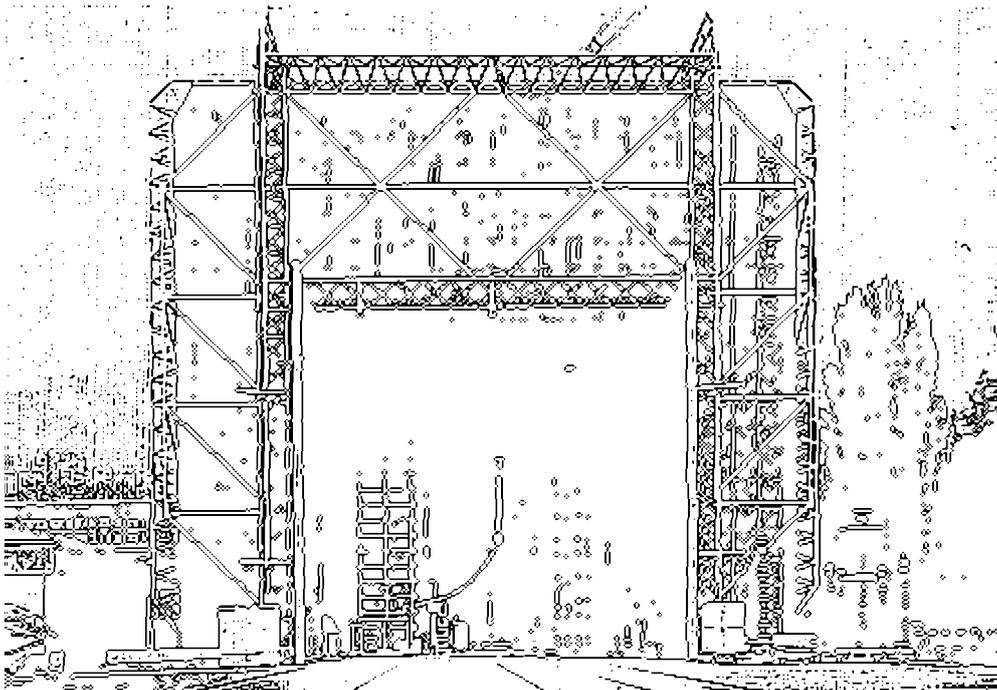


-TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ-

DISSERTATION

Jürgen Plesch
Juli 2020



Institut für
Hochspannungstechnik und Systemmanagement

KIPPSCHWINGUNGEN IN AUSGEWÄHLTEN STRUKTUREN VON HOCHSPANNUNGSANLAGEN

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
„Doktor der technischen Wissenschaften“

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jürgen Plesch, BSc

genehmigt von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
an der Technischen Universität Graz



- 1. Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack
- 2. Begutachter: Prof. Dr.-Ing. Claus Neumann
(Technische Universität Darmstadt,
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik)

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz

Graz, Juli 2020

DANKSAGUNG

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement an der Technischen Universität Graz.

Ich möchte mich bei meinem Betreuer Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack bedanken, der das Zustandekommen dieser Arbeit ermöglicht hat. Auch bedanke ich mich für die fachlichen Diskussionen und seine kritischen Fragestellungen, welche die Arbeit wesentlich vorangetrieben haben. Auch für die Möglichkeit für den Besuch von wissenschaftlichen Tagungen und Konferenzen möchte ich mich bedanken.

Ich möchte mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. Georg Achleitner und Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Huska von der Austrian Power Grid AG bedanken, die die Möglichkeit der vor Ort Messung von transienten Spannungen in den Hochspannungsanlagen des österreichischen Hoch- und Höchstspannungsnetzes geschaffen haben.

Ich bedanke mich im Namen aller Personen der Austrian Power Grid AG, die mich bei der Durchführung der messtechnischen Untersuchungen in den Hochspannungsanlagen des österreichischen Hoch- und Höchstspannungsnetz unterstützt haben. Dieser Dank gilt besonders den Mitarbeitern des Leitungstrupps der Austrian Power Grid AG, welche die Messteiler in den Hochspannungsanlagen aufgebaut und hochspannungsseitig angeschlossen haben.

Auch möchte ich mich bedanken, dass ich Daten der Hochspannungsanlagen erhalten habe, denn ohne die technischen, elektrischen und geometrischen Daten wäre die numerische Modellbildung nicht möglich gewesen.

Ein großer Dank gilt auch den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement einerseits für die fachlichen Diskussionen und andererseits für den freundlichen und netten Umgang.

Die Daten für die numerische Modellbildung der einzelnen Hochspannungsanlagen wurden vom österreichischen Übertragungsnetzbetreiber (Austrian Power Grid AG) zur Verfügung gestellt.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Graz, Juli 2020

.....

Jürgen Plesch

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The uploaded text document in TUGRAZonline is identical with this dissertation.

Graz, July 2020

.....

Jürgen Plesch

KURZFASSUNG

Die elektrischen Betriebsmittel in Hochspannungsanlagen sind inneren und äußeren Einwirkungen ausgesetzt. Ein stationärer und sicherer Betrieb ist nur dann möglich, wenn die Betriebsmittel diesen Einwirkungen standhalten, sodass im Weiteren die Netzstabilität und Versorgungssicherheit aufrechterhalten bleiben. Schalthandlungen können ein, aufgrund der vorhandenen Komponenten, schwingungsfähiges System anregen. Diese System besteht aus einen induktiven Anteil in Form von Transformatoren und den induktiven Spannungswandlern sowie einen kapazitiven Anteil. Mit der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Komponenten können in Kombination mit der wirksamen Kapazität stationäre nichtlineare Schwingungen (Kippschwingungen) der Leiter-Erde-Spannung entstehen. Kommen Kippschwingungen zu Stande, können Überspannungen und Überströme die angeschlossenen elektrischen Betriebsmittel beeinflussen oder sogar zerstören. Mit Hilfe von numerischen Berechnungen und der messtechnischen Aufzeichnung können die Einwirkungen auf die Leiter-Erde-Spannung analysiert und bewertet werden. Die numerische Modellbildung und Berechnung liefert einen Beitrag zur Abschätzung des Auftretens von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen. Die messtechnischen Aufzeichnung der Leiter-Erde-Spannung in Hochspannungsanlagen kann Informationen liefern, unter welchen Bedingungen Kippschwingungen angeregt werden können. Anhand von numerischen Berechnungsmodellen und der messtechnischen Aufzeichnung wurde das Auftreten von dreiphasigen Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen betrachtet.

Mit dem Einsatz von numerischen Berechnungsprogrammen konnte das Entstehungspotential von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen untersucht werden. Die technischen Daten und numerische Modellbildung der induktiven Spannungswandler sowie eine präzise Nachbildung der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie bis in den gesättigten Bereich sind entscheidend für die Untersuchung und das Auftreten von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen.

Aus den numerisch berechneten Leiter-Erde-Spannungen und den ausgewerteten charakteristischen Parametern konnte für einen Knotenpunkt einer Hochspannungsanlage ein Fingerabdruck erstellt werden. Dieser Fingerabdruck setzt sich aus den globalen positiven und negativen Spitzenwerten, den Frequenzbereichen und der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung zusammen. Ist der Fingerabdruck einer Hochspannungsanlage in Abhängigkeit einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse vorhanden, kann dieser für weitere Hochspannungsanlagen genutzt werden, um das Entstehungspotential gegenüber Kippschwingungen abschätzen zu können.

Mit der messtechnischen Erfassung konnten Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen aufgezeichnet und die Qualität der numerischen Modellbildung bestätigt werden. Beide Untersuchungsmethoden wurden in dieser Arbeit angewendet, um die Einwirkungen auf die Leiter-Erde-Spannung an drei Hochspannungsanlagen zu untersuchen.

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der numerischen Modellbildung und Berechnung das Auftreten von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen abgeschätzt werden kann. Kommen in Hochspannungsanlagen Kippschwingungen zu Stande, können Spitzenwerte der Leiter-Erde-Spannung in der Größenordnung von ca. 300 % auftreten. Bei der Durchführung von Schalt-handlungen der Leistungsschalter wurde neben der 50-Hz-Netzfrequenz, die zweite Subharmonische Kippschwingung mit 25 Hz sowie weitere Harmonische der Netzfrequenz identifiziert werden.

Schlüsselworte:

Kippschwingungen, numerische Berechnungen, messtechnische Aufzeichnung, Hochspannungsanlagen, Fingerabdruck

ABSTRACT

The electrical equipment in high-voltage substations are exposed to internal and external influences. A stationary and secure operation of the high-voltage substations can be assumed if the equipment is able to withstand these influences and furthermore the network stability and the security of supply is maintained. Switching operations are able to trigger an existing resonant circuit. This resonant circuit consist out of the inductive components of transformers and inductive voltage transformers and out of the capacitive components. With the nonlinear magnetization curve of the inductive components in combination with the effective capacitance is it possible to generate stationary nonlinear oscillations (ferroresonance) of the line-to-ground voltage. If ferroresonance oscillations occur in high-voltage substations, transient overvoltages and overcurrents may influence or even destroy the connected electrical equipment. With the help of numerical calculations and field measurements, the influence to the line-to-ground can be analysed and evaluated. The numerical modelling and calculation provide a contribution to estimate the occurrence of ferroresonance in high-voltage substation. Field measurements of the line-to-ground voltage in high-voltage substations provide information for the conditions for triggering ferroresonances. The occurrence of three-phase ferroresonance was investigated with the use of numerical simulation models and field measurements.

The investigations were focused on the evaluation of ferroresonances in high voltage systems. The technical data and the numerical modelling of the inductive voltage transformers as well as a precise replication of the nonlinear magnetic curve up to the saturated range are important for the investigation and the occurrence of ferroresonance in high voltage systems.

From the numerical calculated line-to-ground voltages and the evaluation of characteristicly parameters, a fingerprint for a node of a high voltage system could be created. This fingerprint contains the global positive and negative peak values, the frequency ranges and the oscillation capability of the line-to-ground voltage. If a fingerprint of a high voltage system, depending on a performed sensitivity analysis, is available, this can be used for other high voltage systems with similar installed electrical components and geometrical layout in order to estimate the risk of ferroresonance.

With the use of capacitive and resistive-capacitive voltage dividers, the line-to-ground voltage was measured in several high voltage substations. With the evaluated line-to-ground voltages of the field measurements the quality of the numerical simulation models was confirmed. Both investigation strategies were applied in three different high voltage substations to investigate the effects on the line-to-ground voltages.

It could be shown that with the help of numerical modelling and calculation, the occurrence of ferroresonance in high voltage networks can be estimated. If a ferroresonance occurs in a high voltage

substation, the peak values of the line-to-ground voltage can be in the range of 300 %. During switching operations of the circuit breakers, the subharmonic ferroresonance with a frequency of 25 Hz was detected. Also, further harmonics of the nominal frequency were evaluated.

The combination of the transient numerical simulations and the investigation of the field measurements showed that the subdivision of high voltage systems into network structures is useful. Depending on the influence an assignment between occurring cause and the effects to the line-to-ground voltage was possible.

Keywords:

Ferroresonance, transient numerical calculation, field measurements, high voltage substations, fingerprint

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Motivation	1
2	Theoretische Grundlagen zur Untersuchung von Hochspannungsnetzen und -anlagen	5
2.1	Allgemeines	5
2.2	Schalten im Hochspannungsnetz	6
2.3	Kippschwingungen – Grundlagen, Auftreten und Gegenmaßnahmen.....	7
3	Methoden der numerischen Modellbildung und Berechnung	19
3.1	Modellbildungsgrad.....	19
3.2	Analyse von kippschwingungsgefährdeten Hochspannungsanlagen	21
3.3	Numerische Modellbildung von Hochspannungskomponenten	22
3.4	Untersuchungsmethoden und Bewertungsstrategien von Kippschwingungen	35
4	Numerische Berechnung von Kippschwingungen	45
4.1	Einleitung	45
4.2	Numerische Berechnung von Kippschwingungen in Anlagenstrukturen.....	47
4.3	Interpretation der numerischen Berechnungsergebnisse.....	81
5	Messtechnik und messtechnische Untersuchungen in Hochspannungsanlagen.....	87
5.1	Messtechnik zur Erfassung transienter Ereignisse	87
5.2	Messtechnische Aufzeichnungen in Hochspannungsanlagen	92
5.3	Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen.....	93
5.4	Kippschwingungen in Anlagenstrukturen	94
5.5	Interpretation der messtechnischen Untersuchungen.....	101
6	Vergleich der numerischen Berechnungen und der messtechnischen Erfassung	105
6.1	Allgemeines	105
6.2	Fingerabdruck.....	106
6.3	Anlagenstrukturen im Hochspannungsnetz.....	107
6.4	Erkenntnisse	115
7	Resümee	117
8	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis.....	125
	Anhang	131

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Hochspannungsnetze zählen mit den vorhandenen installierten Komponenten zu komplexen Strukturen in der Energieübertragung. Durch den stetig wachsenden Energieverbrauch und der Notwendigkeit einen zuverlässigen und versorgungssicheren Betrieb sicherzustellen, ist ein zeitgerechter Ausbau des Hochspannungsnetzes essenziell. Mit der wachsenden Komponentenzahl im Energieübertragungsbereich in Form von Transformatoren, Übertragungsleitungen (Freileitungs- und Energiekabelverbindungen) sowie den Schutz- und Messeinrichtungen in Form von induktiven Spannungs- und Stromwandlern ist die wissenschaftliche Untersuchung von Kippschwingungserscheinungen anhand von grundlegenden mathematischen Beziehungen nicht mehr möglich und kann nur mit der Hilfe von numerischen Berechnungsprogrammen durchgeführt werden [EMI01, EMT95]. Abweichungen vom stationären Netzbetrieb durch Schalthandlungen oder Fehlerereignissen, beanspruchen die elektrischen Komponenten durch transient und stationär auftretende Überspannungen und können deren Betriebsverhalten beeinflussen oder diese sogar beschädigen [CHO96]. Die wissenschaftliche Untersuchung von Hochspannungsanlagen beinhaltet aufgrund der aufkommenden Komplexität gewisse Herausforderungen. Einerseits kommen durch die eingesetzten induktiven Komponenten nichtlineare Zusammenhänge zwischen Spannung und Strom zum Tragen, andererseits sind Kopplungsmechanismen bei dreiphasigen Systemen zu berücksichtigen.

Mit den in Hochspannungsanlagen installierten Komponenten sind schwingungsfähige Systeme vorhanden. Diese schwingungsfähigen Systeme bestehen aus den induktiven Komponenten mit nichtlinearer Magnetisierungskennlinie (Transformatoren, induktive Spannungswandler und Kompensationsdrosselspulen) und den vorhandenen wirksamen Kapazitäten. Wird dieses System anregt, können in Hochspannungsanlagen Schwingungen der Leiter-Erde-Spannung auftreten. Diese Schwingungen sind als Kippschwingungen bekannt, überlagern sich der Betriebsspannung, führen Überspannungen und Überströme mit sich und können in weiterer Folge die Anlagenzuverlässigkeit und Anlagenverfügbarkeit beeinflussen. Hochspannungsanlagen stellen in diesem Zusammenhang eine Schlüsselkomponente im Hochspannungsnetz dar, die für einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb ausschlaggebend sind.

Zur numerischen Berechnung von transienten Erscheinungen wurden Berechnungsprogramme entwickelt [EMT95], die eine Untersuchung von Hochspannungsnetzen ermöglichen. Hierfür werden von den numerischen Berechnungsprogrammen Modelle der elektrischen Betriebsmittel zur Verfügung gestellt. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die zur Verfügung gestellten numerischen Berechnungsmodelle die grundlegenden mathematischen Beziehungen beinhalten und an den jeweiligen Untersuchungsgegenstand anzupassen sind. Ein wesentliches Kriterium sind die auftretenden

bzw. zu untersuchenden Frequenzbereiche, die einen signifikanten Einfluss auf die numerische Modellbildung ausüben. Die Durchführung von Sensitivitätsanalysen ausgewählter Parameter der elektrischen Komponenten ist erforderlich, um aussagekräftige Kenngrößen für den sicheren und stabilen Betrieb des Hochspannungsnetzes evaluieren zu können.

Eine weitere Herangehensweise ist die messtechnische Erfassung der transienten Beanspruchung ausgewählter Knotenpunkte in einer Hochspannungsanlage. Die messtechnische Erfassung der transienten Spannungen bei geplanten und ungeplanten Ereignissen im Hochspannungsnetz kann jedoch nur eingeschränkt mit den traditionellen Messwandlern durchgeführt werden. Diese besitzen aufgrund ihrer verwendeten Materialien Einschränkungen im Übertragungsverhalten und sind, in Abhängigkeit der Spannungsebene, bis zu einer Frequenz von ca. 1 kHz für Messungen geeignet [61869-103]. Zur qualitativen messtechnischen Erfassung über einen definierten Frequenzbereich, werden neue Technologien von Messteilern eingesetzt. Mit dem Einsatz von ohmsch-kapazitiven Spannungsteilern kann ein eindeutiges Abbild der zu messenden Spannung erfolgen. Diese Spannungsteiler werden in ausgewählten Knotenpunkten in einer Hochspannungsanlage, unter Einhaltung der normativen Sicherheitsabstände [61936-1], eingebaut um die auftretenden transienten Ereignisse in Kombination mit breitbandigen Messgeräten digital zu erfassen und für eine Bewertung zur Verfügung zu stellen. Die qualitative Erfassung der Betriebsspannung mit den überlagerten transienten Ereignissen kann zur Beurteilung der transienten Beanspruchung herangezogen werden. Es kann eine eindeutige Zuordnung zwischen der Ursache und der Auswirkung auf die gemessene Leiter-Erde-Spannung ermittelt werden.

Sind die wissenschaftlichen Ergebnisse der numerischen Berechnung und der messtechnischen Aufzeichnung einer Hochspannungsanlage vorhanden, können die Ergebnisse miteinander verglichen werden, um eine Aussage über die transiente Beanspruchung und deren Auswirkungen treffen zu können. Numerische Berechnungsmodelle bilden die tatsächlichen Gegebenheiten in Abhängigkeit der gewählten Randbedingungen zu einem gewissen Grad ab, wobei jedoch messtechnische Aufzeichnungen alle auftretenden Effekte beinhalten. Dieser Zusammenhang bietet die Möglichkeit, die Sensitivität der numerischen Modellbildung der einzelnen Komponenten zu analysieren, die vorhandenen Modelle zu erweitern und diese erweiterten Modelle für zukünftige Untersuchungen bereitstellen zu können.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, durch numerische Berechnungen und durch die messtechnischen Aufzeichnungen Kippschwingungen in ausgewählten Anlagenstrukturen zu analysieren. Die Arbeit fokussiert sich auf die Ereignisse bei der Durchführung von Schalthandlungen der Leistungsschalter in Hochspannungsanlagen und das Auftreten von Kippschwingungen.

Die Zielsetzungen der durchgeführten Arbeit waren im Folgenden:

- Numerische Modellbildung von Hochspannungsanlagen und den darin enthaltenen wesentlichen Komponenten
- Numerische Berechnungen in ausgewählten Anlagenstrukturen
- Messtechnische Aufzeichnungen in ausgewählten Strukturen von Hochspannungsanlagen mit dem Einsatz von Hochspannungsmessteilern
- Vergleich zwischen den numerischen und messtechnischen Ergebnissen
- Auswertung von charakteristischen Kenngrößen zur Evaluierung der Kippschwingungsgefährdung in ausgewählten Anlagenstrukturen

Zielführend für die durchgeführten Untersuchungen ist, dass nicht nur numerische Berechnungen, sondern auch messtechnische Aufzeichnungen in Hochspannungsanlagen durchgeführt werden, um einen Einblick über die auftretende transiente Beanspruchung zu erhalten. Mit einer strukturierter Aufarbeitung der erhaltenen Ergebnisse, der Durchführung einer Korrelation zwischen beiden wissenschaftlichen Methoden und mit der Evaluierung von Ursache und Auswirkung auf die Betriebsspannung können Aussagen über das Kippschwingungspotential in Hochspannungsanlagen getroffen werden.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUR UNTERSUCHUNG VON HOCHSPANNUNGSNETZEN UND -ANLAGEN

2.1 Allgemeines

Wird der Betrieb eines Hochspannungsnetzes betrachtet, sind stationäre sowie transiente Vorgänge zu berücksichtigen. Bei stationären Vorgängen kann das Hochspannungsnetz als eine Struktur betrachtet werden, in welcher sich die Randbedingungen nicht ändern. Die Netzfrequenz ist der normativ festgelegten Abweichung von $\pm 1\%$ unterlegen [50160]. Bei transienten Vorgängen entstehen bei der Durchführung von Schalthandlungen, dem Auftreten von Fehlerereignisse oder durch atmosphärische Entladungen Ausgleichsvorgänge im Hochspannungsnetz [CHO96, GRE91]. Die Zeitdauer dieser Ausgleichsvorgänge kann von Mikrosekunden bis hin 60 min bei temporären Überspannungen andauern und die auftretenden transienten Spannungen überlagern sich mit der Betriebsspannung der jeweiligen Spannungsebene. Abbildung 2-1 zeigt eine Auflistung der auftretenden Überspannungen in Hochspannungsnetzen und der Beanspruchungsdauer im Fall von transienten Ereignissen [60071-4].

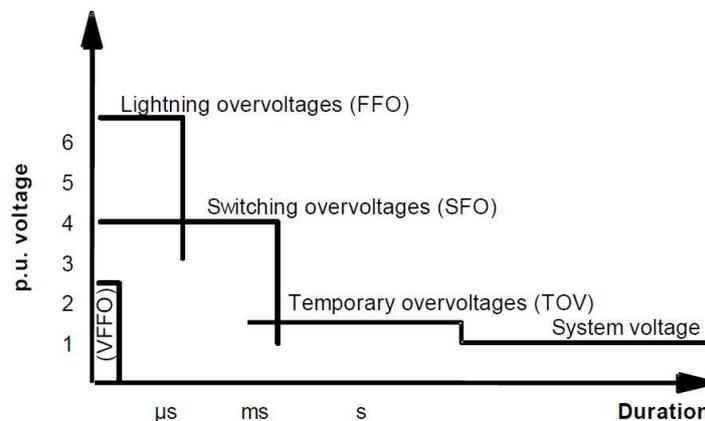


Abbildung 2-1: Auflistung auftretender transienter Überspannungen in Hochspannungsnetzen mit der transienten Beanspruchungsdauer [60071-4]

Auftretende transiente Beanspruchungen in Hochspannungsnetzen können in die folgenden Kategorien mit den typischen Frequenzbereichen unterteilt werden [CIG039, MAR07]:

- Langsame niederfrequente Schwingungen im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 3 kHz
- Langsam ansteigende Überspannungen im Frequenzbereich von 50/60 Hz bis 20 kHz
- Schnell ansteigende Überspannungen im Frequenzbereich von 10 kHz bis 3 MHz
- Sehr schnell ansteigende Überspannungen im Frequenzbereich von 100 kHz bis 50 MHz

Durch Schalthandlungen, Fehlerfälle und atmosphärische Entladungen können Ausgleichsvorgänge auftreten, die aus mehreren stabilen und instabilen Zuständen bestehen können. Durchzuführende Schalthandlungen umfassen den Frequenzbereich bis 20 kHz, dem die langsamen niederfrequenten Schwingungen und die langsam ansteigenden Überspannungen zugeordnet werden können. Der Frequenzbereich bis 20 kHz umfasst das Einschalten von Transformatoren und Leitungen [CIG039].

Werden bei der Durchführung von Schalthandlungen oder beim Auftreten von Fehlerfällen schwingungsfähige Systeme angeregt, können Überspannungen und/oder Überströme ins System eingebracht werden. Durch nichtlineare induktive Komponenten können in Kombination mit den vorhandenen Kapazitäten Kippschwingungen auftreten. Abhängig von der Energienachführung in einen kippschwingungsgefährdeten Anlagenteil können sich diese stationär oder transient (abklingend) äußern.

Für die numerische Berechnung von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen und deren Auswirkungen ist eine Modellbildung der einzelnen Betriebsmittel für den jeweilig gültigen Frequenzbereich anzuwenden. Hierfür ist es wesentlich, dass die technischen Daten der zu untersuchenden Hochspannungsanlage und vor allem der nichtlineare Verlauf der Magnetisierungskennlinie der induktiven Komponenten für die numerische Modellbildung vorhanden ist. Erst dies ermöglicht eine zielorientierte Bewertung des Kippschwingungspotentials in Hochspannungsanlagen, um in weiterer Folge die Möglichkeit einer Bedämpfung zu untersuchen.

2.2 Schalten im Hochspannungsnetz

Schalthandlungen sind bewusst getätigte Aktionen vom Freischalten und Erden eines Anlagenteils bis hin zu Netzumschaltungen. Schalthandlungen sind laut [50110-1] wie folgt definiert:

Schalthandlungen dienen dazu, den Schaltzustand von elektrischen Anlagen zu ändern.

Es werden zwei Arten von Schalthandlungen unterschieden:

- *Schalthandlungen zur Änderung des elektrischen Zustandes einer Anlage, zum Bedienen von Betriebsmitteln, Ein- und Ausschalten, Starten und Stillsetzen von Betriebsmitteln mit Einrichtungen, deren bestimmungsgemäßer Gebrauch gefahrlos ist;*
- *Ausschalten oder Wiedereinschalten von Anlagen im Zusammenhang mit der Durchführung von Arbeiten.*

Schalthandlungen dürfen vor Ort oder durch Fernsteuerung durchgeführt werden.

Die auftretenden Ausgleichsvorgänge in Form von transienten Spannungen überlagern sich der Betriebsspannung und können sich lokal in Hochspannungsanlagen oder global im gesamten Hochspannungsnetz ausbreiten. Globale Beeinflussungen konnten bei der Durchführung von Schalthandlungen im Zuge von messtechnischen Aufzeichnungen ermittelt werden. Die punktuell messtechnisch erfasste transiente Spannung kann, mit der durchgeführten Korrelation zu einem Schaltmeldeprotokoll, zu einer Aktivität (Schalthandlung) in weiter Ferne zugeordnet werden [PLE15].

Kernelement für ein sicheres und zuverlässiges Schalten im Hochspannungsnetz sind alle Arten von Hochspannungsschaltern. Diese Schalter haben folgende Schaltaufgaben zu beherrschen [SME15]:

- Unterbrechung von Fehlerströmen
- Lastwechsel
- Isolieren und Erden
- Sammelschienenwechsel in Hochspannungsanlagen
- Ein- und Ausschalten von Hochspannungskomponenten

Speziell für das Ein- und Ausschalten von Hochspannungskomponenten kommen Leistungsschalter zum Einsatz. Diese Leistungsschalter können nach dem Prinzip des gesteuerten Schaltens betrieben werden. Gesteuertes Schalten setzt voraus, dass die Signallaufzeiten, das mechanische Ansprechen und der zeitliche Versatz zwischen der erstschaltenden Phase und den verbleibenden Phasen untereinander abgestimmt ist. Für ein sicheres Einschalten von Transformatoren wird beispielsweise eine Phase im Spannungsmaximum und die zwei verbleibenden Phasen zeitlich verzögert zugeschaltet. Somit besteht die Möglichkeit, dass einerseits die auftretenden transienten Überspannungen und andererseits die Einschaltströme von Transformatoren minimiert werden [CIG262, MOR88, SCH15].

Fehlerhaftes gesteuertes bzw. ungesteuertes Einschalten kann einerseits zu hohen Einschaltströmen bei Transformatoren führen und andererseits ausgeprägte transiente Ausgleichsvorgänge generieren. Neben den transienten Spannungen spielen die Frequenzbereiche und die Anstiegszeiten eine entscheidende Rolle. Eine wesentliche und häufig auftretende Sonderform der transienten Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel sind Kippschwingungen, die im Zusammenhang mit Schalthandlungen oder durch Erdschlüsse angeregt werden können. Das wesentliche Ziel bei der Durchführung von Schalthandlungen in Hochspannungsnetzen ist es, dass bei Anregung der vorhandenen schwingungsfähigen Systeme stationäre Schwingungen durch eine ausreichende Dämpfung vermieden werden.

2.3 Kippschwingungen – Grundlagen, Auftreten und Gegenmaßnahmen

2.3.1 Grundlagen zu Kippschwingungen

Unter Kippschwingungen können unerwünschte Schwingungen verstanden werden, die in Hochspannungsanlagen zustande kommen können, wo induktive Komponenten mit ferromagnetischem Kern (Induktive Spannungswandler, Transformatoren oder Kompensationsdrosselspulen) zusammen mit den wirksamen Kapazitäten und einer Wechselspannungsquelle ein schwingfähiges System bilden. Kippschwingungsgefährdete Anordnungen bilden sich in Hochspannungsanlagen durch

die Änderung des Schaltzustandes, durch Schalthandlungen oder durch einen verlöschenden Erdschluss aus. Besteht in einer Hochspannungsanlage bereits die Gefahr der Kippschwingung, können diese bei bereits im Betrieb befindlichen Anlagen oft schwer bedämpft werden [BRA09]. Das vermehrte Auftreten von Kippschwingungen hat folgende Gründe [BRA06]:

- *Infolge des Preisdrucks auf die Betreiber von Schaltanlagen und auf die Hersteller von Komponenten (Messwandler, Transformatoren, Hochspannungskondensatoren, Steuerkondensatoren für Leistungsschalter und Freiluftisolierstützer) erfolgt eine schleichende wesentlich höhere Ausnutzung der Systeme und Komponenten.*
- *Für die Systeme erfolgt eine Verschiebung von der Nennspannung U_R in Richtung höchstzulässige dauernde Betriebsspannung U_m .*
- *Bei den Komponenten Transformator und induktiver Spannungswandler wird die Flussdichte \vec{B} durch Verkleinerung des Kerns erhöht.*
- *Die Reduzierung der Anlagenkapazitäten durch den Einsatz von neuen Komponenten führt zu einer Erhöhung der erregenden Spannung.*

Wesentliches Kriterium für das Auftreten einer Kippschwingung ist die Anregung eines schwingungsfähigen Systems mit einer ausreichenden Energienachführung aus einem gekoppelten oder übergeordneten Hochspannungsnetz. Die kipperschwingungsanregende Steuerkapazität, die Erdkapazität und die Charakteristik der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler stehen in einer Wechselbeziehung zueinander. Es gibt Bereiche von Wertekombinationen in denen stationäre Kippschwingungen möglich sind [BRA06, BRA09, DAU90].

Die Untersuchung von Kippschwingungen mit Subharmonischen und in Drehstromnetzen erfolgte bereits in den 60er-Jahren [AND66, BER66, PEI64]. Kippschwingungen treten in einem abgegrenzten Bereich eines Hochspannungsnetzes auf und können einphasig und dreiphasig angeregt werden. Eine Unterteilung kann anhand der vorliegenden Anlagenstruktur erfolgen. In der Regel treten einphasige Kippschwingungen in geerdeten Netzen und dreiphasige Kippschwingungen in isoliert betriebenen Netzen auf. Neben den beiden genannten Kippschwingungsformen gibt es Sonderformen in zweiphasigen Netzen und in Inseln im starr geerdeten Netz mit nicht-starrer Erdung [DAU90].

Wurde eine Kippschwingung in einer Hochspannungsanlage angeregt, stellt sich in Abhängigkeit der Dämpfung ein stationäres oder ein transientes Verhalten ein. Transiente Kippschwingungen bedämpfen sich selbstständig durch ausreichend große Verluste im System. Bei unzureichender Dämpfung lassen sich stationäre Kippschwingungen nur durch operative Maßnahmen vermeiden. Diese Maßnahmen beschreiben den Ausschluss von kritischen Schaltzuständen bzw. Schalthandlungen oder das Betätigen der Trennschalter zur Unterbrechung der weiteren Energieeinkopplung [BRA09]. Aus [KOE95] kann entnommen werden, dass auch heute noch das Phänomen der Kippschwingung als Hauptursache für den Ausfall von Messwandlern angesehen werden kann.

Eine Anordnung zur Beschreibung von Kippschwingungen kann aus Abbildung 2-2 entnommen werden.

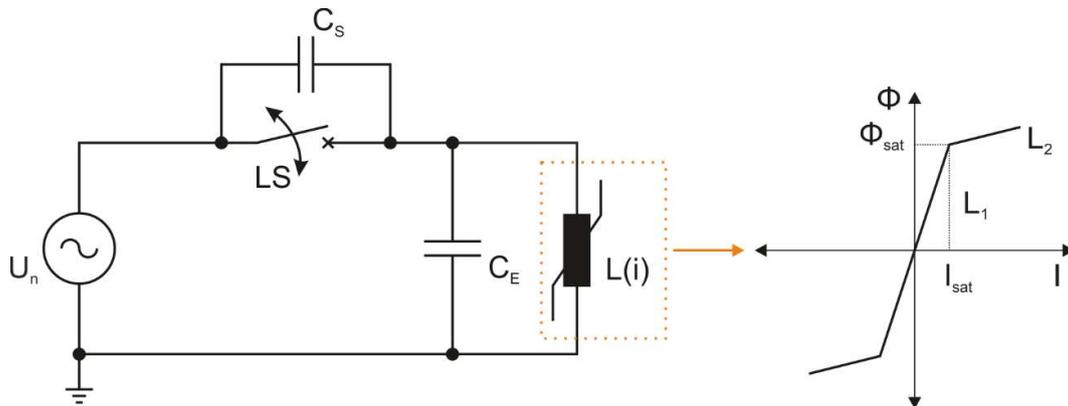


Abbildung 2-2: Anordnung zur Beschreibung und Untersuchung von Kippschwingungen

U_n	Betriebsspannung in V	Φ_{sat}	Magnetischer Sättigungsfluss in Vs
LS	Leistungsschalter	I	Strom in A
C_s	Steuerkapazität des Leistungsschalters in F	I_{sat}	Sättigungsstrom in A
C_E	Kapazität gegen Erde in F (Streukapazität)	L_1	Induktivität im ungesättigten Bereich in H
$L(i)$	Induktivität als Funktion des Stroms	L_2	Induktivität im gesättigten Bereich in H
Φ	Magnetischer Fluss in Vs		

In der gezeigten Struktur kann bei geeigneten Kapazitätsverhältnissen eine Kippschwingung bei Durchführung einer Schalthandlung des Leistungsschalters angeregt werden. Bei der Durchführung von Schalthandlungen und unter der Voraussetzung linearer Netzkomponenten (keine Sättigungseffekte), existiert genau eine Resonanzfrequenz die mit folgender Formel (1) berechnet wird:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (1)$$

f_{res}	Resonanzfrequenz in Hz	C	Kapazität in F
L	Induktivität in H		

Aufgrund der induktiven Komponenten in Hochspannungsanlagen liegen jedoch keine linearen Verhältnisse vor, da diese ferromagnetische Materialien beinhalten. Es entsteht eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen dem magnetischen Fluss und dem Strom. Aufgrund der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Komponenten kann es in Kombination mit den wirksamen Kapazitäten in Hochspannungsanlagen zu mehreren Resonanzfrequenzen kommen. Auch der Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie ist entscheidend für das Auftreten von Kippschwingungen. Die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der nichtlinearen Induktivität ergibt sich aus Formel (2). Die Kapazität C aus Formel (2) wird in Hochspannungsanlagen durch die Steuerkapazität der Leistungsschalter (C_s) und durch Kapazitäten gegen Erde (C_E) repräsentiert – siehe Abbildung 2-2. Wirksame Kapazitäten stellen auch Koppelkapazitäten bei der Parallelführung von Freileitungssystem unterschiedlicher Spannungsebene an einem Hochspannungsmast dar. Abhängig von der Größenordnung der wirksamen Kapazitäten und der Höhe der speisenden Spannungsquelle bilden sich charakteristische Schwingungsformen aus [VAL07].

Beim instabilen Punkt 2 führt eine kleine Veränderung des Stromes zu einer kleinen Veränderung der induktiven Spannung und zu einer großen Veränderung der kapazitiven Spannung. Die Steigung der kapazitiven Spannung ist größer als der gegenwirkenden induktiven Spannung und führt zu einem kontinuierlichen Ansteigen des Stromes.

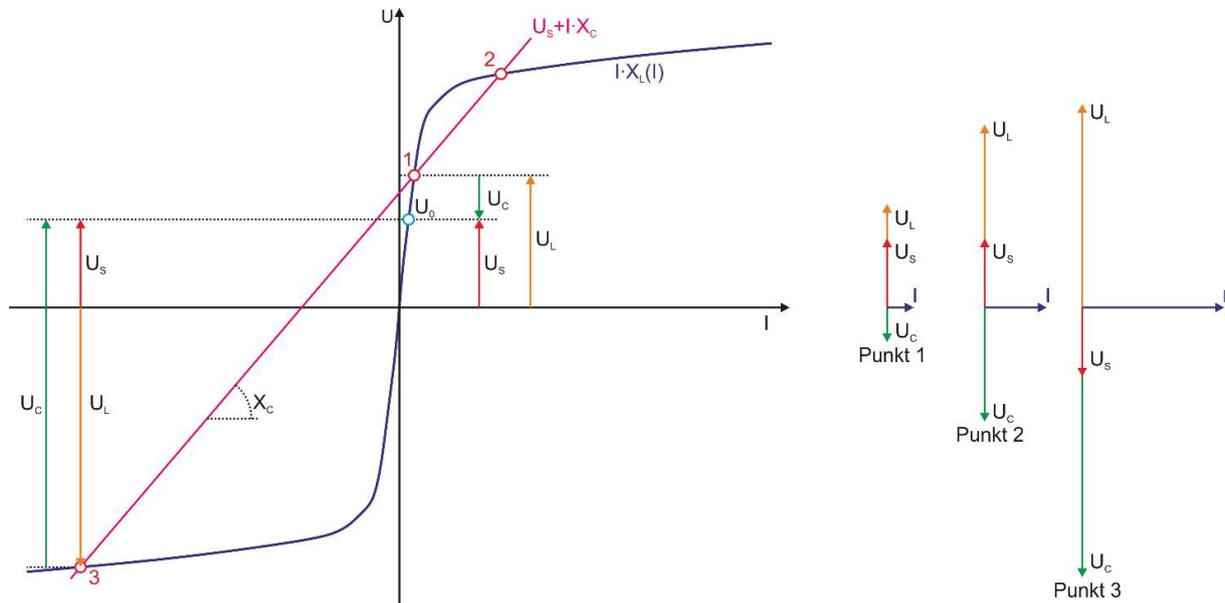


Abbildung 2-4: Graphische Lösung der stabilen und instabilen Punkte eines Serien-Kippschwingungskreises

U	Spannung in V	I	Strom in A
U_0	Betriebsspannung in V	$X_L(I)$	Induktiver Widerstand als Funktion des Stromes
U_S	Betriebsspannung in V	X_C	Kapazitiver Widerstand
U_L	Induktiver Spannungsabfall in V		
U_C	Kapazitiver Spannungsabfall in V		

Die Steigung der Gerade $U_S + I \cdot X_C$ wird durch die Größe der Kapazität bestimmt. Mit hinreichend großer Kapazität verschwinden die Punkte 2 und 3. Punkt 1 bleibt als einzige Lösung vorhanden, der einen stabilen Arbeitspunkt beschreibt.

