinsichtlich dieser

Leitungsparameter für die berechneten Ersatzleitungen verloren. Die im Reduktionsschritt bestimmte Leitungslängsadmittanz \underline{Y}_{12}^* (Formel 2) der jeweiligen Verbindungsleitung besteht aus einem Real- und einem Imaginärteil, sodass eine Zuordnung der Belagsgrößen entsprechend Abbildung 3 nicht mehr möglich ist. Das führt vor allem bei der Abbildung der Blindleistung und der Blindleistungsverluste zu unzulässigen Abweichungen.

$$\underline{Y}_{12}^* = \frac{1}{\underline{Z}_{12}^*} \rightarrow \underline{Z}_{12}^* = R'_{12}^* \cdot l + j \cdot \omega \cdot L'_{12}^* \cdot l$$

Formel 2: Leitungslängsadmittanz berechnet über die entsprechende Impedanz (...reduzierte Größen)*

Aufgrund dessen soll nun eine alternative Methode der Erstellung von wirk- und blindleistungsgenauen Zellenmodelle vorgestellt werden, welche auf den Reduktionsschritt mittels Gauss Elimination verzichtet. Sie wird in der weiteren Arbeit als „Leitungsmodellierung“ (LM) bezeichnet. Die Vorgehensweise dieser Methode basiert auf zwei Schritten: Zuerst erfolgt die Aggregation der Zellen in einen repräsentativen Zellenknoten durch Aufsummieren der Knotenleistungen \underline{S} bzw. der Knotenströme \underline{I} . Daraus kann die Knotenspannung \underline{U} am jeweiligen Zellenknoten bestimmt werden. Dann wird die Annahme getroffen, dass jede Verbindungsleitung zu anderen Zellen einer π -Ersatzschaltung zwischen zwei bereits aggregierten Zellenknoten entspricht. Da aus der vollständigen Lastflussrechnung des Originals auch die Leistungsflüsse und Verlustleistungen in den Originalleitungen bekannt sind, kann darauf basierend die Berechnung der Ersatzleitungen erfolgen. Unter der Annahme, dass die Leistungsflüsse in den Ersatzleitungen jenen in den Originalleitungen entsprechen, können die neuen Leistungsströme und Spannungsabfälle und daraus die Leitungsparameter der Ersatzleitung berechnet werden. Die Methode der Leitungsmodellierung ermöglicht daher eine korrekte Leitungsnachbildung auch nach der Reduktion und damit eine verbesserte Abbildung der Blindleistungsverhältnisse im Modell.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Alle vorgestellten Methoden werden zur besseren Vergleichbarkeit auf dasselbe Netz angewendet. Die erhaltenen Ergebnisse bestätigen, dass bei Anwendung der klassischen Methoden (REI-Methode, Ward-injection-method und Ward-admittance-method) die Blindleistungsverhältnisse im Modell schon in kleinen, nicht verzweigten Netzen nicht ausreichend genau abgebildet werden können (Abbildung 4 und 5). Durch Anwendung der in dieser Arbeit vorgestellten Methode der Leitungsmodellierung kann das elektrische Verhalten, welches über Leistungseinspeisung in den Slack-Knoten sowie Gesamtnetzverluste beurteilt wird, mit vernachlässigbaren Abweichungen nachgebildet werden (Abbildung 4 und 5).

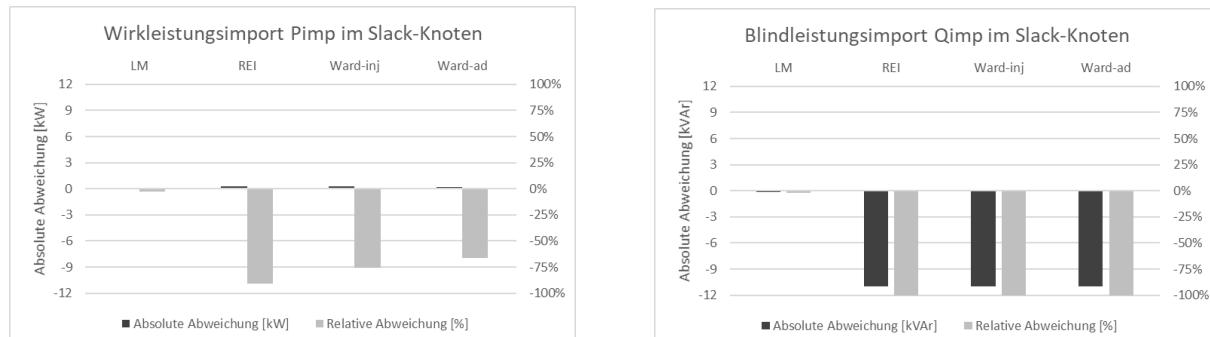


Abbildung 4: Absolute und relative Abweichungen in der Gesamtbilanz der Wirk- und Blindleistungs-einspeisungen im Slack-Knoten

