

# Induktive Kopplung parallelgeführter Hochspannungsleitungssysteme – Erfahrungsbericht und Maßnahmen

Christian Raunig<sup>1)</sup>, Klemens Reich<sup>1)</sup>, Georg Achleitner<sup>1)</sup>, Lothar Fickert<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Austrian Power Grid AG, Wagramer Straße 19 (IZD-Tower), A-1220 Wien,  
+43 (0) 50 320 - 56362, [christian.raunig@apg.at](mailto:christian.raunig@apg.at), [www.apg.at](http://www.apg.at)

<sup>2)</sup> Institut für Elektrische Anlagen und Netze / TU Graz, Inffeldgasse 18/I, A-8010 Graz,  
+43 (316) 873 - 7564, [lothar.fickert@tugraz.at](mailto:lothar.fickert@tugraz.at), [www.iean.tugraz.at](http://www.iean.tugraz.at)

**Kurzfassung:** Bedingt durch den vermehrten Ausbau von regenerativen Energieträgern und den steigenden Stromtransport werden Umspannwerke und neue Leitungsabschnitte in bestehende Leitungszüge eingebunden. Dies kann aufgrund der niederfrequenten induktiven Kopplung der Leitungssysteme ohne entsprechende Maßnahmen zu Unsymmetrieeffekten wie z.B. Unsymmetrie(kreis)strömen führen, welche eine negative Auswirkung auf den Betrieb der Leitungen haben. Zukünftig bekommt die Berücksichtigung der gegenseitigen induktiven Kopplung von Leitungssystemen, vor allem durch die steigenden Leitungsauslastungen wie z.B. bei Dynamic-Line-Rating Betrieb, eine höhere Bedeutung.

**Keywords:** Induktive Kopplung, Unsymmetrieströme, Kreisströme, Verdrillung, Optimierung

## 1 Einleitung

Ein stromdurchflossener Leiter verursacht in seiner Umgebung ein niederfrequentes magnetisches Wechselfeld, welches in benachbarten elektrisch leitfähigen Strukturen eine Spannung induziert. Besteht ein geschlossener niederimpedanter Strompfad (z.B. über elektrisch parallel geschaltete Doppelleitungssysteme oder geerdete Erdseile und Kabelschirme), kann sich in diesen Leitern ein Strom ausbilden. Je nach Konfiguration können diese induzierten Ströme Werte annehmen, welche zu zusätzlichen Leitungsverlusten, Einflüssen auf Schutz- und Leitetechnikalgorithmen (Schutzanregungen und –meldungen), Ableitströmen in Erdungsanlagen etc. führen.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit den aus induktiven Beeinflussungswirkungen resultierenden Unsymmetrie(kreis)-, Erdseil- und Mastableitströmen, welche durch induktiv gekoppelte Hochspannungsfreileitungssysteme im Normalbetrieb (Lastflusssituationen) an einem konkreten Beispiel untersucht wurden.

## 2 Beschreibung der untersuchten Beeinflussungstopologie

Bei der untersuchten Beeinflussungstopologie (siehe Abbildung 1) handelt es sich um eine 380-kV-Doppelleitung, welche in einem Abschnitt als eine 380/220-kV-Vierfachleitung geführt wird. Durch den zukünftigen Netzausbau ist es geplant in den bestehenden Leitungszug weitere Umspannwerksprojekte einzubinden, was zu einer Änderung der Beeinflussungstopologie führt.

