

# Die Problematik der induktiven Beeinflussung parallelgeführter Hochspannungsleitungssysteme – Berechnung und Lösungsvorschläge

Christian Raunig<sup>1)</sup>, Ernst Schmutzner<sup>1)</sup>, Lothar Fickert<sup>1)</sup>, Georg Achleitner<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Elektrische Anlagen/TU Graz, Inffeldgasse 18/I A-8010 Graz, +43 316/873-7552, christian.raunig@TUGraz.at, [www.ifea.tugraz.at](http://www.ifea.tugraz.at)

<sup>2)</sup> Austrian Power Grid, Wagramer Straße 19 (IZD-Tower) A-1220 Wien, +43 50320-56338, georg.achleitner@apg.at, [www.apg.at](http://www.apg.at)

**Kurzfassung:** Im Zuge des vermehrten Ausbaues von regenerativen Erzeugungsanlagen, werden z.B. in windreichen Gebieten Windparks mit hohem elektrischen Leistungsdargebot und stark volatilen Energieaufkommen errichtet, welche mit Hilfe einer geeigneten Anbindung mittels Hochspannungsleitungen und Umspannwerke zum Verbraucher übertragen werden müssen. Um diese örtlich konzentrierten Erzeugungsanlagen in das Stromnetz einzubinden und den erzeugten Strom effizient zu nutzen, müssen die Transportkapazitäten bestehender Leitungen und Kapazitäten der Umspannwerke ausgebaut und entsprechend den neuen Anforderungen angepasst werden.

Diese vermehrte Einbindung von Windkraft-Umspannwerken in bestehende symmetrisch aufgebaute Leitungssysteme führt ohne entsprechende Gegenmaßnahmen zu Problemen im Betrieb des Netzes durch Unsymmetrieeffekte in Form von niederfrequenten induktiven Beeinflussungen. Diese unerwünschten Spannungs- und Stromunsymmetrien führen zu Kreisströmen in Leitungssystemen und können unter Umständen zu

- spontanen, Lastfluss abhängigen Meldungen,
- einer verringerten Transportkapazität,
- höheren Leitungsverlusten und
- Beeinflussungswirkungen

führen, weshalb Maßnahmen ergriffen werden müssen. Zusätzliche Einschleifungen, höhere Transportkapazitäten, sich ändernde Lastflusssituationen, der fortschreitenden Leitungsausbau und die vermehrte Führung von Leitungssystemen auf Gemeinschaftsgestängen führt zu immer stärkeren induktiven Beeinflussungen, welche den Betrieb des Netzes beeinträchtigen können. Sind z.B. ausbaubedingt hohe induzierte Spannungen oder Kreisströme zu erwarten, können diese Probleme mit Hilfe von kosten- und praxisorientierten Optimierungen hinsichtlich des Verdrillungsschemas der Leitungszüge im Vorhinein verifiziert und gelöst werden.

**Keywords:** Induktive Beeinflussung, Unsymmetrie, Summenkreisströme, Optimierung

## 1 Einleitung

Elektrische Hochspannungsnetze und darin eingesetzte Betriebsmittel sind grundsätzlich symmetrisch aufgebaut um dadurch eine auftretende und störende Unsymmetrie und dabei entstehende Beeinflussungen durch ohmsche, induktive und kapazitive Kopplungen zu reduzieren. Freileitungssysteme besitzen im Speziellen aufgrund der geometrischen Leiterseilaufhängung eine natürliche Unsymmetrie, welcher durch zyklisches verdrillen entgegen gewirkt werden kann. Übertragungsleitungen werden üblicherweise in Verdrillungsabschnitte unterteilt und nach einem bestimmten festgelegten Schema verdrillt ausgeführt, damit eine Längssymmetrie der Leitung erreicht wird. Für den Fall, dass eine bestehende symmetrische Leitung unterbrochen wird z.B. für die Einschleifung eines neuen Umspannwerkes (UW), werden die einzelnen Systemlängen verändert und die Symmetrie aufgehoben. Im Hinblick auf die gegenseitige niederfrequente induktive und kapazitive Beeinflussung von parallelgeführten Freileitungssystemen wird zwischen einer inneren (natürlichen) und einer äußeren Unsymmetrie unterschieden. Die innere (natürliche) Unsymmetrie bezieht sich auf die Unsymmetrie des Systems bzw. eines galvanisch getrennten Netzes. Auswirkungen sind, z.B. unsymmetrische Phasenströme und -spannungen bzw. Verlagerungsspannungen während des Normalbetriebs von Netzen mit isoliertem bzw. resonant geerdetem Sternpunkt. Die äußere Unsymmetrie bezieht sich auf die induktiv oder kapazitiv eingekoppelte Unsymmetrie aufgrund parallelgeführter Leitungssysteme. Diese Leitungssysteme können einem galvanisch verbundenen sowie galvanisch getrenntem Netz mit selber und unterschiedlicher Netzfrequenz angehören.

In diesem Beitrag zeigen die Autoren die Problematik der induktiven Beeinflussung parallelgeführter Hochspannungsleitungssysteme, welche aufgrund einer Einbindung von Umspannwerken für erneuerbare Energien in bestehende symmetrisch aufgebaute Leitungssysteme auftreten. Diese Beeinflussungen in Form von Unsymmetrieeffekten, hervorgerufen durch niederfrequente induktive Beeinflussungen, sind z.B. unerwünschten Spannungs- und Stromunsymmetrien und resultierende Kreisströme. Zusätzliche Einschleifungen, höhere Transportkapazitäten, sich ändernde Lastflusssituationen (aufgrund von Windkrafteinspeisung), der fortschreitenden Leitungsausbau und die Führung von Leistungssystemen auf Gemeinschaftsgestängen führen zu immer stärkeren induktiven Beeinflussungen, welche den Betrieb des Netzes beeinträchtigen können.