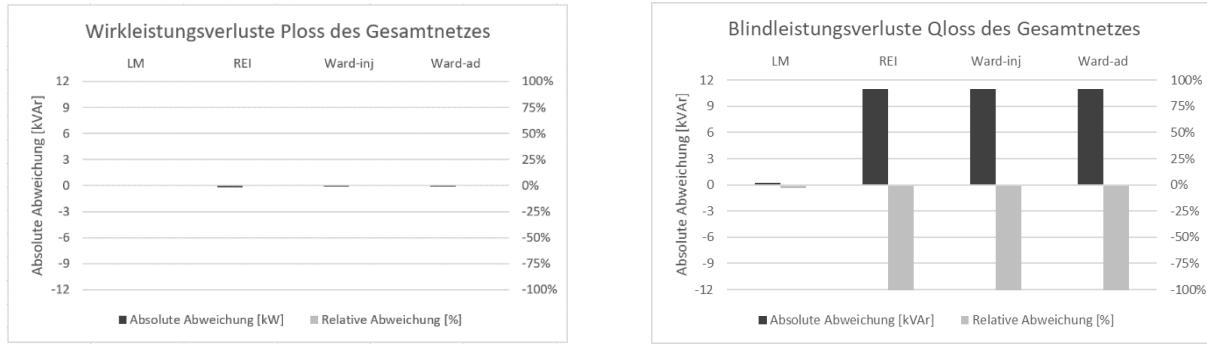


Abbildung 5: Absolute und relative Abweichung in der Gesamtbilanz der Wirk- und Blindleistungsverluste des Gesamtnetzes

Ein direkter Vergleich der Originalleitung mit der Ersatzleitung ist jedoch auch bei Anwendung der Leitungsmodellierung nicht immer möglich. Diese Abweichung entsteht einerseits aus der Vernachlässigung von Leitungen innerhalb der Zellen bei der Modellierung, andererseits aufgrund von Einspeisungen mit definiertem Blindleistungsbedarf in den aggregierten Zellenknoten. Da aber auch für diese Fälle die interzellularen Lastflüsse korrekt nachgebildet werden müssen, wird die Modellierung über einen rekursiven Prozess (Abbildung 6) gestaltet. Die Ergebnisse der zuvor gezeigten Leitungsmodellierung (Ersatzleitungsparameter) ermöglichen zunächst eine korrekte Nachbildung von Wirkleistungsflüssen sowie Wirk- und Blindleistungsverlusten in den Leitungen. Danach sollen vor allem die Blindleistungsflüsse, sofern unzulässige Abweichungen auftreten, durch Shunt-Widerstände mit fester Admittanzregelung angepasst werden. Die auszugleichende Blindleistung durch den Shunt ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Blindleistungsfluss im Original und dem vorhandenen Blindleistungsfluss im Ersatznetz nach Anwendung der Leitungsmodellierung. Sollten sich danach Abweichungen im elektrischen Gesamtverhalten ergeben, kann weiters eine Anpassung im Slack-Knoten auf dieselbe Weise vorgenommen werden.