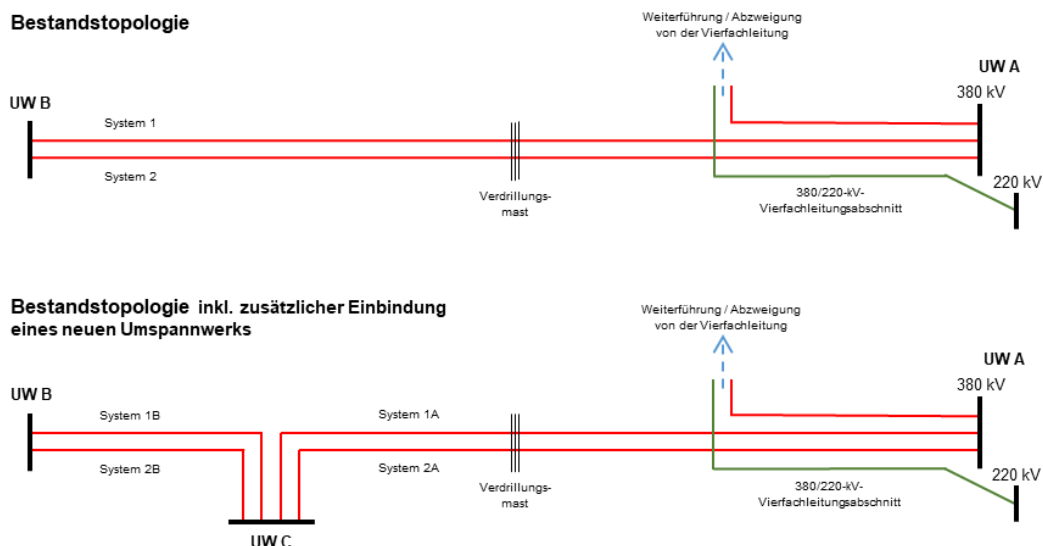


Abbildung 1: Vereinfacht schematisch dargestellte Beeinflussungstopologie

Das Augenmerk der Untersuchungen liegt, bedingt durch laststromabhängige Unsymmetriemeldungen, auf den Unsymmetrie(kreis)strömen in den Leitungssystemen und Sammelschienen-Querkupplungen, Erdseil- und Mastableitströmen in den einzelnen Leitungsabschnitten (Erwärmung von Erdseil-Armaturen) während des Normalbetriebs. In dem Beitrag werden auszugsweise Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

### 3 Methodik

Anhand eines entwickelten Modells [1, 2, 3], welches auf der Berücksichtigung einer speziellen Ersatzschaltung zur Nachbildung der gegenseitigen Kopplungswirkung zweier elektrischer Leiter [5] und dem Knotenpotentialverfahren basiert, ist die realitätsnahe Nachbildung der gegenseitigen niederfrequenten induktiven Beeinflussungswirkungen der Leiter unter Berücksichtigung des Erdseilkettenleiters möglich. Somit ist die Möglichkeit gegeben Unsymmetrie-, Erdseil- und Mastableitströme sowohl für den Normalbetrieb (Langzeitbeeinflussung) als auch für den Betrieb im Störfall (z.B. Erdkurzschluss, kurzzeitige Beeinflussung während des Störfalls) zu bestimmen und geeignete Maßnahmen zur Reduktion der Auswirkungen (z.B. mittels Optimierung der Phasenbelegung) zu untersuchen. Anhand der berechneten Mastableitströmen, können z.B. die resultierenden Erdungsspannungen an den einzelnen Masterdungsanlagen bestimmt und auf gegebenenfalls lastabhängige Erwärmung von Erdseilarmaturen geschlossen werden. Die gesamte Beeinflussungstopologie (Leitungssysteme, Kupplungen, Masterdungen, Erdseilkettenleiter, Transformatornullsystemersatzimpedanzen) kann mit Hilfe des angewendeten Modells abgebildet werden, was eine realitätsnahe Untersuchung der Leitung ermöglicht. Optimierungsrechnungen mit Annahme von verschiedenen Lastflussvarianten, Phasenseilkonfigurationen, etc. ermöglichen Entwicklungen von zukünftigen Maßnahmen unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen und praxisrelevanten Rahmenbedingungen. Eine Vielzahl von Untersuchungen haben gezeigt, dass die berechneten Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung mit in der Realität aufgenommenen Messwerten aufweisen.