## 2 Methode und Modellbildung

Zur Ermittlung der Auswirkung der gegenseitigen niederfrequenten induktiven Beeinflussung, müssen die Kopplungsmechanismen der Leitungssysteme nachgebildet werden. In diesem Beitrag wird ein Modell [11, 12, 13] gezeigt, welches die gegenseitige Kopplung der einzelnen Leiter einer Übertragungsleitung durch ein mathematisches Äquivalent nach [5] ausdrückt. Mit Hilfe dieses mathematischen Äquivalents (Ersatznetzwerkes) ist es möglich, die Berechnung der induktiven Beeinflussung auf Basis des Knotenpunktverfahrens (KPV) [6] durchzuführen. Durch diesen Ansatz kann der Erdseilkettenleiter in der Modellbildung berücksichtigt werden, was zu einer realitätsnahen Nachbildung der Leitung führt. Der Vorteil dieses Modells liegt in der Berechnung der induktiven Beeinflussung unter Berücksichtigung der gegenseitigen Rückwirkung zwischen den einzelnen Systemen bzw. Leitern, der

Integration des Erdseilkettenleiters und der Möglichkeit des einfachen Nachbildens von induktiv beeinflussten Netzbereichen.

Die Beziehung der induktive Kopplung zwischen zwei Leiter-Schleifen mit Erdrückleitung kann mathematisch ausgedrückt werden [5, 6], dabei gelten die folgenden grundsätzlichen Zusammenhänge (1):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A(\text{Eingang})} - \underline{U}_{A(\text{Ausgang})} &= \Delta \underline{U}_A = \underline{Z}_{AA} \cdot \underline{I}_A + \underline{Z}_{AB} \cdot \underline{I}_B \\ \underline{U}_{B(\text{Eingang})} - \underline{U}_{B(\text{Ausgang})} &= \Delta \underline{U}_B = \underline{Z}_{BA} \cdot \underline{I}_A + \underline{Z}_{BB} \cdot \underline{I}_B \end{aligned} \quad (1)$$

- $\underline{U}_{A(\text{Eingang})}$  ... Leiter-Erde-Spannung des Leiters A am Eingang des Impedanz-Vierpoles
- $\underline{U}_{A(\text{Ausgang})}$  ... Leiter-Erde-Spannung des Leiters A am Ausgang des Impedanz-Vierpoles
- $\Delta \underline{U}_A, \Delta \underline{U}_B$  ... Längsspannung entlang des Leiters
- $\underline{Z}_{AA}, \underline{Z}_{BB}$  ... Selbstimpedanz der Leiter
- $\underline{Z}_{AB}, \underline{Z}_{BA}$  ... Gegenimpedanz der Leiter
- $\underline{I}_A, \underline{I}_B$  ... Phasenstrom

In der Abbildung 1 ist die Beziehung (1) graphisch dargestellt um die Zusammenhänge der induktiven Kopplung zweier Leiter-Schleifen mit Erdrückleitung zu verdeutlichen.

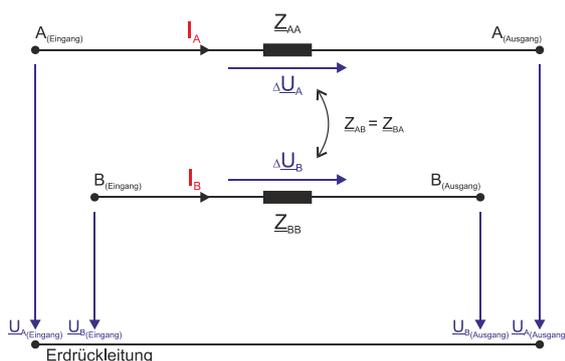


Abbildung 1: Graphische Darstellung der induktiven Kopplung zweier Leiter-Schleifen mit Erdrückleitung

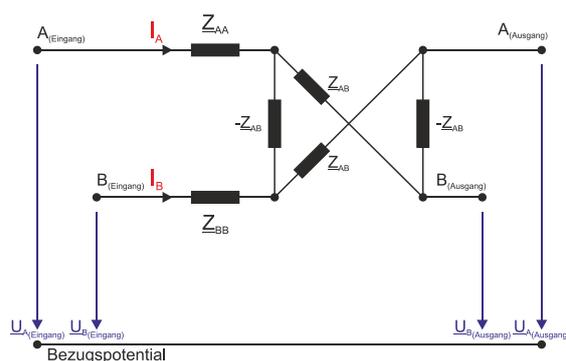


Abbildung 2: Äquivalentes Ersatznetzwerk zweier induktiv gekoppelter Leiter-Schleifen mit Erdrückleitung nach [5]

Die graphische Darstellung des äquivalenten Netzwerkes, welches nach dem mathematische Modell nach [5] erstellt werden kann, ist in der Abbildung 2 dargestellt. Das dargestellte Ersatznetzwerk wird für die Modellierung der einzelnen Kopplungen der an der Beeinflussung beteiligten Leitern (gekoppelt Hochspannungsleitungssysteme, siehe Abbildung 3) herangezogen. Dabei werden die einzelnen Kopplungen der Leiter z.B. L<sub>1</sub> auf L<sub>2</sub> eines Spannungsfeldes nachgebildet und kaskadiert. Durch die Kaskadierung der Ersatzschaltungen für die einzelnen gekoppelten Leiter und Aneinanderreihen der einzelnen Spannungsfelder entsteht nun ein Netzwerk, welches die untersuchte Leitung bzw. den untersuchten Netzbereich nachbildet [11, 12].