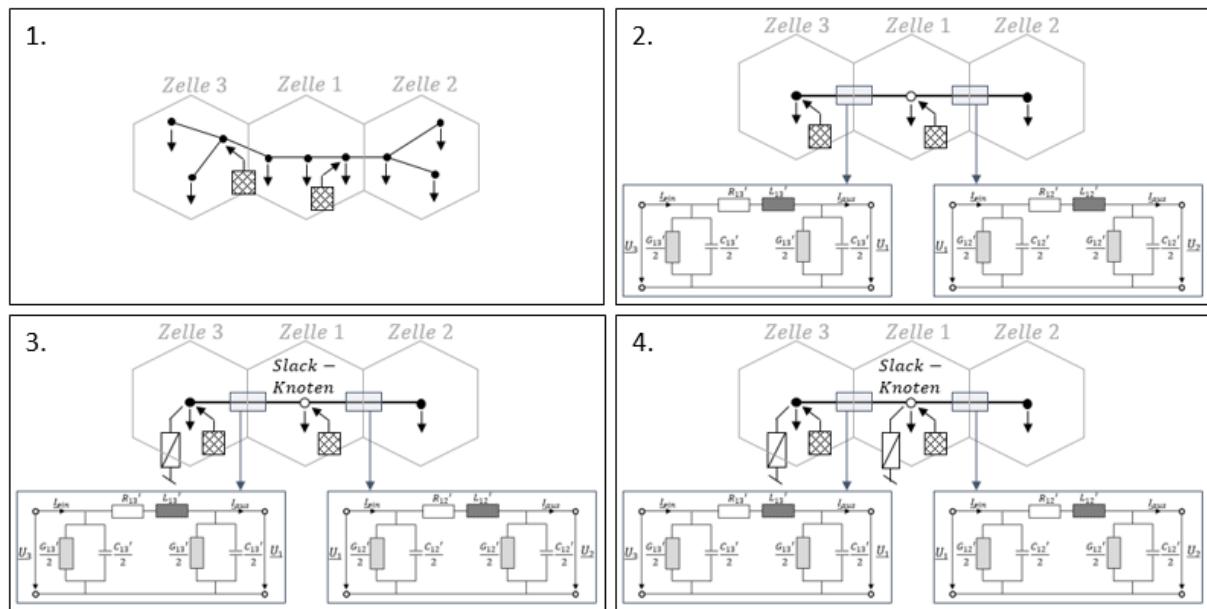


Abbildung 6: Prozess der Ersatznetzerstellung: 1. Originalnetz mit gegebener Zelleneinteilung, 2. Aggregation der Knotengrößen und Leitungsmodellierung, 3. Blindleistungsanpassung in den Einspeiseknoten, 4. Blindleistungsanpassung im Slack-Knoten

Diese Vorgehensweise ist bisher nur an einfachen Strukturen und kleinen Netzen mit geringer Knoten- und Zellenanzahl getestet. Weitere Adaptionen dieses Prozesses sind hinsichtlich stark vermaschter Netze mit Ringstrukturen vorzunehmen. Schließlich soll es so jedoch gelingen, wirk- und blindleistungsgenaue Modellierungen sowohl von Leitungen als auch des elektrischen Verhaltens, vor allem bezüglich der Blindleistungsverhältnisse, zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] INA - INSTITUT FÜR NETZ- UND ANWENDUNGSTECHNIK GMBH; Ostbayrische Technische Hochschule Regensburg (Mitarb.): *Zukünftige Bereitstellung von Blindleistung und anderen Maßnahmen für die Netzsicherheit*. 2016
- [2] HEIMBERGER, Markus ; KAUFMANN, Thomas ; MAIER, Christoph ; NEMEC-BEGLUK, Sabina ; WINTER, Alexander ; GAWLIK, Wolfgang: *Energieträgerübergreifende Planung und Analyse von Energiesystemen*. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 134 (2017), Nr. 3, S. 229–237
- [3] VOPAVA, Julia ; BÖCKL, Benjamin ; KRIECHBAUM, Lukas ; KIENBERGER, Thomas: *Anwendung zellularer Ansätze bei der Gestaltung zukünftiger Energieverbundsysteme*. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 134 (2017), Nr. 3, S. 238–245
- [4] BÖCKL, Benjamin ; KRIECHBAUM, Lukas ; KIENBERGER, Thomas: Analysemethode für kommunale Energiesysteme unter Anwendung des zellularen Ansatzes. In: *14. Symposium Energieinnovation (EnInnov2016)*.
- [5] ENERGietechnische GESELLSCHAFT: *VDE Studie - Der zellulare Ansatz : Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende*, 2015
- [6] DECKMANN, S. ; PIZZOLANTE, A. ; MONTICELLI, A. ; STOTT, B. ; ALSAC, O.: *Studies on Power System Load Flow Equivalencing*. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (1980), Vol. PAS-99, No.6, S. 2301–2310
- [7] PAPAEMMANOUIL, Antonis ; ANDERSSON, Göran: On the reduction of large power system models for power market simulations. In: *17th Power Systems Computation Conference Stockholm*.
- [8] GAVRILAS, Mihai ; IVANOV, Ovidiu ; GAVRILAS, Gilda: REI Equivalent Design for Electric Power Systems with Genetic Algorithms. In: *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*.
- [9] CRASTAN, Valentin: *Elektrische Energieversorgung* 1. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015