## 4 Ergebnisse

In dem Beitrag werden einzelne ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen der beschriebenen Beeinflussungstopologie vorgestellt und diskutiert. Unabhängig von der Höhe der Lastflussströme in den einzelnen Systemen, ergeben sich anhand einer ersten Annahme acht Lastflusssituationen für die Beeinflussungstopologie, welche in weiterer Folge berücksichtigt werden.

### 4.1 Bestandsleitung

In einem ersten Schritt wurden anhand der Lastszenarien und der (n-1)-Ströme der Leitungssysteme die Bestandsleitung analysiert.

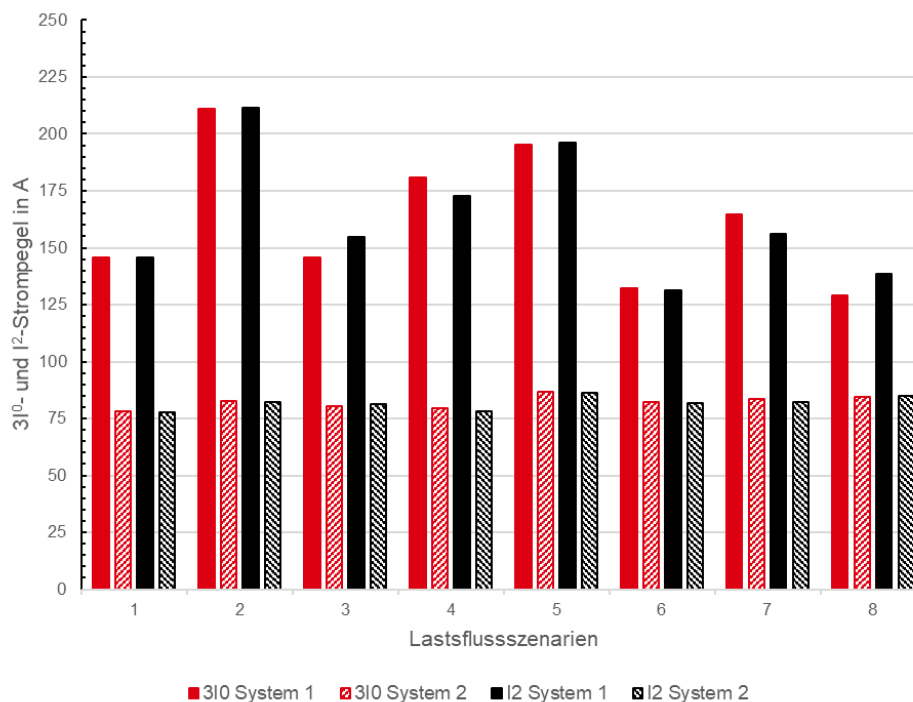


Abbildung 2:  $3I^0$ - und  $I^2$ -Strompegel der untersuchten Beeinflussungstopologie bei (n-1)-Lastströmen

Aus der Abbildung 2 sind die Unsymmetrie(kreis)ströme in den Leitungssystemen, welche bei der Konfiguration und den gewählten Lastannahmen auftreten angeführt. Die Pegel der Gegenstromkomponente ( $I^2$ ) bleibt bei unterschiedlichen Lastflussszenarien im Vierfachleitungsabschnitt relativ konstant.

Durch Leittechnik- und Schutzgeräte wird die Unsymmetrie in den Leitungssystemen und der Sammelschienen-Querkupplung überwacht. Treten Unsymmetrie(kreis)ströme auf, welche bestimmte Einstellwerte überschreiten kommt es zu einem Ansprechen dieser Überwachungsfunktionen. Je nach Schaltzustand (im Regelfall werden die Systeme einer Doppelleitung an verschiedene Sammelschienen geschaltet, welche gekuppelt betrieben werden), überlagern sich die Unsymmetrie(kreis)ströme der einzelnen Leitungssysteme über die Sammelschienen-Querkupplung. Die Unsymmetrie(kreis)ströme sind lastabhängig und steigen bei höheren Auslastungen der Leitungen. Stromunsymmetriemeldungen treten vorwiegend in Sammelschienen-Querkupplungen auf, da sich je nach Schaltzustand der

Unsymmetriestrom über die Querkupplung schließt, aber die verursachenden Lastströme nicht über die Querkupplung fließen.