Zusätzlich werden die einzelnen Masterdungen durch eine Verbindung des Erdseiles über einen ohmschen Widerstand (entsprechend der Masterdung) mit dem Bezugsknoten eingefügt. Als Abschluss der Modellbildung werden die Sammelschienen, sowie die

Ersatzimpedanzen der Transformatoren und die speisenden Quellen in das Modell integriert. Die Quellen werden im Modell so integriert, dass sich auf den zu untersuchenden Leitungssystemen abhängig von den angegebenen Transportleistungen ein Last- bzw. Stromfluss einstellt, welcher dem Impedanzverhältnissen der Leitungen und der induktiven Kopplung zwischen den Leitern bzw. Systemen entspricht. Es können somit die Leiterströme des Netzbereiches unter annähernd realen Bedingungen (unsymmetrischer Lastfluss) nachgebildet werden.

Ein weiterer Vorteil der Modellbildung ist es, dass komplizierte Netztopologien wie beispielsweise T-Einschleifungen nachgebildet werden können.

### **3 Berechnung**

Durch die parallele Führung von mehreren Leitungssystemen auf einem Gemeinschaftsmasten oder entlang einer „eng“ benachbarten Trasse kommt es aufgrund der gegenseitigen elektromagnetischen Beeinflussung der Leitungssysteme zu Unsymmetrie-Erscheinungen wie z.B. induzierte Kreisströme, welche in weiterer Folge zu spontanen Unsymmetrie-Warnmeldungen bzw. Beeinträchtigungen des Betriebes der Leitungsanlagen führen. Diese Kreisströme sind von der Leitungslänge, der Phasenbelegung und der Lastflusssituation abhängig und können als Summenkreisstrompegel der Leitungssysteme berechnet und angegeben werden. Durch die Entwicklung des Modells auf Basis des Knotenpunktverfahrens unter Berücksichtigung induktiv gekoppelter Leiter, können auftretende Fragestellungen wie Unsymmetrie-, Kreis- und Erdseilströme für den Normalbetrieb und den Fehlerfall bestimmt werden und in weiterer Folge Maßnahmen, wie z.B. eine Optimierung des Verdrillungsschemas, erarbeitet werden.

#### **3.1 Wirkung des Erdseilkettenleiters**

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Erdseilkettenleiters werden Ergebnisse des neuen Ansatzes mit dem Knotenpunktverfahren dem konservativen Ansatz ohne Berücksichtigung des Erdseilkettenleiters gegenübergestellt. Bei dem konservativen Ansatz wird das Erdseil beidseitig geerdet, aber ähnlich wie ein Leiterseil behandelt, d.h. ohne zusätzliche Erdung an den einzelnen Freileitungsmasten modelliert. Da in der Realität das Erdseil an jedem elektrisch leitfähigem Masten geerdet wird, bildet sich ein Erdseilkettenleiter aus, dies wird im neuen Ansatz in der Modellbildung berücksichtigt. Die Modellierung mit Berücksichtigung des Erdseilkettenleiters ist im Speziellen bei verdrillten Leitungen notwendig, da sich in diesem Fall in den einzelnen Bereichen durch die verschiedenen Phasenbelegungen unterschiedliche Erdseilströme und Ströme über die Masten (Betrag und Winkel) ausbreiten können. Bei einer nicht-verdrillten Leitung bilden sich bei beiden Ansätzen mit Ausnahme der Randbereiche und der Bereiche mit unterschiedlichen Mastausbreitungswiderständen dieselben Erdseilströme aus.

Als Grundlage für diese Gegenüberstellung dient ein einfaches Beispiel einer 380-kV-Doppelleitung mit einer Länge von 60 km und per Zufallsgenerator gewählten Spannfeldlängen (zw. 200 - 320 m) bzw. Mastausbreitungswiderständen (zw. 0,5 - 10  $\Omega$ ). Als Belastung wird eine Transportkapazität von 1000 MW (~700 A pro System und Phase) angenommen. Die gewählten Verdrillungsschemata sind in der Abbildung 3 dargestellt.