Sind Kippschwingungen aufgetreten, können diese anhand des zeitlichen Verhaltens (siehe Abbildung 2-5) und dem Frequenzspektrum unterschieden werden [CIG569, FER98, HAR04]:

- Netzfrequente (a) oder subharmonische (b) Kippschwingung

Eine periodische Kippschwingung ist durch Spannungsformen gekennzeichnet, die sich selbst wiederholen. Die Spannungsformen sind zum Teil sehr verzerrt und das Frequenzspektrum kann entweder harmonische oder subharmonische Frequenzkomponenten beinhalten.

- Quasiperiodische Kippschwingung (c)

Quasiperiodische Kippschwingungen sind durch nicht-periodische Spannungsformen charakterisiert, die mindestens zwei Frequenzanteile besitzen.

- Chaotische Kippschwingungen (d)

Chaotische Kippschwingungen sind durch ungleichmäßige Spannungsformen mit einem breiten Frequenzspektrum charakterisiert.

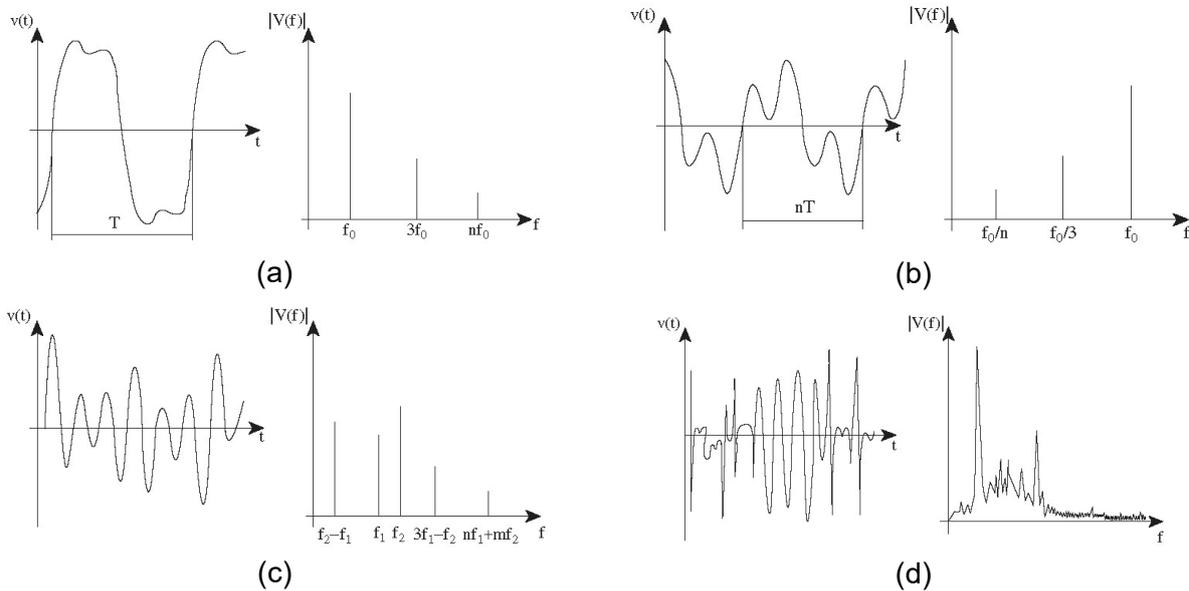


Abbildung 2-5: Typische Kurvenformen von Kippschwingungen und deren charakteristische Frequenzbereiche [HAR04]

Aus [QIA97] kann entnommen werden, dass im Wesentlichen zwischen den folgenden zwei Arten von Kippschwingungen unterschieden werden kann:

- Netzwerk Kippschwingung: Wird durch die Kombination aus der Kapazität gegenüber Erde und der Induktivität des Spannungswandlers gebildet. Diese Art der Kippschwingung breitet sich im gesamten Netzwerk aus.
- Kippschwingung bei leerlaufender Sammelschiene: Bildet sich im isolierten Netz und mit der Durchführung von Schalthandlungen kann eine Phase oder mehrere Phasen in Sättigung kommen.

Durch folgende Konfigurationen können Kippschwingungen zu Stande kommen:

- Einpolig geerdete Spannungswandler in Netzen mit isoliertem Sternpunkt
- Serienkondensatoren von Freileitungen
- Transformatoren mit unbelasteter Freileitung
- Kapazitiver Spannungswandler in Hochspannungsanlagen

Kippschwingungserscheinungen sind in der Literatur mit folgenden Erscheinungen dokumentiert [KOE95, DOL72]:

- Zerstörung von induktiven Spannungswandlern in einem Hochspannungsnetz
- Lokale Erwärmung von Transformatoren

Kippschwingungen können durch folgende Ereignisse angeregt werden [BRA06, DET85, KOE86, RUD53]:

- Einpolige Stromunterbrechung
- Abschaltung eines parallelen Leitungsabschnittes
- Ausschalten eines Leistungsschalters mit Steuerkondensatoren

Ob Kippschwingungen auftreten können, hängt von den folgenden Parametern ab [BRA06]:

- Schaltmoment der Leistungsschalter
- Amplitude der Quellenspannung
- Kenngrößen der elektrischen Komponenten (Kennlinie induktiver Komponenten, Kapazitäten der Hochspannungsanlage)

Das Auftreten von Kippschwingungen ist einer Vielzahl von Randbedingungen unterlegen, daher ist es nicht immer möglich eine eindeutige Aussage über das Kippschwingungspotential in Hochspannungsanlagen treffen zu können. Einerseits sind für die numerischen Berechnungen geeignete Randbedingungen zu wählen und andererseits ist die Qualität der zur Verfügung stehenden technischen Parameter von entscheidender Bedeutung [EMI01].

Zur vorbeugenden Vermeidung von stationären Kippschwingungen ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Anlagenbetreiber, Anlagenhersteller und Wandlerhersteller zu empfehlen [BRA06].

2.3.2 Ein- und dreiphasige Kippschwingungen

Einphasige Kippschwingung:

Einphasige Kippschwingungen können in Hochspannungsanlagen in einem ausgeschalteten, aber nicht geerdeten Anlagenteil auftreten. Beinhaltet dieser Anlagenteil einen oder mehrere induktive Spannungswandler, die unabhängig über eine Koppelkapazität mit der Betriebsspannung des Netzes verbunden sind, können diese zum Schwingen angeregt werden.

Einphasige Kippschwingungen kommen in folgenden Situationen zu Stande [BRA06, BRA06a, CIG569, DAU90, DET85, HEU02, SPE13a]:

- Kapazitive Kopplung eines freigeschalteten Abgangsfeldes (siehe Abbildung 2-6)
- Kapazitive Kopplung durch Parallelführung von Stromkreisen verschiedener Spannungsebenen auf einem Mast (siehe Abbildung 2-7)

Einphasige Kippschwingungen können in Netzen mit geerdeten und nicht geerdeten Sternpunkt auftreten [BRA06]. Für die gezeigte Anlagenkonfiguration ist es unerheblich, ob der Sternpunkt geerdet ist oder nicht. Eine Anordnung, in der einphasige Kippschwingungen auftreten können ist in Abbil-

Einphasige Kippschwingungen können vom Frequenzverhalten unterschieden werden und gliedern sich wie folgt auf [61869-102, DAU90, SPE13a]:

- 50 Hz Kippschwingung
 - Amplitude größer als die Betriebsspannung des Netzes
 - Schnelle dielektrische und thermische Schädigung
 - Voraussetzung: Kleine Erdkapazitäten – sehr selten in der Praxis
- 16 2/3 Hz Kippschwingung
 - Amplitude in der Größenordnung der Betriebsspannung des Netzes
 - Keine dielektrische Schädigung, jedoch thermische Schädigung nach längerer Zeit
 - Wiederholte Netzzuschaltung kann eine Zerstörung bewirken
- 10 Hz Kippschwingung
 - Energieschwach und deutlich kleinere Amplitude
 - Thermische Überlastung beinahe ausgeschlossen
 - Selbstdämpfend aufgrund steigender Verluste in der Primärwicklung (Erwärmung)

Dreiphasige Kippschwingung:

Dreiphasige Kippschwingungen treten vor allem in Anlagen oder Netzbereichen mit einphasigen Spannungswandlern auf, bei denen der Sternpunkt nicht starr geerdet ist [BRA06]. Eine typische Anordnung ist in Abbildung 2-8 dargestellt. Dreiphasige Kippschwingungen können durch das Einschalten von Transformatoren oder bei zugeschaltetem Transformator durch einen verlöschenden Erdschluss auftreten [DAU90, SPE13a]. Grundvoraussetzung für das Auftreten ist, dass die induktiven Spannungswandler nur mit einem kleinen Teilbereich des Netzes verbunden sind.

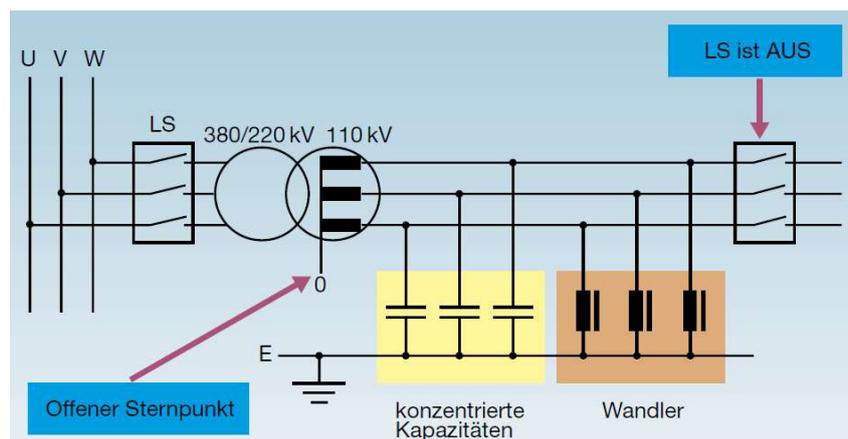


Abbildung 2-8: Anlagenkonfiguration in der dreiphasige Kippschwingungen auftreten können [BRA06]

U, V, W	Leiter des Drehstromnetzes	0	Offener Sternpunkt
LS	Leistungsschalter	E	Erde

Bei der gezeigten Anlagenstruktur ist die Größe der Erdkapazität entscheidend, ob eine transiente oder stationäre Kippschwingung angeregt werden kann. Bei großen Erdkapazitäten kann sich der Sternpunkt nicht ausreichend schnell verlagern und falls der induktive Spannungswandler aus der

Sättigung kommt, endet der Kippschwingungsvorgang von selbst. Im Gegensatz zu kleinen Erdkapazitäten verlagert sich der Sternpunkt schneller als das der induktive Spannungswandler aus der Sättigung kommt und ein stationärer Kippschwingungsvorgang kann sich ausbilden. Abhängig von der Dämpfung klingt eine angeregte transiente Kippschwingung ab oder führt in weiterer Folge zu einer stationären Kippschwingung. Ist eine stationäre Kippschwingung einmal angeregt worden und es erfolgt keine Änderung der Netzkonfiguration (Durchführung einer Schalthandlung), so bleibt die Schwingung erhalten [BRA06, DAU90].

Eine charakteristische Frequenz für eine dreiphasige Kippschwingung ist die zweite Subharmonische (25 Hz) der 50-Hz-Netzfrequenz. In vielen Fällen kann eine Schwebung mit einem Frequenzband von 0,1 Hz bis 7 Hz auftreten. Allerdings sind auch andere Harmonische und Subharmonische der Netzfrequenz möglich. Da die Amplitude der resultierenden Schwingung über der Betriebsspannung liegen kann, sind diese energiereich und können, wie bei einphasigen Kippschwingungen, zu einer dielektrischen und thermischen Schädigung der induktiven Spannungswandler führen [AND66, BRA06, DAU90, SPE13a]. [BER66] analysierte an einem dreiphasigen Netzmodell die verschiedenen Kippschwingungsformen und deren Existenzbereiche. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass die zweite Subharmonische den größten Existenzbereich aufweist und daher am häufigsten in der Praxis auftritt.

Im Weiteren wird das Auftreten von dreiphasigen Kippschwingungen betrachtet, da diese Art der Kippschwingungen im österreichischen Hochspannungsnetz aufgrund der bestehenden Anlagenkonfiguration am häufigsten auftreten kann.

2.3.3 Dokumentierte Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen

Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen werden schon seit längerer Zeit beobachtet. Es wurden auch Untersuchungen über kippschwingungsgefährdete Anordnungen durchgeführt, um Maßnahmen zur Vermeidung von Kippschwingungen zu erarbeiten.

Die Identifizierung ist durch die aufgezeichneten Messgrößen möglich, allerdings werden die Ursachen oftmals in der Praxis erst nach der Zerstörung eines Spannungswandlers erkannt. Auch ist wenig darüber bekannt ob eine Hochspannungsanlage bereits kippschwingungsgefährdete Anordnungen enthält [BRA08]. Wesentlich äußern sich Kippschwingungen im gesamten galvanisch verbundenen Hochspannungsnetz durch Erdfehlermeldungen, Brummen von Transformatoren und Spannungswandlern sowie durch Pendelbewegungen von Spannungszeigern [SAN90].

Mit Hilfe von numerischen Berechnungsprogrammen können Hochspannungsanlagen untersucht, die Sensitivität gegenüber dem Auftreten von Kippschwingungen ermittelt und Gegenmaßnahmen erarbeitet werden. Aus der Literatur können Beispiele von Anlagenstrukturen entnommen werden,

die in nahezu allen Hoch- und Höchstspannungsnetzen vorkommen und zu Kippschwingungen führen können [ESC05, HEU02, JAC96, JAC00, JAC03, PAT07, PIN15]:

- Kippschwingungen an Transformatoren bei Durchführung von Schalthandlungen
- Transformatoren, die nur über eine bzw. zwei Phasen versorgt werden
- Transformatoren, die über die Steuerkapazität eines geöffneten Leistungsschalters mit Spannung versorgt werden
- Parallele Kopplung von abgeschalteten und eingeschalteten Hochspannungsfreileitungssystemen in Kombination mit induktiven Spannungswandlern
- Transformatoren, die über lange Freileitungen oder Energiekabel versorgt werden
- Kippschwingung an induktiven Spannungswandlern
- Kippschwingungen durch Fehlerfälle im Hochspannungsnetz

2.3.4 Maßnahmen zur Vermeidung von Kippschwingungen

Kann durch die numerische Berechnung die erforderliche Randbedingung für das Auftreten von Kippschwingungen ermittelt werden, so können diese durch Abhilfemaßnahmen vermieden werden. Für die unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen in denen einphasige und dreiphasige Kippschwingungen auftreten, können folgende Abhilfemaßnahmen angewendet werden [AND66, DAU90, ESC11, FER98 KOE95, QIA97]:

- Einphasige Kippschwingungen
 - Verstimmung des Resonanzkreises durch Änderung der Leitungsdaten (Mastbild)
 - Reduzierung der eingekoppelten Energie durch Änderung der Phasenbelegung am Mast
 - Änderung der Wandlerdaten
 - Einbau von Zusatzkapazitäten
 - Rasche Erdung des freigeschalteten Leitungsabschnittes
 - Zusätzliche Bebürdung der Wandler
 - Dämpfung des Schwingkreises durch Ableiter auf der Primärseite
 - Einlegen des Erdungsschalters
 - Installation von induktiven Spannungswandlern auf der Leitungsseite
 - Vor dem Entladen die Spannungswandler ausschalten und danach wieder einschalten
 - Spannungswandler mit Luftspalt
 - Optische oder kapazitive Spannungswandler
 - Bedämpfungseinrichtungen

- Dreiphasige Kippschwingungen
 - Optimierung von Schalthandlungen
 - Spannungswandler mit Luftspalt
 - Leistungsschalter der Höchstspannungsebene ohne Steuerkondensatoren
 - Spannungswandler mit größerer Sättigung
 - Bedämpfungseinrichtungen
 - Optische oder kapazitive Spannungswandler
 - Vergrößerung der Erdkapazität des Netzes

3 METHODEN DER NUMERISCHEN MODELLBILDUNG UND BERECHNUNG

3.1 Modellbildungsgrad

Ein entscheidendes Kriterium für die Modellierung von Hochspannungsanlagen ist der zu untersuchende Frequenzbereich. Da transiente Ereignisse Frequenzen im Bereich von DC bis zu einigen MHz annehmen können, existieren keine numerischen Berechnungsmodelle, die den gesamten Frequenzbereich abdecken [CIG039, MAR07].

Abbildung 3-1 zeigt den wesentlichen Unterschied des Modellierungsansatzes zwischen den drei Untersuchungsarten (Lastflussberechnung, Schalthandlungen und atmosphärische Entladungen) in Abhängigkeit des Frequenzbereiches. Der Frequenzbereich hat einen Einfluss auf die numerische Modellbildung und den Modellierungsgrad von Hochspannungsanlagen. Die Modelle sind dem zu untersuchenden Frequenzbereich anzupassen. Modellkomponenten für die numerische Nachbildung können aus [60071-4] entnommen werden.

Während bei stationären Betriebsverhältnissen lineare mathematische Zusammenhänge für die Beschreibung ausreichend sind, treten bei transienten Ereignissen höhere Frequenzen, Laufzeiteffekte und Sättigungserscheinungen auf. Für stationäre Untersuchungen sind die kapazitiven und induktiven Kopplungsmechanismen zu berücksichtigen. Eine laufzeitabhängige Modellbildung ist in diesem Fall nicht erforderlich. Bei der Durchführung der Untersuchung von Schalthandlungen, dem Auftreten von Fehlerereignissen (mittel- bis hochfrequent) und atmosphärischen Entladungen (hoch- bis sehr hochfrequent) sind Kopplungsmechanismen, Nichtlinearitäten und Laufzeiteffekte zu berücksichtigen.

Da der Fokus der numerischen Berechnungen auf das Auftreten von Kippschwingungen bei der Durchführung von Schalthandlungen in den Hochspannungsanlagen gelegt wurde, erfolgte die Modellbildung der einzelnen Hochspannungsanlagen und den elektrischen Komponenten bis hin zu einer Frequenz von ca. 20 kHz [CIG039]. Dieser Frequenzbereich deckt die langsamen niederfrequenten Schwingungen und die langsam ansteigenden Überspannungen ab. In diesen Frequenzbereich fällt unter anderem auch die Analyse der Einschaltströme von Transformatoren, Lastabwurf, Fehlerereignisse und Schalthandlungen an Leitungsverbindungen [MAR07].

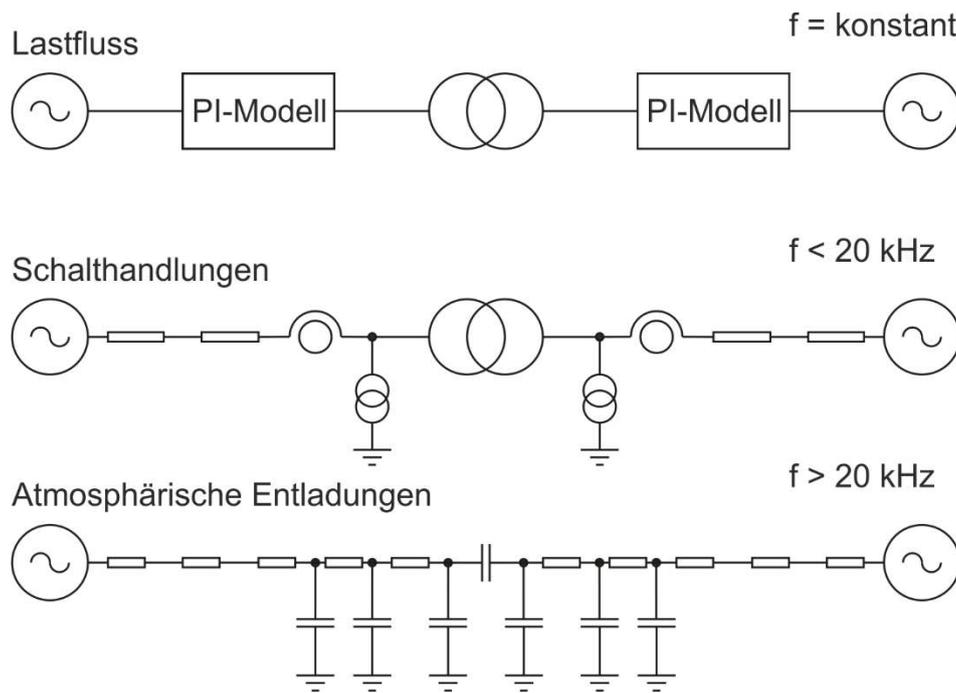


Abbildung 3-1: Modellbildungsgrad in Abhängigkeit des Frequenzbereichs von Hochspannungsanlagen für die Untersuchung von Lastfluss, Schaltvorgängen und atmosphärischen Entladungen

Für die Untersuchung von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen, müssen die wesentlichen Parameter der elektrischen Komponenten zur Verfügung stehen. Ausgehend von einer allgemeinen Struktur einer Hochspannungsanlage sind folgende Komponenten zu berücksichtigen:

- Übertragungsleitungen samt ferner Einspeisung mit Netzimpedanz
- Dreiphasige Sammelschienensysteme, Transformator- und Abgangsfelder
- Transformatoren und induktive Spannungswandler
- Leistungsschalter mit Steuerkapazität
- Kapazitäten (Streukapazitäten) in der Hochspannungsanlage
- Überspannungsableiter

Die numerischen Berechnungsmodelle der Hochspannungsanlagen wurden in einzelne Anlagenstrukturen unterteilt. Die Unterteilung erfolgt gemäß dem elektrotechnischen Wirkungsgebietes transienter Spannung. Bei der Untersuchung von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen sind für das Auftreten dieser, Aktionen zwischen den Spannungsebenen zu betrachten. Das bedeutet, dass beim primärseitigen Einschalten eines Transformators Kippschwingungen in der darunterliegenden Spannungsebene angeregt werden können. Für die numerische Modellbildung und der Durchführung der numerischen Berechnungen wurde das transiente Berechnungsprogramm EMTP-RV¹ (Fa. Powersys solutions), Version 4.0, verwendet [EMT95].

¹ EMTP-RV: ElectroMagnetic Transients Program – Restructured Version

Die Ausgangsbasis der numerischen Berechnungsmodelle für die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse liefert ein numerisches Berechnungsmodell, welches nach den folgenden Punkten verifiziert wird:

- Anpassen der einzelnen numerischen Berechnungsmodellbausteine auf den vorliegenden Fall (Frequenzbereich)
- Numerische Stabilität des Berechnungsmodells im stationären und im transienten Fall
- Verifizierung der auftretenden transienten Phänomene

3.2 Analyse von kippschwingungsgefährdeten Hochspannungsanlagen

Für die numerische Berechnung des Auftretens von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen sind die technischen Parameter der elektrischen Komponenten und der Verlauf der Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler entscheidend. Aus Tabelle 3-1 können typische Anlagenparameter zur numerischen Modellbildung entnommen werden. Die angeführten Größen sind für die Beurteilung der Gefährdung durch Kippschwingungen, aber auch zur Bildung von Berechnungsmodellen und zur Evaluierung von Abhilfemaßnahmen heranzuziehen.

Tabelle 3-1: Anlagenparameter für die numerische Modellbildung ausgewählter Hochspannungskomponenten [BRA08]

Anlagenparameter	Max. Netzspannung U_m	123 kV ... 145 kV	245 kV	420 kV ... 550 kV
		Erdkapazitäten induktiver Spannungswandler C_{HS}	Öl	250 pF ... 300 pF
	SF ₆	80 pF	100 pF ... 200 pF	200 pF ... 250 pF
Erdkapazitäten induktiver Stromwandler C_{HS}	Öl	600 pF ... 1300 pF	600 pF ... 1300 pF	
	SF ₆	150 pF	250 pF	230 pF ... 290 pF
Erdkapazitäten kombinierte Wandler C_{HS}	Öl	1000 pF ... 1700 pF	1000 pF ... 1700 pF	
	SF ₆	190 pF	250 pF ... 350 pF	270 pF ... 380 pF
Kapazität kapazitive Spannungswandler C_{HS}	Öl	4000 pF ... 10000 pF	3000 pF ... 6000 pF	2000 pF ... 4000 pF
Erdkapazität induktive Spannungswandler für GIS C_{HS}	SF ₆	70 pF	80 pF	100 pF
Kapazität RC-Spannungswandler C_{HS}	Öl		700 pF ... 5000 pF	
Erdkapazität der Anlage ohne Messwandler C_e			200 pF ... 3000 pF	
Kapazität von Freileitungsstrecken			10 pF/m ... 15 pF/m	
Kapazität von Kabelstrecken			150 pF/m ... 300 pF/m	
Hauptinduktivität von Spannungswandlern im Arbeitspunkt L_n		Größenordnung 1 kH ... 1000 kH, Angaben vom Hersteller		
Eisenverluste der induktiven Spannungswandler P_{Fe}		Angaben vom Hersteller		
Verlustwiderstände zwischen Hochspannung und Erde R_e		Isolationswiderstände gegen Erde: Größenordnung 1 MΩ bis 10 GΩ. Sie variieren stark je nach Art der Isolation, Feuchtigkeit und Verschmutzungsgrad		
Typische Werte der Kapazität von Steuerkondensatoren für Leistungsschalter C_s		Europa: 200 pF ... 1000 pF, USA: 200 pF ... 1500 pF. Moderne Hochspannungsschalter besitzen oft keine Steuerkondensatoren, die Schaltstreckenkapazität liegt damit in der Größenordnung von 10 pF		

In einer bestehenden Anlage können aufgetretene Kippschwingungen ohne Umbaumaßnahmen entweder mit externen Bedämpfungseinrichtungen oder durch operative Maßnahmen vermieden werden. Gelingt es nicht, bestehende Kippschwingungen durch zusätzliche Bedämpfungsmaßnahmen zu beheben, so ist zu überprüfen, ob stationäre Kippschwingungen durch operative Maßnahmen vermieden werden können. Es ist zu überprüfen, ob kritische Schaltzustände bzw. Schalthandlungen vermieden werden können oder ob durch sofortiges Betätigen der Trennschalter die weitere Energieeinkopplung unterbrochen werden kann. Sind diese Maßnahmen nicht erfolgreich, so muss die Anlagenkonfiguration verändert werden [BRA09].

3.3 Numerische Modellbildung von Hochspannungskomponenten

3.3.1 Hochspannungsanlagen

Die numerische Modellbildung von Hochspannungsanlagen erfolgt für den nieder- bis mittelfrequenten Bereich (Frequenzbereich bis ca. 20 kHz). Zu diesem Frequenzbereich zählen langsame niederfrequente Schwingungen und langsam ansteigende Überspannungen. Bei der numerischen Modellbildung und Berechnung sind die kapazitiven und induktiven Koppelmechanismen für das Auftreten von Kippschwingungen essenziell und nachzubilden. Es ist entscheidend, dass die verwendeten Modelle hinsichtlich des zu untersuchenden Frequenzbereichs unterteilt werden [60071-4].

Zur dreiphasigen numerischen Modellbildung, werden für die Struktur der Sammelschienen, Transformator- und Abgangsfelder die geometrischen (Höhe und Position der Leitungsverbindungen und der Leiterquerschnitt) und elektrischen Daten (Frequenz, Gleichstromwiderstand und Skin-Effekt) zur Berechnung eines Ersatzschaltbildes herangezogen, damit der ohmsche Widerstand und die induktiven und kapazitiven Kopplungsmechanismen berücksichtigt werden. Aus Abbildung 3-2 kann die Leiteranordnung einer Sammelschiene, eines Transformator- oder Abgangsfeldes entnommen werden.

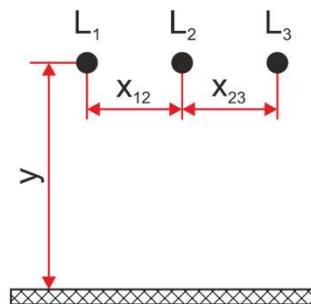


Abbildung 3-2: Leiteranordnung einer Sammelschiene, eines Transformator- oder Abgangsfeldes in Hochspannungsanlagen

L_1, L_2, L_3	Leiter des Drehstromnetzes	x_{12}, x_{23}	Horizontaler Abstand der Sammelschienen in m
y	Höhe der Sammelschiene über Erde in m		

Zur Modellbildung der Hochspannungsanlagen wurde ein Matlab-Programm entwickelt, welches aus den geometrischen und elektrischen Parametern der Sammelschiene und des geometrischen Aufbaus der Hochspannungsanlage, eine Struktur für das numerische Berechnungsprogramm zur Verfügung stellt. Das numerische Berechnungsprogramm stellt die Möglichkeit einer Schnittstelle, die die Einbindung einer externen Struktur ermöglicht, zur Verfügung. Diese Schnittstelle wird verwendet und die generierte Anlagenstruktur einer Hochspannungsanlage kann in EMPT-RV eingebunden werden.

Folgende Komponenten sind im Strukturprogramm hinterlegt:

- Dreiphasige Sammelschienenkomponenten (ein- und zweisystemig)
- Leistungsschalter mit Steuerkapazitäten
- Verbindungsknoten
- Verbindungsschnittstelle zu EMPT-RV

Abbildung 3-3 zeigt eine beispielhafte schematische Darstellung einer Hochspannungsanlage mit der Schnittstelle zwischen EMTP-RV und Matlab. Mit den Verbindungen (O_1 bis O_n) besteht die Möglichkeit, dass externe Komponenten wie Spannungsquellen, Freileitungen, Transformatoren oder induktive Spannungswandler angeschlossen werden können. Diese Modelle werden mit Hilfe der Benutzeroberfläche von EMTP-RV zum numerischen Berechnungsmodell hinzugefügt.

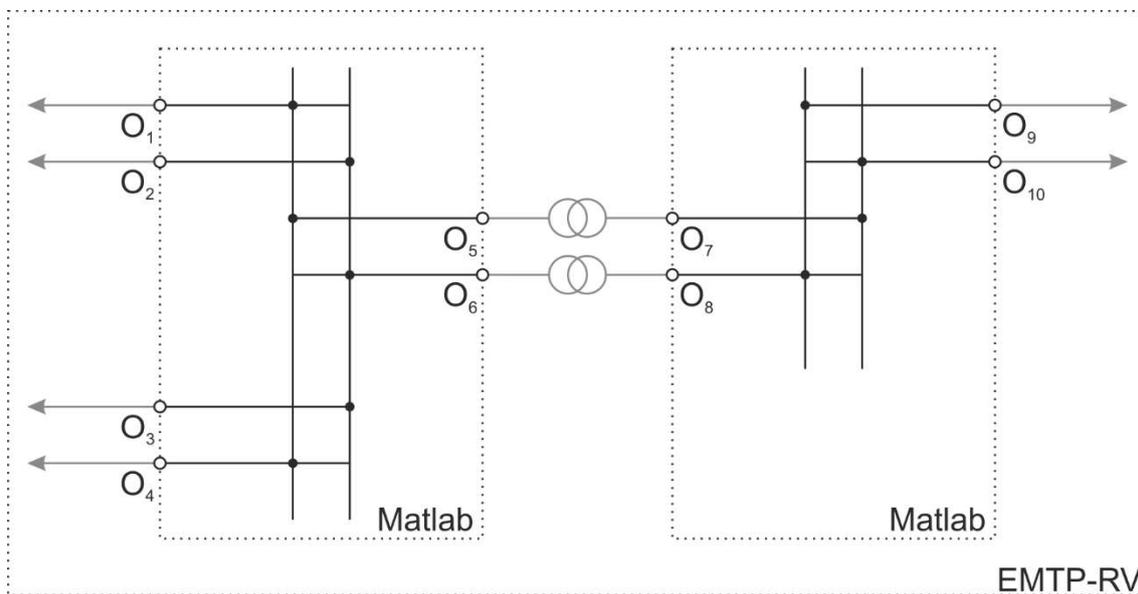


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung einer Hochspannungsanlage mit der Schnittstelle zwischen EMTP-RV und Matlab

$O_1 - O_{10}$ Schnittstellen zwischen EMTP-RV und Matlab

3.3.2 Leitungsverbindungen

Zur Implementierung von Leitungsverbindungen im numerischen Berechnungsprogramm können Konstant-Parameter-, frequenzabhängige- und PI-Modelle verwendet werden. Der Einsatz der drei genannten Modelle wird durch den Frequenzbereich und der Art der Untersuchung bestimmt [MAR05]. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Modellen kann aus Tabelle 3-2 entnommen werden.

Tabelle 3-2: Numerische Modelle der Realisierungsmöglichkeiten von Leitungsverbindungen
(+ ... geeignet; - ... nicht geeignet)

Modell	Laufzeitabhängig	Frequenzabhängig
Konstant-Parameter	+	-
Frequenzabhängig	+	+
PI-Modell	-	-

Die aufgelisteten Modelle beschreiben, abhängig vom auftretenden Frequenzbereich ein unterschiedliches Verhalten. Die Nutzung der frequenzabhängigen Modelle kommt dem realen Verhalten von Freileitungen und Energiekabeln am nächsten und ist vor für die Untersuchung von schnell und sehr schnell ansteigenden Überspannungen einzusetzen. Abhängig vom Untersuchungsgegenstand kann folgende Unterscheidung in der Verwendung der Modelle getroffen werden – siehe Tabelle 3-3.

Tabelle 3-3: Auswahl der numerischen Modelle von Leitungsverbindungen in Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstandes (+ ... geeignet; - ... nicht geeignet)

Untersuchung	Konstant-Parameter	Frequenzabhängig	PI-Modell
Atmosphärische Entladungen	-	+	-
Schalthandlungen	+	+	~
Kippschwingungen	+	~	+
Lastfluss	-	-	+

Zur Realisierung des Berechnungsmodells einer Freileitungsverbindung (siehe Abbildung 3-4) werden die Informationen aus den, vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellten, Leitungsdaten herangezogen [MAR05]:

- Mastkopfbild
- Höhenangaben (Aufhängehöhen) von Leiterseilen und Erdseil (x-y Koordinaten)
- Durchhang von Leiter- und Erdseile
- Durchmesser der Leiter- und Erdseile
- Gleichstromwiderstand
- Länge der Freileitung
- Spezifischer Bodenwiderstand
- Teilleiteranzahl, Anzahl der Systeme

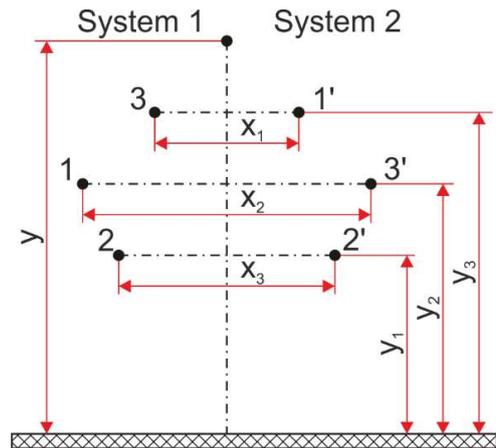


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung eines Mastkopfbildes mit Höhen- und Distanzangaben von Leiterseilen und Erdseil

1, 2, 3	Leiter des Drehstromsystems (System 1)	$x_1 - x_3$	Horizontaler Abstand der Leiterseile in m
1', 2', 3'	Leiter des Drehstromsystems (System 2)	$y_1 - y_3$	Aufhängehöhen der Leiterseile in m
y	Aufhängehöhe des Erdseils in m		

Für die numerische Modellbildung von Energiekabeln (siehe Abbildung 3-5) werden folgende Informationen, vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellten Daten, herangezogen [GUS05]. Aus den vorhandenen Daten wird ein n-phasiges Ersatzschaltbild erzeugt.

- Anzahl der Energiekabel
- Leiter und Anzahl der Schirme
- Position der Energiekabel (x-y Koordinaten)
- Innerer und äußerer Radius von Leiter und Schirm
- Äußerer Durchmesser
- Spezifischer Bodenwiderstand
- Materialeigenschaften (Spezifischer Widerstand, relative Permeabilität und Permittivität)

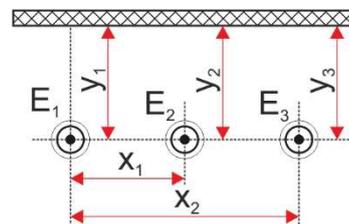


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung verlegter Energiekabel im Erdreich mit Verlegetiefe und Abstand untereinander

$E_1 - E_3$	Energiekabel (Referenz: E_1)
$y_1 - y_3$	Verlegetiefe der Energiekabel in m
$x_1 - x_2$	Horizontaler Abstand der Energiekabel in m

Für die numerische Modellbildung der Leitungskomponenten werden die frequenzunabhängigen Konstant-Parameter-Modelle und die PI-Modelle verwendet.

[60071-4] empfiehlt die Berechnungsschrittweite derart anzupassen, dass die höchste erwartete Frequenz bei transienten Vorgängen abgedeckt ist. Es wird empfohlen, dass eine Berechnungsschrittweite von einem Zehntel der Periode gewählt wird, welche der höchsten Frequenz entspricht. Zur Überprüfung der Qualität der verwendeten numerischen Berechnungsmodelle und der Berech-

nungsschrittweite kann eine Zeitunabhängigkeitsanalyse durchgeführt werden. Im Rahmen der Modellvalidierung wurde die Berechnungsschrittweite ausgehend von einer angenommenen Schrittweite von $\Delta t = 10 \mu\text{s}$ bei gleichbleibender Modellierung immer weiter verfeinert, bis ein nicht signifikanter Unterschied zwischen den numerisch berechneten transienten Spannungen festzustellen war. Durch den Vergleich der Berechnungsergebnisse konnte die Unabhängigkeit der Berechnungsschrittweite für die numerische Modellbildung nachgewiesen werden.

3.3.3 Magnetisierungskennlinie und induktive Spannungswandler

Kernstück für die numerische Berechnung von Kippschwingungen sind die Informationen über den Verlauf der Magnetisierungskennlinie von induktiven Spannungswandlern, Transformatoren und Kompensationsdrosselpulen [ZAR09]. Bei der Untersuchung von Kippschwingungen ist die Charakteristik der Magnetisierungskennlinie von entscheidender Bedeutung, da diese in Kombination mit vorhandenen wirksamen Kapazitäten das Auftreten von Kippschwingungen erst ermöglicht.

Wie aus [CIG569] hervorgeht, kann die Magnetisierungskennlinie für induktive Spannungswandler derselben Spannungsebene eine unterschiedliche Charakteristik aufweisen. Abbildung 3-6 zeigt beispielhaft Magnetisierungskennlinien von drei induktiven 400-kV-Spannungswandlern [CIG569]. Es ist zu erkennen, dass die drei Magnetisierungskennlinien einen unterschiedlichen Knickpunkt und Verlauf beim Übergang vom linearen (ungesättigten) in den gesättigten Bereich aufweisen.