Die eingesetzten Schutzgeräte verwenden die folgenden kurz beschriebenen Algorithmen [8, 9] zur Überwachung der Stromunsymmetrie.

Schutzgerät 1 [8]	Schutzgerät 2 [9]
<b>Freigabe der Funktion</b>	
$I_{ph(max)} > I_{nom} \cdot Faktor$	$I_{ph(max)} > I_{nom} \cdot Faktor$
<b>Unsymmetriefaktor</b>	
$= \frac{ I_{ph(min)} }{ I_{ph(max)} }$	$= \frac{ I^2 }{ I_{ph(max)} }$
<b>Meldung bei</b>	
$Unsymmetriefaktor < Einstellwert$	$Unsymmetriefaktor > Einstellwert$

$I_{ph(max)}$ ... maximalen Leiterstroms in A

$I_{ph(min)}$ ... minimalen Leiterstroms in A

$I^2$ ... Betrag des Gegensystemstroms (sym. Komponenten) in A

$I_{nom}$ ... Nennstrom der Stromwandler in A (z.B. 1200 A)

Die Untersuchungen zeigen, dass es bei dem vorliegenden Schaltzustand und den resultierenden lastabhängigen Unsymmetrie(kreis)strömen mehrfach zu Meldungen von Schutzgeräten in der Sammelschienen-Querkupplung kommt. Eine Kontrollrechnung mit einem Datensatz bestehend aus den 15-Minuten Stromwerten auf den an der Beeinflussungskonfiguration beteiligten Leitungssystemen hat dies bestätigt, sowie auch eine zeitliche Überschneidung mit den real aufgetretenen Unsymmetriemeldungen konnte nachgewiesen werden.

Wie bereits in den Beiträgen [6, 7] gezeigt wurde, treten bei Berücksichtigung des Erdseilkettenleiters entlang einer Freileitung in den Leitungsabschnitten (darunter sind neben Verdrillungsabschnitten auch Abschnitte mit weiteren parallelgeführten Leitungssystemen wie z.B. der vorliegende Vierfachleitungsabschnitt zu verstehen) in Betrag und Winkel unterschiedliche Erdseilströme aufgrund der Induktionswirkung der Phasenströme in das Erdseil auf. Dieser Umstand führt dazu, dass bedingt durch die Phasensprünge ein Ausgleichsstrom von den Erdseilen über die Masterdungen abfließt und je nach Höhe zu Erwärmungen von Erdseil-Armaturen führen kann.

Bei der untersuchten Leitung, sind teilweise in den Leitungsabschnitten Erdseilströme in der Höhe von 50 bis zu 170 A bei einer (n-1)-Auslastung der Leitungssysteme und den angenommenen Lastflussrichtungen berechnet worden. Die daraus vor allem beim Wechsel von Abschnitten (wie z.B. Vierfachleitung auf Doppelleitung) oder im Bereich von Verdrillungsmasten resultierenden Ausgleichsströme (Mastableitströme) über einzelne Masten nehmen dabei vereinzelt Werte im Bereich von bis zu 35 A im Normalbetrieb an. Aufgrund dieser Ströme resultieren einerseits Erwärmungen von Erdseilarmaturen und andererseits ohmsche Beeinflussungen (Potentialanhebungen sowie Berührungs- und Schrittspannungen). Hinsichtlich der ohmschen Beeinflussung sind bei diesen Werte aber keine nennenswerten Gefährdungen an bzw. im Bereich der betroffenen Masten zu erwarten.

## 4.2 Bestandsleitung inkl. einer weiteren Einbindung eines Umspannwerks

In einem weiteren Schritt wurden die Unsymmetrieströme bei einer zusätzlichen Einbindung der beiden Leitungssysteme in ein weiteres Umspannwerk (ca. bei 2/3 der gesamten Leitungslänge) in die Bestandsleitung analysiert.