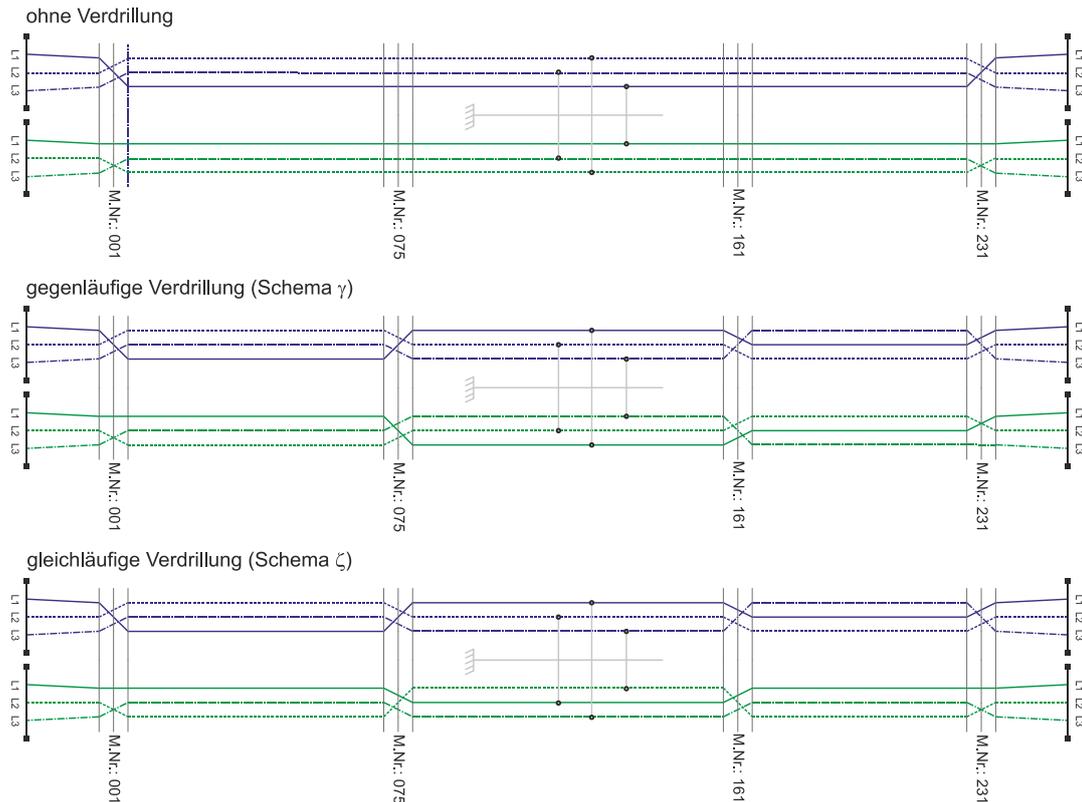


Abbildung 3: Verdrillungsschemata des Beispiels

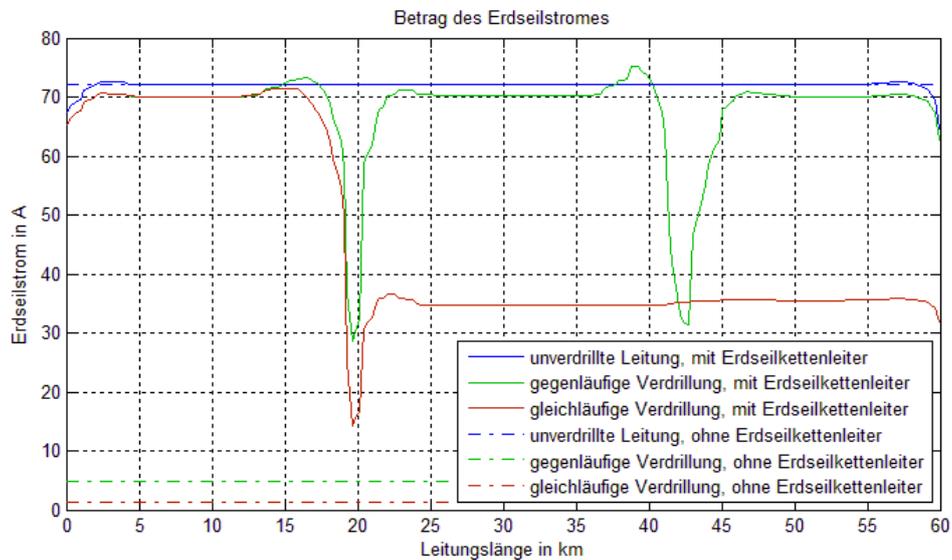


Abbildung 4: Betrag des Erdseilstromes entlang einer Leitung mit und ohne Berücksichtigung des Erdseilkettensleiters bei verschiedenen Verdrillungsvarianten

In Abbildung 4 ist ersichtlich, dass durch die modelltechnische Berücksichtigung des Erdseilkettensleiters, sich in den einzelnen Verdrillungsabschnitten unterschiedliche Erdseilströme (Betrag und Winkel) ausbilden. So können die realen „Reduktionsfaktoren“ bzw. Beeinflussungswirkungen bestimmt werden. Je nachdem, in welchem Abschnitt sich ein beeinflusster Leiter befindet, kann es zu höheren Beeinflussungswirkungen kommen. Dieser Umstand hat vor allem Bedeutung, wenn Leitungen auf Mehrfachgestängen geführt werden und sich aufgrund der Topologie Kreisströme ausbilden können oder in dem Fall, dass eine beeinflusste Anlage nur abschnittsweise mit der induzierenden Leitung parallelgeführt wird.

### 3.2 Validierung der Ergebnisse

Zur Validation der rechnerisch ermittelten Ergebnisse und Sicherstellung, dass die Optimierungsrechnungen der Verdrillungsschemata zu dem gewünschten Erfolg führen, wurden die Ergebnisse mit messtechnisch aufgenommenen Werten verglichen. Für die Berechnungen und Untersuchungen wurde zur Vereinfachung ausschließlich ein reiner Wirkleistungslastfluss herangezogen, da dies für die Quellenvorgabe leichter zu realisieren ist. Grundsätzlich kann in einem erweiterten Modell ein Blindleistungslastfluss berücksichtigt werden. Anhand gemessener Transportleistungen im untersuchten Netzbereich wird der entsprechende Lastfall nachgerechnet und die Ergebnisse verglichen.

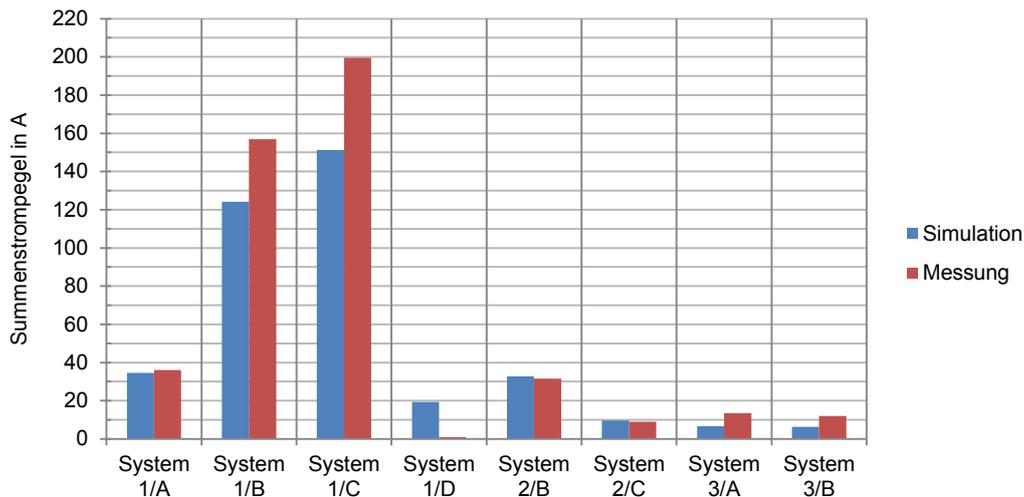


Abbildung 5: Gegenüberstellung von Simulations- und Messwerten der Summenstrompegel in dem untersuchten Netzbereich (Abbildung 6b)

Abbildung 5 zeigt die Gegenüberstellung der durch Simulation und Messungen ermittelten Summenstrompegel. Aus diesem Vergleich kann festgestellt werden, dass die Rechenergebnisse unter Berücksichtigung der teilweise vereinfachten Modellbildung<sup>1</sup> eine ausreichende Übereinstimmung aufweisen. Die Größten Abweichungen werden durch die nicht exakt zeitgleiche messtechnische Erfassung der Ströme in den einzelnen Leitungssystemen bzw. Umspannwerken und der Vernachlässigung des Blindleistungsflusses erklärt.