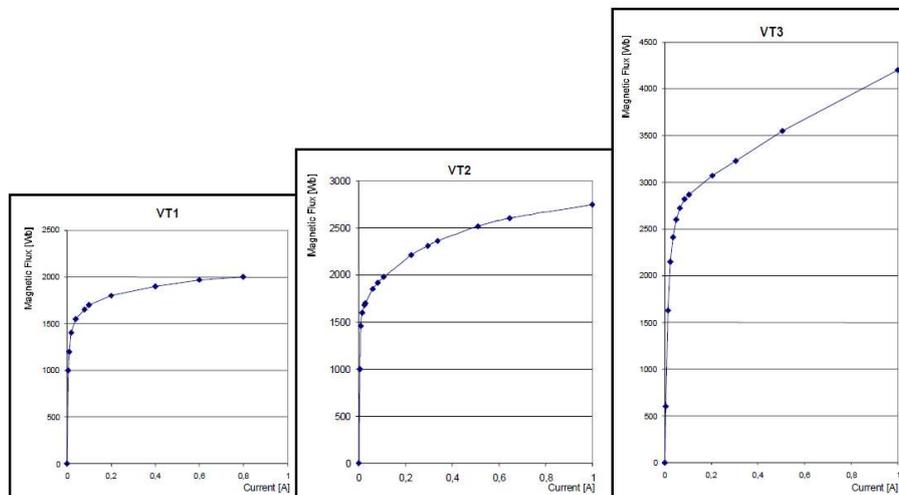


Abbildung 3-6: Magnetisierungskennlinien von drei induktiven 400-kV-Spannungswandlern [CIG569]

Die Magnetisierungskennlinie kann entweder punktweise oder durch einen Polynomzug repräsentiert werden. In Abhängigkeit von der Repräsentation und bei gleichbleibender numerischer Modellbildung können Kippschwingungen bei Schaltheftungen oder Fehlerfällen angeregt, vermieden oder erfolgreich bedämpft werden [ZAR09].

Sind keine Informationen über den Verlauf der Magnetisierungskennlinie von induktiven Spannungswandlern bekannt, kann die numerische Berechnung und Untersuchung des Auftretens von Kippschwingungen nicht erfolgen. Somit kann die Aussage der Kippschwingungsgefährdung einer Hochspannungsanlage nicht im Detail untersucht und bewertet werden. Um diesem Umstand Abhilfe zu verschaffen, kann entweder eine normierte Magnetisierungskennlinie aus der Literatur herangezogen oder es besteht die Möglichkeit diese messtechnisch zu erfassen [CER15, NEV93]. Sind die messtechnisch aufgezeichneten Werte von Spannung, Strom und Leistung vorhanden, erfolgt anhand dieser Daten die Berechnung der Magnetisierungskennlinie bzw. des Eisenverlustwiderstandes als Funktion des Stromes [NEV93].

Sind keine Informationen über die Magnetisierungskennlinie vorhanden, kann diese anhand von zwei Geraden nachgebildet werden. Der Nennarbeitspunkt von induktiven Spannungswandlern kann mit Formel (3) berechnet werden.

$$\phi_{\text{Nenn}} = \frac{\sqrt{2}U_n}{\sqrt{3} 2\pi f} \quad (3)$$

ϕ_{Nenn}	Magnetischer Nennfluss in Vs	f	Frequenz in Hz
U_n	Betriebsspannung in V		

In Abbildung 3-7 ist ein beispielhafter Verlauf einer Magnetisierungskennlinie zu sehen. Die nichtlineare Induktivität setzt sich aus den zwei Induktivitätswerten, wobei L_1 den linearen (ungesättigten) Bereich und L_2 den gesättigten Bereich repräsentieren, zusammen. Der Übergang vom ungesättigten in den gesättigten Bereich der Magnetisierungskennlinie kann typischerweise mit 25 % bis 75 % über dem Nennpunkt (Arbeitspunkt) angenommen werden. Die Steigung im gesättigten Bereich kann mit einer um 30 % verringerten Steigung als im ungesättigten Bereich angenommen werden [CIG569, COL07].

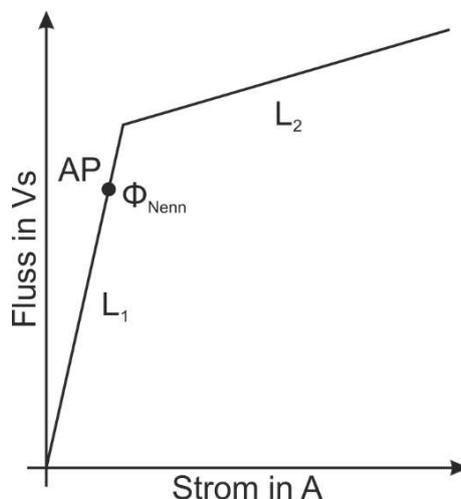


Abbildung 3-7: Beispielhafter vereinfachter Verlauf einer Magnetisierungskennlinie

L_1	Induktivität im ungesättigten Bereich in H	AP	Nennpunkt (Arbeitspunkt)
L_2	Induktivität im gesättigten Bereich in H		

Die Berechnung eines Polynomzuges aus einer stückweisen Repräsentation der Magnetisierungskennlinie kann für die numerische Modellbildung anhand der Abhängigkeit zwischen dem Strom und des magnetischen Flusses berechnet werden [MAR91] – siehe Formel (4).

$$i_m = a\phi + b\phi^n \quad (4)$$

i_m	Magnetisierungsstrom in A	a, b, n	Konstanten
ϕ	Magnetischer Fluss in Vs		

Der Faktor n aus Formel (4) kann beliebig gewählt werden. Die beiden Faktoren a und b beschreiben den linearen (ungesättigten) und den gesättigten Bereich der Magnetisierungskennlinie. Es ist jedoch zu beachten, dass der Faktor n nur ungerade Zahlen annehmen kann. Die Ordnung von n ist für die Repräsentation von Bedeutung. Typische Werte liegen in der Größenordnung zwischen 11 und 25 [CER15, MAR91, ZAR09].

Die Magnetisierungskennlinie ist durch eine endliche Anzahl des Parameterdatensatzes der Strom-Fluss-Charakteristik bestimmt. Damit es in numerischen Berechnungsprogrammen nicht zu Instabilitäten kommen kann, erfolgt eine Interpolation der Magnetisierungskennlinie in den größeren Sättigungsbereich. Ohne Interpolation würde es im numerischen Berechnungsablauf zu Singularitäten kommen und in weiterer Folge zu einer numerischen Instabilität. Abbildung 3-8 zeigt beispielhaft die Interpolation einer Magnetisierungskennlinie in den größeren Strombereich.

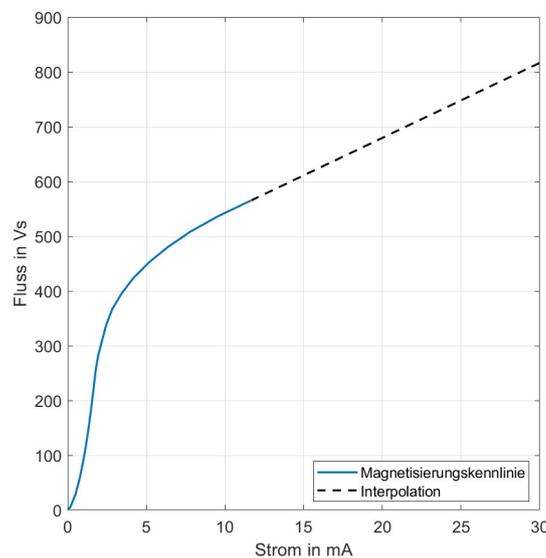


Abbildung 3-8: Interpolation der Magnetisierungskennlinie in den größeren Strombereich

Induktive Spannungswandler in Hochspannungsanlagen werden für Schutz-, Mess- und Abrechnungszwecke verwendet. Die Implementierung der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie bei induktiven Spannungswandlern ist vor allem für das Auftreten von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen entscheidend [CIG569, ZAR09].

Zur Abschätzung des Kippschwingungspotentials in Hochspannungsanlagen ist es notwendig, dass bei der numerischen Modellbildung der induktiven Spannungswandler ein adäquater Datensatz vorhanden ist. Dieser grundlegende Datensatz kann entweder durch eine messtechnische Erfassung erfolgen oder es können die technischen Daten vom Hersteller bezogen werden. In Abbildung 3-9 ist das Modell eines induktiven Spannungswandlers samt den einzelnen Komponenten dargestellt. Die beiden Kapazitäten (C_{HV} und C_{PR}) können bei vorhandenen technischen Daten im numerischen Berechnungsmodell berücksichtigt werden. Die Kapazität C_{HV} repräsentiert die Hochspannungskapazität und die Kapazität C_{PR} die Lagenkapazität der Primärspule.

An der Sekundärseite des induktiven Spannungswandlers repräsentiert die Impedanz Z_B die Bürde, die zusätzliche Verluste durch angeschlossene Mess- und Schutzeinrichtungen erzeugt. Moderne elektronische Zähl- und Schutzeinrichtungen besitzen eine Bürde von annähernd null und können oftmals vernachlässigt werden. Diese Verluste bestimmen in Kombination mit den Verlusten des Netzes und den Eisenverlusten, ob eine Kippschwingung transient bleibt oder in weiterer Folge stationär werden kann [61869-102]. Die im induktiven Spannungswandler auftretenden Verluste sind im numerischen Berechnungsmodell durch den primären Wicklungswiderstand und der Streuinduktivität der primärseitigen Spule enthalten. Die Dämpfung der induktiven Spannungswandler wurde in den numerischen Berechnungsmodellen durch den Eisenverlustwiderstand, der die Hystereseverluste und Wirbelstromverluste berücksichtigt, nachgebildet.

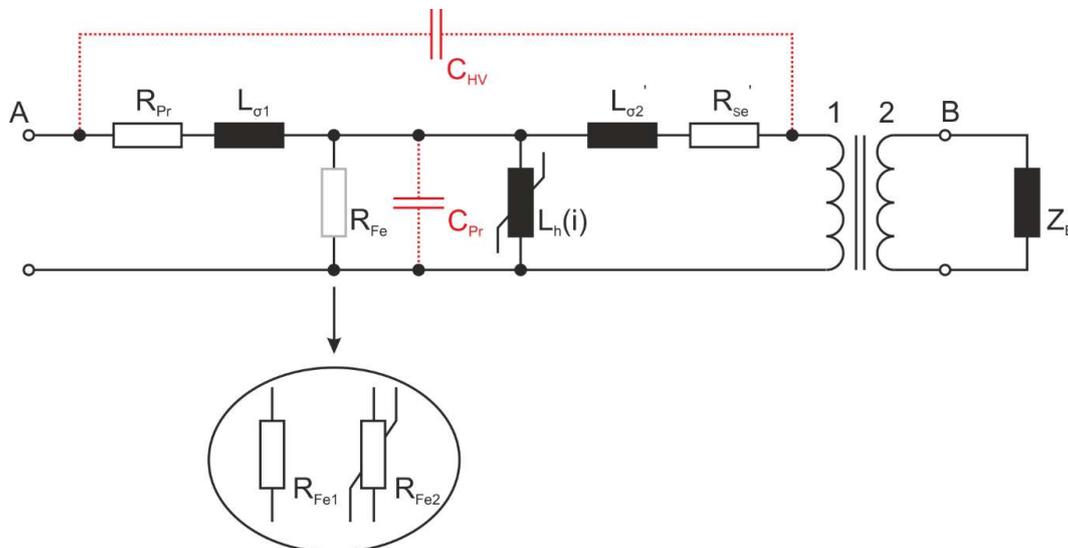


Abbildung 3-9: Numerische Modellbildung von induktiven Spannungswandlern bei vollständigem Datensatz

A, B	Anschlusspunkte	R_{Se}	Sekundärseitiger Wicklungswiderstand in Ω
R_{Pr}	Primärseitiger Wicklungswiderstand in Ω	$L_{\sigma 2}$	Streuinduktivität der Sekundärspule in H
$L_{\sigma 1}$	Streuinduktivität der Primärspule in H	C_{HV}	Hochspannungskapazität in F
$L_h(i)$	Nichtlineare Induktivität als Funktion des Stromes in H	C_{Pr}	Lagenkapazität der Primärspule in F
R_{Fe}	Eisenverlustwiderstand in Ω	Z_B	Bürde in Ω

Im einfachsten Fall kann die Repräsentation aus Abbildung 3-10 für die numerischen Berechnungen herangezogen werden. Für den Eisenverlustwiderstand kann ein konstanter Wert verwendet wer-

den. Im Eisenverlustwiderstand parallel zur nichtlinearen Magnetisierungskennlinie sind die Hystereseverluste und Wirbelstromverluste berücksichtigt (Abbildung 3-10).

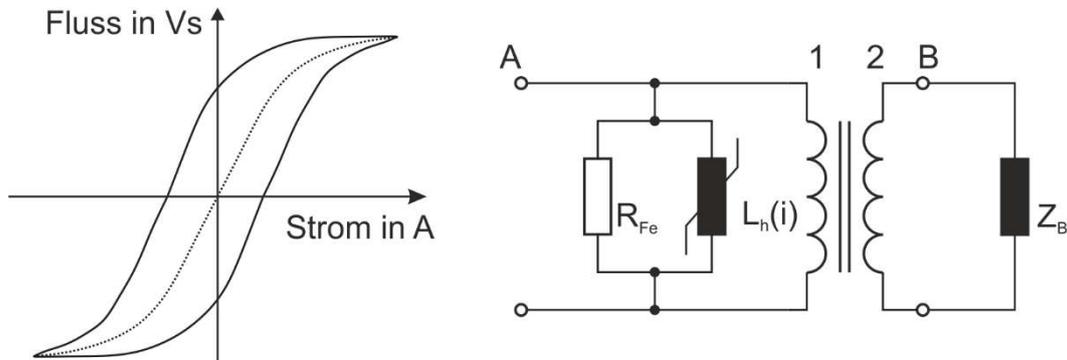


Abbildung 3-10: Vereinfachte numerische Modellbildung eines induktiven Spannungswandlers

A, B	Anschlusspunkte	R_{Fe}	Eisenverlustwiderstand in Ω
$L_h(i)$	(Nichtlineare) Hauptinduktivität in H	Z_B	Bürde in Ω

Aus Abbildung 3-9 kann entnommen werden, dass für den Eisenverlustwiderstand und mit der nichtlinearen Induktivität in Abhängigkeit der verfügbaren Informationen mehrere Repräsentationen des Querzweiges möglich sind. Abhängig vom vorhandenen Datensatz können sich folgende mögliche Kombinationen mit und ohne Kapazitäten (Hochspannungskapazität und Lagenkapazität der Primärspule) ergeben:

1. R_{Fe2} und L_{H2} mit wirksamen Kapazitäten
2. R_{Fe2} und L_{H2} ohne Kapazitäten
3. R_{Fe1} und L_{H2} mit wirksamen Kapazitäten
4. R_{Fe1} und L_{H2} ohne Kapazitäten
5. R_{Fe1} und L_{H2} (vereinfachte Struktur)

Zur Ermittlung der Qualität der numerischen Berechnungsmodelle wurde ein Vergleich zwischen den verschiedenen Modellierungsgraden von induktiven Spannungswandlern an einem Modellnetz durchgeführt – siehe Anhang F.

3.3.4 Hochspannungstransformatoren

Für die Implementierung von Transformatoren in numerischen Berechnungsprogrammen gibt es mehrere Ansätze, die durch den Frequenzbereich bestimmt werden. Grundsätzlich können aus der Literatur [CIG568, CIG577A, EMT95, IRA00, MAR03] mehrere Modellierungsansätze für Transformatoren entnommen werden. Der Aufbau des Eisenkerns ist von entscheidender Bedeutung [CHI05, CHI10]. Bei der Berücksichtigung des Aufbaus des Eisenkerns wird der Fokus auf die auf-

tretenden Einschaltströme von Transformatoren gelegt und der Nachbildung der Magnetisierungskennlinie. Untersuchungen diesbezüglich wurden bereits von [ANG10] durchgeführt, die für die numerische Berechnung von Kippschwingungen verwendet wurden und geeignet sind.

Aus Abbildung 3-11 kann ein Beispiel für die Realisierung eines Transformators für die nieder- und mittelfrequente numerische Berechnung mit Streukapazitäten, bis zu einem Frequenzbereich von ca. 20 kHz, entnommen werden [DEN09, MAR05a]. Für die grau hinterlegte Induktivität sind folgende Möglichkeiten in Abhängigkeit des Frequenzbereiches umsetzbar:

- Hauptinduktivität L_{H1} : Repräsentiert eine konstante Hauptinduktivität und einen linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Strom. Für stationäre Untersuchungen (Lastfluss) ist es hinreichend genau, dass der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Strom erhalten bleibt. Bei diesen Untersuchungen wird der Transformator beim Nennarbeitspunkt betrieben.
- Hauptinduktivität L_{H2} : Repräsentiert eine nichtlineare Hauptinduktivität und in weiterer Folge einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen dem magnetischen Fluss und des Stroms. Diese Realisierungsmöglichkeit wird für die Untersuchung der Kippschwingungsaktivität in Hochspannungsanlagen für die Transformatoren verwendet. Zur Ermittlung des nichtlinearen Zusammenhangs kann aus den gemessenen Leerlaufverlusten und den Leerlaufströmen die Magnetisierungskennlinie berechnet werden [MAR05b].

Die eingezeichneten Kapazitäten (Kapazität der Durchführungen, Koppelkapazitäten zwischen den einzelnen Wicklungen und Streukapazitäten) aus Abbildung 3-11 können aus den Prüfprotokollen der Transformatoren oder aus [CIG039, GRE91, 60071-4] entnommen werden.

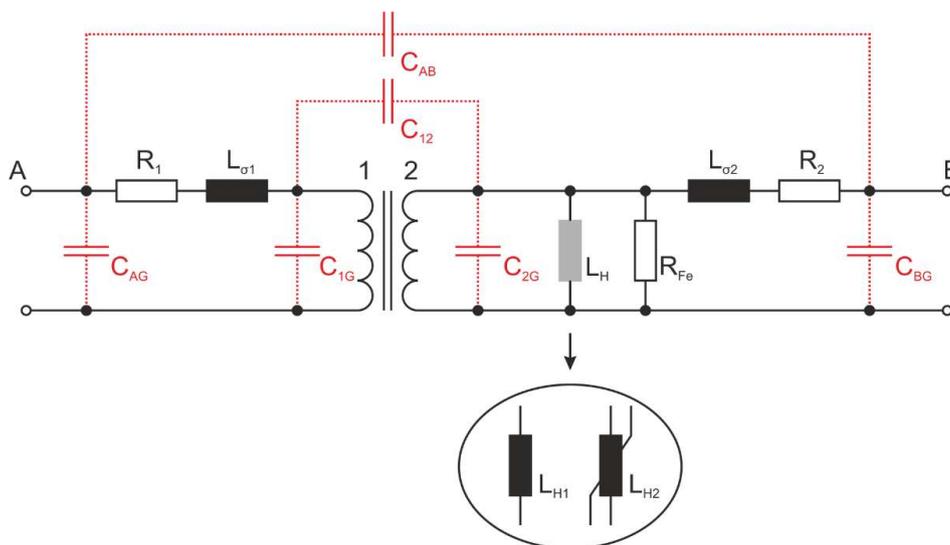


Abbildung 3-11: Numerische Modellbildung von Transformatoren bis zu einem Frequenzbereich von ca. 20 kHz

A, B	Anschlusspunkte	$L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$	Streuinduktivitäten in H
R_1, R_2	Wicklungswiderstände in Ω	L_H	(Nichtlineare) Hauptinduktivität in H
R_{Fe}	Eisenverlustwiderstand in Ω	C	Kapazitäten in F

Da sich die vorliegende Arbeit mit der numerischen Berechnung von Kippschwingungen beschäftigt, ist es hinreichend genau, das numerische Berechnungsmodell für Transformatoren aus den messtechnisch ermittelten Daten von Kurzschluss- und Leerlaufversuch zu berechnen. Die Implementierung von Sättigungserscheinungen bei Transformatoren ist vor allem bei der niederfrequenten numerischen Modellbildung von entscheidender Bedeutung. In diesem Frequenzbereich spielen bei der Durchführung von Schalthandlungen die Erscheinungen von Kippschwingungen eine entscheidende Rolle.

Die verwendeten numerischen Berechnungsmodelle wurden im Berechnungsprogramm auf Plausibilität anhand der zur Verfügung gestellten Informationen aus den Prüfberichten verifiziert. Das verwendete numerische Berechnungsmodell des Transformators ist im Anhang D angeführt.

3.3.5 Leistungsschalter

Zur Durchführung von Schalthandlungen werden in numerischen Berechnungsprogrammen ideale Schalter mit einer parallelen Summensteuerkapazität (Summe der einzelnen Steuerkapazitäten der Leistungsschalterpole) verwendet. Die Wahl des Schaltermodells kann dadurch begründet werden, dass beim Auftreten von Kippschwingungen die Frequenzen vor allem im Bereich der Netzfrequenz, deren Subharmonischen, Harmonische sowie Zwischenharmonische sind. Die Interaktion des Lichtbogenprozesses mit dem Hochspannungsnetz ist nicht von Bedeutung [MAR05c]. Die Frequenzen des Lichtbogenprozesses bei Schalthandlungen des Leistungsschalters befinden sich im MHz-Bereich [CIG039]. Die Größe der Steuerkapazität wurde entweder aus Datenblättern entnommen oder vom Anlagenbetreiber zur Verfügung gestellt. Als Parameter für die Durchführung von Schalthandlungen wurde der Schaltzeitpunkt verwendet.

Abbildung 3-12 zeigt einen SF₆ und einen ölarmen Leistungsschalter für die 400-kV-Spannungsebene. Die Steuerkapazität der SF₆-Leistungsschalter liegt in der Größenordnung von ca. 500 pF pro Unterbrechereinheit. Bei ölarmen Leistungsschaltern befindet sich die Steuerkapazität in der Größenordnung von ca. 2000 pF pro Unterbrechereinheit.

[CIG33-210] beschreibt, dass Kippschwingungen auch durch eine Fehlfunktion der Leistungsschalter oder durch einen zu großen zeitlichen Versatz zwischen den einzelnen Polen auftreten können. Es wird auch darauf hingewiesen, dass die transiente Beanspruchungsdauer der Überspannungen aufgrund von Kippschwingungen während der Zeit auftreten, in denen zwei Pole des Leistungsschalters offen sind und ein Pol geschlossen ist.

[60071-4] empfiehlt für die Untersuchung von langsam ansteigenden Überspannungen, dass das Einschalten der einzelnen Pole des Leistungsschalters einer Gaußschen Verteilung zu Grunde liegen sollte. Auch wenn die drei Phasen zum Schließen der Leistungsschalterpole den Befehl gleichzeitig bekommen, reagieren diese aufgrund der mechanischen Streuung und durch Vorzündungen

mit einer zufälligen zeitlichen Verzögerung. Die Standardabweichung der zeitlichen Reaktion der einzelnen Leistungsschalter ist nicht immer bekannt. Aus diesem Grund schlägt [60071-4] vor, dass für die einzelnen Einschaltzeitpunkte sich die Werte der Standardabweichung zwischen 0,8 ms und 2,0 ms befinden sollen.



Abbildung 3-12: Leistungsschalter mit Steuerkapazitäten für die 400-kV-Spannungsebene

Links: SF6-Leistungsschalter mit zwei Unterbrechereinheiten;

Rechts: Ölarmierter Leistungsschalter mit sechs Unterbrechereinheiten

3.3.6 Überspannungsableiter

Überspannungsableiter sind zum Schutz vor Blitz- oder Schaltüberspannungen in Hochspannungsanlagen eingebaut. Diese haben die Aufgabe, auftretende transiente Überspannungen sicher gegen Erde abzuleiten, sodass eine Beschädigung der Isolation vermieden wird. Überspannungsableiter werden durch eine Strom-Spannungs-Charakteristik nachgebildet. In Bezug auf Schaltüberspannungen, werden diese durch die Bemessungsspannung, die Dauerbetriebsspannung, die Restspannung (z.B.: bei 10 kA) und durch die Entladungsklasse charakterisiert [60071-4].

Der Einsatz und die Nachbildung von Überspannungsableitern wird laut [60071-4] in folgenden Fällen empfohlen, wenn

- ihre dämpfende Wirkung gegen Überspannung berücksichtigt werden soll;
- das Energieaufnahmevermögen untersucht wird;
- auftretende Überspannungen die Nennspannung des MO-Ableiters oder die Überschlagspannung eines Ableiters überschreiten;
- wenn langsam ansteigende Überspannungen untersucht werden;
- wenn Überspannungsableiter zur Begrenzung von langsam ansteigenden Überspannungen verwendet werden.

Für diese Fälle ist es hinreichend genau, die nichtlineare Charakteristik von Überspannungsableitern durch nichtlineare Widerstände zu repräsentieren. Überspannungsableiter können in den numerischen Berechnungsmodellen berücksichtigt werden, falls beim Auftreten einer Kippschwingung die Energieabsorptionsfähigkeit überschritten werden [60071-4].

Bei der numerischen Berechnung von Kippschwingungen wurden die Überspannungsableiter in den Berechnungsmodellen vernachlässigt. Die möglicherweise dämpfende Wirkung der Überspannungsableiter bleibt unberücksichtigt. In diesem Fall entsprechen die numerischen Berechnungen einer Worst-Case Betrachtung.

3.4 Untersuchungsmethoden und Bewertungsstrategien von Kipp-schwingungen

3.4.1 Allgemeine Herangehensweise

Abbildung 3-13 zeigt beispielhaft einen schematischen Ablauf der Untersuchungsmethode zur Abschätzung der transienten Beanspruchung an den Betriebsmitteln im Hochspannungsnetz. Ausgehend von den erhaltenen technischen Informationen erfolgt eine ein- bzw. dreiphasige numerische Modellbildung mit transienten Eingangsgrößen und den ersten Plausibilitätsprüfungen. Die Teilergebnisse können durch einen Vergleich mit der Literatur oder durch Fachwissen überprüft werden. Sind die numerischen Berechnungsergebnisse plausibel, hat die numerische Modellbildung bestanden. Anschließend erfolgt der Wesentliche Schritt der Untersuchung der transienten Beanspruchung mit der Variation ausgewählter Parameter, das Durchführen der numerischen Berechnung und der Auswertung von charakteristischen Kenngrößen aus den numerisch berechneten Ergebnissen.

Bei nicht plausiblen Ergebnissen ist die Modellbildung, die verwendeten Modelle, die Randbedingungen und die Modellparameter zu überprüfen und erneut mit transienten Eingangsgrößen auf Plausibilität zu überprüfen.

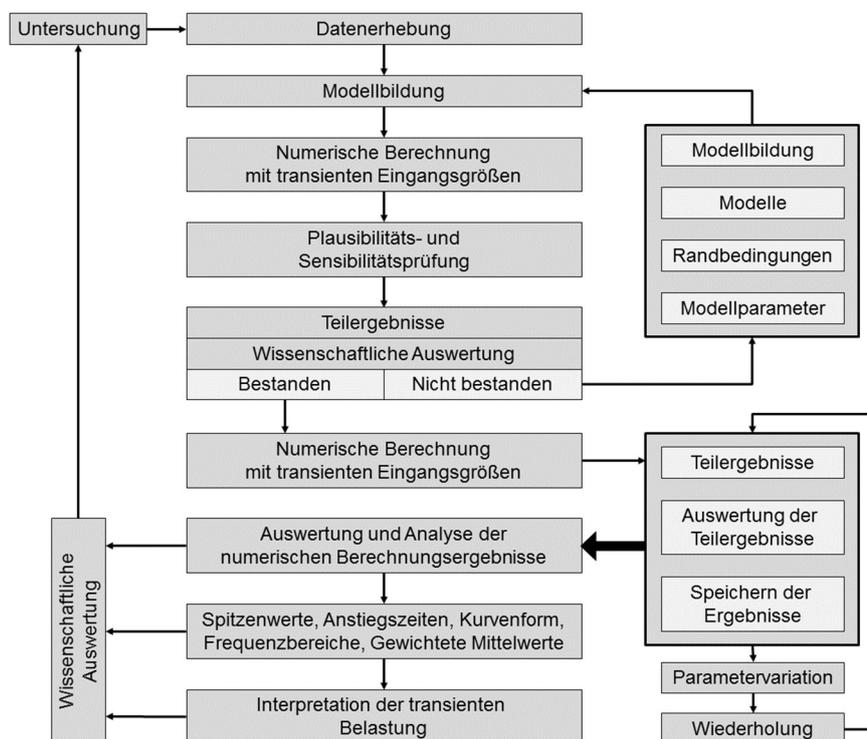


Abbildung 3-13: Schematischer Ablauf der Herangehensweise an die numerische Modellbildung und der Untersuchung zur Abschätzung der transienten Beanspruchung

Wie aus Abbildung 3-13 entnommen werden kann, nimmt die Variation ausgewählter Parameter einen großen Teil der numerischen Berechnung in Anspruch. Bei der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse wird in Abhängigkeit der Variation eines Parameters die Leiter-Erde-Spannung der einzelnen numerischen Berechnungsergebnisse gegenübergestellt.

Dies kann durch einen Eingriff in die Berechnungsroutine effektiver gestaltet werden, in dem die Berechnung, Auswertung und Gegenüberstellung in Abhängigkeit der Sensitivitätsanalyse ausgelagert wird.

3.4.2 Untersuchungsmethoden von Hochspannungsanlagen

Abbildung 3-14 zeigt die Unterteilung des klassischen Ablaufs der numerischen Berechnungen in drei Abschnitte. Der erste Abschnitt bleibt, wie bereits beschrieben, bestehen. Entweder wird hierzu eine Hochspannungsanlage klassisch im numerischen Berechnungsprogramm aufgebaut oder es erfolgt die numerische Modellbildung wie bereits in Kapitel 3.3.1 beschreiben. Mit Hilfe der vorhandenen Schnittstellen in EMTP-RV kann der zweite Abschnitt – Sensitivitätsanalyse – und der dritte Abschnitt – Berechnung, Auswertung und Gegenüberstellung der transienten Größen – ausgelagert werden. Es kann ein Überblick über das transiente Verhalten eines Knotenpunktes des Hochspannungsnetzes ermittelt werden.

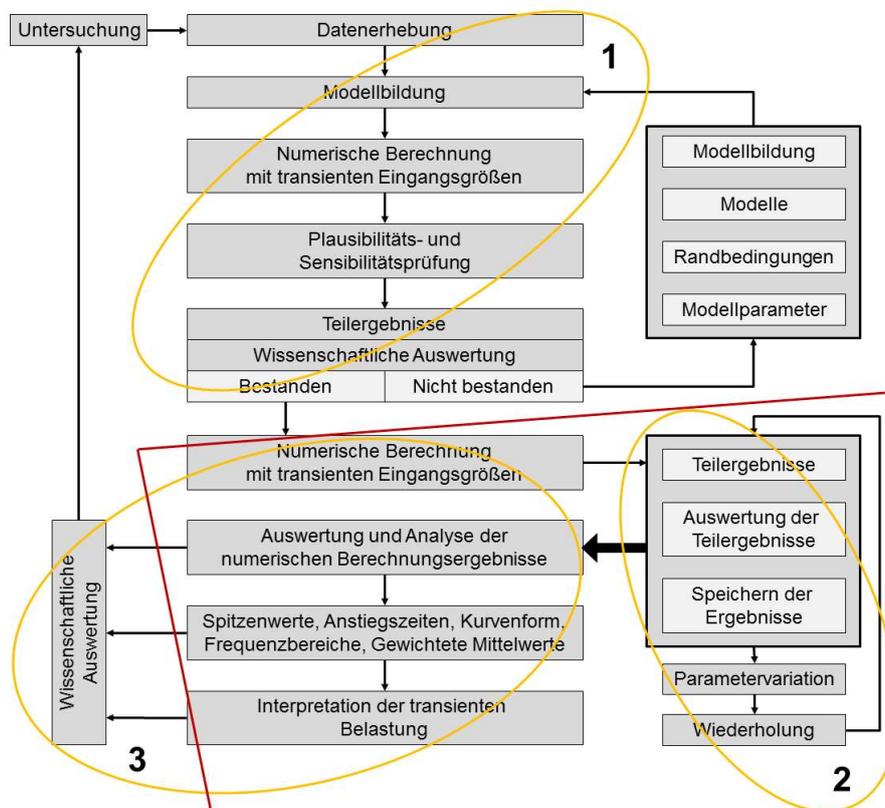


Abbildung 3-14: Aufteilung und Auslagerung der numerischen Berechnung und Auswertung transienter Verläufe

Der Vorteil darin liegt, dass für die numerischen Berechnungen ein Basismodell (mit den im Kapitel 3.2 beschriebenen Komponenten) vorhanden ist – siehe Abbildung 3-15. Dieses Basismodell, das mit Hilfe von Plausibilitätssimulationen verifiziert wurde, bildet die Grundlage für die weiterführenden numerischen Berechnungszyklen (Sensitivitätsanalyse).

Nach der Parametervariation erfolgt die numerische Berechnung, die Auswertung der Berechnungsergebnisse und eine Gegenüberstellung von ausgewählten Knotenpunkten zwischen den einzelnen Variationen. Neben der Variation der Parameter einzelner Komponenten des numerischen Berechnungsmodells, besteht die Möglichkeit einzelne Komponenten auszulagern und mit der Parametervariation zu kombinieren. So kann zum Beispiel bei der numerischen Berechnung von Kippschwingungen neben der Variation von Steuer- und Streukapazitäten, die nicht lineare Magnetisierungskennlinie von induktiven Spannungswandlern variiert werden. Wesentlicher Vorteil dieser numerischen Berechnung ist es, dass bei der Untersuchung von kippschwingungsgefährdeten Hochspannungsanlagen kritische Bereiche bzw. Parameterkombinationen evaluiert werden können.

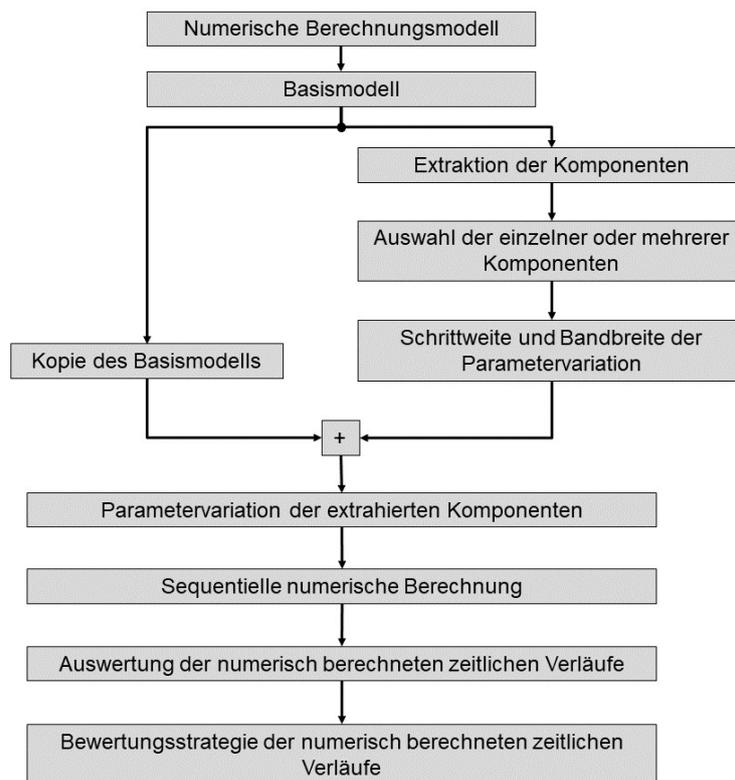


Abbildung 3-15: Ablaufdiagramm der Parametervariation extrahierter Komponenten aus dem Basismodell und Berechnung der zeitlichen Verläufe

3.4.3 Bewertungsstrategien der numerischen Berechnungsergebnisse

Nachdem transiente Spannungen durch numerische Berechnungen vorhanden sind, können diese klassifiziert werden. Die Bewertung transienter Spannungen kann folgende Parameter beinhalten [PAC98]:

- Scheitelwerte
- Anstiegszeiten bzw. Anstiegsgeschwindigkeit
- Transiente Beanspruchungsdauer
- Kurvenform
- Frequenzbereiche
- Häufigkeit des Auftretens

Mit der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter von Hochspannungskomponenten entsteht eine Vielzahl an numerischen Berechnungsergebnissen, die entweder händisch oder durch erweiterte Auswerteroutinen gegenübergestellt werden. Mit Hilfe der Auswerteroutine können die numerisch berechneten transienten Signalverläufe aus dem Berechnungsergebnissen extrahiert, in Matlab implementiert, miteinander verglichen und anschließend analysiert und bewertet werden. Zum Beispiel können aus den numerisch berechneten Leiter-Erde-Spannungen für die Beurteilung globale Spitzenwerte innerhalb der transienten Beanspruchungsdauer ausgewertet werden – siehe Abbildung 3-16.

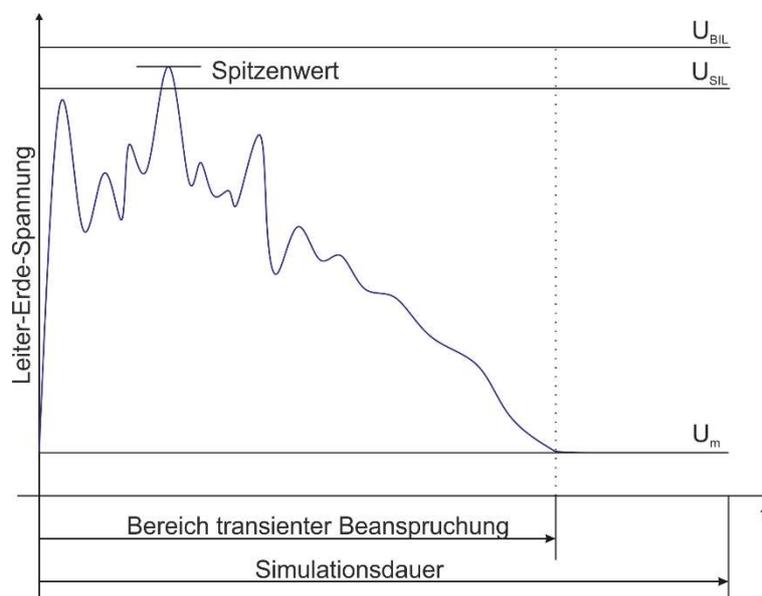


Abbildung 3-16: Beispielhafter transienter Verlauf und Auswertung des globalen Spitzenwertes

U_{BIL}	Normativer Grenzwert: Basic Insulation Level in V	U_{SIL}	Normativer Grenzwert: Switching Insulation Level in V
U_m	Höchste Spannung für Betriebsmittel in V	t	Zeit in s

Zur Analyse der Kippschwingungsgefährdung in einer Hochspannungsanlage, wird der zeitliche Ver-

lauf der Leiter-Erde-Spannung in zeitdiskrete Blöcke mit einer Fensterbreite der Grundfrequenz unterteilt. Mit dieser Unterteilung kann aus den dreiphasig berechneten Leiter-Erde-Spannungen für jede Phase die Schwingungsfähigkeit evaluiert werden. Abbildung 3-17 (links) zeigt ein Beispiel eines angenommenen Zeitsignales, welche für die Analyse der Kippschwingungsgefährdung in zeitdiskrete Blöcke unterteilt wurde. Aus dem beispielhaften Zeitsignal können zu den globalen positiven und negativen auch die lokalen Spitzenwerte evaluiert werden – siehe Abbildung 3-17 (rechts).