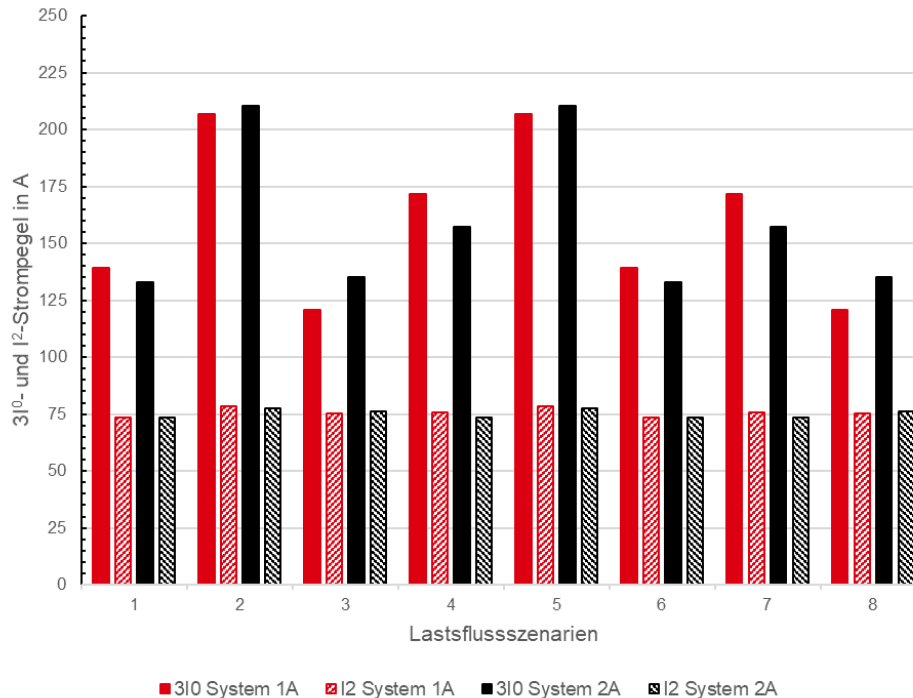


Abbildung 3: 3I<sup>0</sup>- und I<sup>2</sup>-Strompegel der untersuchten Beeinflussungstopologie mit Berücksichtigung der Einbindung eines zusätzlichen Umspannwerks im Leitungszug bei (n-1)-Lastströmen; Systeme 1A und 2A