### 3.3 Summenstrompegel ausgewählter Ausbaustufen

Im Folgenden werden auszugsweise Ergebnisse von Untersuchungen in einem Netzbereich gezeigt, welche die Entwicklung von Summenkreisstrompegel in Abhängigkeit von verschiedenen Ausbaustufen und Lastszenarien zeigen. Unter dem Begriff Summenstrom wird in diesem Beitrag die Stromsumme der unsymmetrischen Phasenströme verstanden, der Summenkreisstrompegel ist daher als Pegel der Unsymmetriekreisströme in den Leitungssystemen zu verstehen.

<sup>1</sup> Die Vereinfachung der Modellbildung erfolgte hauptsächlich an Randbereichen des Netzbereiches, der Nachbildung der Transformatoren und Umspannwerken, welche aufgrund der Daten nicht vollständig nachgebildet werden konnten, es wurden jedoch Analysen durchgeführt, die zeigten, dass diese Vereinfachungen keine nennenswerten Auswirkungen auf die eigentlichen gesuchten Ergebnisse haben.

Untersucht wird ein galvanisch zusammenhängender Netzbereich, in welchem die Leitungszüge in weiten Bereichen auf Mehrfachleitungsmasten geführt werden. Damit realitätsnahe Ergebnisse erzielt werden, werden die Berechnung mit unterschiedlichen realen Lastflusssituationen bzw. abgeschätzten zukünftig Lastflussszenarien (unter Berücksichtigung von zusätzlicher Einspeisung aus regenerativen Energiequellen wie z.B. Windenergie) berücksichtigt.

Der untersuchte Netzbereich umfasst in einem ersten Ausbauzustand fünf Umspannwerke, welche durch die einzelnen Systeme verbunden sind, der Schaltzustand ist dem Einlinien-Schaltbild in Abbildung 6a zu entnehmen. In weiteren Ausbauschritten werden Leitungen aufgetrennt und in Umspannwerke eingebunden sowie weitere Systeme (auf bestehenden Masten) aufgelegt, um einen steigenden Transportbedarf an elektrischer Energie gerecht zu werden bzw. die zusätzlich eingespeiste Energie abzutransportieren.

In den nachfolgenden Grafiken werden die ermittelten Summenstrompegel durch eine farbliche Skala dargestellt, wobei den Farben den folgenden Strompegel zugeordnet sind:

- Grün (Pegel zwischen 0 und 50 A)
- Orange (Pegel zwischen 50 und 100 A)
- Rot (Pegel größer 100 A)

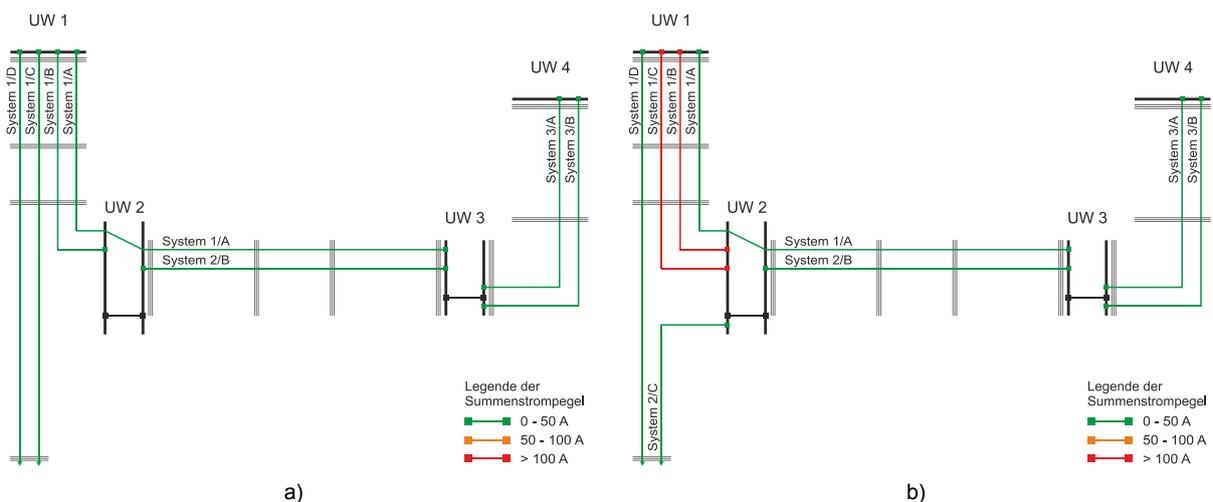


Abbildung 6: Illustration des Ausbauzustandes mit den berechneten Summenstrompegeln in den Leitungssystemen a) vor und b) nach den ersten Aus- bzw. Umbaumaßnahmen im untersuchten Netzbereich

In Abbildung 6 ist der Ausbauschritt zu sehen, in dem die lastabhängigen Kreisstrommeldungen aufgetreten sind. Es ist sehr gut zu erkennen, dass durch das Auftrennen des Systems 1/C das Verdrillungsschema der Leitung unterbrochen wird und die neue Netztopologie zu einem Kreisstrompfad über die Systeme 1/B und 1/C führt.