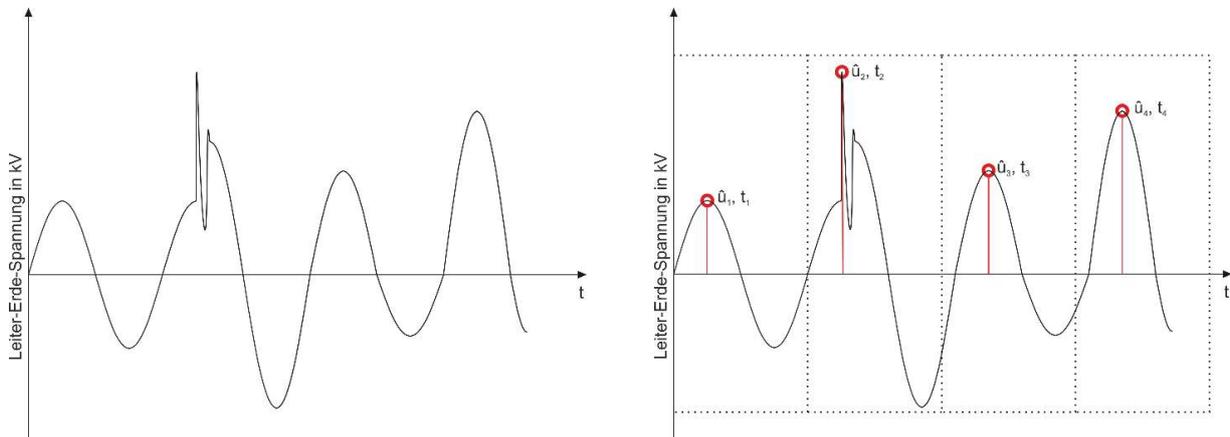


Abbildung 3-17: Links: Beispielhaftes Zeitsignal eines transienten Kurvenverlaufs

Rechts: Beispiel der Auswertung der lokalen Spitzenwerte (\hat{u}_1 bis \hat{u}_4) und deren zeitlicher Auftrittspunkte (t_1 bis t_4) mit Anwendung von zeitdiskrete Blöcke

Der zeitliche Auftrittspunkt und der Spitzenwert der Leiter-Erde-Spannung werden für alle durchgeführten numerischen Berechnungen zusammengefasst und anschließend dargestellt. Abbildung 3-18 zeigt die Zusammenfassung der ausgewerteten Spitzenwerte mit den einzelnen zeitlichen Auftrittspunkten in Abhängigkeit der Berechnungszeit und der durchgeführten Sensitivitätsanalyse. Durch die Normierung der Spitzenwerte auf den Spitzenwert der höchsten Spannung für Betriebsmittel der jeweiligen Spannungsebene [60071-1] kann ein Vergleich der transienten Beanspruchung zwischen Hochspannungsanlagen und zwischen den einzelnen numerisch berechneten Knotenpunkten erfolgen.

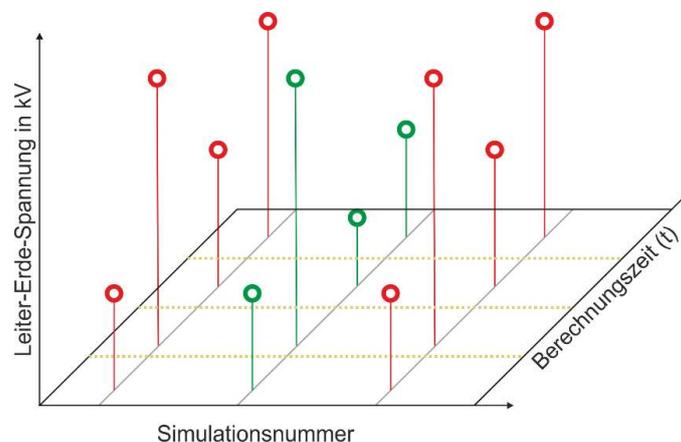


Abbildung 3-18: Zusammenfassung der ausgewerteten Spitzenwerte mit dem zeitlichen Auftrittspunkt in Abhängigkeit der Berechnungszeit und einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse

Die erhaltenen Ergebnisse der einzelnen numerisch berechneten transienten Signalverläufe können anschaulich gegenübergestellt werden. Abbildung 3-19 (a) zeigt eine Darstellungsmöglichkeit der zeitlich ausgewerteten Spitzenwerte. Mit der Vorgabe der Fensterbreite können Schwingungen der Grundfrequenz und die zweite Subharmonische in einen kippschwingungsgefährdeten Anlagenteil ermittelt werden. Abbildung 3-19 (b) zeigt ein beispielhaftes numerisches Berechnungsergebnis der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung zur Analyse und Bewertung von Kippschwingungen.

Aus der Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse kann folgendes evaluiert werden:

- Stationäres Verhalten vor internen oder externen Einwirkungen
- Transiente Beanspruchung bei internen oder externen Einwirkungen
- Transientes Verhalten nach internen oder externen Einwirkungen
- Stationäre Schwingung mit der Grundfrequenz
- Stationäre Schwingung mit der zweiten Subharmonischen
- Stationäres und transientes Verhalten von Kippschwingungen
- Zuverlässigkeit eines Knotenpunktes beim Auftreten von Schalthandlungen und Fehlerereignissen
- Zeitliches Verhalten von Schwingungen in Abhängigkeit einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse
- Vollständiges Amplitudenspektrum

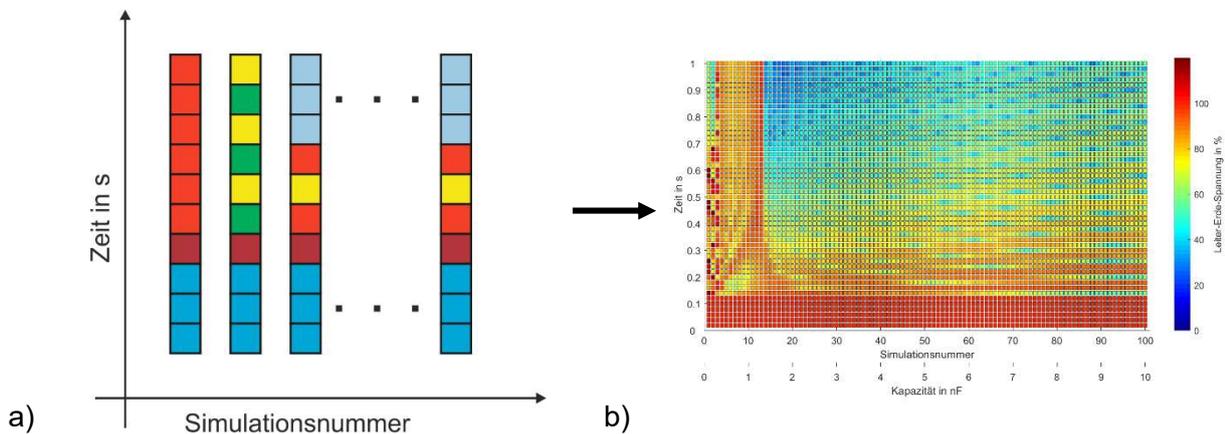


Abbildung 3-19: a) Schematische Darstellung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung für einen Knotenpunkt einer Hochspannungsanlage; b) Beispielhaftes numerisches Berechnungsergebnis der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung zur Analyse von Kippschwingungen bei der Variation eines Parameters

Abbildung 3-20 zeigt ein Beispiel der Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung bei der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse der wirksamen Kapazität. Aus dem Beispiel können folgende Bereiche extrahiert werden:

- Bereich (1): Kapazitätsbereich, in welchem stationäre Kippschwingungen auftreten.
- Bereich (2): Kapazitätsbereich, in welchem transiente Kippschwingungen auftreten. Die notwendige Kapazität zur Anregung einer stationären Kippschwingung ist bereits kleiner als die Kapazität für die Anregung transientser Kippschwingungen.
- Bereich (3): Kapazitätsbereich, in welchem weder transiente oder stationäre Kippschwingungen auftreten können. Die numerisch berechnete Kapazität ist hinreichend groß, um Kippschwingungen zu vermeiden.

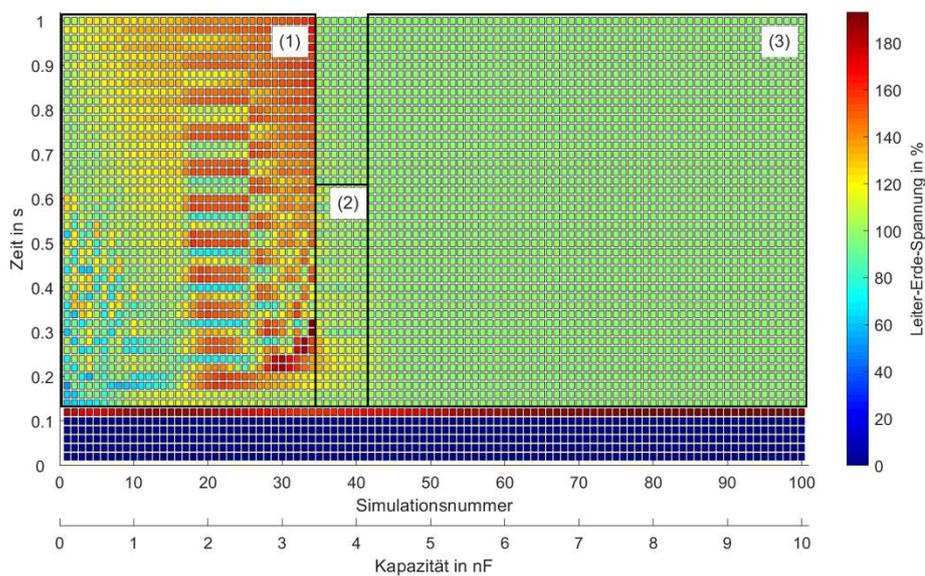
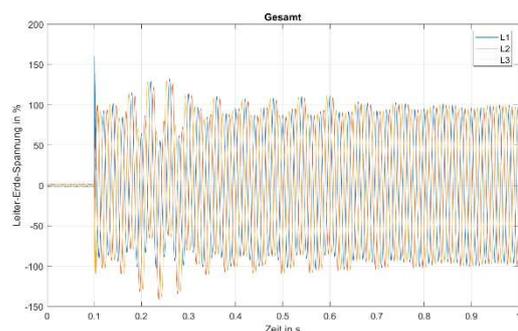


Abbildung 3-20: Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung zur Analyse von Kippschwingungen bei der Variation eines Parameters

Die Auswerterroutine umfasst in Abhängigkeit einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse die folgenden transienten Berechnungsergebnisse:

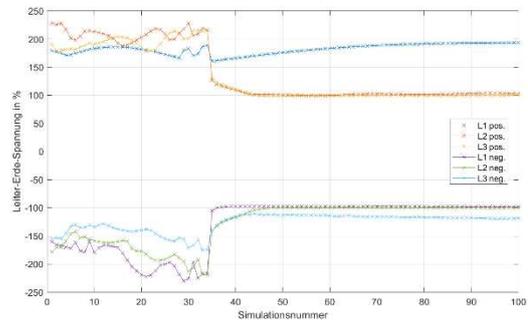
1. Zeitlicher Verlauf von berechneten Knotenpunkten:

Darstellung des zeitlichen Verlaufs ausgewählter numerischer berechneter Knotenpunkte.



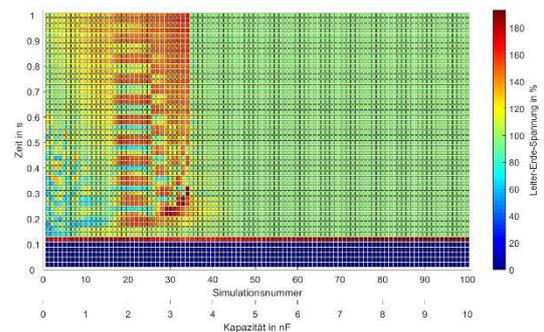
2. Darstellung der aufgetretenen globalen positiven und negativen Spitzenwerte:

Die ausgewerteten globalen Spitzenwerte der durchgeführten numerischen Berechnungen werden in Abhängigkeit des sich verändernden Parameters dargestellt.



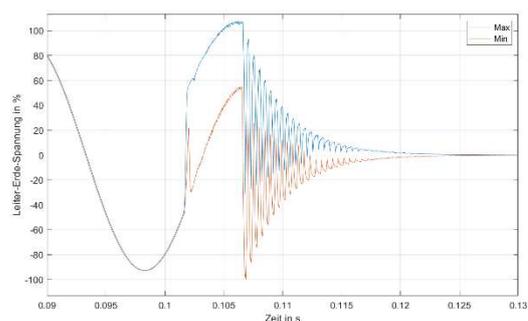
3. Bewertung der Schwingungsfähigkeit eines Knotenpunktes einer Hochspannungsanlage:

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit für die Analyse von Kippschwingungen ist die zeitliche Auswertung der aufgetretenen Spitzenwerte innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls. Das Zeitintervall richtet sich nach der auftretenden Frequenz der Kippschwingung.



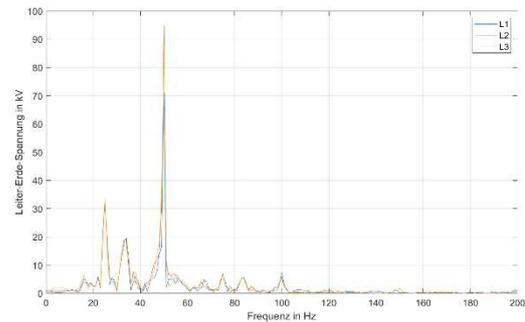
4. Kombination der zeitlich transienten Signalverläufe:

Eine Parametervariation einzelner Komponenten führt bei einer gleichbleibenden internen oder externen Beeinflussung zu einem unterschiedlichen Verhalten der Signalverläufe. Mit der Überlagerung der zeitlichen transienten Signalverläufe kann die Bandbreite der aufgetretenen transienten Beanspruchung in einem Knoten der Hochspannungsanlagen anschaulich dargestellt werden.



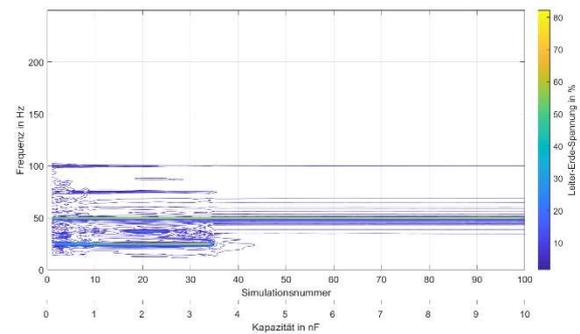
5. Darstellung der aufgetretenen Frequenzbereiche:

Auswertung und Darstellung des Frequenzspektrums ausgewählter Signalverläufe.



6. Kombination der aufgetretenen Frequenzbereiche:

Eine Kombination der Frequenzbereiche bei der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse liefert einen Gesamtüberblick über das Frequenzverhalten eines Knotenpunktes und weist auf signifikante oder weniger signifikante Beeinflussungen hin. Durch eine Sensitivitätsanalyse können stabile oder transiente Zustände von Knotenpunkten evaluiert werden.



Mit der Bewertungsstrategie und den erhaltenen numerischen Berechnungsergebnissen einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse kann das Verhalten eines Knotenpunktes einer Hochspannungsanlage bei internen und externen Einwirkungen beschrieben werden.

4 NUMERISCHE BERECHNUNG VON KIPPSCHWINGUNGEN

4.1 Einleitung

Basierend auf den vorhandenen Informationen der Hochspannungsanlagen wurden mit der beschriebenen Herangehensweise der numerischen Modellbildung unterschiedliche Strukturen von Hochspannungsanlagen im transienten Berechnungsprogramm EMTP-RV (Version 4.0) in Kombination mit Matlab generiert und einer Sensitivitätsanalyse unterzogen [PLE15a, PLE18]. Die numerisch berechneten Signalverläufe der durchgeführten Sensitivitätsanalysen wurden gegenübergestellt, analysiert und anschließend bewertet. Zur numerischen Berechnung wurden folgende Hochspannungsanlagen aus den zur Verfügung gestellten Informationen der Anlagenbetreiber modelliert und untersucht:

- 400 / 110 / 30-kV-Hochspannungsanlage (A)
- 400 / 110 / 30-kV-Hochspannungsanlage (B)
- 400 / 230 / 110 / 30-kV-Hochspannungsanlage (C)

Für das Auftreten von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen sind mehrere Randbedingungen in den numerischen Berechnungsmodellen zu berücksichtigen:

- Spannungsquelle mit Netzimpedanz
- Freileitungs- und Energiekabelverbindungen
- Numerische Modellbildung von Sammelschienen
 - Verwendung geeigneter Berechnungsmodelle
 - Berücksichtigung induktiver und kapazitiver Kopplungsmechanismen
 - Verwendung der elektrischen und geometrischen Daten
- Numerische Modellbildung der Anlagenkomponenten
 - Transformatoren
 - Induktive Spannungswandler
 - Leistungsschalter mit Steuerkapazität, Schaltzeiten der einzelnen Phasen
- Verlauf der Magnetisierungskennlinie der induktiven Komponenten
- Wirksame Kapazitäten gegen Erde
 - Kapazitäten der Durchführungen der Transformatoren
 - Kapazitätswerte induktiver Spannungswandler
 - Kapazitäten weiterer Anlagenkomponenten (Sammelschienen, Trennschalter, Stromwandler, Überspannungsableiter, Leistungsschalter)

Wesentlich für die Durchführung der numerischen Berechnungen ist es, dass die Untersuchungen im Berechnungsmodell den tatsächlichen Abläufen im Hochspannungsnetz nachempfunden werden. Dies beinhaltet die Funktionsweise der Leistungsschalter, die Behandlung der Sternpunkte von Transformatoren und den Normalschaltzustand von Hochspannungsanlagen. Die Spitzenwerte der numerisch berechneten Leiter-Erde-Spannungen wurden auf den Spitzenwert der höchsten Spannung für Betriebsmittel (U_m) laut [60071-1] bezogen (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Spitzenwerte der höchsten Spannung für Betriebsmittel [60071-1]

Betriebsspannung	Höchste Spannung für Betriebsmittel U_m	Spitzenwert \hat{u}
kV	kV	kV
110	123	100,4
220/230	245	200,0

Für die numerische Modellbildung der einzelnen Hochspannungsanlagen und der einzelnen Komponenten wurden die im Anhang A angeführten Quellen der Netzbetreiber herangezogen. Die technischen Daten der Transformatoren für die Modellbildung sind im Anhang B angeführt.

4.2 Numerische Berechnung von Kippschwingungen in Anlagenstrukturen

4.2.1 Hochspannungsanlage A (400 / 110 / 30 kV)

Da bei Anlagenstrukturen spannungsebenenübergreifende Wirkungen gegeben sein können, können beim primärseitigen Einschalten von Transformatoren Kippschwingungen in der darunterliegenden Spannungsebene angeregt werden. Abbildung 4-1 zeigt eine Anordnung einer Hochspannungsanlage, in der das Auftreten von Kippschwingungen nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Durch primärseitiges Einschalten der Leistungsschalter können an der Sekundärseite des Transformators bei geeignetem Zusammenspiel der induktiven Spannungswandler und den wirksamen Kapazitäten Kippschwingungen angeregt werden. Das numerische Berechnungsmodell der induktiven Spannungswandler kann aus Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden.

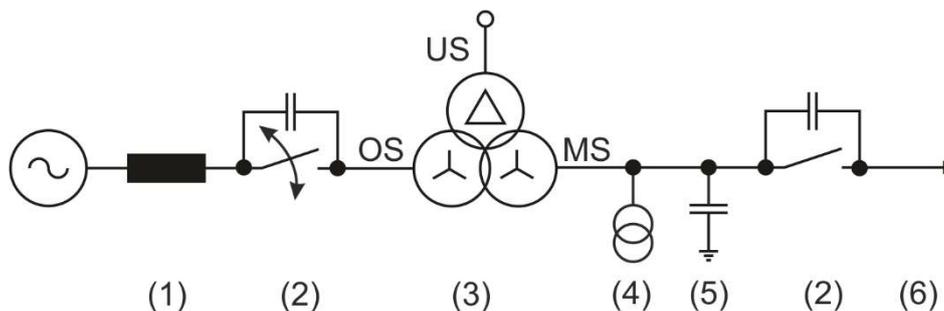


Abbildung 4-1: Anordnung zur Beschreibung von Kippschwingungen in einer Anlagenstruktur

1	Spannungsquelle mit Netzimpedanz	6	Abzweig
2	Leistungsschalter mit Steuerkapazität	OS	Oberspannungsseite
3	Transformator mit drei Wicklungen	MS	Mittelspannungsseite
4	Induktiver Spannungswandler	US	Unterspansnungsseite
5	Leiter-Erde-Kapazität (Streukapazität)		

Abbildung 4-2 zeigt die schematische Struktur der Hochspannungsanlage zur Untersuchung von Kippschwingungen bei der Durchführung von primärseitigen Schalthandlungen der Leistungsschalter (LS). Die numerischen Berechnungen hinsichtlich des Auftretens von Kippschwingungen konzentrieren sich auf Transformator (Tr1). Transformator (Tr2) bleibt während der Durchführung der Schalthandlungen am Transformator (Tr1) mit der 400-kV- und 110-kV-Sammelschiene verbunden. Der Sternpunkt von Transformator (Tr1) war geerdet und von Transformator (Tr2) war nicht geerdet. Beide Transformatoren besitzen induktive Spannungswandler in der 400-kV- und 110-kV-Spannungsebene und induktive Spannungswandler wurden auch an den Freileitungsabgängen berücksichtigt.

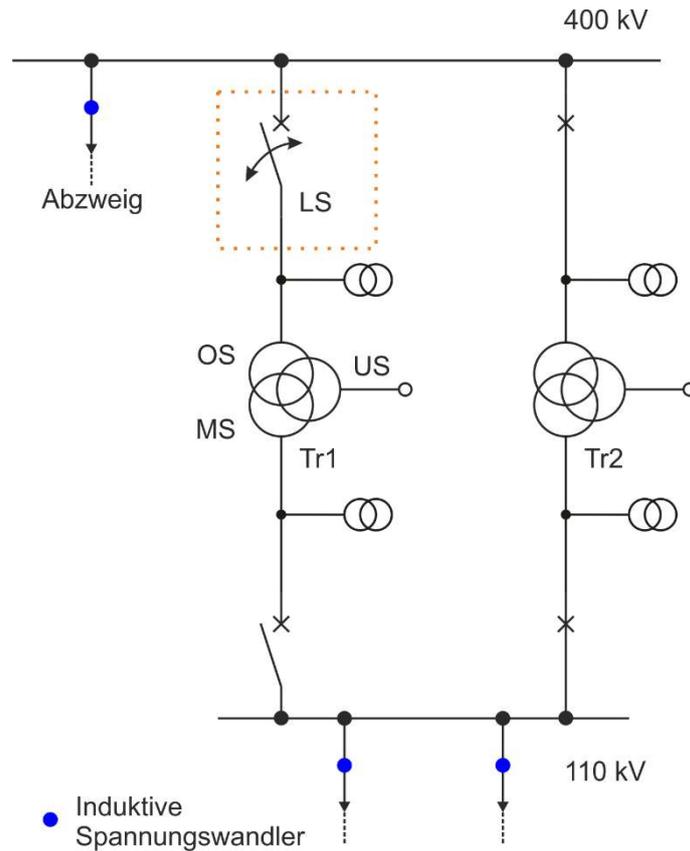


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Hochspannungsanlage A zur Untersuchung von Kippschwingungen

LS	Leistungsschalter	MS	Mittelspannungsseite
Tr1, Tr2	Transformatoren	US	Unterspannungsseite
OS	Oberspannungsseite		

Das numerische Berechnungsmodell umfasst die folgenden Komponenten (siehe Abbildung 4-2):

- Zwei Netzkuppeltransformatoren (400 / 115 / 30 kV)
- Leistungsschalter mit Steuerkapazität ($C = 0,322 \text{ nF}$)
- Induktive 400-kV- und 110-kV-Spannungswandler
- Transformatorfelder
- Dreiphasige Sammelschiene der 400-kV- und 110-kV-Spannungsebene
- Zwei Kompensationsdrosselpulen (50 MVA_r, 30 kV)
- Übertragungsleitungen samt ferner Einspeisung mit Netzimpedanz

Für die numerische Berechnung von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen ist vor allem der Verlauf der Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler entscheidend. In Hochspannungsanlage A erfolgte eine Variation der Magnetisierungskennlinie. Bei gleichbleibenden numerischen Randbedingungen wurden fünf Verläufe der Magnetisierungskennlinie der induktiven 110-kV-Spannungswandler herangezogen und einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Für die Magnetisierungskennlinie der induktiven 110-kV-Spannungswandler wurden folgende Verläufe gewählt (siehe Abbildung 4-3):

- Magnetisierungskennlinie 1: Angenommene Magnetisierungskennlinie
- Magnetisierungskennlinie 2: Kennlinie aus Rohdatensatz
- Magnetisierungskennlinie 3: Berechnete Magnetisierungskennlinie
- Magnetisierungskennlinie 4: Realer Verlauf
- Magnetisierungskennlinie 5: Bauähnlicher Spannungswandlertyp

Die Magnetisierungskennlinien 1 bis 3 wurden unter Einhaltung des normativ festgelegten Bemessungsspannungsfaktors von $1,9 \times U_n$ ausgelegt [61869-3]. Magnetisierungskennlinie 2 und 3 wurde gemäß Anhang C angenommen. Die Magnetisierungskennlinien 4 und 5 wurden von Wandlerherstellern zur Verfügung gestellt.

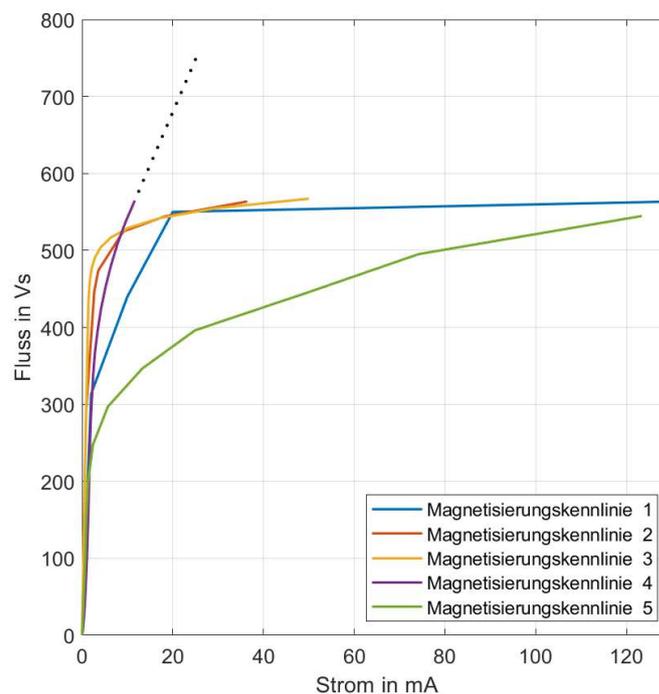


Abbildung 4-3: Repräsentationen von Magnetisierungskennlinien induktiver 110-kV-Spannungswandler (Scheitelwerte)

Zur Untersuchung des Auftretens von Kippschwingungen erfolgt eine Variation der wirksamen Leiter-Erde-Kapazität linear im Bereich von $0,1 \text{ nF}$ bis 10 nF (mit $\Delta C = 0,1 \text{ nF}$). Diese Kapazität kann durch die Erdkapazität der induktiven Spannungs- und Stromwandler, oder der Erdkapazität kombinierter Wandler und der Erdkapazität der Anlage repräsentiert werden (siehe Tabelle 3-1). Dadurch kann die Bandbreite der auftretenden Kippschwingungen in Abhängigkeit der installierten Komponenten und der Erdkapazität der Anlage untersucht werden. Die Leiter-Erde-Spannungen wurden am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler bei primärseitigem Einschalten der Leistungsschalter des Transformators Tr1 ausgewertet.

Numerische Berechnungsergebnisse unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 1:

Die Auswertung der globalen positiven und negativen Spitzenwerte kann aus Abbildung 4-4 entnommen werden und zeigt, dass im Bereich kleiner Kapazitätswerte bis ca. $C = 1,8 \text{ nF}$ die Leiter-Erde-Spannung Spitzenwerte im Bereich von ca. 300 % bis ca. 350 % erreichen kann. Mit steigender Kapazität verringern sich die Spitzenwerte auf ca. 200 %.

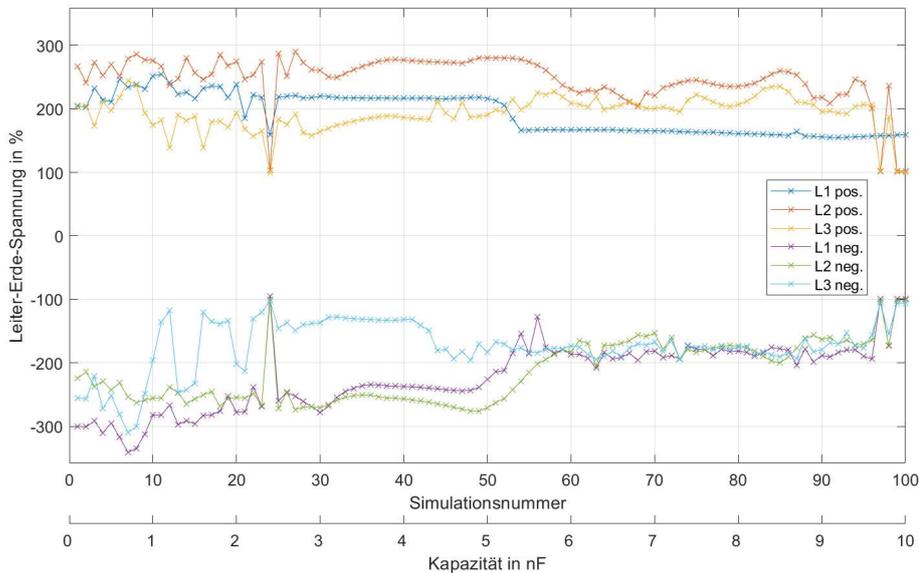


Abbildung 4-4: Auswertung der globalen positiven und negativen Spitzenwerte am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 1 (Hochspannungsanlage A)

Die Schwingungsfähigkeit des Knotenpunktes der induktiven Spannungswandler kann aus Abbildung 4-5 entnommen werden. Das Auftreten von Kippschwingungen ist signifikant ausgeprägt und besitzt eine wesentliche Bandbreite. Dem Verhalten der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung ist zu entnehmen, dass sowohl transiente als auch stationäre Kippschwingungen aufgetreten sind. Im Bereich von 0,1 nF bis ca. 1,1 nF treten hauptsächlich transiente Kippschwingungen auf. Die erste stationäre Kippschwingung entsteht beim Kapazitätswert von $C = 1,2 \text{ nF}$.

Der zeitliche Übergangsbereich zu stationären Kippschwingungen ist vom Sättigungsverhalten der induktiven Spannungswandler abhängig. Der Abbildung 4-5 ist zu entnehmen, dass die stationären Kippschwingungen 100 ms später, nach erfolgreicher Einschaltung der Leistungsschalter, aufgetreten sind. In diesem Kapazitätsbereich sind jeweils nur zwei Spannungswandler an der Kippschwingung beteiligt. Aus dem Berechnungsergebnis können Bereiche ermittelt werden, in welchem keine stationären Kippschwingungen auftreten (Kapazität $C = 2,4 \text{ nF}$). Eine kleine kapazitive Abweichung aus diesem Bereich führt wiederholt zu stationären Kippschwingungen. Erst mit steigendem Kapazitätswert kommt es zu einer Verringerung der Schwingungsfähigkeit. Es ist auch zu erkennen, dass bei steigendem Kapazitätswert eine niederfrequente Oszillation der Leiter-Erde-Spannung auftritt.

Mit der Analyse des zeitlichen Verhaltens ist das auslösende Ereignis für den Kippschwingungsvorgang eine erste Sättigungserscheinung in einer Phase. Anschließend erfolgt in einer weiteren Phase die Sättigung. Es befinden sich somit zwei Spannungswandler im gesättigten Bereich. Aufgrund der kapazitiven Kopplung und der gleichzeitigen Sättigung von zwei Wandlern gelangt der dritte Wandler ebenfalls in den gesättigten Bereich. Es erfolgt ein Wechsel des Sättigungsverhaltens von Wandler zu Wandler. Im stationären Kippschwingungsvorgang sind stetig zwei Wandler (Phase L1 und L2) gesättigt und ein Wandler (Phase L3) nicht gesättigt. Beim Auftreten der netzfrequenten Kippschwingungen sind die Verluste zu gering um die Kippschwingungen zu bedämpfen. Es kommt durch die vorliegenden Kapazitätsverhältnisse zu hohen Überspannungen und die Spitzenwerte am Knotenpunkt der induktiven Spannungswandler erreichen ca. 250 %. Mit der verwendeten Magnetisierungskennlinie 1 ist der Existenzbereich von transienten und stationären Kippschwingungen verhältnismäßig groß.

Die Analyse des Frequenzverhaltens aus Abbildung 4-6 zeigt für Magnetisierungskennlinie 1, dass mit steigendem Kapazitätswert vor allem eine netzfrequente Schwingung vorhanden ist (Kapazitätsbereich von ca. 2,4 nF bis ca. 5,3 nF). Neben der Harmonischen der Netzfrequenz, kann auch die zweite und dritte Harmonische und die zweite Subharmonische identifiziert werden. Ab einem Kapazitätswert von 5,4 nF kommt die zweite Subharmonische zum Tragen. Mit der Verwendung der Magnetisierungskennlinie 1 kommen in der Hochspannungsanlage A stetig entweder transiente oder stationäre Kippschwingungen vor. Erst mit einer wirksamen Kapazität von ca. 9,8 nF treten keine stationären Kippschwingungen mehr.

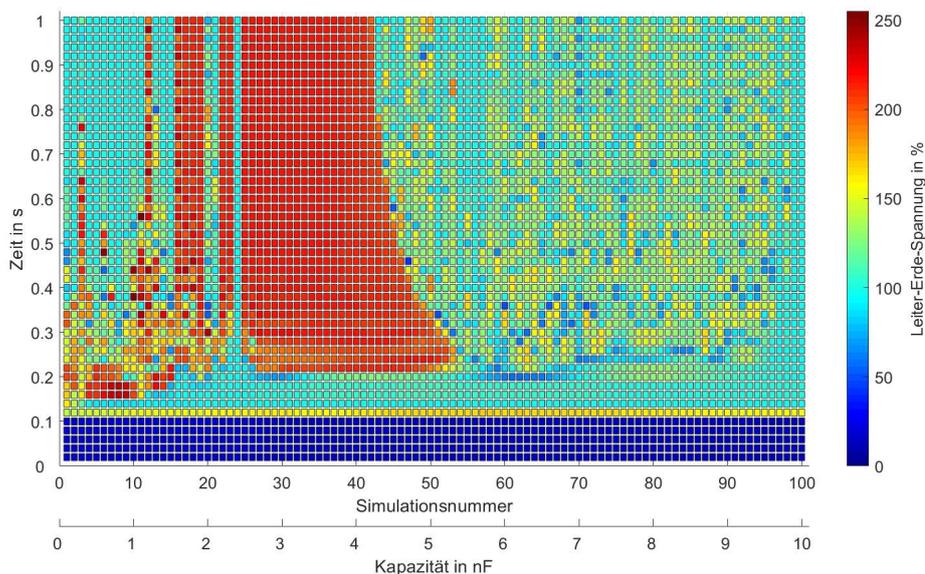


Abbildung 4-5: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 1 (Hochspannungsanlage A)

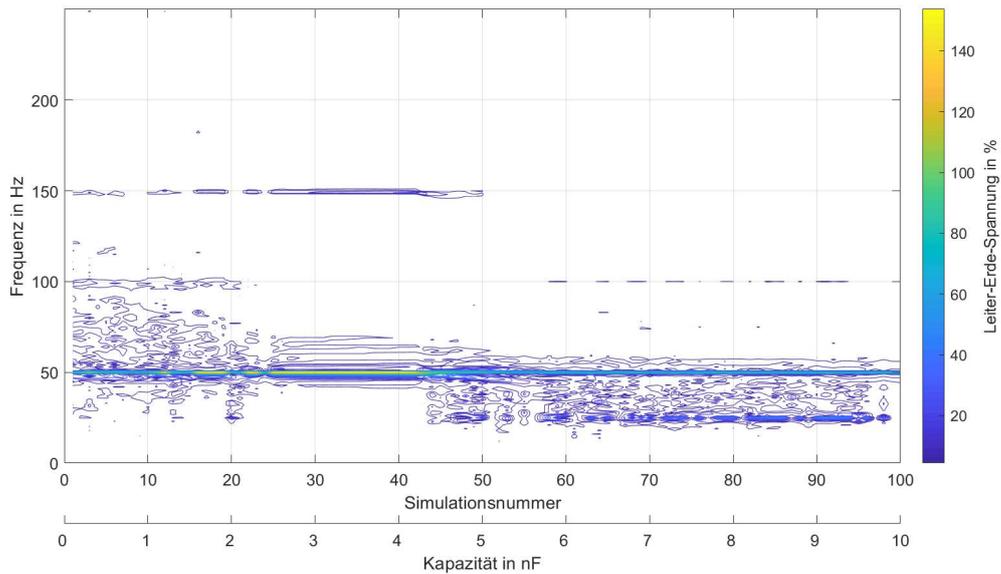


Abbildung 4-6: Auswertung des Frequenzverhaltens am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 1 (Hochspannungsanlage A)

Den numerischen Berechnungsergebnissen kann entnommen werden, dass die wirksame Kapazität zu gering ist, um das Auftreten von Kippschwingungen zu vermeiden. Mit der Verwendung von Magnetisierungskennlinie 1 treten stationäre oder transiente Kippschwingungen bis zu hohen Kapazitätswerten auf. Der Existenzbereich der aufgetretenen Kippschwingungen ist verhältnismäßig groß und kann in diesem Fall nur durch operative Maßnahmen vermieden werden.

Numerische Berechnungsergebnisse unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 2:

Unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 2 für die induktiven Spannungswandler in Hochspannungsanlage A kann aus Abbildung 4-7, Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 das Verhalten der globalen Spitzenwerte, die Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung und das Frequenzverhalten abgelesen werden. Im linearen Bereich besitzt Magnetisierungskennlinie 2 eine höhere Steigung und folglich eine größere Induktivität.