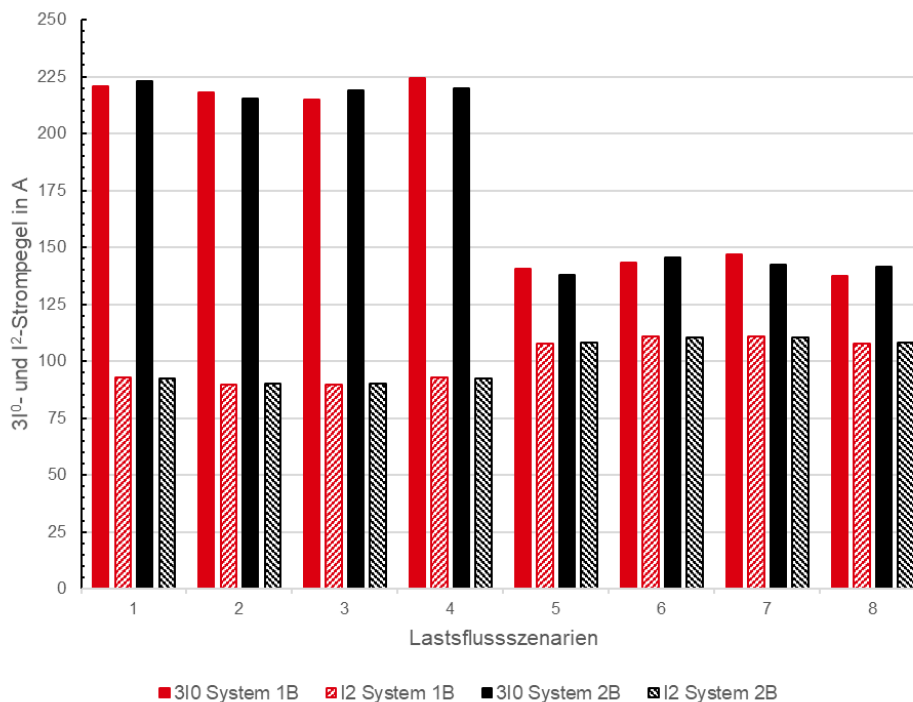


Abbildung 4: 3I<sup>0</sup>- und I<sup>2</sup>-Strompegel der untersuchten Beeinflussungstopologie mit Berücksichtigung der Einbindung eines zusätzlichen Umspannwerks im Leitungszug bei (n-1)-Lastströmen; Systeme 1B und 2B

Wie in der Abbildung 3 und 4 ersichtlich ist, resultieren – ohne entsprechende Maßnahmen (wie z.B. zusätzliche Verdrillungen oder Änderungen der Phasenbelegungen) – weiterhin hohe Unsymmetrie(kreis)ströme in den Leitungssystemen. Die Kreisströme bilden sich bei dieser Beeinflussungskonfiguration aber zusätzlich über die Sammelschienen-Querkupplung in dem neuen Umspannwerk aus, was auch dort sowie in den bestehenden Umspannwerken zu Meldungen führt.

Da alleine durch die zusätzliche Einbindung des neuen Umspannwerks die Phasenbelegung der Bestandsleitung nicht geändert wird, ändern sich die im Erdseil induzierten Ströme nur geringfügig gegenüber der Situation ohne die zusätzliche Einbindung.

### **4.3 Optimierung der Phasenseilbelegung**

Die geplante Einbindung des neuen Umspannwerks bietet die Möglichkeit, die Phasenseilbelegung in definierten Abschnitten zu optimieren, um in weiterer Folge die induzierten Unsymmetriekreis- und Erdseilströme zu reduzieren.

In einem ersten Ansatz, wurde versucht in den bestehenden Abschnitten eine optimierte Phasenseilbelegung für die Beeinflussungskonfiguration zu finden. Dafür wurde eine Vielzahl von Optimierungsrechnungen mit Variation der Phasenbelegungen in den gewählten Abschnitten durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass bedingt durch die unterschiedlichen Lastflussszenarien im Bereich des Vierfachleitungsabschnitts keine eindeutige optimale Phasenbelegung (Verdrillung) der Leitung – ohne weitere Verdrillungsmasten und –abschnitte – gefunden werden konnte, welche sowohl ein Optimum hinsichtlich der Stromunsymmetrien und den induzierten Erdseilströmen darstellt, gefunden werden konnte.

Als weiterer Ansatz wurden die Anzahl der maßgeblich auftretenden Lastflusssituationen für die Vierfachleitung – auf Basis von 15-Minutenmittelwerten der vorherigen Jahre – analysiert und eingegrenzt. Auch für diese Eingrenzung auf vier zeitlich relevante Lastflusssituationen und Berücksichtigung einer statistischen Auswertung der Lastströme konnte keine allgemein gültige optimierte Phasenseilkonfiguration gefunden werden.

Eine Möglichkeit zur Optimierung wären weitere Verdrillungen im Bereich der Vierfachleitung und des Doppelleitungsabschnitts zur Reduktion der Unsymmetrie- und Erdseilströme, was jedoch mit einem enormen Aufwand und Kosteneinsatz verbunden wäre. Die vorliegenden Untersuchungen zeigten jedoch, dass zumindest die Unsymmetrieströme durch eine Optimierung der Phasenseilbelegung reduziert werden können, wenn auch nicht für alle vorkommenden Lastflusssituationen auf dem Vierfachleitungsabschnitt.