In weiteren Um- bzw. Ausbauschritten werden, zur Erhöhung der Transportkapazität, zwei weitere Systeme in Abschnitten des untersuchten Netzbereiches aufgelegt und somit die Netztopologie (Einschleifungen, Anzahl der Leitungssysteme etc.) weiter geändert. In der Abbildung 7 ist die Netztopologie und die Summenstrompegel (a, Lastszenario mit zusätzlicher Einspeisung bzw. b, Lastszenario ohne zusätzliche Einspeisung) dargestellt, welche auftreten, wenn die geplante Phasenbelegung bzw. ein geplantes Verdrillungsschema zur Anwendung kommt.

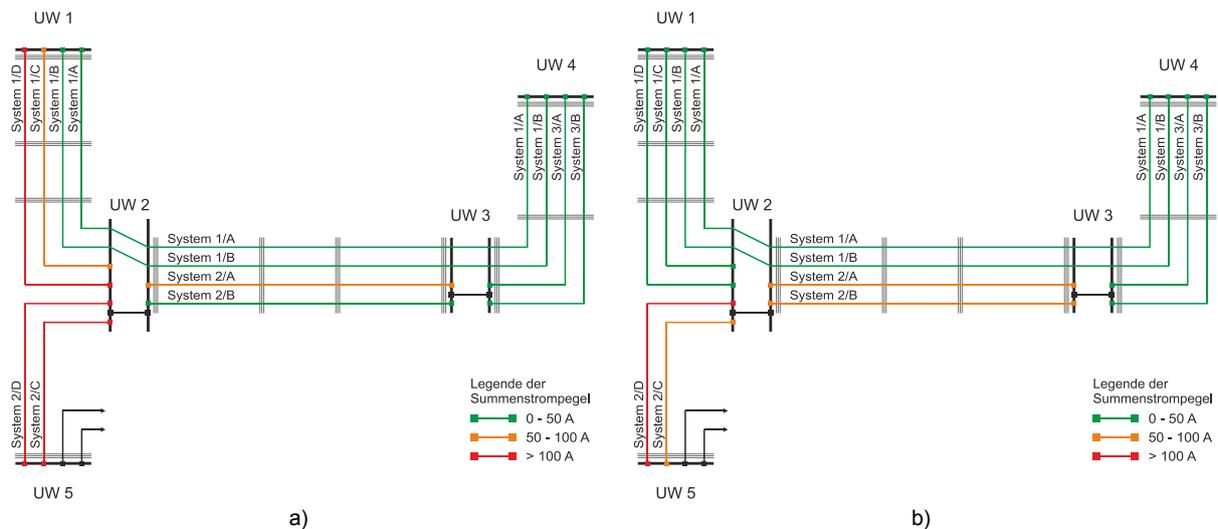


Abbildung 7: Illustration des untersuchten Netzbereiches mit Summenstrompegel nach weiteren Ausbaumaßnahmen zur Erhöhung der Transportkapazität, a) Lastszenario mit zusätzlicher Einspeisung, b) Lastszenario ohne zusätzliche Einspeisung

Es ist ersichtlich, dass die Summenstrompegel bei bestimmten Lastszenarien ansteigen und somit mit einer vermehrten Häufung von Meldungen durch die Leittechnik zu rechnen ist.

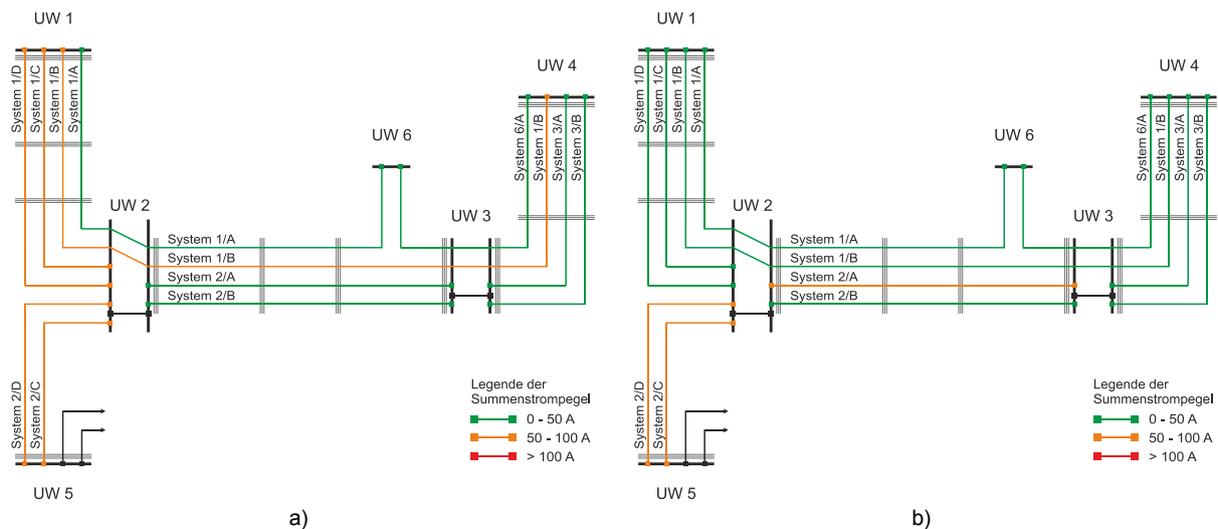


Abbildung 8: Illustration des untersuchten Netzbereiches mit Summenstrompegel nach weiteren Ausbaumaßnahmen zur Erhöhung der Transportkapazität und Einbindung eines neuen Umspannwerkes, a) Lastszenario mit zusätzlicher Einspeisung, b) Lastszenario ohne zusätzliche Einspeisung

Abbildung 8 zeigt ein Ausbauschema mit einem neu geplanten Umspannwerk (UW 6), welches in die bestehende Netztopologie (siehe Abbildung 7) integriert wird. Das neue Umspannwerk wird mit einer 1-systemigen Einschleifung angebunden. Die dadurch entstehende Änderung der Summenstrompegel ist den Abbildungen 8a und 8b zu entnehmen.