Die Auswertung der globalen positiven und negativen Spitzenwerte zeigt, dass Phase L1 (Einschaltung im Spannungsmaximum) annähernd ein konstantes Verhalten aufweist. Dieses Verhalten lässt sich auf das primärseitige Einschalten der Leistungsschalter zurückführen. Bei Phase L2 und L3 verringert sich der Spitzenwert ab einer Kapazität von 6,5 nF. Daraus ist zu schließen, dass sich ab diesem Kapazitätswert weder stationäre noch transiente Kippschwingungen ausbilden.

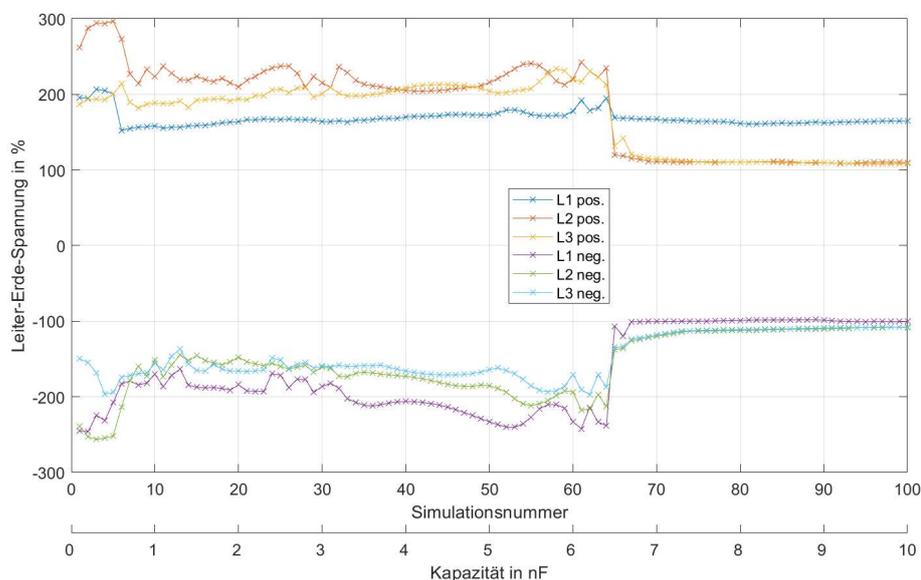


Abbildung 4-7: Auswertung der globalen positiven und negativen Spitzenwerte am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 2 (Hochspannungsanlage A)

Aus Abbildung 4-8 ist zu entnehmen, dass Kippschwingungen bis zu einer wirksamen Kapazität von ca. 6,5 nF aufgetreten sind. Erst bei größeren Kapazitätswerten treten keine stationären Kippschwingungen mehr auf. Im kleinen Kapazitätsbereich von ca. 0,1 nF bis ca. 0,6 nF entsteht eine transiente netzfrequente Kippschwingung. Diese Kippschwingung hat für die Hochspannungsanlage eine Existenzdauer von ca. 350 ms nach der Durchführung des primärseitigen Einschaltens der Leistungsschalter und nimmt mit steigender Kapazität ab. Durch die größere Steigung der Magnetisierungskennlinie im linearen Bereich und den vorhandenen Verlusten im System bildet sich eine stationäre netzfrequente Kippschwingung nicht aus.

Bei Vergrößerung der wirksamen Kapazität kommt vorrangig die zweite Subharmonische Kippschwingung zum Tragen und alle drei Phasen sind an der Schwingung beteiligt. Im Bereich von ca. 1,0 nF bis ca. 3,0 nF befindet sich der Spitzenwert der Leiter-Erde-Spannung in der Größenordnung von ca. 150 %. Das Verhalten der auftretenden Kippschwingungen ist in diesem Bereich entweder stationär oder transient. Der Bereich von ca. 3,0 nF bis ca. 6,5 nF führt in Kombination mit den induktiven 110-kV-Spannungswandlern zu einem Anstieg der Leiter-Erde-Spannung bis hin zu ca. 160 % und es entstehen ausschließlich stationäre Kippschwingungen. Ab einer wirksamen Kapazität von ca. 6,5 nF kann eine Oszillation der Leiter-Erde-Spannung mit Frequenzen kleiner als die zweite Subharmonische identifiziert werden. Jedoch treten keine stationären oder transienten Kippschwingungen mehr auf.

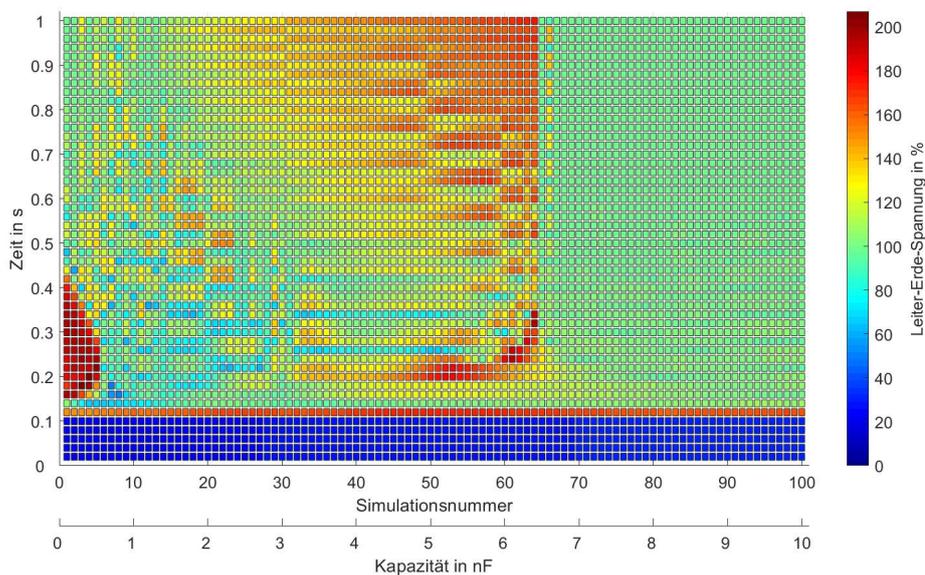


Abbildung 4-8: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 2 (Hochspannungsanlage A)

Es erscheint unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 2 eine zweite und dritte Harmonische Kippschwingung, die sich der 50-Hz-Betriebsspannung überlagern. Die zweite Subharmonische hat eine signifikante Bandbreite und wird ab einer wirksamen Kapazität von ca. 6,5 nF erfolgreich gedämpft.

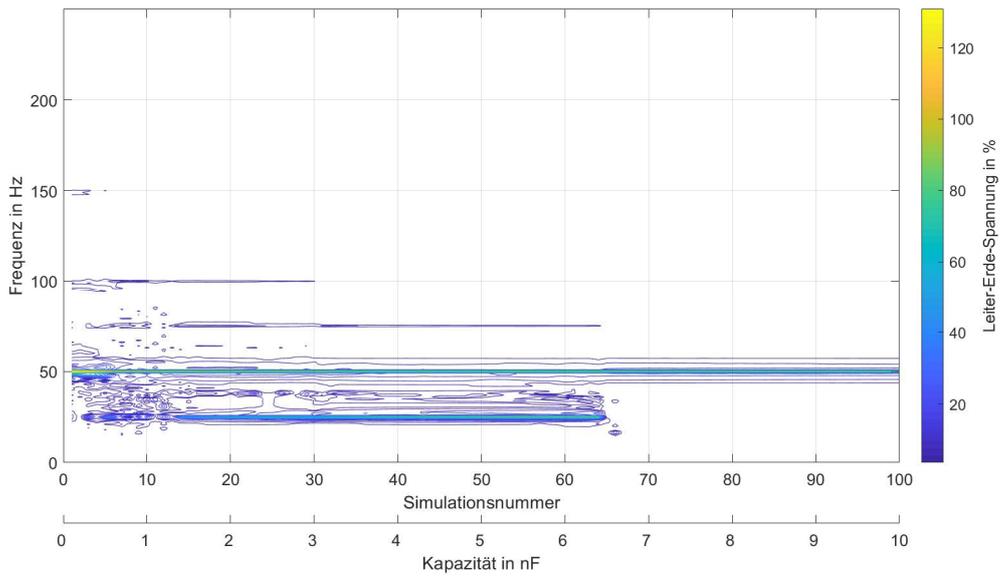


Abbildung 4-9: Auswertung des Frequenzverhaltens am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 2 (Hochspannungsanlage A)

Numerische Berechnungsergebnisse unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 3:

Die Auswertung der globalen positiven und negativen Spitzenwerte zeigt, dass in Abhängigkeit der durchgeführten Sensitivitätsanalyse die Spitzenwerte signifikant geringer sind als mit der Verwendung von Magnetisierungskennlinie 1 und 2. Im Vergleich zu Abbildung 4-4 ist aus Abbildung 4-10 zu entnehmen, dass sich die Maximalwerte der globalen Spitzenwerte im Bereich von ca. 200 % befinden und diese sich signifikant verringert haben. Ab einem Kapazitätswert von ca. 4.3 nF treten keine stationären Kippschwingungen mehr auf.

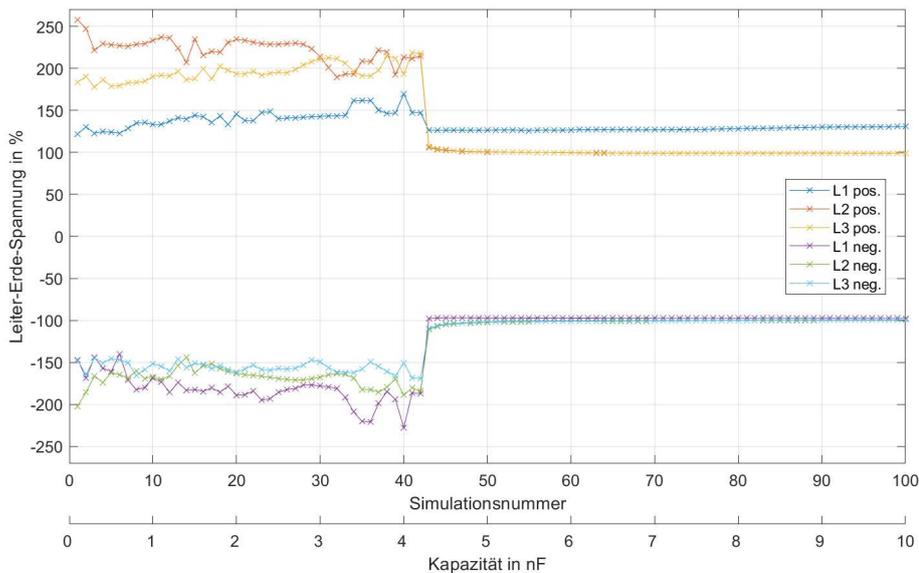


Abbildung 4-10: Auswertung der globalen positiven und negativen Spitzenwerte am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 (Hochspannungsanlage A)

Wie schon bei Magnetisierungskennlinie 2 zu sehen war, ist das Verhalten der globalen Spitzenwerte, die Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung und das Frequenzspektrums harmonischer als unter der Verwendung von Magnetisierungskennlinie 1.

Der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung (Abbildung 4-11) ist zu entnehmen, dass im kleinen Kapazitätsbereich keine Kippschwingungen in der Hochspannungsanlage zu Stande gekommen sind. Anschließend bildet sich eine stationäre 50-Hz-Kippschwingung aus, die in eine 25-Hz-Schwingung übergeht. Es können auch Kapazitätsbereiche ermittelt werden, in denen nach dem Einschalten der Leitungsschalter keine stationären Kippschwingungen aufgetreten sind. Durch die vorhandenen Verluste und dem gewählten Kapazitätswert treten transiente Kippschwingungen auf, welche sich nicht zu einer stationären Schwingung ausbilden.

Abbildung 4-12 zeigt das Frequenzverhalten am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler. Im Kapazitätsbereich von 0,1 nF bis ca. 4,2 nF erscheint neben der 50-Hz-Netzfrequenz auch die zweite Subharmonische. Da die Amplituden der Zwischenfrequenz von 75 Hz und der zweiten Harmonischen in der Größenordnung von ca. 10 % sind, zeigen diese keine signifikante Beeinflussung auf die Leiter-Erde-Spannung. Mit der durchzuführenden Schalthandlung verschiebt sich das Spektrum der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung zu kleineren Kapazitätsverhältnissen.

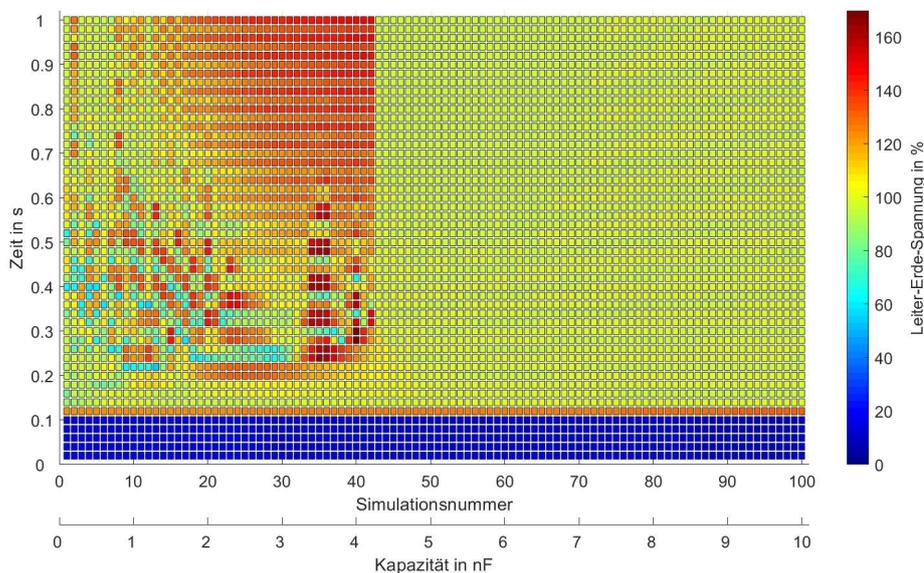


Abbildung 4-11: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 (Hochspannungsanlage A)

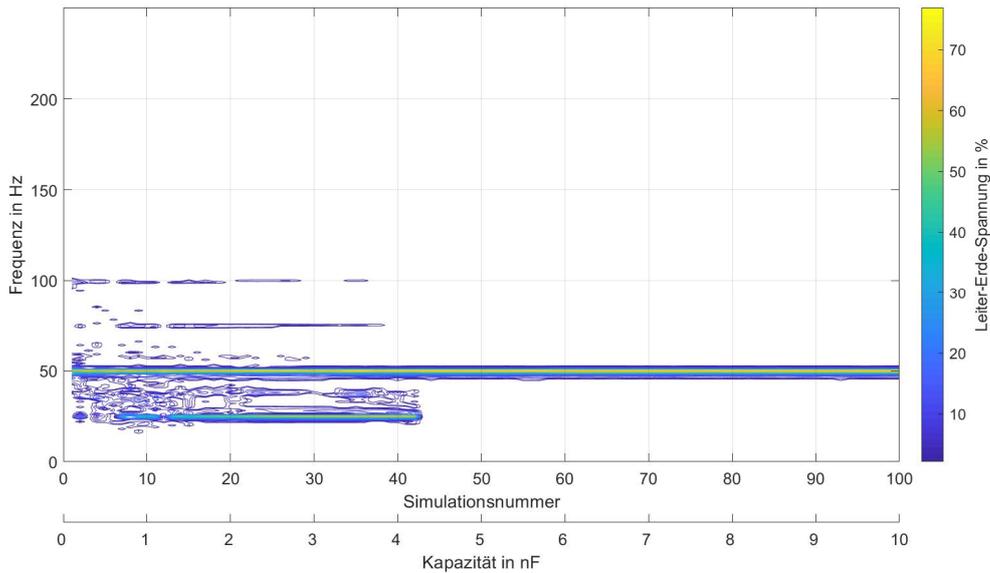


Abbildung 4-12: Auswertung des Frequenzverhaltens am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 (Hochspannungsanlage A)

Numerische Berechnungsergebnisse unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 4:

Unter Verwendung einer realen Magnetisierungskennlinie für die induktiven Spannungswandler ist aus Abbildung 4-13 zu entnehmen, dass es beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter und der Variation der Kapazität zu keinem Zustand kommen kann, in dem sich stationäre Kippschwingungen ausbilden können. Im Bereich sehr kleiner Kapazitätswerte (bis ca. 0,3 nF) treten transiente Kippschwingungen mit einer Beanspruchungsdauer von ca. 800 ms und mit Spitzenwerten im Bereich von ca. 140 % auf.

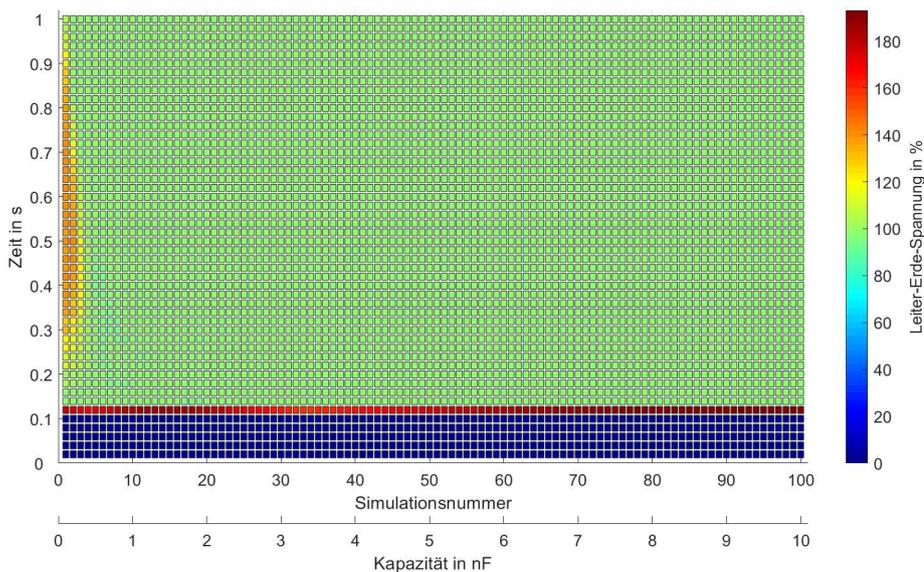


Abbildung 4-13: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 4 (Hochspannungsanlage A)

Numerische Berechnungsergebnisse unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 5:

Aus Abbildung 4-14 kann die Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 5 entnommen werden. Im Kapazitätsbereich von 0,1 nF bis ca. 1,4 nF treten netzfrequente Kippschwingungen auf. Im Kapazitätsbereich von ca. 1,5 nF bis ca. 8,5 nF kommt es zur Anregung der zweiten subharmonischen Kippschwingung. Diese besitzt in der gegebenen Hochspannungsanlage eine signifikante Bandbreite.

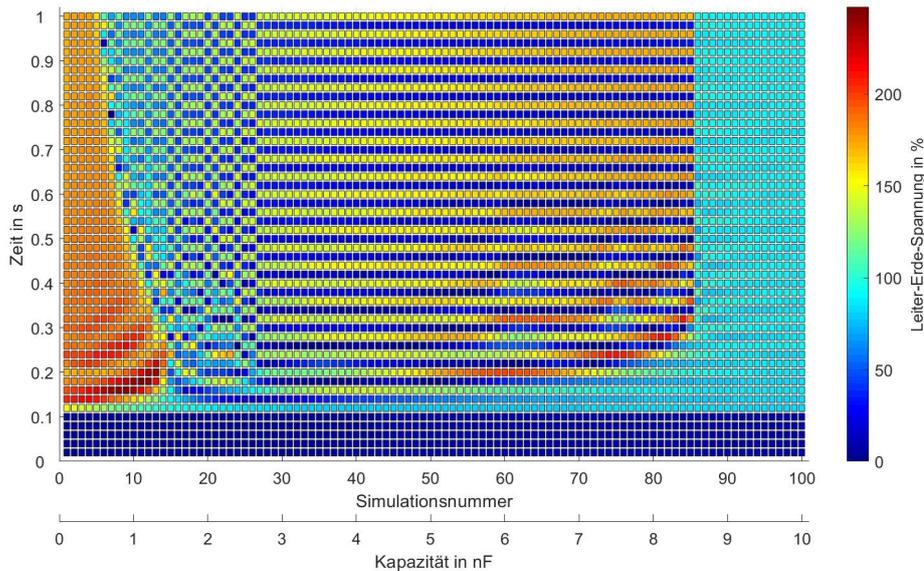


Abbildung 4-14: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 5 (Hochspannungsanlage A)

Für Hochspannungsanlagen kann die Annahme getroffen werden, dass die wirksame Anlagenkapazität bestehend aus der Kapazität der Transformatordurchführung, der Leiter-Erde-Kapazität von Sammelschienelementen (Transformatorfeld) und der Kapazität der induktiven Wandler nur endliche Werte annehmen kann. Die grundlegende Kapazität des sekundärseitigen Transformatorfeldes befindet sich in der Größenordnung von ca. 857 pF. Mit der Kapazität der induktiven Wandler erhöht sich die wirksame Anlagenkapazität im Bereich von ca. 1,71 nF bis ca. 2,66 nF, bestehend aus den folgenden Kapazitätswerten:

- Kapazität der Transformatordurchführung: ca. 465,23 pF
- Kapazität des sekundärseitigen Transformatorfeldes zwischen der Transformatordurchführung und des Leistungsschalters Für Hochspannungsanlage C ergibt sich, auf Basis der geometrischen Daten, eine berechnete Kapazität von ca. $C = 391,5$ pF.
- Kapazität der induktiven 110-kV-Spannungs- und Stromwandler im Bereich von ca. 850 pF bis zu ca. 1600 pF.
- Kapazität kombinierter 110-kV-Wandler im Bereich von ca. 1000 pF bis ca. 1800 pF.

Variation der Einschaltzeitpunkte der drei Phasen des Leistungsschalter:

Basierend auf dem numerischen Berechnungsmodell und den verwendeten Magnetisierungskennlinien erfolgte eine Sensitivitätsanalyse des primärseitigen Einschaltens der Leistungsschalter. Die Einschaltung von Phase L1 erfolgt im Spannungsmaximum jeweils zum Zeitpunkt $t = 100 \text{ ms}$ und die Phasen L2 und L3 wurden zeitlich versetzt zugeschaltet. Im Zeitbereich von 100 ms bis 110 ms wurde die zeitliche Verschiebung von Phase L2 und L3 jeweils um $1,8^\circ$ (mit $\Delta t = 0,1 \text{ ms}$) vergrößert. In Abbildung 4-15 ist eine schematische Darstellung der zeitlichen Verschiebung zwischen der konstant bleibenden Phase L1 und den variablen Phasen L2 und L3 zu sehen.

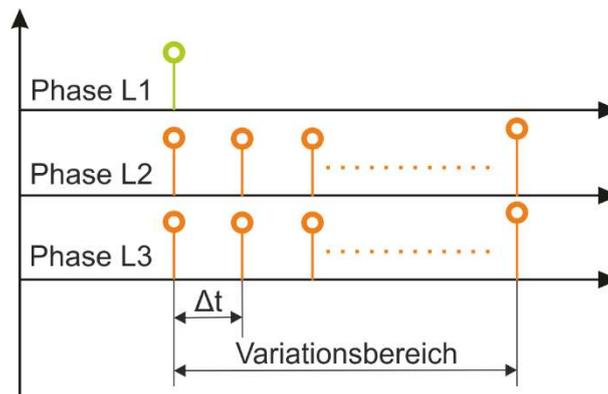


Abbildung 4-15: Variationsbereich der zeitlichen diskreten Verschiebung zwischen den einzelnen Phasen beim Einschalten der Leistungsschalter (Phase L1 ... konstant, Phase L2 und L3 ... zeitlich versetzt um Δt)

In Abhängigkeit der zeitlichen Verschiebung der zwei Phasen L2 und L3 kann aus den folgenden Abbildungen die Schwingungsfähigkeit des Knotenpunktes der induktiven 110-kV-Spannungswandler in Abhängigkeit der verwendeten Magnetisierungskennlinien entnommen werden. Für die numerischen Berechnungen wurde eine anlagentypische Erdkapazität von $1,7 \text{ nF}$ gewählt, da die induktiven Spannungswandler als Kombinationswandler ausgeführt sind. Bei den durchgeführten numerischen Berechnungen sind für die Magnetisierungskennlinien 1, 2, und 3 mit diesem Kapazitätswert stets stationäre Kippschwingungen aufgetreten.

Den numerischen Berechnungsergebnissen aus Abbildung 4-18, Abbildung 4-19, Abbildung 4-20 und Abbildung 4-22 ist zu entnehmen, dass es Bereiche des zeitlichen Versatzes der Einschaltzeiten der Leistungsschalter gibt, in denen keine stationären oder transienten Kippschwingungen zu Stande kommen.

Aus der Variation der Magnetisierungskennlinie bei gleichbleibenden Randbedingungen kann entnommen werden, dass bei vier Magnetisierungskennlinien durch gesteuertes Einschalten der Leistungsschalter Kippschwingungen vermieden werden können. Die Auswertung der Leiter-Erde-Spannung für Magnetisierungskennlinie 4 zeigt (siehe Abbildung 4-21), dass kein Zustand existiert, in welchem weder stationäre noch transiente Kippschwingungen auftreten können.

Aus Abbildung 4-18 ist zu entnehmen, dass hauptsächlich netzfrequente Kippschwingungen zu Stande kommen und sich die Spitzenwerte der Leiter-Erde-Spannung im Bereich von ca. 200 % befinden. Diese ergeben sich aufgrund der Sättigung von zwei Spannungswandlern. Der Übergang vom Existenzbereich der stationären netzfrequenten Kippschwingungen zum stationären Bereich liegt bei einer zeitlichen Verschiebung von ca. 3,4 ms.

Betrachtung Zeitpunkt 3,3 ms (Abbildung 4-18): Der induktive Spannungswandler (Phase L3) löst den Beginn des Kippschwingungsvorganges durch den ersten Sättigungsvorgang aus und treibt den Wandler (Phase L2) anschließend in Sättigung. Es kommt zu einer Abwechslung des Sättigungsverhaltens. Durch die gleichzeitige Sättigung von zwei Wandlern, erfährt auch der dritte Wandler eine Sättigungserscheinung. Somit befinden sich nun die beiden Wandler der Phase L1 und L2 gleichzeitig in Sättigung. Der dritte Wandler beendet sein Sättigungsverhalten und die Amplitude geht in diesem Fall zurück. Wandler L1 und L2 führen anschließend eine netzfrequente Kippschwingung aus – siehe Abbildung 4-16.

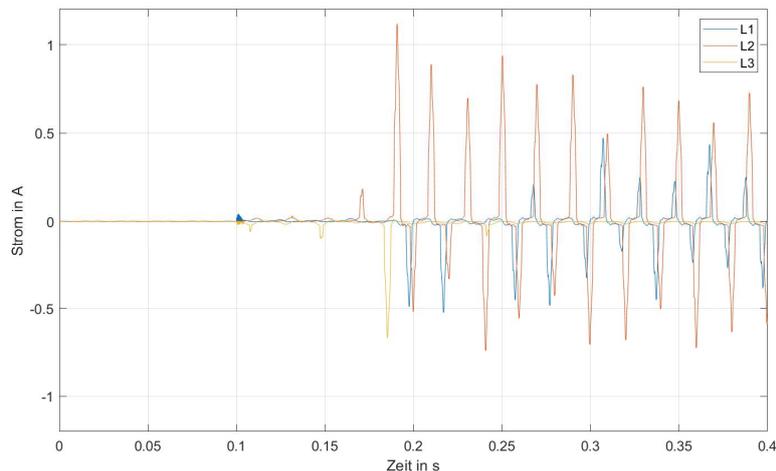


Abbildung 4-16: Strom durch den induktiven Spannungswandler nach dem Einschalten der Leistungsschalter

Bei einer zeitlichen Verschiebung von 3,3 ms kommen stationäre Kippschwingungen zu Stande. In diesem Fall wird ein Spannungswandler bereits nach dem Einschalten der Leitungsschalter in Sättigung getrieben. Durch die kapazitive Kopplung des Transformatorfeldes erfolgt die gleichzeitige Sättigung von zwei Spannungswandlern und es bildet sich eine stationäre Kippschwingung aus. Mit der zeitlichen Verschiebung von 3,4 ms ist die Sättigung des Spannungswandlers nicht signifikant ausgeprägt (siehe Abbildung 4-17). In den ersten Perioden nach dem Einschalten der Leistungsschalter treten keine ausgeprägten Sättigungserscheinungen auf.

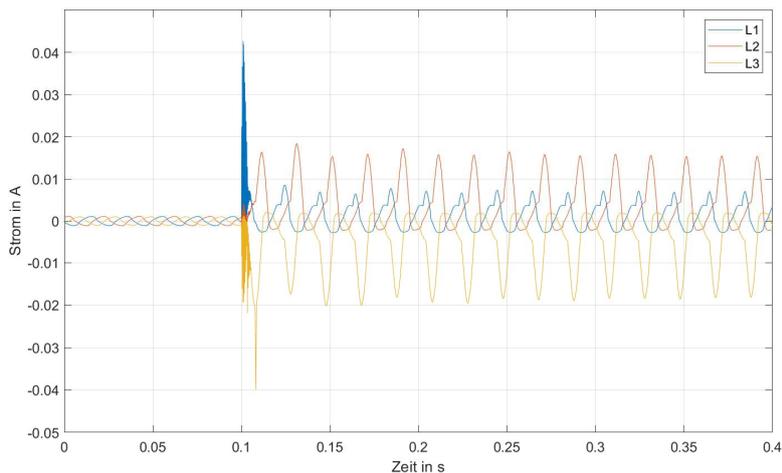


Abbildung 4-17: Strom durch den induktiven Spannungswandler nach dem Einschalten der Leistungsschalter

Mit größer werdender zeitlicher Verschiebung wird es immer unwahrscheinlicher, dass ein Spannungswandler in Sättigung kommt, um in weiterer Folge einen Kippschwingungsvorgang auslösen zu können.

Bei den Magnetisierungskennlinien 1 bis 3 kristallisiert sich vor allem der Bereich mit einem zeitlichen Versatz von Phase L2 und L3 zu Phase L1 von ca. 3,2 ms bis ca. 8,0 ms heraus. Innerhalb dieses Zeitbereiches kommt es zu keinem kippschwingungsgefährdeten Zustand am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler. Ein Ansteigen des zeitlichen Versatzes führt wiederum zum Auftreten von transienten und stationären Kippschwingungen in der Hochspannungsanlage.

Ausschlaggebend für das Auftreten der stationären Kippschwingungen ist der Grad der Sättigung der induktiven Spannungswandler nach dem Einschalten der Leistungsschalter.

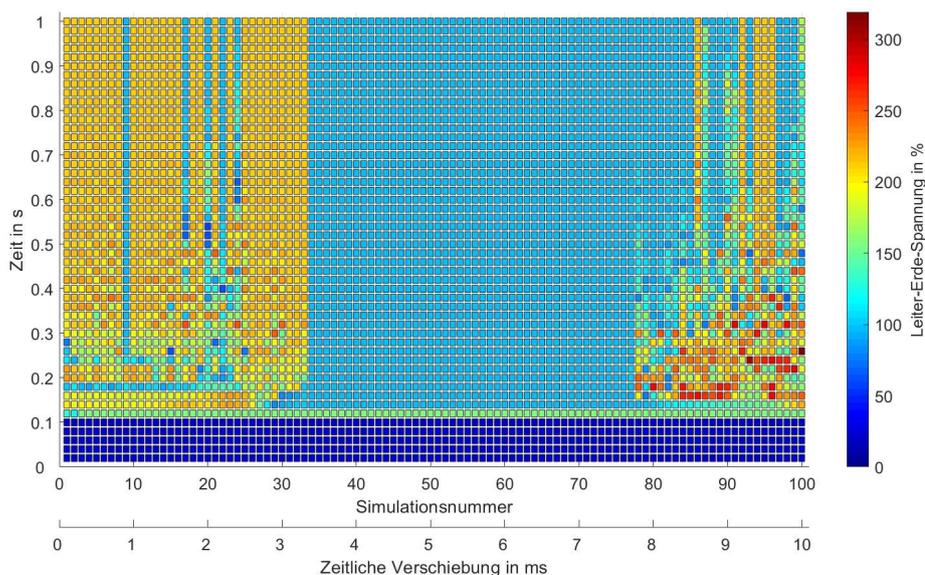


Abbildung 4-18: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 1; Phase L1 im Spannungsmaximum zugeschaltet (Hochspannungsanlage A)

Mit Magnetisierungskennlinie 2 tritt eine dreiphasige Kippschwingung mit Frequenzen der zweiten Subharmonischen auf. Die Wandler in den einzelnen Phasen werden nacheinander in Sättigung getrieben. Bis zu einer zeitlichen Verschiebung von ca. 3,3 ms treten dreiphasige Kippschwingungen auf. Ein Wandler kommt in Sättigung und regt die beiden verbleibenden Wandler zum Kippschwingungsvorgang an. Ab einer zeitlichen Verschiebung von ca. 8,0 ms erfolgt wiederholt die Anregung einer dreiphasigen Kippschwingung.

Der Vergleich von Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20 zeigt, dass Magnetisierungskennlinien 2 und 3 dieselben Auswirkungen auf die Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung haben. Magnetisierungskennlinie 3 weist zwar im linearen Bereich eine größere Steigung und somit eine größere wirksame Induktivität auf, jedoch im gesättigten Bereich haben beide Kennlinien denselben Verlauf. Mit der Durchführung der Schalthandlung gelangen die induktiven Spannungswandler in Sättigung und durch den verringerten Induktivitätswert im gesättigten Bereich führen beide Magnetisierungskennlinien zu einer subharmonischen Kippschwingung. Mit der wirksamen Kapazität und dem Induktivitätswert im gesättigten Bereich kann dieselbe Schwingungsfähigkeit erwartet werden. Beide Magnetisierungskennlinien zeichnen sich mit der wirksamen Kapazität zur Anregung von Kippschwingungen aus.

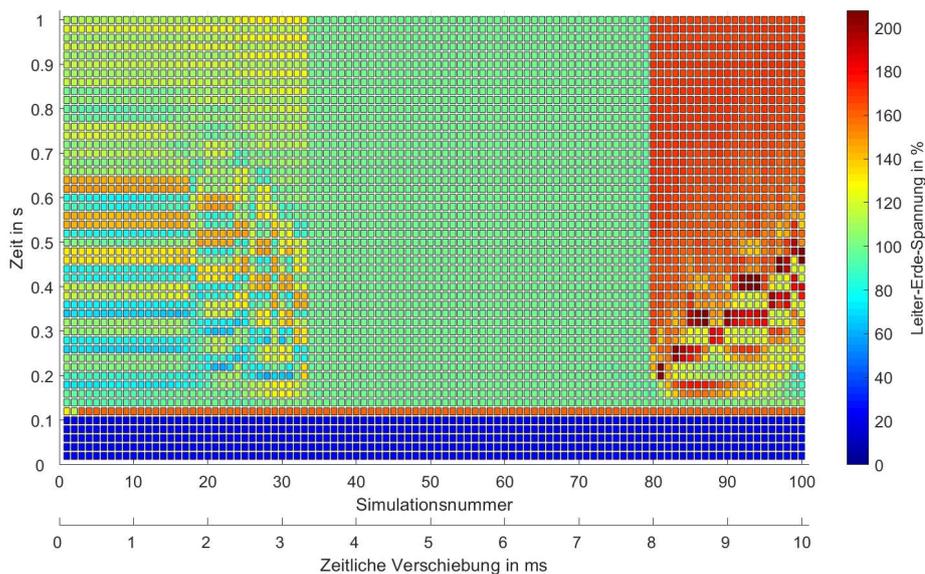


Abbildung 4-19: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 2; Phase L1 im Spannungsmaximum zugeschaltet (Hochspannungsanlage A)

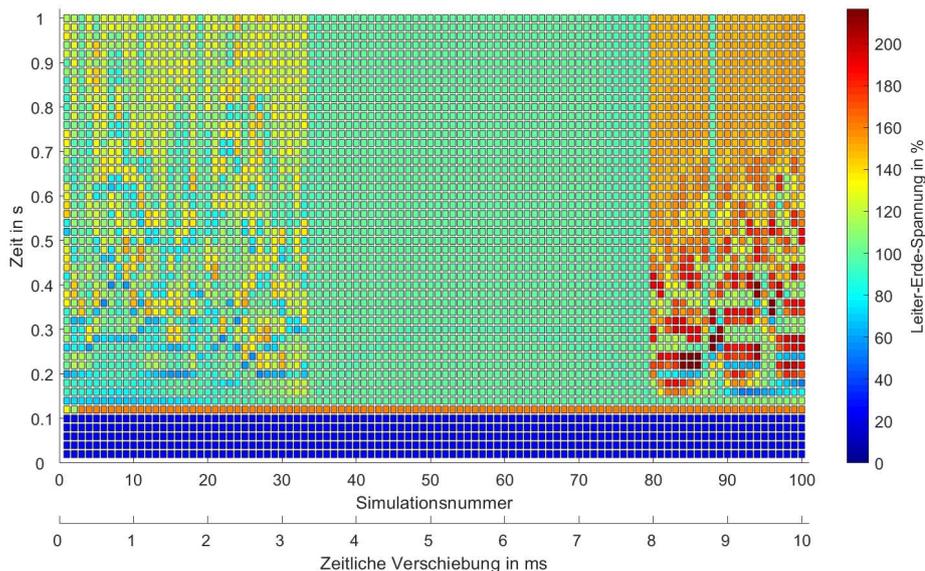


Abbildung 4-20: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3; Phase L1 im Spannungsmaximum zugeschaltet (Hochspannungsanlage A)

Abbildung 4-21 zeigt die Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 4. In diesem Fall sind weder stationäre noch transiente Kippschwingungen aufgetreten.

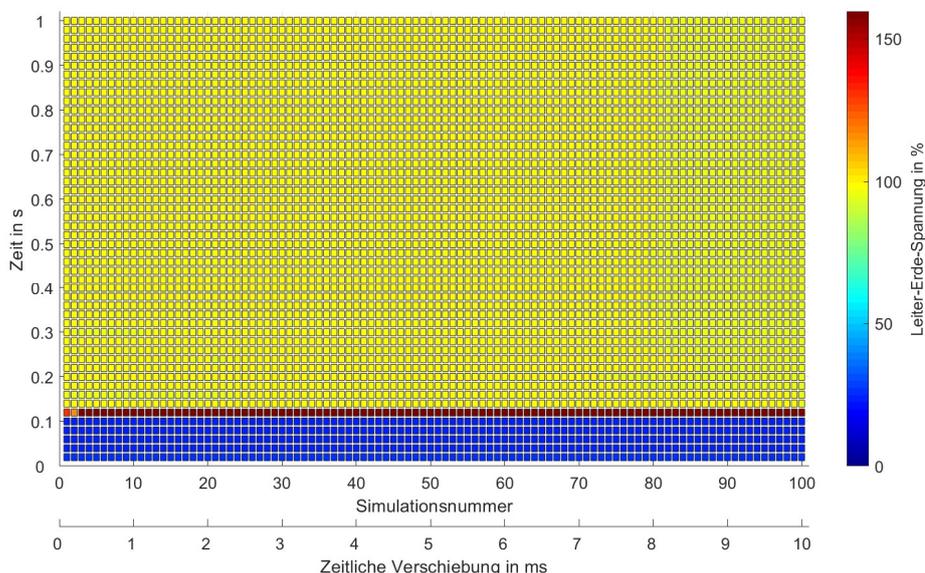


Abbildung 4-21: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 4; Phase L1 im Spannungsmaximum zugeschaltet (Hochspannungsanlage A)

Abbildung 4-22 zeigt die Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 5. Für diese Magnetisierungskennlinie ergibt sich ein ein Zeitbereich von ca. 4,2 ms bis ca. 6,1 ms in dem keine transienten oder stationären

Kippschwingungen auftreten. Mit dem gesteuertem Einschalten der Leistungsschalter können stationäre Kippschwingungen vermieden werden.