## **5 Zusammenfassung**

Im Zuge von umfangreichen Untersuchungen, wurden die aufgrund der induktiven Kopplung und der unvollständigen Verdrillung (Unsymmetrie) resultierenden Unsymmetrie(kreis)ströme und Erdseilströme in einer bestehenden Beeinflussungstopologie untersucht, in welcher es zukünftig geplant ist weitere Umspannwerke einzubinden.

Es konnte gezeigt werden, dass ohne Maßnahmen bereits bei der Bestandsleitung laststromabhängige Unsymmetriestrommeldungen in den Querkupplungen der Sammelschienen auftreten, welche durch die weiteren Einbindungen noch zusätzlich verstärkt

werden. Bei der vorliegenden Konfiguration (im Besonderen dem Vierfachleitungsabschnitt) haben die möglichen Lastflusssituationen einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden Beeinflussungswirkungen.

Eine Vielzahl von Optimierungsrechnungen hat gezeigt, dass bei der vorliegenden Konfiguration (verschiedene Lastflussrichtungen im Vierfachleitungsabschnitt, bestehende Verdrillungsabschnitte und zukünftige Einbindungen von Umspannwerken) keine direkte Reduktion der Unsymmetrie- sowie Erdseilströme für den Vierfachleitungsabschnitt, ohne umfangreiche Maßnahmen, wie z.B. eine Verdrillung des Vierfachleitungsabschnitts, erzielt werden kann.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Unsymmetrieeffekte im Bereich des Doppelleitungsabschnittes durch eine optimierte Phasenseilkonfiguration in Abstimmung auf die zukünftigen Leitungseinbindungen jedenfalls reduziert werden können.

Die betrachtete Leitungstopologie zeigt, dass es zur Vermeidung von Unsymmetrieeffekten jedenfalls notwendig ist, auf die Symmetrie von Leitungen (Verdrillung, entsprechende Phasenseilbelegungen) zu achten.

Weitere Maßnahmen zur Vermeidung von Meldungen der Schutz- und Leittechnikgeräte hinsichtlich der Stromunsymmetrie wären z.B. auch die Anhebung der Einstell- bzw. Schwellwerte, welche in enger Abstimmung mit den Schutztechnikern erfolgen muss.

## 6 Literaturverzeichnis

Sofern Verweise im Literaturverzeichnis in der Veröffentlichung nicht direkt referenziert sind, dienen die angeführten Quellen als weiterführende Literatur.

- [1] Raunig, „Ein Beitrag zur Modellierung und Berechnung von niederfrequenten induktiven Beeinflussungen“, Arbeitstitel der laufenden Dissertation am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz
- [2] Steinkellner, „Der Einfluss der Verdrillung auf die Stromunsymmetrie bei induktiv gekoppelten Hochspannungsfreileitungssystemen“, Diplomarbeit am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2012
- [3] Schuster, „Stromaufteilung bei Kurzschlüssen in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung induktiv gekoppelter Leitungssysteme“, Diplomarbeit am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2012
- [4] Oeding, Oswald, „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Springer-Verlag Berlin, 2011
- [5] Clarke, „Circuit Analysis of A-C Power Systems“, vol. 6 pp. 366-379, 1926
- [6] Raunig, Schmutzger, Fickert, Achleitner, „Die Problematik der induktiven Beeinflussung parallelgeführter Hochspannungsleitungssysteme – Berechnung und Löschungsvorschläge“, 13. Symposium Energieinnovation, TU Graz, 2014
- [7] Raunig, Schmutzger, „Modellierung und Berechnung der gegenseitigen niederfrequenten induktiven Kopplung“, e&i - Elektrotechnik und Informationstechnik, Ausgabe 8, 2014
- [8] Handbuch, „SIPROTEC 4 Distanzschutz 7SA6“, Version V04.71.00, Ausgabedatum 05.2016
- [9] Handbuch, „Easergy MiCOM P437 Distanzschutz“, Version P437-313-414/415-662