### 3.4 Optimierung des Verdrillungsschemas

Da sich die häufigen (Nullstrom-)Meldungen störend auf den Netzbetrieb auswirken und hohe Summenströme die Transportkapazität sowie die Beeinflussungswirkungen und

Übertragungsverluste negativ beeinflussen, werden Optimierungen des Verdrillungsschemas bzw. der Seilbelegung in bestimmten ausgewählten Netzbereichen durchgeführt. Diese Optimierungen haben das Ziel, für möglichst alle Ausbauzustände und die gewählten Lastszenarien ein Optimum darzustellen. Im Zuge der Optimierung werden alle möglichen Phasenbelegungen in den drei Optimierungsbereichen berechnet und die Beträge der Summenstrompegel verglichen. Die jeweils besten drei Varianten, dienen als Grundlage für den nächsten Bereich, somit ergeben sich 27 unterschiedliche Varianten. Die Optimierungen erfolgen unter Berücksichtigung von vorgegebenen praktischen (z.B. Umsetzung der Verdrillungsvariante) und wirtschaftlichen (z.B. Verwendung von bestehenden Verdrillungsmasten) Rahmenbedingungen.

In den folgenden Abbildungen sind die unterschiedlichen Summenstrompegel eines gefundenen und umsetzbaren Verdrillungsschemas bei unterschiedlichen Lastszenarien und Ausbaubarvarianten dargestellt.

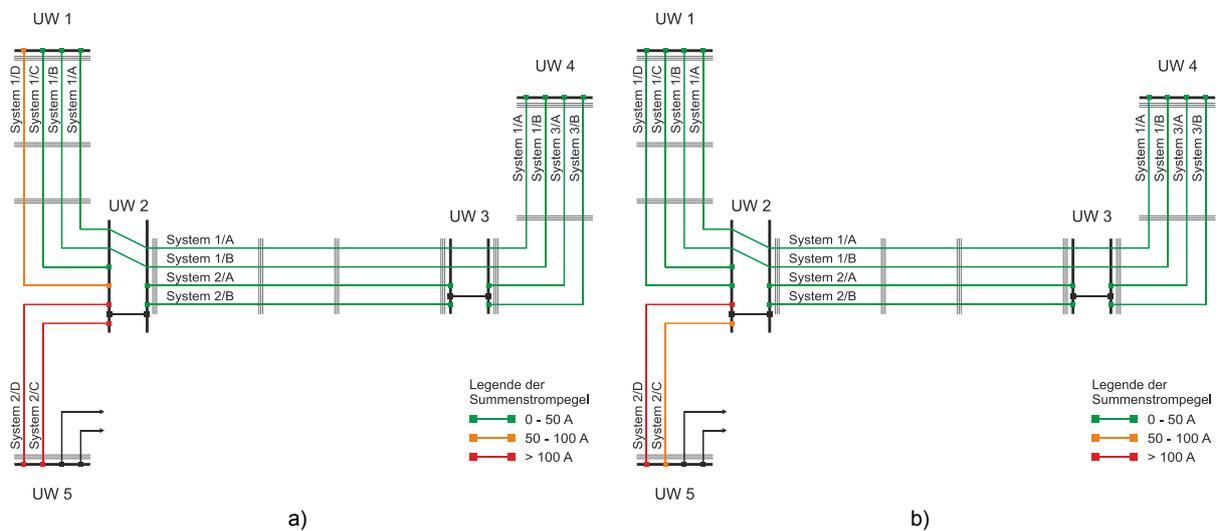


Abbildung 9: Summenstrompegel des untersuchten Netzbereiches (Zwischenausbaustufe) nach der Optimierung des Verdrillungsschemas, a) Lastszenario mit zusätzlicher Einspeisung, b) Lastszenario ohne zusätzliche Einspeisung

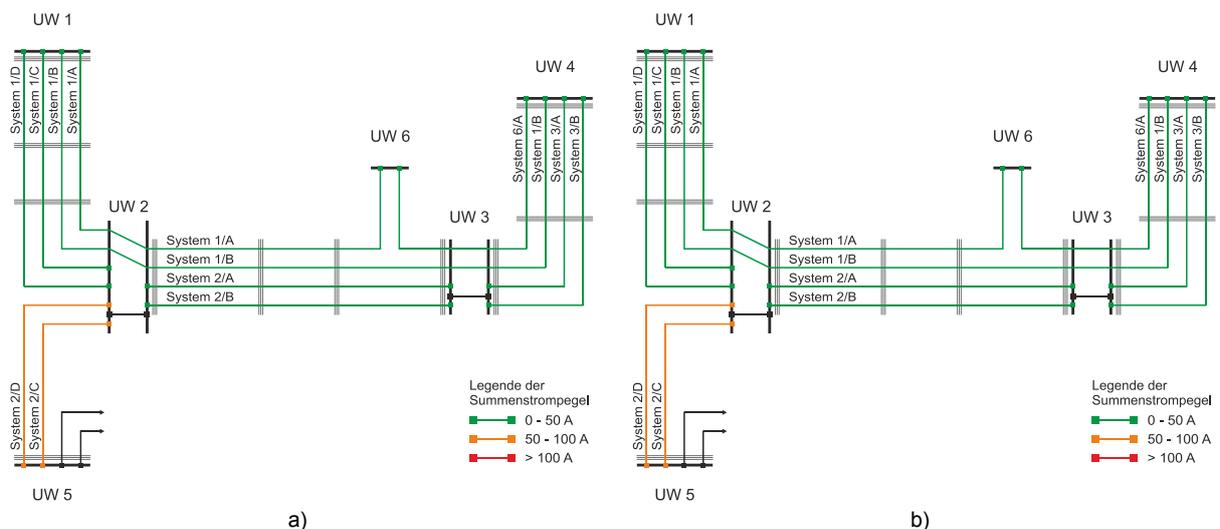


Abbildung 10: Summenstrompegel des untersuchten Netzbereiches (Endausbau) nach der Optimierung des Verdrillungsschemas, a) Lastszenario mit zusätzlicher Einspeisung, b) Lastszenario ohne zusätzliche Einspeisung