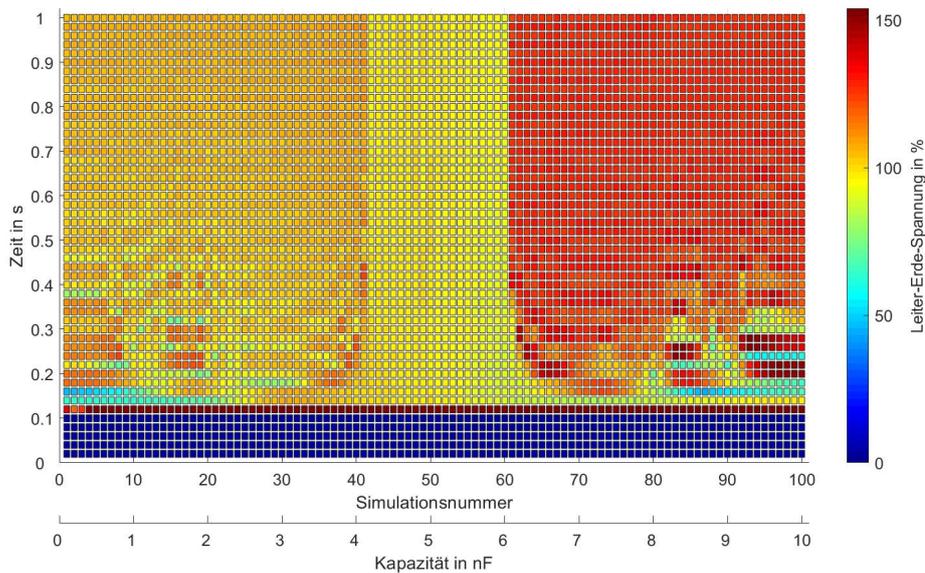


Abbildung 4-22. Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie %; Phase L1 im Spannungsmaximum zugeschaltet (Hochspannungsanlage A)

Abbildung 4-23 zeigt die stabilen und instabilen Einschaltzeiten der drei Phasen des Leistungsschalters für die Magnetisierungskennlinien 1 bis 3. Bei den stabilen Punkten entstehen weder transiente noch stationäre Kippschwingungen und die Leiter-Erde-Spannung erreicht innerhalb weniger Perioden den stationären Zustand. Bei den instabilen Zuschaltzeiten treten beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter entweder stationäre oder transiente Kippschwingungen auf. Gesteuertes Einschalten kann als effektive Maßnahme genutzt werden, um das Auftreten von Kippschwingungen zu vermeiden.

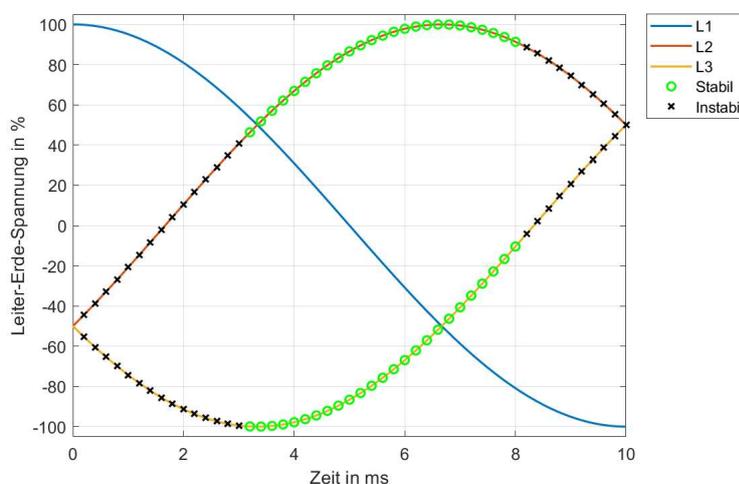


Abbildung 4-23: Stabile und instabile Einschaltzeiten der drei einzelnen Phasen des Leistungsschalters die zu einem stationären Zustand führen oder transiente oder stationäre Kippschwingungen auslösen

Interpretation und Zusammenfassung der numerischen Berechnungsergebnisse von Hochspannungsanlage A:

Es konnte gezeigt werden, dass bei vier von fünf Magnetisierungskennlinien beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter eine signifikante Bandbreite von transienten und stationären Kippschwingungen vorhanden ist. Die numerischen Berechnungen haben gezeigt, dass mit der zusätzlich eingebrachten Kapazität der induktiven Spannungswandler die Anlagenkapazität in Hochspannungsanlage A zu gering ist, um das Auftreten von Kippschwingungen vollständig zu vermeiden. Mit den verwendeten Magnetisierungskennlinien 1, 2 und 3 für die induktiven 110-kV-Spannungswandler ist die berechnete Anlagenkapazität kleiner als die notwendige wirksame Kapazität um das Auftreten von Kippschwingungen zu vermeiden.

Neben der 50-Hz-Netzfrequenz ist vor allem die zweite subharmonische Kippschwingung vorhanden. Es konnten auch Zwischenfrequenzen und Harmonische der Netzfrequenz evaluiert werden. Die Schwingungsfähigkeit des Knotenpunktes der induktiven 110-kV-Spannungswandler wird beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter wesentlich durch den Verlauf der gewählten Magnetisierungskennlinie bestimmt. Erst durch den Einbau von zusätzlichen Kapazitäten kann das Auftreten von Kippschwingungen vermieden werden. Dies gilt für den Fall des ungesteuerten primärseitigen Einschaltens der Leistungsschalter.

Bei kippschwingungsgefährdeten Hochspannungsanlagen können Kippschwingungen durch einen zeitlichen Versatz der Einschaltzeiten der Leistungsschalter (gesteuertes Schalten) signifikant vermieden werden.

Die numerischen Berechnungen zeigen, dass die beiden verwendeten Magnetisierungskennlinien (Nr. 1 und Nr. 2, siehe Abbildung 4-3) für die Untersuchung von Kippschwingungen bedingt geeignet sind. Mit diesen Magnetisierungskennlinien sind Kippschwingungen bis zu hohen Kapazitätswerten aufgetreten. Zur Vermeidung von stationären Kippschwingungen unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 1 und 2 sind zusätzliche Kapazitäten einzubauen. Somit kann eine stückweise Repräsentation der Magnetisierungskennlinie (Nr. 1 und 2) für die numerische Berechnung von Kippschwingungen nicht für eine eindeutige Aussage für das Auftreten von Kippschwingungen genutzt werden.

Mit der Verwendung von Magnetisierungskennlinie 3 hat sich gezeigt, dass diese signifikante Ergebnisse über das Auftreten von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen liefern. Die Variation der Kapazität hat gezeigt, dass diese bereits in einer geeigneten Größenordnung in Hochspannungsanlagen vorhanden sein kann, um Kippschwingungen erfolgreich beim ungesteuerten primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter zu vermeiden. Der Einsatz eines realen Magnetisierungskennlinienverlaufs (Nr. 4) zeigte, dass am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler keine Kippschwingungen identifiziert werden konnten.

Mit den grundlegenden numerischen Berechnungen von Hochspannungsanlage A konnte, bei gleichbleibender numerischer Modellbildung und den gewählten Randbedingungen, die Grundlage für die Untersuchung weiterer Hochspannungsanlagen geschaffen werden. Mit der Verwendung von fünf Magnetisierungskennlinien und der Variation der wirksamen Kapazität hat sich gezeigt, dass in Abhängigkeit der Kapazitätsverhältnisse transiente und stationäre Kippschwingungen aufgetreten sind. Die Vergrößerung der wirksamen Kapazität wirkt sich auf das Auftreten von Kippschwingungen aus und noch signifikanter wirkt sich der Verlauf der Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler aus.

Mit den ausgewerteten Kenngrößen (globale positive und negative Spitzenwerte, den Frequenzbereichen und der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung) konnte für den Knoten der induktiven 110-kV-Spannungswandler ein Fingerabdruck generiert werden. Dieser Fingerabdruck kann für weiterer Hochspannungsanlagen mit Spannungswandlern der gleichen Magnetisierungskennlinie genutzt werden, um eine Aussage über das Auftreten von Kippschwingungen treffen zu können.

Um in Einklang mit den tatsächlichen Verhältnissen vor Ort zu haben, sollten die technischen Parameter der induktiven Spannungswandler sowie der Verlauf der Magnetisierungskennlinie zur Verfügung stehen. Dies kann einerseits durch die Wandlerhersteller erfolgen oder andererseits durch die messtechnische Erfassung. In Abhängigkeit einer verwendeten Magnetisierungskennlinie können für bestimmte Kapazitätsverhältnisse transiente oder stationären Kippschwingungen mit unterschiedlichen Ausprägungen auftreten.

In diesem Zusammenhang ist es für die Untersuchung des Auftretens von Kippschwingungen notwendig, den tatsächlichen Verlauf der Magnetisierungskennlinie bis in den Sättigungsbereich präzise nachzubilden. Auch die präzise Nachbildung der Verluste und die Größenordnung der Kapazitäten (Steuerkapazität, Leiter-Erde-Kapazitäten und Streukapazitäten) sind für das Auftreten von Kippschwingungen von entscheidender Bedeutung.

4.2.2 Hochspannungsanlage B (400 / 110 / 30 kV)

Hochspannungsanlage B fokussiert sich auf die numerische Berechnung von Kippschwingungen an der 110-kV-Sekundärseite des Hochspannungstransformators. Wie schon in Hochspannungsanlage A numerisch berechnet wurde, kann ab einer gewissen Größe der wirksamen Kapazität der Sekundärseite das Auftreten einer Kippschwingung vermindert werden. Basierend auf den Kenntnissen von Hochspannungsanlage A mit den aufgetretenen transienten und stationären Kippschwingungen und der ermittelten sekundärseitigen Anlagenkapazität wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung der sekundärseitigen Anlagenkapazität des Transformatorfeldes
- Erdungsverhältnisse am zugeschalteten Transformator

Im Gegensatz zu Hochspannungsanlage A erhöht sich in Hochspannungsanlage B die Komplexität der Anlage. Eine schematische Darstellung der Hochspannungsanlage ist aus Abbildung 4-24 zu entnehmen. Die numerische Modellbildung umfasst folgende Komponenten:

- Netzkupplertansformatoren (400 / 115 / 30 kV)
- Leistungsschalter mit Steuerkapazität ($C = 0,25 \text{ nF}$)
- Induktive 400-kV- und 110-kV-Spannungswandler
- Doppelsammelschiene der 400-kV-Spannungsebene und 110-kV-Spannungsebene samt Kupplungsfeld
- Transformatorfelder
- Übertragungsleitungen samt ferner Einspeisung mit Netzimpedanz (Abgangsfelder)
- Drei Kompensationsdrosselspulen (100 MVAR, 30 kV)

Die durchgeführten Schalthandlungen im numerischen Berechnungsmodell wurden an tatsächliche Schalthandlungen in Hochspannungsanlagen angepasst. Dies bedeutet, dass beim primärseitigen Einschalten der Transformatoren ein gesteuertes und ungesteuertes Schalten der Leistungsschalter untersucht wurde. Beim Einschalten von Transformatoren in Hochspannungsanlagen ist die Kompensationsdrosselspule am schaltenden Transformator nicht aktiv und wird entsprechend vorher weggeschaltet. In der gezeigten Hochspannungsanlage ist ein Transformatorsternpunkt der 400-kV-Spannungsebene (Tr3) geerdet, während die verbleibenden Transformatorsternpunkte nicht geerdet sind.

Hochspannungsanlage B besitzt dieselben elektrischen Daten der Transformatoren. Die geometrischen Abmessungen der Sammelschienen, Transformator- und Abgangsfelder unterscheiden sich. Somit herrschen im Bereich der Transformator- und Abgangsfelder andere Kapazitätsverhältnisse vor. Mit der numerischen Modellbildung und Berechnung von Hochspannungsanlage B soll gezeigt werden, ob der vorliegende Fingerabdruck von Hochspannungsanlage A genutzt werden kann, um

das Auftreten von Kippschwingungen abschätzen zu können. Für die Magnetisierungskennlinien der induktiven Spannungswandler wurden Kennlinie 3 und 4 (siehe Abbildung 4-3) gewählt. Bei ungesteuertem Einschalten der Leistungsschalter und unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 3 befindet sich die wirksame Kapazität im Bereich von ca. 4,0 bis ca. 5,0 nF (numerisches Berechnungsergebnis aus Kapitel 4.2.1).

Die numerische Berechnung für die Evaluierung des Existenzbereiches der Kippschwingungen in der 110-kV Spannungsebene wurde am Transformator Tr2 durchgeführt. Beim primärseitigen Einschalten durch die Leistungsschalter des Transformators (Tr2) bei nicht geerdetem oberspannungsseitigem Sternpunkt wurde eine Sensitivitätsanalyse der wirksamen Kapazität durchgeführt.

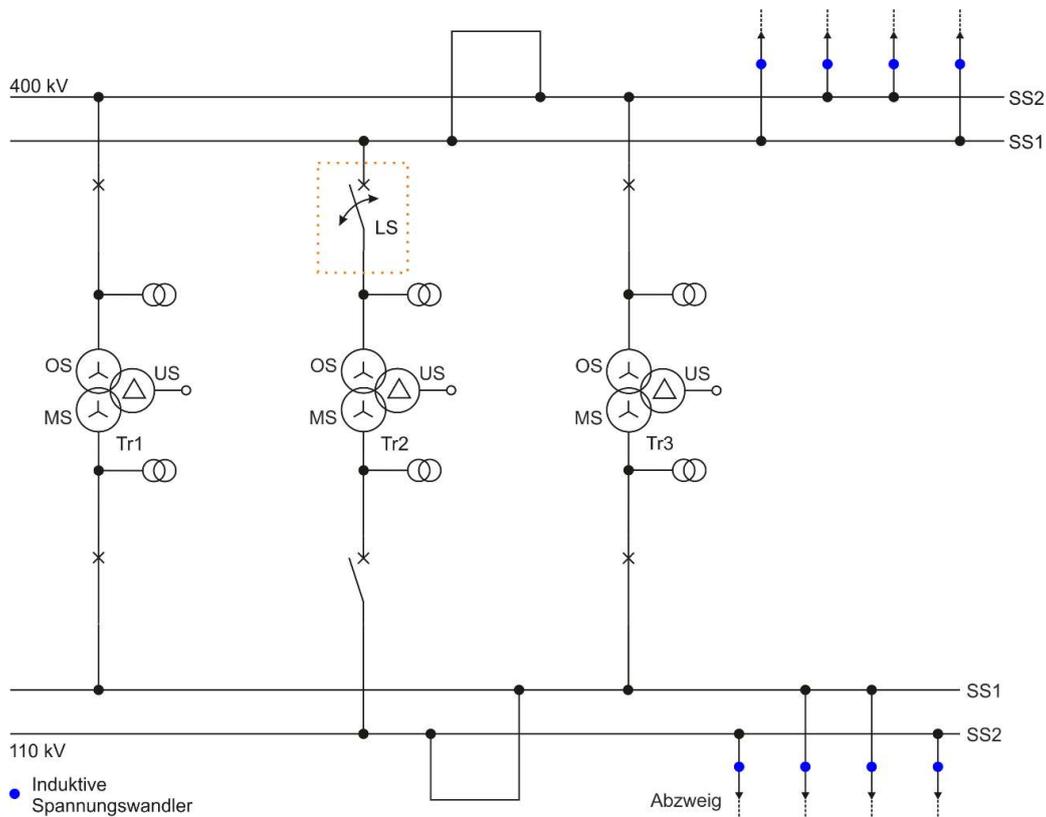


Abbildung 4-24: Schematische Struktur von Hochspannungsanlage B zur Untersuchung von Kippschwingungen

LS	Leistungsschalter	OS	Oberspannungsseite
SS1, SS2	Sammelschienen	MS	Mittelspannungsseite
Tr1 – Tr3	Transformatoren	US	Unterspannungsseite

Die grundlegende Kapazität des sekundärseitigen Transformatorfeldes befindet sich in der Größenordnung von ca. 972 pF. Mit der Kapazität der induktiven Wandler erhöht sich die wirksame Anlagenkapazität in den Bereich von ca. 1,82 nF bis ca. C = 2,77 nF, bestehend aus den folgenden Kapazitätswerten:

- Kapazität der Transformatordurchführung: 532,6 pF
- Kapazität des Transformatorfeldes (sekundärseitig): ca. 439,8 pF
- Kapazität der induktiven 110-kV-Wandler: Im Bereich von ca. 850 pF bis ca. 1800 pF

Für Magnetisierungskennlinie 3 ergibt sich eine wirksame Kapazität von ca. 4,2 nF (siehe Abbildung 4-25). Bei größeren Kapazitätswerten treten keine stationären oder transienten Kippschwingungen auf. Mit der Kapazität der induktiven Spannungswandler ist in diesem Fall mit Magnetisierungskennlinie 3 mit stationären Kippschwingungen bei ungesteuertem Einschalten der Leistungsschalter zu rechnen.

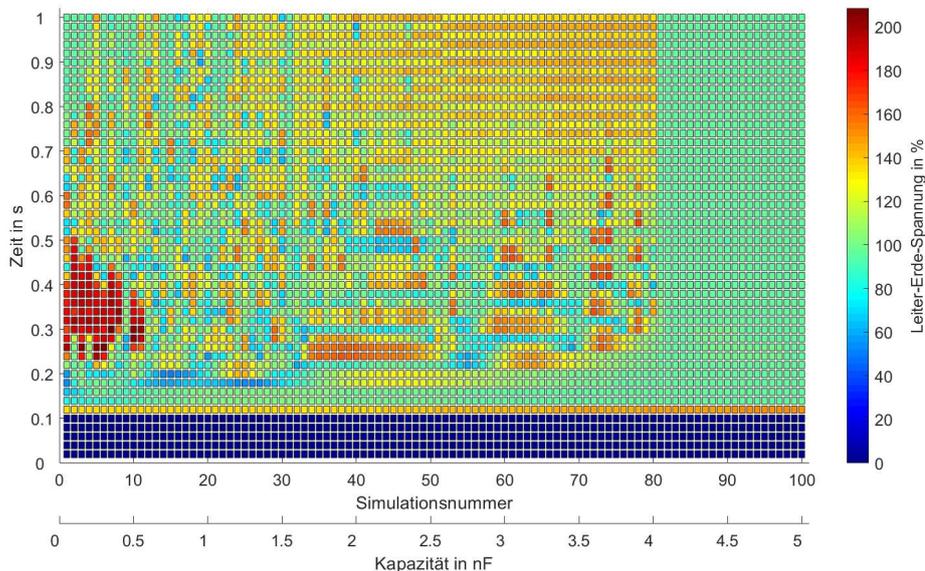


Abbildung 4-25: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 (Hochspannungsanlage B)

Für Magnetisierungskennlinie 4 ergibt sich eine wirksame Kapazität von ca. 0,3 nF. Mit der Kapazität des sekundärseitigen Transformatorfeldes treten ausschließlich transiente Kippschwingungen auf. Somit befindet sich die Kapazität in einer geeigneten Größenordnung, um stationäre Kippschwingungen bei ungesteuertem Einschalten der Leistungsschalter zu vermeiden. Mit der Kapazität der induktiven Spannungswandler können weder stationäre noch transiente Kippschwingungen auftreten.

Aus Abbildung 4-26 kann die Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven Spannungswandler, unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 5, entnommen werden. In diesem Fall ist eine Kapazität von ca. 8,5 nF notwendig, um das Auftreten von stationären Kippschwingungen zu vermeiden.

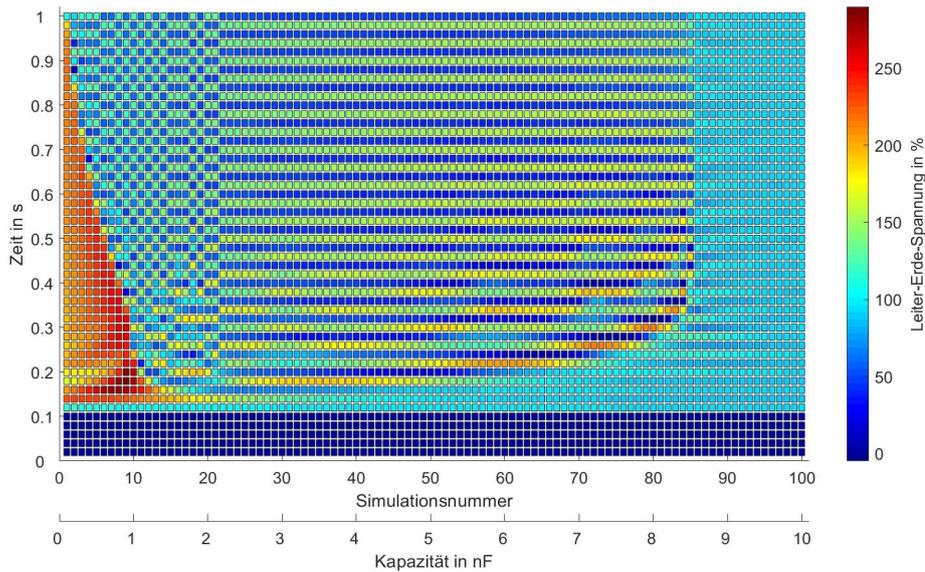


Abbildung 4-26: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 5 (Hochspannungsanlage B)

Basierend auf der Kenntnis der sekundärseitigen Anlagenkapazität der Hochspannungsanlage wurden numerische Berechnungen mit zwei weiteren Randbedingungen durchgeführt. Tabelle 4-2 zeigt die Randbedingungen der Leistungsschalter (ungesteuertes und gesteuertes Schalten) und die Behandlung des Transformatorsternpunkts (geerdet oder nicht geerdet) in Abhängigkeit der Variation der Magnetisierungskennlinie 3 und 4. Die Randbedingungen werden für die numerische Berechnung der Kippschwingungen am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler am Transformator Tr2 angewendet.

Tabelle 4-2: Randbedingungen für die numerische Berechnung der Kippschwingungen am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler unter Variation der Magnetisierungskennlinie

Nr.	Sternpunkt Transformator Tr2	Leistungsschalter
1	Nicht geerdet	Ungesteuert
2	Nicht geerdet	Gesteuert
3	Geerdet	Ungesteuert
4	Geerdet	Gesteuert

Beim ungesteuerten Einschalten der Leistungsschalter wird Phase L1 im Spannungsmaximum eingeschaltet. Das Einschalten von Phase L2 und L3 erfolgt zeitgleich zu Phase L1. Im Fall von gesteuertem Einschalten wird Phase L1 im Spannungsmaximum zugeschaltet und Phase L2 und L3 zeitlich um ca. 5 ms versetzt.

400-kV-Sternpunkt am Transformator Tr2 nicht geerdet und ungesteuertes Einschalten der Leistungsschalter (Magnetisierungskennlinie 3):

Das primärseitige Einschalten der Leistungsschalter erfolgt ungesteuert. Aus Abbildung 4-27 ist zu erkennen, dass stationäre Kippschwingungen am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler aufgetreten sind. Zur 50-Hz-Netzfrequenz überlagert sich die zweite Subharmonische und es treten Spitzenwerte in der Größenordnung von ca. 160 % auf. Im Einschaltmoment befinden sich die Spitzenwerte der Leiter-Erde-Spannung im Bereich von ca. 220 %. Mit diesen beiden Randbedingungen kommt eine stationäre Kippschwingung zu Stande.

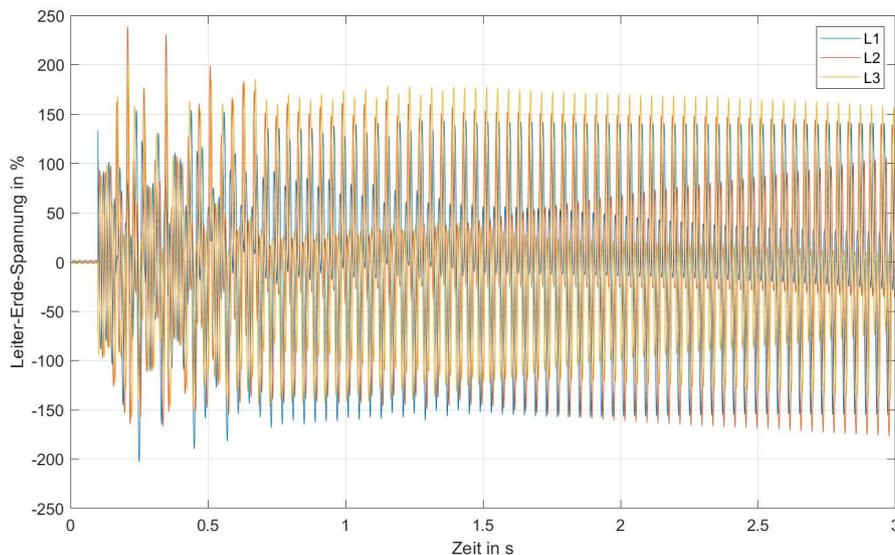


Abbildung 4-27: Numerisch berechnete Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler bei primärseitigen ungesteuertem Einschalten der Leistungsschalter ohne geerdetem Sternpunkt am Transformator unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 (Hochspannungsanlage B)

400-kV-Sternpunkt Transformator Tr2 nicht geerdet und gesteuertes Einschalten der Leistungsschalter (Magnetisierungskennlinie 3):

Erfolgt ein gesteuertes Einschalten der Leistungsschalter am Transformator (Phase L1 im Spannungsmaximum, Phase L2 und L3 um 5 ms verzögert), bei nicht geerdetem Sternpunkt des Transformators. Die Spitzenwerte im Moment des Einschaltens sind signifikant geringer als beim ungesteuerten Einschalten und befinden sich in der Größenordnung von ca. 120 %. Aus Abbildung 4-28 ist zu entnehmen, dass ein Übergangsbereich auftritt in welchem sich transiente Kippschwingungen ausbilden. Aufgrund der Sättigung von zwei Spannungswandlern zur Auslösung einer stationären Kippschwingung in der Hochspannungsanlage. Diese stationäre Kippschwingung entsteht dadurch, dass die beiden Spannungswandler der Phase L1 und L3 in Sättigung geraten und aufgrund der kapazitiven Kopplung der sekundärseitigen Abgangsfeldes den dritten induktiven Spannungswand-

ler in Sättigung treiben. Die kapazitive Kopplung ist in diesem Fall ausschlaggebend für das Auftreten der stationären Kippschwingung. Dieser Zustand tritt nach ca. 0,7 s nach der erfolgreichen Einschaltung der Leistungsschalter auf. Der Verlauf der Leiter-Erde-Spannung kann aus Abbildung 4-28 entnommen werden. Die Spitzenwerte der Leiter-Erde-Spannungen befinden sich im Fall der stationären Kippschwingungen im Bereich von ca. 160 kV.

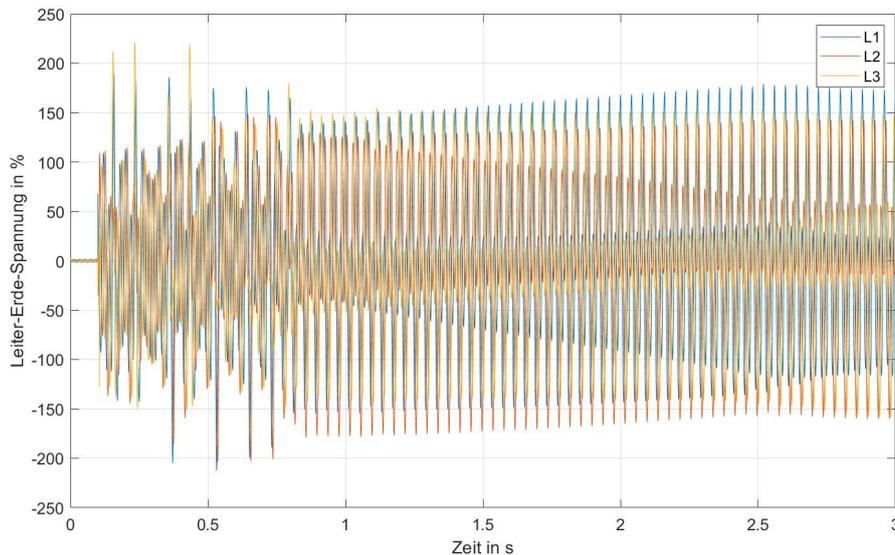


Abbildung 4-28: Numerisch berechnete Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswand-
ler bei primärseitigen gesteuertem Einschalten der Leistungsschalter ohne geerdetem Sternpunkt am Transformator un-
ter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 (Hochspannungsanlage B)

400-kV-Sternpunkt Transformator Tr2 geerdet und ungesteuertes Einschalten der Leistungsschalter (Magnetisierungskennlinie 3):

Bei primärseitig geerdetem Sternpunkt am Transformator Tr2 und bei ungesteuertem Einschalten der Leistungsschalter kommt es wiederholt zum Auftreten von stationären Kippschwingungen am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler (siehe Abbildung 4-29). Die überspannungsseitige Sternpunkterdung des zugeschalteten Transformators ist in diesem Fall keine wirksame Maßnahme zur Vermeidung von stationären Kippschwingungen. Aus dem zeitlichen Verlauf der Leiter-Erde-Spannungen (Abbildung 4-29) sind keine signifikanten Unterschiede zu Abbildung 4-27 zu erkennen.

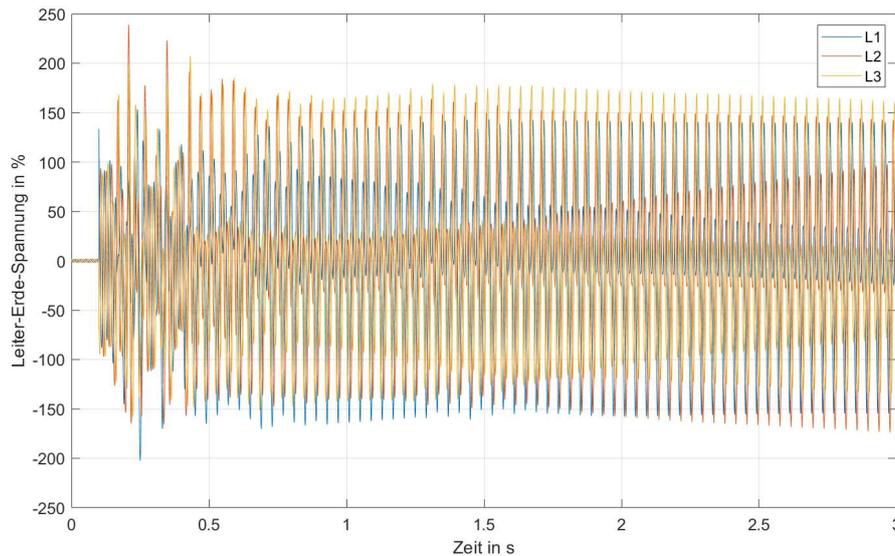


Abbildung 4-29 Numerisch berechnete Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswand-ler bei primärseitigen ungesteuertem Einschalten der Leistungsschalter mit geerdetem Sternpunkt am Transformator unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 (Hochspannungsanlage B)

400-kV-Sternpunkt Transformator Tr2 geerdet und gesteuertes Einschalten der Leistungsschalter (Magnetisierungskennlinie 3):

Der Sternpunkt des Transformators Tr2 wird vor der Durchführung der Schalthandlung geerdet. Das Einschalten der Leistungsschalter erfolgt gesteuert (Phase L1 im Spannungsmaximum, Phase L2 und L3 um 5 ms verzögert). Es stellt sich ein stationärer Zustand der Leiter-Erde-Spannung ein, sodass sich weder stationäre noch transiente Kippschwingungen ausbilden können. Somit wirkt sich die Vergabe des Sternpunktes positiv auf durchzuführende Schalthandlungen beim gesteuerten Einschalten der Leistungsschalter aus (siehe Abbildung 4-30).

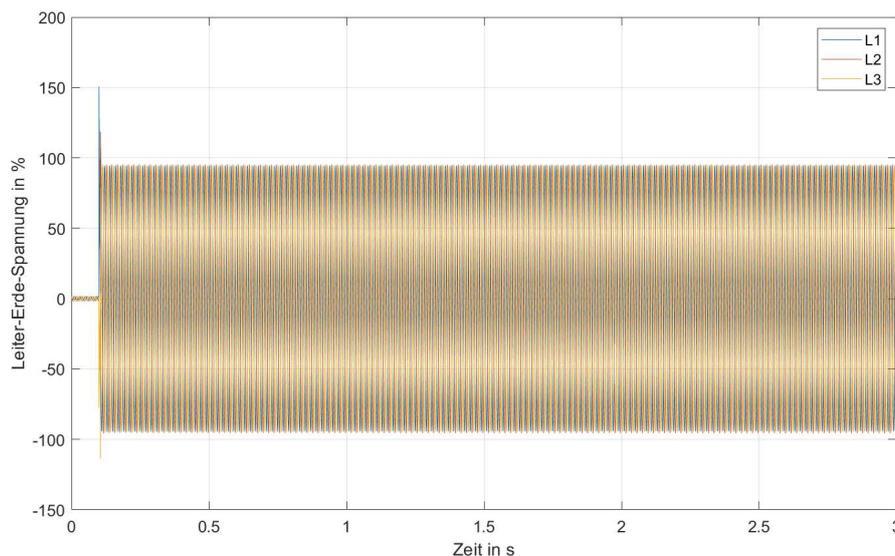


Abbildung 4-30: Numerisch berechnete Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswand-ler bei primärseitigen gesteuertem Einschalten der Leistungsschalter mit geerdetem Sternpunkt am Transformator unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 (Hochspannungsanlage B)

Die numerischen Berechnungsergebnisse am Transformator Tr2 zeigen, dass beim gesteuerten Einschalten der Leistungsschalter Kippschwingungen angeregt werden können, wenn der Sternpunkt des einschaltenden Transformators nicht geerdet ist.

Mit den angegebenen Maßnahmen des gesteuerten Einschaltens der Leistungsschalter und des geerdeten Sternpunkts am Transformator Tr2 können Kippschwingungen vermieden werden.

Numerische Berechnungen mit Magnetisierungskennlinie 4:

Abbildung 4-31 zeigt den numerisch berechneten Verlauf der Leiter-Erde-Spannung für den Fall des ungesteuerten Einschaltens der Leistungsschalter bei nicht geerdetem Sternpunkt am Transformator, unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 4. Die Analyse der numerischen Berechnungen zeigt, dass es beim ungesteuerten primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unerheblich ist, ob der Sternpunkt des Transformators nicht geerdet oder geerdet (siehe Abbildung 4-32) ist. Der Verlauf der Leiter-Erde-Spannungen, die zeitliche Beanspruchungsdauer und Frequenzbereiche sind in beiden Fällen identisch. In diesen Fällen treten transiente Kippschwingungen mit einer Beanspruchungsdauer von ca. 1,1 s auf.

Nur für den Fall des gesteuerten Einschaltens der Leistungsschalter und des geerdeten Transformatorsternpunktes zeigte keine Beeinflussung auf die Leiter-Erde-Spannung hinsichtlich stationärer oder transients Kippschwingungen – siehe Abbildung 4-33.

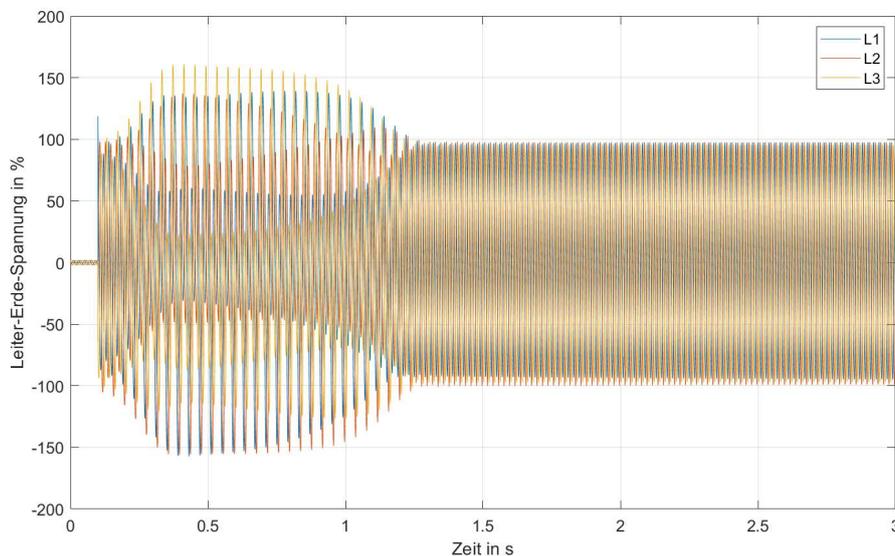


Abbildung 4-31: Numerisch berechnete Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler bei primärseitigen ungesteuertem Einschalten der Leistungsschalter mit nicht geerdetem Sternpunkt am Transformator unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 4 (Hochspannungsanlage B)

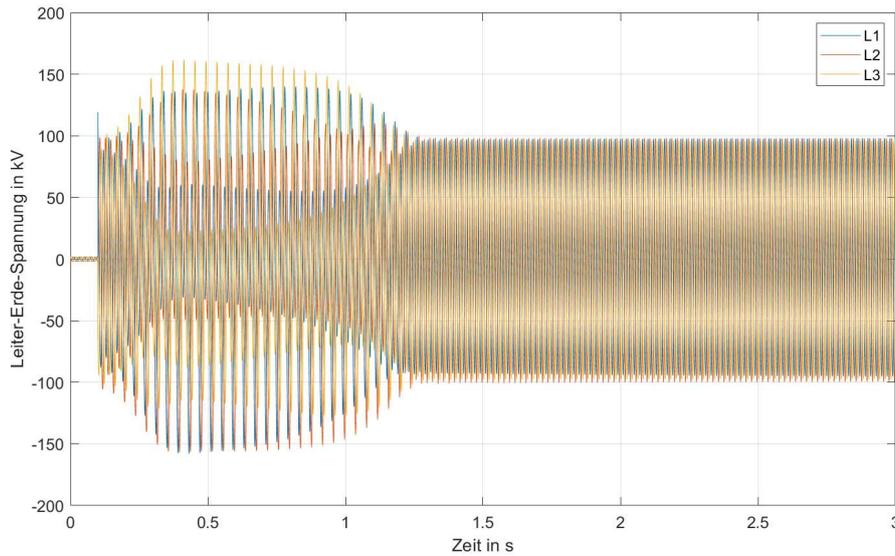


Abbildung 4-32: Numerisch berechnete Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler bei primärseitigen ungesteuertem Einschalten der Leistungsschalter mit geerdetem Sternpunkt am Transformator unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 4 (Hochspannungsanlage B)

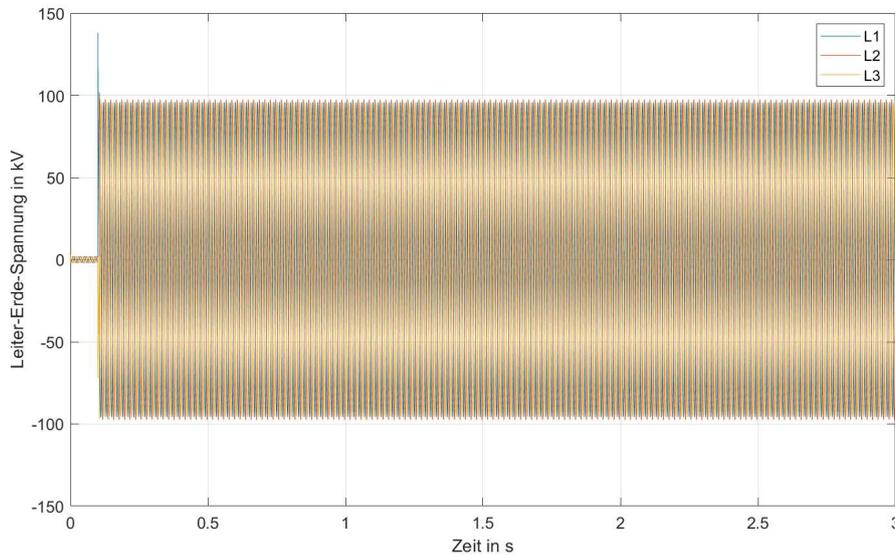


Abbildung 4-33: Numerisch berechnete Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler bei primärseitigen gesteuertem Einschalten der Leistungsschalter mit geerdetem Sternpunkt am Transformator unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 4 (Hochspannungsanlage B)

Ist die Kapazität der induktiven Spannungswandler aus Prüfprotokollen bekannt und wird diese im numerischen Berechnungsmodell berücksichtigt, ergibt sich für Magnetisierungskennlinie 4 keine Kombination der beiden Randbedingungen (Leistungsschalter und Transformatorsternpunkt), in der es zur Ausbildung von stationären oder transienten Kippschwingungen kommen kann.

Die durchgeführten numerischen Berechnungen der Hochspannungsanlage B haben gezeigt, dass die Anwendung der beiden Randbedingungen (Leistungsschalter und Transformatorsternpunkt) einen wesentlichen Einfluss für das Auftreten von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen haben. Die Randbedingungen wurden an zwei typischen Verläufen der Magnetisierungskennlinie angewandt. Ungesteuertes Schalten der Leistungsschalter führt bei beiden Verläufen der Magnetisierungskennlinie zur Ausbildung von Kippschwingungen. Es zeigt sich, dass bei Verwendung von Magnetisierungskennlinie 4 eine transiente Kippschwingung auftritt und nach einer zeitlichen Beanspruchungsdauer von ca. 1,1 s bis ca. 1,3 s sich selbstständig bedämpft. Die Vergabe des Transformatorsternpunktes wirkt sich nicht wesentlich auf die zeitliche Verweildauer der transienten Kippschwingungen bei Verwendung von Magnetisierungskennlinie 4 aus.

Bei Anwendung der Magnetisierungskennlinie 3 kommt es in beinahe allen Fällen zur Auslösung einer stationären Kippschwingung. Erst beim gesteuerten Einschalten der Leistungsschalter und der Vergabe des Sternpunktes an den zu schaltenden Transformator liefert nach dem primärseitigen Einschalten einen stationären Verlauf der Leiter-Erde-Spannung, sodass sich weder stationäre noch transiente Kippschwingungen ausbilden können.

Tabelle 4-3 zeigt eine Zusammenfassung der Art des Auftretens von Kippschwingungen in Abhängigkeit der verwendeten Magnetisierungskennlinie unter Variation des Einschaltens der Leistungsschalter und der Vergabe des Sternpunktes. Unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 kommt es zur Ausbildung von stationären Kippschwingungen. Bei Verwendung der Magnetisierungskennlinie 4 bilden sich hauptsächlich transiente Kippschwingungen mit einer Beanspruchungsdauer von ca. 1,3 s aus.

Tabelle 4-3: Auftreten von transienten und stationären Kippschwingungen in Abhängigkeit der verwendeten Magnetisierungskennlinie unter Variation des Einschaltens der Leistungsschalter und der Vergabe des Sternpunktes

Nr.	Sternpunkt	Leistungsschalter	Magnetisierungskennlinie 3	Magnetisierungskennlinie 4
-	-	-	Kippschwingung	Kippschwingung
1	Nicht geerdet	Ungesteuert	Stationär	Transient
2	Nicht geerdet	Gesteuert	Stationär	Transient
3	Geerdet	Ungesteuert	Stationär	Transient
4	Geerdet	Gesteuert	Keine	Keine

Tabelle 4-4 zeigt die maximalen Spitzenwerte der Leiter-Erde-Spannung in Abhängigkeit der verwendeten Magnetisierungskennlinie unter Variation des Einschaltens der Leistungsschalter und der Vergabe des Sternpunktes. Der Vergleich der ausgewerteten Spitzenwerte zeigt, dass unter Verwendung des tatsächlichen Verlaufs (Magnetisierungskennlinie 4), diese sich in der Größenordnung von ca. 160 % befinden.

Tabelle 4-4: Maximale Spitzenwerte der Leiter-Erde-Spannung in Abhängigkeit der verwendeten Magnetisierungskennlinien unter Variation des Einschaltens der Leistungsschalter und der Vergabe des Sternpunktes

Nr.	Sternpunkt	Leistungsschalter	Magnetisierungskennlinie 3	Magnetisierungskennlinie 4
-	-	-	%	%
1	Nicht geerdet	Ungesteuert	240	160
2	Nicht geerdet	Gesteuert	220	160
3	Geerdet	Ungesteuert	240	160
4	Geerdet	Gesteuert	150	140

Um das Auftreten von Kippschwingungen zu minimieren, kann eine leerlaufende Sammelschiene zugeschaltet werden. Mit dem Zuschalten einer leerlaufenden Sammelschiene wird versucht, in den unkritischen Kapazitätsbereich zu gelangen (siehe Abbildung 4-25). Falls jedoch eingebrachte Kapazität zu gering ist, kann es auch bei diesem Schaltzustand zu Kippschwingungen kommen. Das Zuschalten von leerlaufenden Sammelschienen wird vom österreichischen Übertragungsnetzbetreiber praktiziert.

4.2.3 Hochspannungsanlage C (400 / 230 / 110 / 30 kV)

Aus Abbildung 4-34 kann die Struktur von Hochspannungsanlage C entnommen werden. Der Transformator verbindet die 400-kV- mit der 230-kV-Spannungsebene. Induktive Spannungswandler wurden in den Freileitungsabgängen und im Abzweig zum Transformator implementiert. Der Sternpunkt des Transformators Tr1 ist an der Oberspannungsseite geerdet.

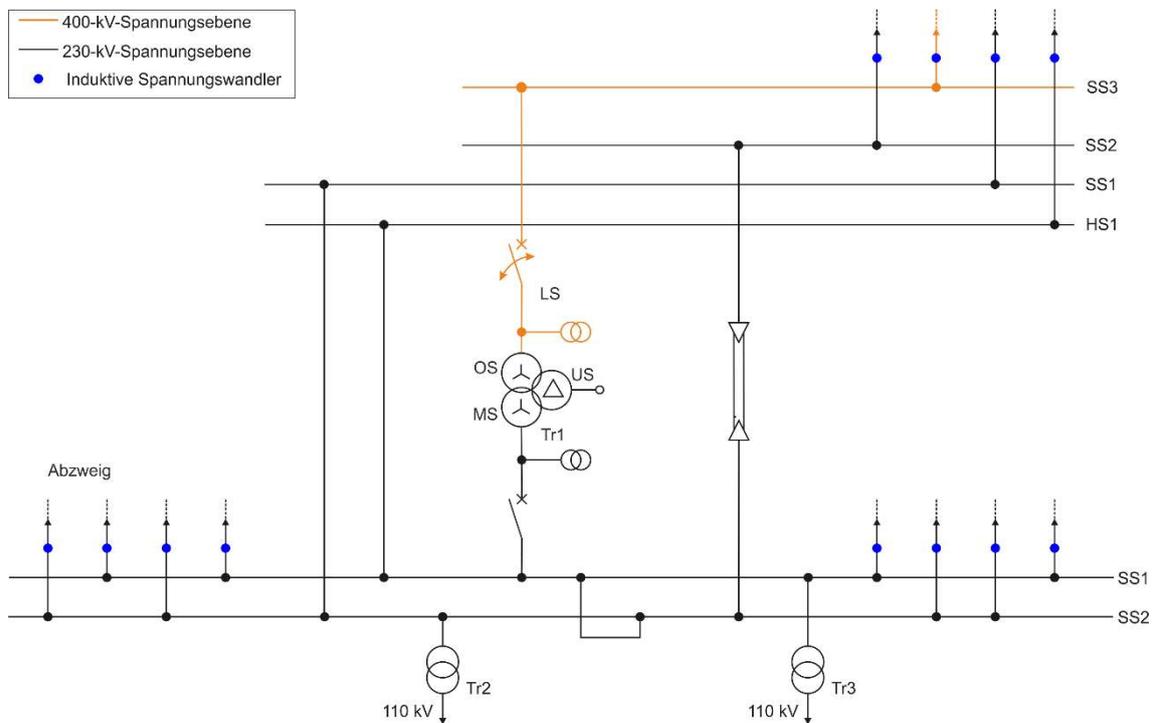


Abbildung 4-34: Schematische Struktur von Hochspannungsanlage C zur Untersuchung von Kippschwingungen

LS	Leistungsschalter	OS	Oberspannungsseite
HS1	Hilfssammelschiene	MS	Mittelspannungsseite
SS1 – SS3	Sammelschienen	US	Unterspannungsseite
Tr1 – Tr3	Transformatoren		

Mit der Durchführung von Schalthandlungen der 400-kV-Leistungsschalter am Transformator soll untersucht werden, ob Kippschwingungen auftreten können. Die Hochspannungsanlage umfasst folgende Komponenten:

- Netzkuppletransformator (400 / 230 / 30 kV)
- Leistungsschalter mit Steuerkapazität ($C = 0,25 \text{ nF}$)
- Induktive 400-kV- und 230-kV-Spannungswandler
- Doppelsammelschiene der 400-kV-Spannungsebene und 230-kV-Spannungsebene samt Kupplungsfeld
- Transformatorfeld
- Energiekabelverbindung
- Übertragungsleitungen samt ferner Einspeisung mit Netzimpedanz (Abgangsfelder)
- Kompensationsdrosselspule (100 MVar, 30 kV)

Abbildung 4-35 zeigt die, von einem Wandlerhersteller zur Verfügung gestellte, Magnetisierungskennlinien eines induktiven 230-kV-Spannungswandlers.

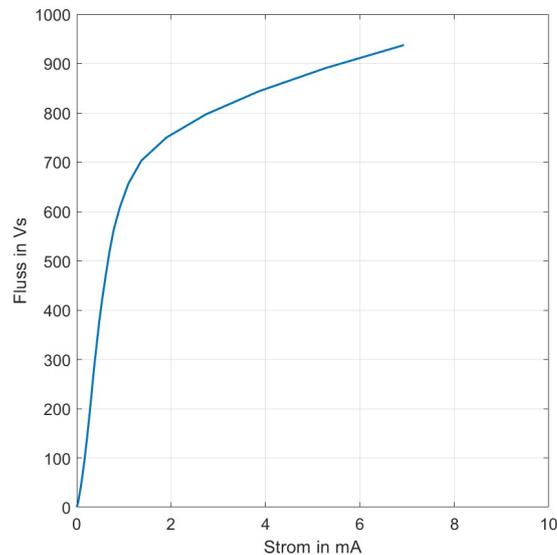


Abbildung 4-35: Magnetisierungskennlinie für einen induktiven 230-kV-Spannungswandler

Die Kapazität des sekundärseitigen Transformatorfeldes befindet sich in der Größenordnung von ca. 1146 pF. Mit der zusätzlich eingebrachten wirksamen Kapazität der induktiven Spannungswandler erhöht sich die Anlagenkapazität in den Bereich von ca. 2,567 nF bis ca. 2,797 nF, bestehend aus den folgenden Kapazitätswerten:

- Kapazität der Transformatordurchführung: 472,4 pF
- Kapazität des Transformatorfeldes (sekundärseitig): ca. 674,1 pF
- Kapazität der induktiven 230-kV-Spannungswandler: Im Bereich von ca. 1420 pF bis ca. 1650 pF

Die Sensitivitätsanalyse der wirksamen Kapazität der Sekundärseite des Transformatorfeldes zeigt, dass bei Verwendung der Magnetisierungskennlinie keine transienten und stationären Kippschwingungen aufgetreten sind (siehe Abbildung 4-36). Kippschwingungen können aufgrund der vorhandenen wirksamen Kapazität beim ungesteuertem Einschalten der Leistungsschalter für Hochspannungsanlage C ausgeschlossen werden. Auch für das gesteuerte Einschalten der Leistungsschalter können aufgrund der hinreichend großen Kapazität Kippschwingungen ausgeschlossen werden.

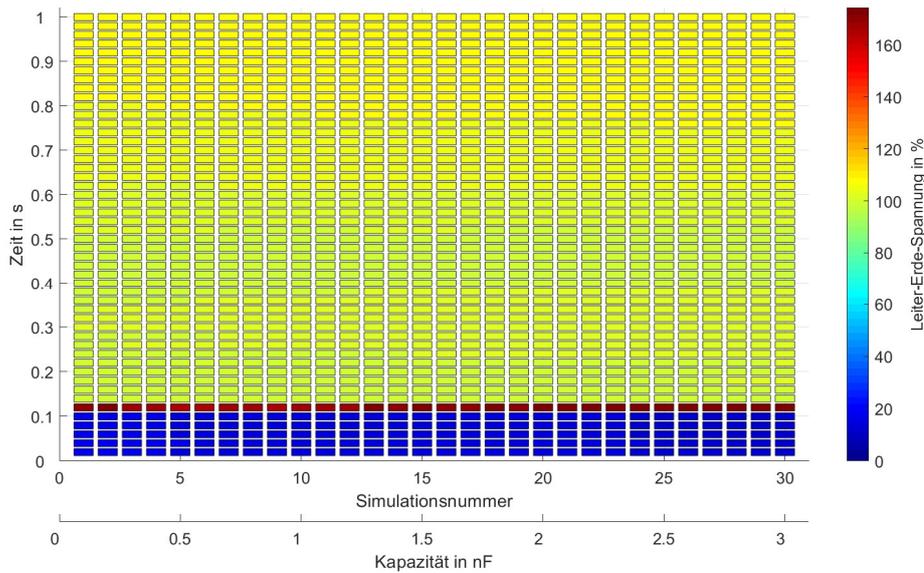


Abbildung 4-36: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 230-kV-Spannungswandler beim primärseitigen ungesteuerten Einschalten der Leistungsschalter (Hochspannungsanlage C)

Da die mechanische Eigenzeit der Leistungsschalter nicht bekannt ist und Streuungen auftreten können, erfolgt eine Variation der Einschaltzeitpunkt gemäß einer Gaußschen Verteilung [60071-4]. In der Hochspannungsanlage erfolgte eine statistische Variation der Einschaltzeit der Leistungsschalter für die Fälle des ungesteuerten und des gesteuerten Einschaltens für die zur Verfügung gestellte Magnetisierungskennlinien (siehe Abbildung 4-35). [60071-4] schlägt vor, dass für die einzelnen Einschaltzeitpunkte sich die Werte der Standardabweichung zwischen 0,8 ms und 2,0 ms befinden. Die wirksame Anlagenkapazität wird bei den numerischen Berechnungen berücksichtigt. Phase L1 wurde Nahe dem Spannungsmaximum zugeschaltet.

Ungesteuertes Einschalten der Leistungsschalter:

Aus Abbildung 4-37 kann die Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 230-kV-Spannungswandler beim primärseitigen ungesteuerten Einschalten der Leistungsschalter mit Einschaltzeitpunkten gemäß einer Gaußschen Verteilung entnommen werden. Es ist zu erkennen, dass weder transiente noch stationäre Kippschwingungen aufgetreten sind.

Die numerischen Berechnungsergebnisse der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung beim gesteuerten Einschaltens der Leistungsschalter mit Einschaltzeitpunkten gemäß einer Gaußschen Verteilung weichen nicht signifikant von Abbildung 4-37 ab.

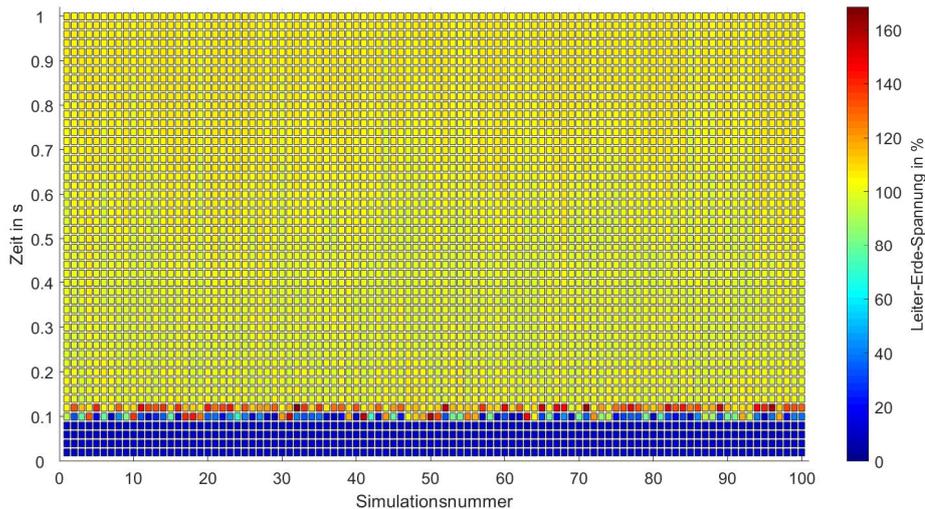


Abbildung 4-37: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 230-kV-Spannungswandler beim primärseitigen ungesteuerten Einschalten der Leistungsschalter mit Einschaltzeitpunkten gemäß einer Gaußschen Verteilung (Hochspannungsanlage C)

Mit der zur Verfügung gestellten Magnetisierungskennlinie der induktiven 230-kV-Spannungswandler konnten weder beim ungesteuerten noch beim gesteuerten Einschalten der 400-kV-Leistungsschalter mit Einschaltzeitpunkten gemäß einer Gaußschen Verteilung der einzelnen Pole transiente bzw. stationäre Kippschwingungen angeregt werden.

4.3 Interpretation der numerischen Berechnungsergebnisse

Die durchgeführten numerischen Berechnungen in den drei beschriebenen Hochspannungsanlagen geben einen Einblick über das Verhalten der Leiter-Erde-Spannung bei der Durchführung von Schalthandlungen. In vielen Fällen ist es hinreichend genau, Hochspannungsanlagen anhand ihrer einzelnen Komponenten numerisch nachzubilden. Mit dem Fokus der Untersuchung des Auftretens von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen kann gezeigt werden, dass die numerischen Berechnungsergebnisse sensitiv gegenüber einer durchgeführten Parametervariation reagieren. Bei der Durchführung von numerischen Berechnungen sind Qualität und Verfügbarkeit der technischen Anlagenparameter und besonders der nichtlineare Verlauf der Magnetisierungskennlinie der eingesetzten induktiven Spannungswandler von entscheidender Bedeutung.

Wesentliches Element für die Untersuchung des Auftretens von Kippschwingungen ist der nichtlineare Verlauf der Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler. Dieser Verlauf ist für die numerischen Berechnungen bis in den gesättigten Bereich nachzubilden. Es hat sich gezeigt, dass Abweichungen im Verlauf der Magnetisierungskennlinie ein vollständiges anderes Verhalten der Leiter-Erde-Spannung liefern können. Auch die Größenordnung der Leiter-Erde-Kapazitäten

bzw. der Erdkapazitäten der installierten elektrischen Komponenten sind bei der numerischen Berechnung zu berücksichtigen (siehe Tabelle 3-1).

Die durchgeführten numerischen Berechnungen in den Hochspannungsanlagen haben einen Einblick in das transiente Verhalten hinsichtlich des Gefährdungspotentials gegenüber Kippschwingungen gegeben. Aus den numerischen Berechnungsergebnissen wurden die charakteristischen Parameter wie die globalen positiven und negativen Spitzenwerte, die Frequenzbereiche und die Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven Spannungswandler analysiert und bewertet. Ausgehend vom plausibilitätsgeprüften Basismodell wurden Sensitivitätsanalysen ausgewählter Parameter durchgeführt, um die Beeinflussung auf die Leiter-Erde-Spannung in den einzelnen Hochspannungsanlagen zu untersuchen und zu bewerten. Folgend werden die wesentlichen Aussagen der einzelnen Hochspannungsanlagen zusammengefasst:

- Hochspannungsanlage A (400 / 110 / 30 kV):

Bei Hochspannungsanlage A lag der Fokus der Untersuchungen auf dem primärseitigen Einschalten des Transformators durch die 400-kV-Leistungsschalter sowie das Anregen von Kippschwingungen an der 110-kV-Sekundärseite. Für die numerischen Berechnungen wurden fünf nichtlineare Verläufe der Magnetisierungskennlinie der induktiven 110-kV-Spannungswandler gewählt und bei gleichbleibenden numerischen Randbedingungen erfolgt eine Sensitivitätsanalyse der Leiter-Erde-Kapazitäten der Sekundärseite. Dadurch konnten transiente und stationäre Kippschwingungen in Abhängigkeit der Magnetisierungskennlinie bestimmt werden. Neben der 50-Hz-Netzfrequenz konnte die charakteristische 25-Hz-Schwingungen sowie weiterer Harmonischen und Zwischenharmonischen der 50-Hz-Netzfrequenz evaluiert werden. Das Auftreten der Kippschwingungen ist durch das Sättigungsverhalten eines induktiven Spannungswandlers ausgelöst worden. Mit der Sättigung eines zweiten induktiven Spannungswandlers konnten stationäre Kippschwingungen angeregt werden.

Es hat sich gezeigt, dass bei drei von fünf Magnetisierungskennlinien das Entstehungspotential von Kippschwingungen signifikant ausgeprägt ist. Kippschwingungen konnten in diesem Fall beim ungesteuerten Einschalten der Leistungsschalter bis hin zu signifikant großen wirksamen Kapazitäten ausgelöst werden.

Die numerischen Berechnungsergebnisse zeigten beim gesteuerten Einschalten der Leistungsschalter für alle fünf Magnetisierungskennlinien einen stabilen Arbeitsbereich. Für die numerischen Berechnungen wurde für die induktiven Spannungswandler eine wirksame anlagentypische Kapazität von 1,7 nF gewählt. In der numerischen Berechnung das Phase L2 und L3 zeitlich versetzt zu Phase L1 (Einschaltung im Spannungsmaximum) zugeschaltet wurden, konnte der Zeitbereich von ca. 3,2 ms bis ca. 8,0 ms identifiziert werden, in welchem keine Kippschwingungen zu Stande gekommen sind. Durch den zeitlichen Versatz zwischen

den einzelnen Zuschaltaugenblicken konnten die induktiven Spannungswandler nicht mehr gesättigt werden.

Mit der sekundärseitigen Anlagenkapazität der Hochspannungsanlage, bestehend aus der Kapazität der Transformatordurchführung, der Kapazität der Spannungswandler und der Kapazität der Sammelschiene konnte gezeigt werden, dass beim ungesteuerten Einschalten Kippschwingungen bei vier von fünf Magnetisierungskennlinien aufgetreten sind. Erst mit der Maßnahme des gesteuerten Einschaltens der Leistungsschalter konnte das Auftreten von stationären Kippschwingungen vermieden werden.

Mit den numerisch durchgeführten Berechnungen und der Auswertung der globalen Spitzenwerte, der Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler und des Frequenzverhaltens konnte ein Fingerabdruck in Abhängigkeit der durchgeführten Sensitivitätsanalyse erstellt werden.

- Hochspannungsanlage B (400 / 110 / 30 kV):

In Hochspannungsanlage B lag der Fokus der numerischen Berechnung beim Auftreten von Kippschwingungen bei primärseitigem Einschalten der 400-kV-Leistungsschalter. Der vorhandene Fingerabdruck des Knotenpunktes der induktiven Spannungswandler von Hochspannungsanlage A kann für Hochspannungsanlage B genutzt werden. Die berechnete sekundärseitige Anlagenkapazität befindet sich innerhalb des Bereichs von stationären Kippschwingungen. Erst ab einem Kapazitätswert von 4,2 nF kann das Auftreten von Kippschwingungen beim ungesteuerten Einschalten der Leistungsschalter vermieden werden.

Basierend auf der berechneten sekundärseitigen Anlagenkapazität und des zur Verfügung stehenden Fingerabdrucks wurden die zwei Randbedingungen, Sternpunktbehandlung des Transformators und das Schalten der Leistungsschalter (gesteuert oder ungesteuert), untersucht. Das Ergebnis zeigte, dass in Abhängigkeit der beiden Randbedingungen und der Verwendung von zwei Magnetisierungskennlinien transiente und stationäre Kippschwingungen zu Stande kommen können.

Unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 3 konnte nur beim gesteuerten Einschalten der Leistungsschalter und bei geerdetem Transformatorsternpunkt ein stationärer Zustand der Leiter-Erde-Spannung innerhalb weniger Perioden erreicht werden. Bei den verbleibenden Kombinationen (Transformatorsternpunkt und Einschalten der Leistungsschalter) bildeten sich stationäre Kippschwingungen aus.

Mit Magnetisierungskennlinie 4 und der Anwendung beider Randbedingungen konnten am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler transiente Kippschwingungen angeregt werden. Das Auftreten von stationären Kippschwingungen konnte nicht beobachtet werden.

- Hochspannungsanlage C (400 / 230 / 110 / 30 kV):

In Hochspannungsanlage C wurde der Fokus auf die 230-kV-Seite des Netzkuppeltransformators (400 / 230 / 30 kV) gelegt. Für die numerische Berechnung wurde eine, vom Wandlerhersteller zur Verfügung gestellte, Magnetisierungskennlinie für die induktiven 230-kV-Spannungswandler verwendet. Mit der ermittelten sekundärseitigen Anlagenkapazität und einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse der wirksamen Kapazität konnte gezeigt werden, dass beim primärseitigen Einschalten der 400-kV-Leistungsschalter die Anlagenkapazität hinreichend groß ist und es zu keiner Anregung von transienten oder stationären Kippschwingungen kommt. Die wirksame Kapazität der installierten Komponenten ist somit für die verwendete Magnetisierungskennlinie hinreichend groß. Beim gesteuerten und ungesteuerten primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter konnten keine transienten oder stationären Kippschwingungen identifiziert werden.

Mit Einschaltzeitpunkten gemäß einer Gaußschen Verteilung der Leistungsschalter erfolgte eine Untersuchung des Auftretens von Kippschwingungen. Es erfolgte ein gesteuertes und ungesteuertes Einschalten der Leistungsschalter. Da beim Einschalten der Leistungsschalter Störungen auftreten können, erfolgte gemäß [60071-4] eine statistische Verteilung der Einschaltzeitpunkte der drei einzelnen Pole des Leistungsschalter.

Mit der verwendeten Magnetisierungskennlinie der induktiven 230-kV-Spannungswandler konnten weder beim ungesteuerten noch beim gesteuerten Einschalten der 400-kV-Leistungsschalter mit Einschaltzeitpunkten gemäß einer Gaußschen Verteilung der einzelnen Pole Kippschwingungen angeregt werden.

Bei den numerischen Berechnungen in Hochspannungsanlage A und B wurden mehrere Verläufe einer nichtlinearen Magnetisierungskennlinie für die induktiven 110-kV-Spannungswandler verwendet. Die nichtlinearen Magnetisierungskennlinien sind derart ausgeführt, dass diese den normativ festgelegten Bemessungsspannungsfaktors von $1,9 \times U_n$ standhalten. Bei gleichbleibenden numerischen Randbedingungen erfolgte in den drei Anlagenstrukturen eine Sensitivitätsanalyse der wirksamen Leiter-Erde-Kapazität zur Ermittlung des Existenzbereiches der Kippschwingungen. Als auslösendes Ereignis für das Auftreten von Kippschwingungen wurde das Einschalten von Transformatoren durch die Leistungsschalter ausgewählt.

In Hochspannungsanlage A erfolgte anhand der gewählten Kennlinien die grundlegende orientierende Untersuchung des Auftretens von Kippschwingungen. Unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 1 konnte gezeigt werden, dass der Existenzbereich für transiente und stationäre Kippschwingungen bis hin zu großen Leiter-Erde-Kapazitäten vorhanden ist. Die Variation der Kapazität erfolgte linear im Bereich von 0,1 nF bis 10 nF mit $\Delta C = 0,1 \text{ nF}$. Bei hohen Kapazitätswerten sind vor allem subharmonische Kippschwingungen mit einer Frequenz von 25 Hz aufgetreten. In

diesem Bereich waren alle drei Phasen der Leiter-Erde-Spannung gleichmäßig am Kippschwingungsvorgang beteiligt. Im mittleren Kapazitätsbereich zeigte sich, dass netzfrequente Kippschwingungen aufgetreten sind und zwei Phasen am Schwingungsvorgang beteiligt waren. Dieser Fall ist durch das Sättigungsverhalten von zwei Phasen und der kapazitiven Kopplung des Transformatorfeldes entstanden.

Die Größe der Erdkapazität eines induktiven kombinierten Wandlers kann sich im Bereich von 1,0 nF bis 1,7 nF befinden (siehe Tabelle 3-1). Mit der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung kann eine Aussage getroffen werden, ob sich der Bereich der Erdkapazität des Wandlers im kippschwingungsgefährdeten Bereich befindet. Am Beispiel der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung von Magnetisierungskennlinie 3 (siehe Abbildung 4-11) wurde die Kapazitätsbandbreite induktiver Wandler eingetragen – siehe Abbildung 4-38. Innerhalb dieser Bandbreite existiert ein Fall mit einer Erdkapazität von $C = 1,2 \text{ nF}$ der induktiven Wandler, in dem eine transiente Kippschwingung mit einer Beanspruchungsdauer von ca. 200 ms zustande kommt. Eine Veränderung der Kapazität von diesem Bereich kann wiederum zu stationären Kippschwingungen führen. Befindet sich die Erdkapazität der induktiven Wandler am Rand der Kapazitätsbandbreite (1,7 nF), ist eine zusätzliche Kapazität von ca. 2,6 nF hinreichend groß, um das Gebiet der stationären Kippschwingungen zu verlassen. Durch das Zuschalten einer Kapazität (mindestens ca. 2,6 nF bzw. höchstens 3,6 nF) erfolgt eine Verschiebung des Kapazitätsbereichs zum Randgebiet der Kippschwingungen. Diese Kapazitätswerte können durch eine leerlaufende Sammelschiene bzw. Freileitung oder durch ein Energiekabel erreicht werden. Unter Heranziehen realer Kapazitätswerte von Freileitungen mit 11 pF/m und von Energiekabeln mit 143 pF/m (Tabelle 3-1) kann die notwendige Länge ermittelt werden. Für die Sammelschiene bzw. der Freileitung ergibt sich eine Länge von ca. 234 m bis ca. 324 m und für die Energiekabel eine Länge von ca. 18 m bis ca. 25 m.

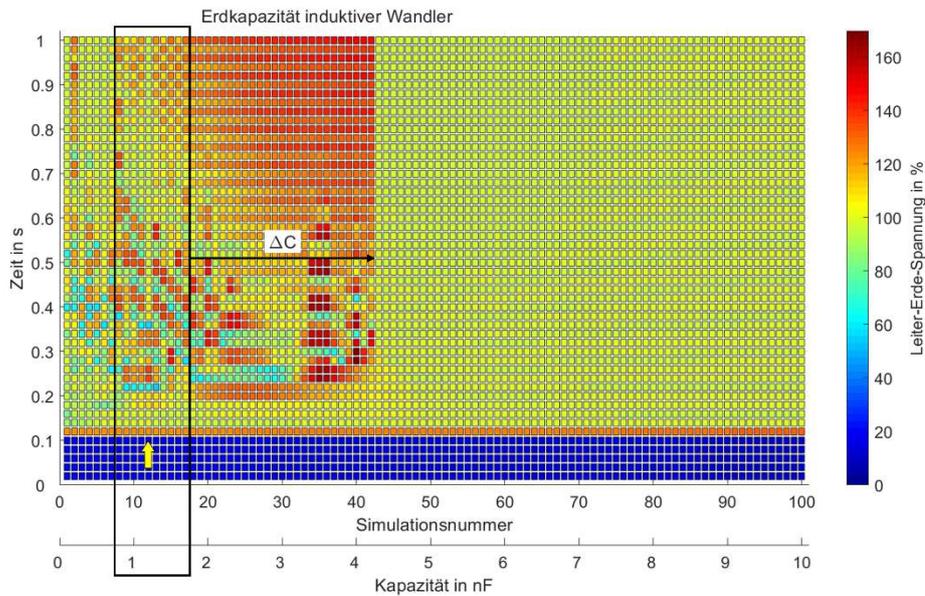


Abbildung 4-38: Schwingungsfähigkeit am Knotenpunkt der induktiven 110-kV-Spannungswandler beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter unter Verwendung der Magnetisierungskennlinie 3 (Hochspannungsanlage A); Bandbreite der Erdkapazität induktiver Wandler

Die gewählten Magnetisierungskennlinien sind für eine erste orientierende Einschätzung für den Parametersatz hilfreich, jedoch ist eine präzise Nachbildung erforderlich. Aus den numerischen Berechnungen geht hervor, dass bereits kleine Änderungen im Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Um in Einklang mit den tatsächlichen Verhältnissen vor Ort zu kommen, sollten die technischen Parameter der induktiven Spannungswandler sowie der präzise Verlauf der Magnetisierungskennlinie bis in den nichtlinearen Bereich zur Verfügung stehen. Auch die kapazitiven Verhältnisse (Leiter-Erde-Kapazitäten, Streukapazitäten und Koppelkapazitäten) sollten den tatsächlich vor Ort herrschenden Gegebenheiten nachempfunden werden. Wirksame Kapazitäten der Komponenten können entweder aus den Prüfprotokollen der Betriebsmittel oder aus Tabelle 3-1 entnommen werden.

Mit der Verwendung von Magnetisierungskennlinie 4 sind in den numerischen Berechnungsmodellen keine stationären Kippschwingungen aufgetreten. Für die Untersuchung des tatsächlichen Verhaltens von transienten und stationären Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen ist eine präzise Nachbildung der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie von entscheidender Bedeutung.

5 MESSTECHNIK UND MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN IN HOCHSPANNUNGSANLAGEN

5.1 Messtechnik zur Erfassung transienter Ereignisse

Beim stationären Betrieb eines Hochspannungsnetzes mit den vorhandenen angeschlossenen elektrischen Betriebsmitteln sind die Leiter-Erde-Spannungen innerhalb der normativen festgelegten Grenzwerte [60071-1]. Bei geplanten und ungeplante Schalthandlungen und Fehlerereignissen sind unzulässige Beanspruchungen der elektrischen Betriebsmittel nicht gänzlich ausgeschlossen. Sie können gegebenenfalls deren Betriebsverhalten beeinflussen. Die Erfassung der Leiter-Erde-Spannungen kann, durch die in den Hochspannungsanlagen installierten induktiven Spannungswandler erfolgen. Im niederfrequenten Bereich (Frequenzen kleiner 1 kHz) ermöglichen induktive Spannungswandler die Transformierung der zu messenden Hochspannung auf einen normativ festgelegten Spannungswert [61869-3, 61869-103].

Da das Übertragungsverhalten von induktiven Spannungswandlern von der jeweils auftretenden Frequenzkomponente abhängig ist, sind diese nicht in der Lage Frequenzen größer 1 kHz eindeutig abzubilden. Es werden entweder zu große oder zu kleine Signale übertragen. Um dieser Gegebenheit entgegenzuwirken, müssen breitbandigere Messteiler zum Einsatz kommen.

Breitbandigere Spannungsteiler erfassen messtechnisch auftretende transiente Ereignisse in hoher Auflösung. Moderne kapazitive und ohmsch-kapazitive Spannungsteiler sind in der Lage, die zu messende Hochspannung über einen definierten Frequenzbereich linear abzubilden. Kapazitive Spannungsteiler sind für die Messung in allen Spannungsebenen geeignet und transiente Spannungen können bis zu einer Frequenz von 1 MHz erfasst und überwacht werden. Ohmsch-kapazitive Spannungsteiler sind für die Erfassung von transienten Spannungen im Frequenzbereich von 0 Hz bis hin zu 2 MHz geeignet [61869-103, MAY11, SPE13].

Die breitbandigen Spannungsteiler werden an technisch sinnvoll ausgewählten Knotenpunkten in Hochspannungsanlagen eingebaut. Die, vor Ort messtechnische Installation der Spannungsteiler, ist durch den Fokus der transienten Einwirkung auf die Leiter-Erde-Spannung definiert [PLE13, PLE14a, PLE14b, PLE15, PLE17, WER15]. Des Weiteren sind beim Einbau zusätzlicher Komponenten in eine Hochspannungsanlage die normativ festgelegten Mindestabstände einzuhalten, um die Gefahr für das Betriebspersonal und für die vorhandenen elektrische Komponenten zu verringern [61936-1].

5.1.1 Messung in Hochspannungsanlagen

Einsatz traditioneller induktiver Spannungswandler:

Die Messung der Hochspannung erfolgt traditionell mit induktiven Spannungswandlern. Diese transformieren die zu messende Hochspannung auf normativ festgelegt Spannungen, die mit Hilfe von Messgeräten angezeigt werden können. Induktive Spannungswandler erzeugen hierzu für Mess-, Schutz- und Verrechnungszwecke ein eindeutiges Abbild der 50-Hz-Komponenten und sind für den niederfrequenten Messbereich ausgelegt. Höherfrequente transiente Ereignisse durch Schaltheandlungen oder durch atmosphärische Entladungen können aufgrund von nichtlinearen Übertragungsmechanismen der induktiven Spannungswandler nur unzureichend dargestellt werden [61869-103].