Es ist erkenntlich, dass durch die Vielzahl der durchgeführten Optimierungsdurchgänge ein Verdrillungsschema gefunden werden konnte, welches ein praktisches Optimum für die letzten beiden Ausbaurzustände darstellt, wobei die praktische Umsetzbarkeit berücksichtigt wird. In Abbildung 10a und 10b treten die gleichen Summenstrompegel für die gewählten Lastszenarien auf.

Anmerkung: Die Verdrillung bzw. Phasenbelegung der Systemen 2/C und 2/D wurden im Zuge der Untersuchungen nicht optimiert, weshalb in diesen noch teils hohe Kreisstrompegel auftreten.

## **4 Schlussfolgerungen und Ausblick**

Der neue wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur Bestimmung der induktiven Beeinflussung bei parallelgeführten Hochspannungsleitungssystemen, welches die gegenseitige Kopplung der Leiter untereinander, sowie die Rückwirkungen der Systeme bzw. der einzelnen Leiter untereinander berücksichtigt. Durch die Anwendung des Knotenpunktverfahrens, besteht die Möglichkeit den Erdseilkettenleiter in die Modellbildung zu integrieren und damit speziell bei verdrillten Leitungen die induktiven Beeinflussungen realitätsnaher zu bestimmen und Maßnahmen zur Verbesserung der Beeinflussungssituation zu entwickeln. Mit Hilfe dieses Modellansatzes können Berechnungen für den Normalbetrieb und den Störfall der Leitungen erfolgen und es besteht die universelle Möglichkeit die Auswirkung unsymmetrischer Lastflüsse auf andere Leitungssysteme unter Berücksichtigung des Impedanzverhältnisses, des Schaltzustandes und der induktiven Kopplung zu analysieren.

Die Berechnungen mit Hilfe des entwickelten Modells zeigen, dass die Unsymmetrieerscheinungen in elektrischen Netzen mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden können. Es steht somit ein validiertes Tool zur Verfügung induktive Beeinflussungen und deren Auswirkungen auf den Netzbetrieb zu ermitteln.

Messungen haben gezeigt, dass dieses Modell geeignet ist, Optimierungsmaßnahmen zur Reduktion der induktiven Beeinflussung unter Berücksichtigung von praktischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu identifizieren. Weiters ergibt sich die Möglichkeit unter Berücksichtigung des unsymmetrischen Lastflusses die Auswirkungen von eventuellen Ausbau- bzw. Umbaumaßnahmen im Vorhinein abzuschätzen und entsprechend gegenzusteuern.

Es kann gezeigt werden, dass bei Beeinflussungsrechnungen der Erdseilkettenleiter berücksichtigt werden muss, da sonst Fehler in der Berechnung der induzierten Spannungen und Ströme aufgrund von unterschiedlichen Reduktionsfaktoren auftreten. Dies wird auch damit begründet, dass bei der Gegenüberstellungen von Messungen und rechnerisch ermittelten Werten eine Abweichung zwischen den tatsächlich auftretenden Strömen und den Rechenergebnissen festgestellt wurden.

## 5 Literaturverzeichnis

Sofern Verweise in der gegenständlichen Veröffentlichung nicht direkt referenziert sind, dienen die angeführten Quellenangaben als weiterführende Literatur.

- [1] Fortescue: "*Method of symmetrical coordinates applied to the solution of poly-phase networks*", AIEE, Part 2, 37 (1918) 1027-1140
- [2] Carson: "*Wave propagation in overhead wires with ground return*", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 5, pp. 539-56, 1926
- [3] Pollaczek: "*Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung*", *E.N.T.*, vol. 3, no. 9, pp. 339-359, 1926
- [4] Haberland: "*Theorie der Leitung von Wechselstrom durch die Erde*", *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 6, pp. 366-379, 1926
- [5] Clarke: "*Circuit Analysis of A-C Power Systems*", Volume I, John Wiley & Sons, 1950
- [6] Oeding, Oswald: "*Elektrische Kraftwerke und Netze*", Springer-Verlag Berlin, 2011
- [7] ITU-T: "*Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines*", ISBN 92-61-03941-3, 2005
- [8] Raunig, Schmutzer, Fickert, Steinkellner, Achleitner: "*A new approach for the calculation of disturbing currents in inductively coupled transmission lines*", 22<sup>nd</sup> International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, 2013
- [9] Raunig, Schmutzer, Fickert, Achleitner: "*A new approach for the estimation of interference phenomena between coupled transmission lines*" Powertech 2013, Grenoble, 2013
- [10] Schmutzer: "*Ein Beitrag zur Berechnung der niederfrequenten induktiven Beeinflussung von Rohrleitungsnetzen*", Dissertation am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 1990
- [11] Raunig: "*Modellierung und Beeinflussung der induktiven Kopplung von Drehstromsystemen auf andere leitende Strukturen*", Arbeitstitel der laufenden Dissertation am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2014
- [12] Steinkellner: "*Der Einfluss der Verdrillung auf die Stromunsymmetrie bei induktiv gekoppelten Hochspannungsfreileitungssystemen*", Diplomarbeit am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2012
- [13] Schuster: "*Stromaufteilung bei Kurzschlüssen in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung induktiv gekoppelter Leitungssysteme*", Diplomarbeit am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2012