Aufgrund des verwendeten ferromagnetischen Kernmaterials besitzen diese über den Frequenzbereich mehrere Resonanzstellen, bei denen ein Amplituden- und Phasenfehler entsteht. Aus Abbildung 5-1 kann entnommen werden, dass mit steigender Nennspannung sich die erste Resonanzstelle des induktiven Spannungswandlers sich zu niedrigeren Frequenzen verschiebt [61869-103, MEY11]. Im Bereich der 50-Hz-Netzfrequenz besitzen die gezeigten Übertragungsfunktionen der induktiven Spannungswandler ein lineares Übertragungsverhalten.

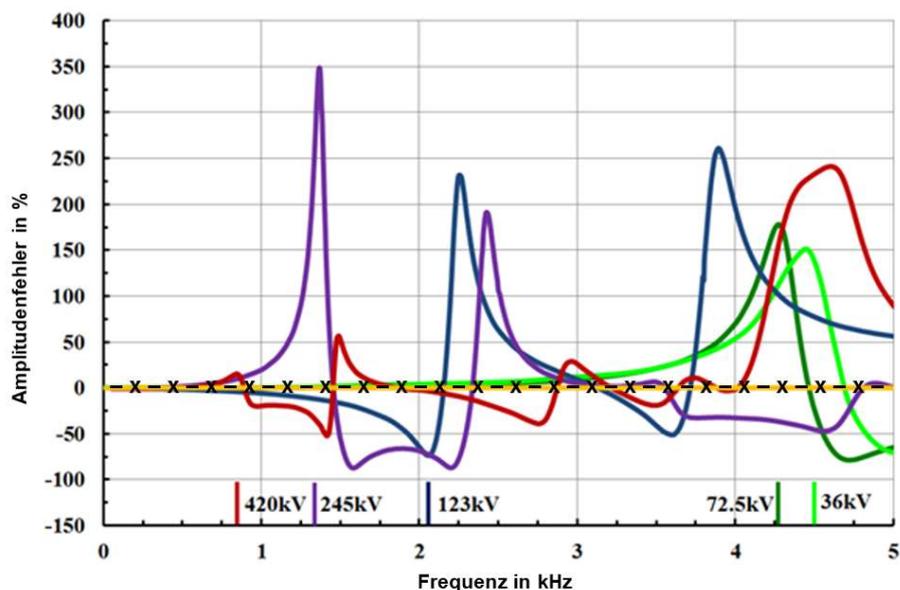


Abbildung 5-1: Übertragungsverhalten induktiver Messwandler bis 5 kHz und Vergleich mit dem RC-Teiler (Gemessen durch Pfiffner Messwandler AG). Amplitudenfehler in Prozent für einen induktiven 36-kV-, 72,5-kV-, 123-kV-, 245-kV-, 420-kV-Messwandler und des ohmsch-kapazitiven 420-kV-Spannungsteilers (- x -) [SPE13]

Aufgrund des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens von induktiven Spannungswandlern können die erfassten sekundärseitigen Spannungen im Frequenzbereich größer 50 Hz mehr oder weniger verfälscht sein. Wie aus Abbildung 5-1 entnommen werden kann, kann ein Amplitudenfehler von bis zu 350 % bei einem induktiven 245-kV-Spannungswandler auftreten.

Einsatz moderner ohmsch-kapazitiver Spannungsteiler:

Abbildung 5-2 zeigt den schematischen Aufbau (links) und die Installation (rechts) eines ohmsch-kapazitiven Spannungsteilers mit Anpassungsnetzwerk, Messleitungen und der Anschlussmöglichkeit von zwei Messgeräten. Aus dem schematischen Aufbau kann entnommen werden, dass die Punkte 1 bis 3 den Spannungsteiler samt Anschlussbox beschreiben. Die doppeltgeschirmten Messleitungen sind bei Möglichkeit im Kabelschacht eng zu verlegen (Minimierung der Fläche zwischen den Messleitungen) und sind am Messgerät mit geeigneter Bürde anzuschließen. Am ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler kann ein Oszilloskop (Bürde: $R = 1\text{ M}\Omega$, $C = 35\text{ pF}$) und ein Messgerät zur Erfassung der Spannungsqualität (Bürde: $R = 10\text{ M}\Omega$, $C = 2,2\text{ pF}$) angeschlossen werden.

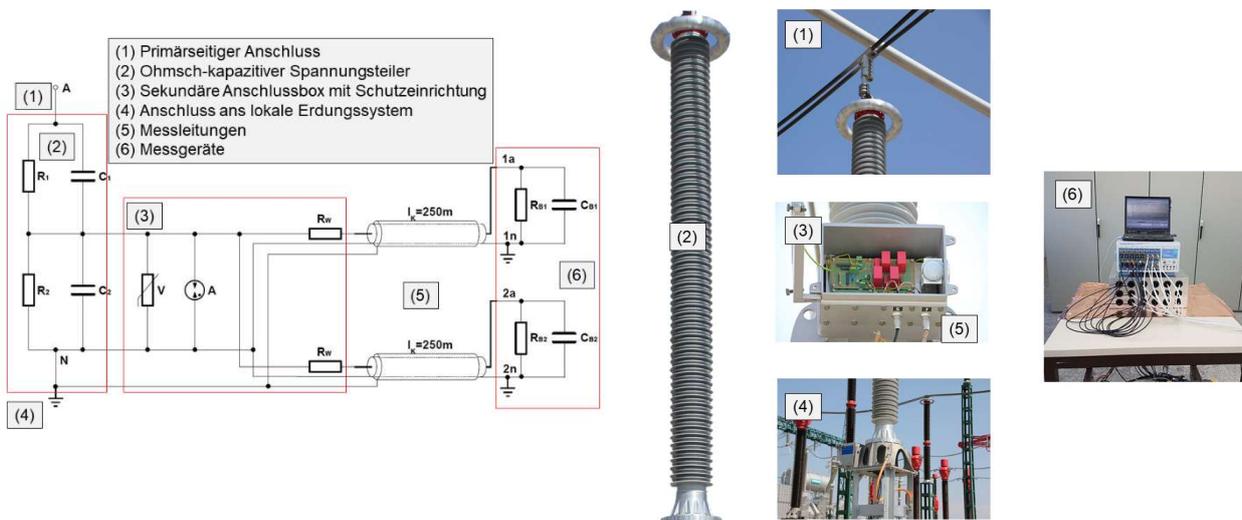


Abbildung 5-2: Schematischer Aufbau (links) und Installation (rechts) eines ohmsch-kapazitiven 400-kV-Spannungsteilers in einer Hochspannungsanlage

Bei einem ohmsch-kapazitiven 400-kV-Spannungsteiler liegt beispielhaft die Resonanzfrequenz bei ca. 1,83 MHz [SPE13] und bei einem 145-kV-Spannungsteiler im Bereich von ca. 2,07 MHz. Diese Resonanzfrequenz wird durch parasitäre Induktivitäten des Spannungsteilers (Größenordnung: μH -Bereich) bestimmt [SPE14].

Diese sind einerseits in der Lage die Betriebsspannung des Hochspannungsnetzes zu erfassen und andererseits die überlagerten transienten Spannungen bis hin zu einem Frequenzbereich von 2 MHz. Unter Betrachtung des gesamten Messsystems, kann durch das zusätzliche Verbindungsmaterial (Kabel und Leitungen), Klemmen und sekundäre Betriebsmittel der mittlere Frequenzgang bis 2 MHz beeinflusst werden. Das gesamte Verhalten des Spannungsteilers wird durch diejenigen Komponenten bestimmt, die verursachen, dass sich die obere Grenze des Frequenzganges von 400 kHz bis 2 MHz ändert [61869-103].

Abbildung 5-3 zeigt einen installierten ohmsch-kapazitiven 400-kV-Spannungsteiler in einer Hochspannungsanlage in unmittelbarer Nähe eines Transformators. Die Installation erfolgt über ein mobiles Untergestell, das mechanisch stabil gegenüber Windlast ist und selbstständig stehen kann. Primärseitig sind die ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler über kurze Seil- und Klemmverbindungen an die einzelnen Phasen angeschlossen.

In Abbildung 5-4 (links) ist die Messtechnik zur Erfassung transients Vorgänge dargestellt. Mit dem eingesetzten Messsystem (Computer mit Messgerät und Tastkopfsystem) können bis zu 16 ausgewählte Signalverläufe gleichzeitig digital aufgezeichnet werden und stehen anschließend für die Auswertung zur Verfügung. Das gesamte Messsystem wird für die Erfassung von transients Vorgängen auf einer großflächigen Erdungsplatte positioniert, die mehrfach an die Bezugserde angeschlossen ist (niederinduktiver Messaufbau). Kurze Erdungsverbindungen von der großflächigen Erdungsplatte zum lokalen Erdungssystem der Hochspannungsanlagen sind vorzusehen. Abbildung 5-4 (rechts) zeigt den internen Aufbau des Tastkopfsystems. Dieses System soll Potentialunterschiede zwischen den einzelnen Schirmen der Messleitungen minimieren und das Messgerät vor Einkopplungen schützen.



Abbildung 5-3: Installierter ohmsch-kapazitiver 400-kV-Spannungsteiler in einer Hochspannungsanlage nahe eines Transformators



Abbildung 5-4: Links: Messtechnik zur Erfassung von transienten Spannungen in Hochspannungsanlagen vor Ort
Rechts: Interner Aufbau des Tastkopfsystems

5.1.2 Erfassung transienter Spannungen in Hochspannungsanlagen

Abbildung 5-5 zeigt eine Anordnung eines Hochspannungsmesskreises zur Erfassung von transienten Spannungen vor Ort in einer Hochspannungsanlage. Der gezeigte Messkreis besteht im Wesentlichen aus den zwei Einheiten, die sich in einen Hochspannungsbereich (z. B.: Teil einer Hochspannungsanlage) und der Messtechnik (Erfassung transienter Signalverläufe) unterteilen.

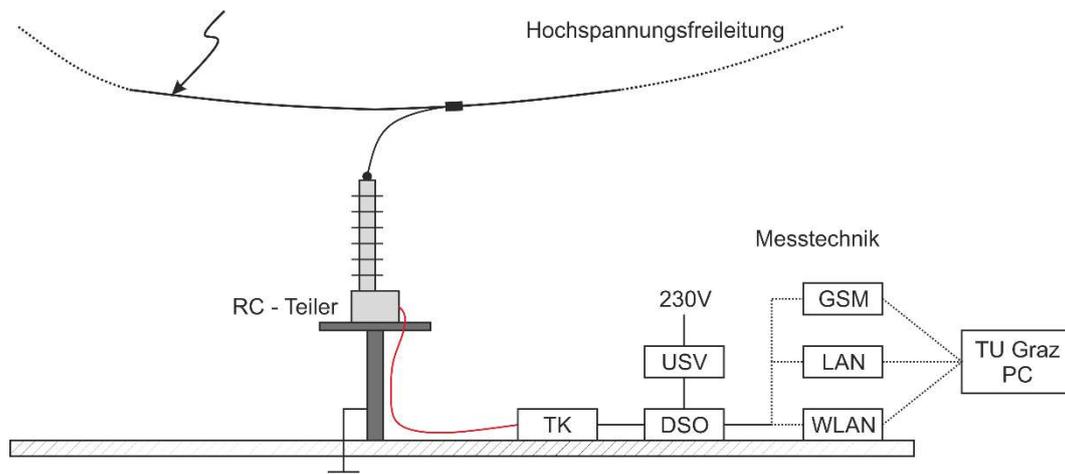


Abbildung 5-5: Anordnung eines Messkreises zur Erfassung transienter Spannungen im Hochspannungsnetz

Der prinzipielle Messaufbau für die Erfassung transienter Vorgänge besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

- Ohmsch-kapazitiver Spannungsteiler (RC-Teiler)
- Messleitungen mit geeigneter Länge (rot)
- Tastkopfsystem (TK) mit Hochpassfilter zur Identifizierung transienter Vorgänge
- Digitales Speicheroszilloskop (DSO) zur Aufzeichnung transienter Vorgänge

- Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)
- Fernzugriff (GSM, LAN oder WLAN) zur Parametrierung des Messgeräts (DSO) und zur Fernabfrage von Messdaten
- Datensichtung und Datenauswertung an lokalen Computern

Die zusätzlich installierten ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler sind in Hochspannungsanlagen samt der gesamten Messtechnik für einen längeren Zeitraum aufgebaut und können den vorherrschenden Witterungsbedingungen ausgesetzt werden. Die Kalibrierung des gesamten Messaufbaus erfolgt vor Ort in der Hochspannungsanlage.

Zur Identifizierung eines der Betriebsspannung überlagerten transienten Ereignisses wird ein Tastkopfsystem mit einer Hochpassfilterung verwendet. Dazu wird das Messsignal mit einer Grenzfrequenz von 3 kHz gefiltert und das gefilterte Signal dient zur Auslösung der Datenaufzeichnung auf einem digitalen Speicheroszilloskop. Durch die Sensitivität der Hochpassfilterung können überlagerte transiente Ereignisse eindeutig in der Betriebsspannung identifiziert werden.

Mit Hilfe des Fernzugriffs zum Messcomputer besteht die Möglichkeit die aufgezeichneten Ereignisse abzufragen und der Fernsteuerung des Messgeräts. Die Speichertiefe und die Abtastrate können an die jeweilige Situation angepasst werden. Die Qualität eines Hochspannungsmesskreises ist ein entscheidendes Kriterium für eine qualitative Erfassung der Betriebsspannung mit den überlagerten transienten Ereignissen.

Durch den Einsatz von modernen Spannungsteilern in Kombination mit geeigneten Messgeräten kann der allgemeine Zustand einer Hochspannungsanlage im transienten und stationären Bereich erfasst werden. Die installierte transiente Messtechnik (Spannungsteiler mit Messsystem) erfasst über einen längeren Zeitraum die auftretenden internen oder externen Beeinflussungen auf die stationäre Leiter-Erde-Spannung. Mit einer anschließenden Analyse, Auswertung und Bewertung der transienten Spannungen kann eine Aussage der transienten Beanspruchung für die vorhandenen elektrischen Betriebsmittel getroffen werden [PLE16, PLE18, SCH17, SCH18].

5.2 Messtechnische Aufzeichnungen in Hochspannungsanlagen

Zur messtechnischen Aufzeichnung von Kippschwingungen wurde in ausgewählten Hochspannungsanlagen mit Hilfe ohmsch-kapazitiven Spannungsteilern die Leiter-Erde-Spannung digital erfasst und bewertet [PLE13, PLE14a, PLE15, PLE17, WER15]. Aus den umfangreichen Datensätzen der messtechnischen Aufzeichnungen der einzelnen Hochspannungsanlagen wurden Fallbeispiele ausgewählt und analysiert. Tabelle 5-1 zeigt eine Übersicht, der durchgeführten messtechnischen Aufzeichnungen mit dem Einsatz von ohmsch-kapazitiven Spannungsteilern. Die Hochspannungsanlagen A bis C wurden bereits in Kapitel 4 numerisch untersucht.

Tabelle 5-1: Übersicht über die durchgeführten messtechnischen Aufzeichnungen mit dem Einsatz von ohmsch-kapazitiven Spannungsteilern in Hochspannungsanlagen

Hochspannungsanlage	Spannungsebene		
	110 kV	230 kV	400 kV
A	X		
B	X		X
C		X	

Für die Evaluierung wurden ohmsch-kapazitive Spannungsteiler in mehreren Hochspannungsanlagen eingebaut. Der Fokus der durchgeführten messtechnischen Aufzeichnungen bei den aufgelisteten Hochspannungsanlagen ist die Erfassung von Kippschwingungen bei der Durchführung von Schalthandlungen oder dem Auftreten von Fehlerfällen. Mit der Analyse der Leiter-Erde-Spannungen können die Auswirkungen von Schalthandlungen analysiert und bewertet werden. Die Spitzenwerte der höchsten Spannung für Betriebsmittel können aus [60071-1] entnommen werden und sind in Tabelle 4-1 angeführt. Die messtechnisch erfassten Leiter-Erde-Spannungen wurden zur Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Hochspannungsanlagen auf den Spitzenwert (\hat{u}) der höchsten Spannung für Betriebsmittel (U_m) laut [60071-1] bezogen.

Die messtechnische Erfassung der Leiter-Erde-Spannung von ausgewählten Knotenpunkten in Hochspannungsanlagen liefert Informationen über das transiente Verhalten. Daraus können charakteristische Kenngrößen abgeleitet und Randbedingungen (Schaltverhalten der Leistungsschaltern) für die einzelnen Anlagenstrukturen ermittelt werden. Mit den messtechnisch aufgezeichneten Leiter-Erde-Spannungen kann unter anderem die Qualität der numerischen Modellbildung verifiziert und bestätigt werden.

Die Einliniensaltbilder der Hochspannungsanlagen A bis C mit dem eingezeichneten Messknoten der ohmsch-kapazitiven 110-kV- und 400-kV-Spannungsteilern sind im 0 dargestellt. Die technischen Daten der ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler und das verwendete messtechnische Equipment sind in Anhang H und Anhang I angeführt. Die Installation der ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler samt Messtechnik erfolgte in den einzelnen Hochspannungsanlagen nach der Checkliste – siehe Anhang J.

5.3 Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen

Das Auftreten von Kippschwingungen kann in Hochspannungsanlagen nicht zur Gänze ausgeschlossen werden. Entweder kann es aufgrund von Sonderschaltzuständen, Schalthandlungen in Hochspannungsanlagen oder durch Fehlerfälle im Hochspannungsnetz zur Anregung eines schwingungsfähigen Systems kommen.

Aus Abbildung 5-6 ist zu entnehmen, dass beim primärseitigen Einschalten eines Transformators durch die Leistungsschalter sich zunächst ein stationärer Zustand einstellt. Nach der erfolgreichen

Einschaltung kommt es nach ca. 100 ms zur Ausbildung einer Kippschwingung. Der zeitliche Verlauf beim primärseitigen Einschalten zeigt, dass die drei Pole des Leistungsschalters zeitgleich zugeschaltet wurden und die wirksame Kapazität zu gering ist, um das Auftreten der stationären Kippschwingung zu vermeiden.

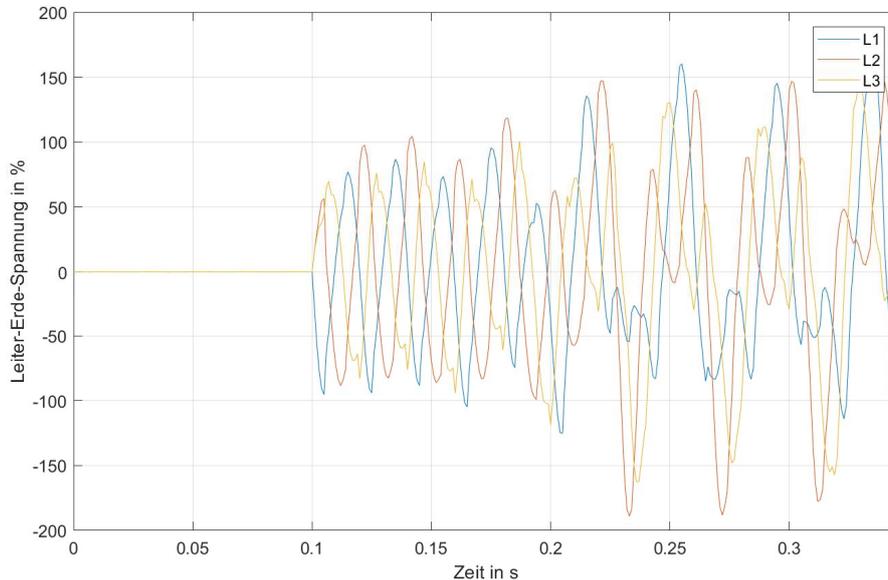


Abbildung 5-6: Aufgezeichnete Kippschwingung beim primärseitigen Bespannen eines Transformators in der 110-kV-Spannungsebene

Am gezeigten Beispiel ist zu erkennen, dass das Phänomen der Kippschwingung weiterhin in Hochspannungsanlagen vorhanden und primärseitiges Bespannen eines Transformators die wirkende Ursache für die Anregung sein kann. Neben der 50-Hz-Netzfrequenz konnte die zweite Subharmonische festgestellt werden. In Abhängigkeit der Anlagenstruktur, geplanter und ungeplanter Netzaktivitäten kann eine Resonanzbedingung zu Stande kommen und bei geeigneten Kapazitätsverhältnissen kann es zur Anregung einer Kippschwingung kommen.

5.4 Kippschwingungen in Anlagenstrukturen

5.4.1 Hochspannungsanlage A (400 / 110 / 30 kV)

Bei der gezeigten Hochspannungsanlage handelt es sich um eine Struktur, bei der Kippschwingungen beim primärseitigen Einschalten des 400-kV-/110-kV-Transformators durch die Leistungsschalter auftreten können. Für die qualitative Erfassung von Kippschwingungen wurden ohmsch-kapazitive 110-kV-Spannungsteiler nahe der Durchführung des Transformators in der Sekundärspannungsebene installiert – siehe Abbildung 5-7.



Abbildung 5-7: Installierte ohmsch-kapazitive 110-kV-Spannungsteiler an der Sekundärseite des Transformators zur Aufzeichnung von Kippschwingungen beim primärseitigen Einschalten des Transformators durch die Leistungsschalter (Hochspannungsanlage A)

Aus den messtechnischen Aufzeichnungen geht hervor, dass das Auftreten von Kippschwingungen an anlagenspezifische Randbedingungen gebunden ist. Für das Einschalten von Transformatoren werden die drei Phasen des Leistungsschalters mit Hilfe eines Zuschaltgeräts zeitlich versetzt geschaltet (gesteuertes Schalten). Die zeitliche Differenz zwischen dem ersten Spannungsmaximum einer Phase und den verbleibenden Phasen beträgt im vorliegenden Anwendungsfall ca. 5 ms

Für die messtechnische Aufzeichnung von Kippschwingungen wurden mehrere primärseitige Einschaltungen des Transformators durch die Leistungsschalter vorgenommen. Tabelle 5-2 zeigt die durchgeführten Schalthandlungen in Abhängigkeit der Sternpunktvergabe und bei aktiviertem und deaktiviertem Zuschaltgerät der Leistungsschalter.

Tabelle 5-2: Durchgeführte Schalthandlungen in der Hochspannungsanlage A in Abhängigkeit der Sternpunktbehandlung und des Zuschaltgeräts der Leistungsschalter

Schalthandlung	Sternpunkt 400-kV-Seite	Zuschaltgerät
Einschaltung 1	Nicht geerdet	Aktiviert
Einschaltung 2	Nicht geerdet	Aktiviert
Einschaltung 3	Geerdet	Deaktiviert
Einschaltung 4	Geerdet	Deaktiviert
Einschaltung 5	Geerdet	Deaktiviert

Einschaltung 1 und Einschaltung 2:

Bei der ersten und zweiten Einschaltung durch die 400-kV-Leistungsschalter war das Zuschaltgerät aktiviert und der Sternpunkt des Transformators nicht geerdet. Der Transformator wurde primärseitig bespannt (Zeitpunkt t_1) und sekundärseitig an die 110-kV-Sammelschiene durch die Leistungsschalter weitersgeschaltet (Zeitpunkt t_2) – siehe Abbildung 5-8. Es ist zu erkennen, dass bei aktivem Zuschaltgerät der Leistungsschalter keine Kippschwingungen an der Sekundärseite (110-kV-Spannungsebene) angeregt werden konnten.

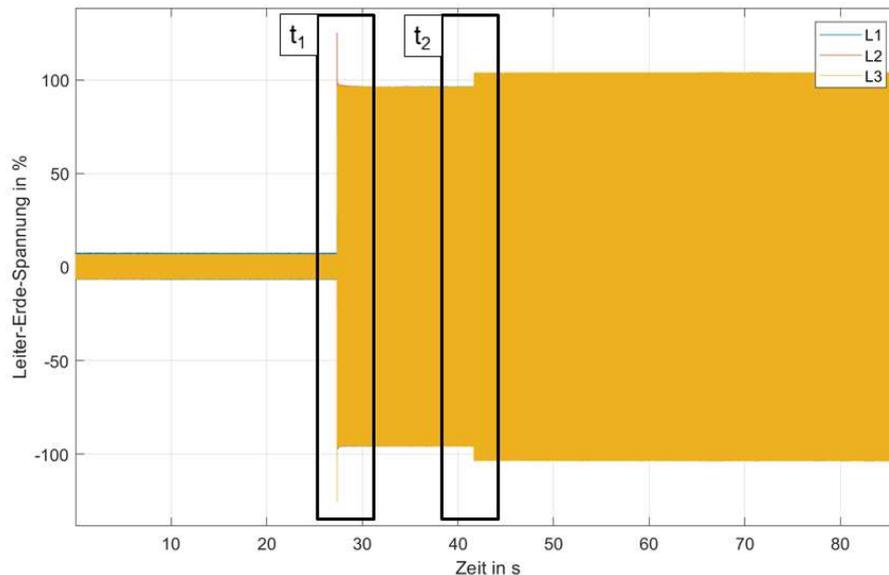


Abbildung 5-8: Einschaltung 1: Gemessene Leiter-Erde-Spannung beim primärseitigen gesteuertem Einschalten des Transformators durch die Leistungsschalter und sekundärseitigem Weiterschalten zur 110-kV-Spannungsebene (Hochspannungsanlage A)

Der Spitzenwert der Leiter-Erde-Spannung im Moment des Einschaltens der Leistungsschalter liegt in der Größenordnung von ca. 130 %. Der zeitliche Versatz zwischen der erstschließenden und letztschließenden Phase kann aus Abbildung 5-9 mit ca. 4,6 ms ermittelt werden.

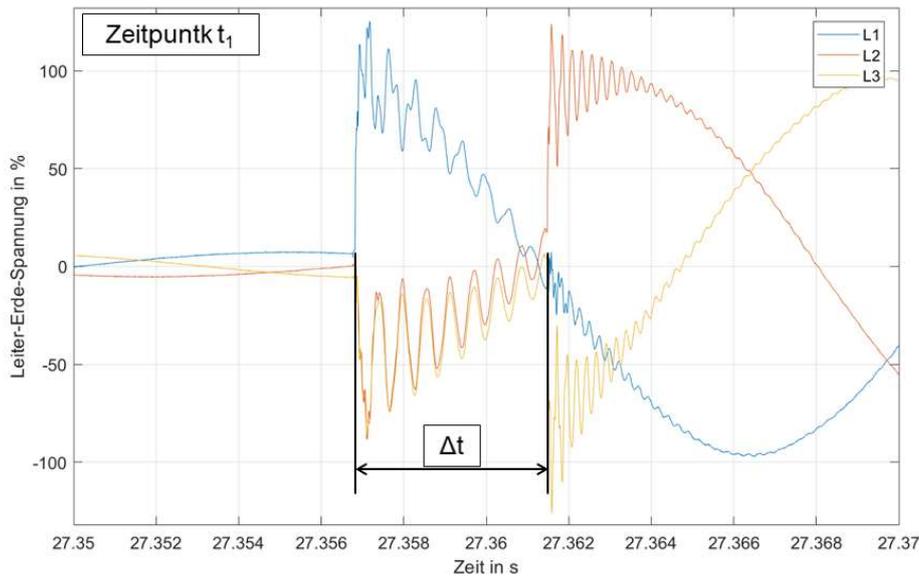


Abbildung 5-9: Leiter-Erde-Spannung beim gesteuerten Einschalten der Leistungsschalter mit einem zeitlichen Versatz von ca. 5 ms zwischen Phase L1 und den beiden Phase L2 und L3 (Hochspannungsanlage A)

Einschaltung 3:

Die dritte Einschaltung aus Abbildung 5-10 zeigt, dass es bei deaktiviertem Zuschaltgerät der Leistungsschalter möglich war, eine dreiphasige Kippschwingung in der 110-kV-Spannungsebene auszulösen. Der Transformatorsternpunkt war geerdet. Mit der Unterteilung des Einschaltvorgangs in drei zeitliche Bereiche können folgende Ergebnisse evaluiert werden. Beim primärseitigen Einschalten der 400-kV-Leistungsschalter (Zeitpunkt t_1) treten Spitzenwerte der Leiter-Erde-Spannung im Bereich von ca. 130 % auf (Phase L2 wurde nahe des Spannungsmaximums zugeschaltet). Anschließend zum Zeitpunkt t_1 folgt der Übergangsbereich (Zeitpunkt t_2) mit einer Zeitdauer von ca. 100 ms. Nach dem Übergangsbereich ist eine Kippschwingung aufgetreten (Zeitpunkt t_3). Zur 50-Hz-Nennspannung des Netzes hat sich eine 25-Hz-Schwingung überlagert. In diesem Bereich treten Spitzenwerte der Leiter-Erde-Spannung im Bereich von ca. 200 % auf.

Die Auswertung des Frequenzverhaltens zeigt, dass die 25-Hz-Komponente ein konstantes Verhalten mit einem Spitzenwert von ca. 80 % aufweist – siehe Abbildung 5-11. Der 50-Hz-Komponente mit einem Spitzenwert von ca. 90 % ist eine Frequenzkomponente von ca. 1,25 Hz überlagert. Die 1,25 Hz ergeben sich anhand der Verlagerung des Sternpunktes im System. Die Zeitdauer der stationären Kippschwingung umfasst für die Einschaltung 3 ca. neun Sekunden, bis der Transformator händisch vom Netz geschaltet wurde.

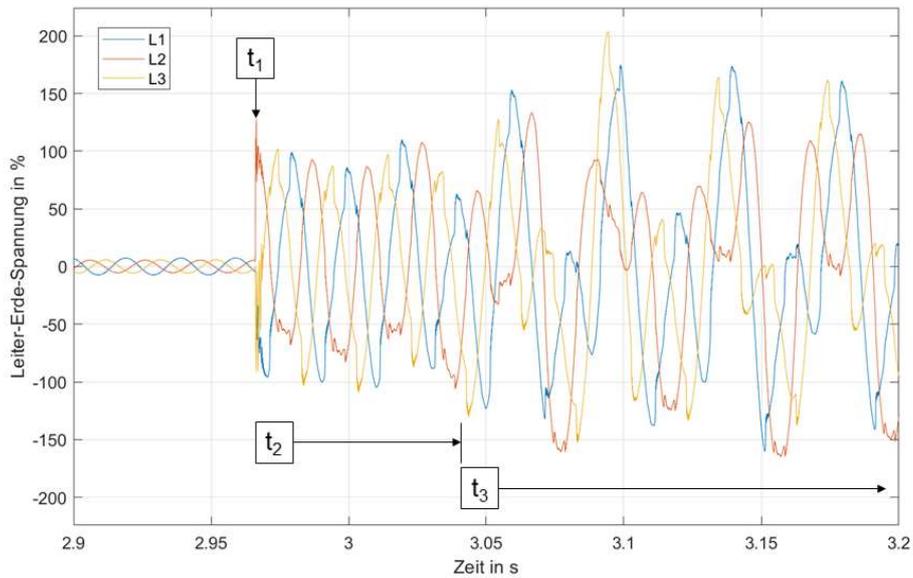


Abbildung 5-10: Einschaltung 3: Gemessene Leiter-Erde-Spannung durch die ohmsch-kapazitiven 110-kV-Spannungsteiler beim primärseitigem Einschalten des Transformators durch die Leistungsschalter (Hochspannungsanlage C)

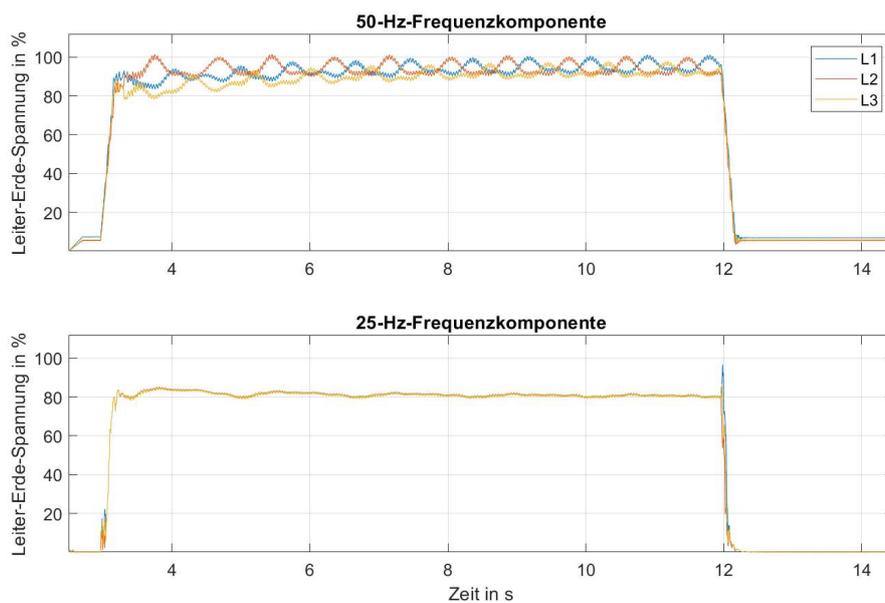


Abbildung 5-11: Frequenzverhalten der Leiter-Erde-Spannung über die Zeit für die 50-Hz-Netzfrequenz und der zweiten Subharmonischen (Hochspannungsanlage A)

Einschaltung 4:

Bei Einschaltung 4 war das Zuschaltgerät der Leistungsschalter deaktiviert und der Sternpunkt des Transformators geerdet. Beim ungesteuerten Einschalten der Leistungsschalter ist es zu keinem Auftreten einer Kippschwingung gekommen. Es erfolgt die Zuschaltung von Phase L2 nahe dem negativen Spannungsmaximum.

Einschaltung 5:

Wie schon bei Einschaltung 3 wurde ein ungesteuertes Einschalten der Leistungsschalter bei geerdeten Sternpunkt durchgeführt. Aus Abbildung 5-12 kann die gemessene Leiter-Erde-Spannung für Einschaltung 5 entnommen werden. Im Vergleich zur Einschaltung 3 ist der Übergangsbereich zur stationären Kippschwingung wesentlich kürzer. Aus der Analyse der Leiter-Erde-Spannungen des Einschaltmoments der Leistungsschalter ist zu entnehmen, dass Phase L2 nahe dem Spannungsmaximum zugeschaltet wurde.

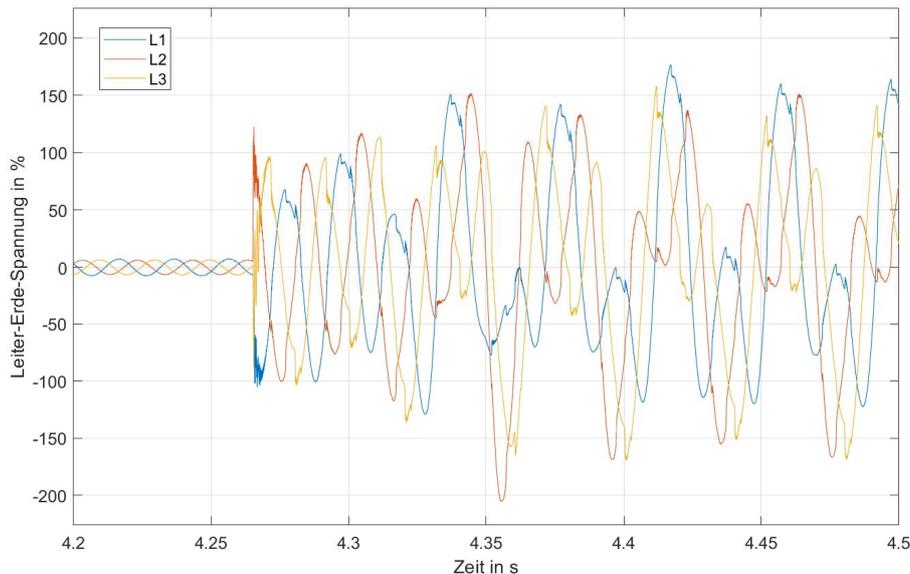


Abbildung 5-12: Einschaltung 5: Gemessene Leiter-Erde-Spannung durch die ohmsch-kapazitiven 110-kV-Spannungsteiler bei primärseitigen ungesteuertem Einschalten des Transformators durch die Leistungsschalter (Hochspannungsanlage A)

Bei den Einschaltungen 3, 4 und 5 können in Abhängigkeit vom Zuschaltaugenblick der Leistungsschalter stationäre Kippschwingungen angeregt werden.

5.4.2 Hochspannungsanlage B (400 / 110 / 30 kV)

Zur Untersuchung des spannungsebenenübergreifenden Verhaltens transientser Spannungen wurden ohmsch-kapazitive 110-kV- und 400-kV-Spannungsteiler in unmittelbarer Nähe eines 300-MVA-Transformators (400 / 115 / 30 kV) installiert. Anhand der durchgeführten messtechnischen Aufzeichnung kann das Verhalten von auftretenden transienten Ereignissen in den beiden Spannungsebenen erfasst und analysiert werden. Für die Auslösung einer Datenaufzeichnung und zur eindeutigen Erkennung von transienten Ereignissen wurde in den zwei Spannungsebenen jeweils Phase L1 als Triggersignal herangezogen. Dabei agieren die zwei Triggersignale unabhängig voneinander, wobei eine Aktion in einer Spannungsebene nicht zwangsläufig eine Beeinflussung bzw. einen Durchgriff zu einer weiteren Spannungsebene zur Folge haben muss.

Der Fokus der messtechnischen Aufzeichnung wurde auf die Erfassung von Kippschwingungen in der 110-kV-Spannungsebene des Transformators gelegt. Schalthandlungen und Fehlerereignisse konnten während des Messzeitraums detektiert werden. Die Auswertung und Analyse des Messdatensatzes hat gezeigt, dass diese Hochspannungsanlage gegenüber dem Auftreten von transienten und stationären Kippschwingungen nicht gefährdet ist.

Das Einschalten des Transformators Tr2 (siehe Abbildung 4-24) durch die Leistungsschalter erfolgte gesteuert mit geerdetem überspannungsseitigen Sternpunkt. Phase L1 wurde im Spannungsmaximum zugeschaltet während Phase L2 und L3 um ca. 5 ms verzögert zugeschaltet wurden. In dieser Hochspannungsanlage sind induktive Spannungswandler installiert, die mit dem numerischen Berechnungsmodell übereinstimmten. Die nichtlineare Magnetisierungskennlinie sowie das gesteuerte Einschalten der Leistungsschalter sind in diesem Fall das entscheidende Kriterium, dass keine Kippschwingungen aufgetreten sind.

Schalthandlung am Transformator – Primärseitiges Einschalten der Leistungsschalter:

Das primärseitige Einschalten des Transformators durch die 400-kV-Leistungsschalter ist in Abbildung 5-13 dargestellt. Die Analyse der gemessenen Leiter-Erde-Spannungen in der 110-kV-Spannungsebene des Transformators zeigt, dass erste Sättigungserscheinungen aufgetreten sind. Dies kann aus dem Verlauf der Leiter-Erde-Spannung erkannt werden. Durch das gesteuerte Einschalten des Transformators durch die Leistungsschalter (Phase L1 im Spannungsmaximum, Phase L2 und L3 um ca. 5 ms versetzt) konnten in Hochspannungsanlage B weder transiente noch stationäre Kippschwingungen in der 110-kV-Spannungsebene angeregt werden.

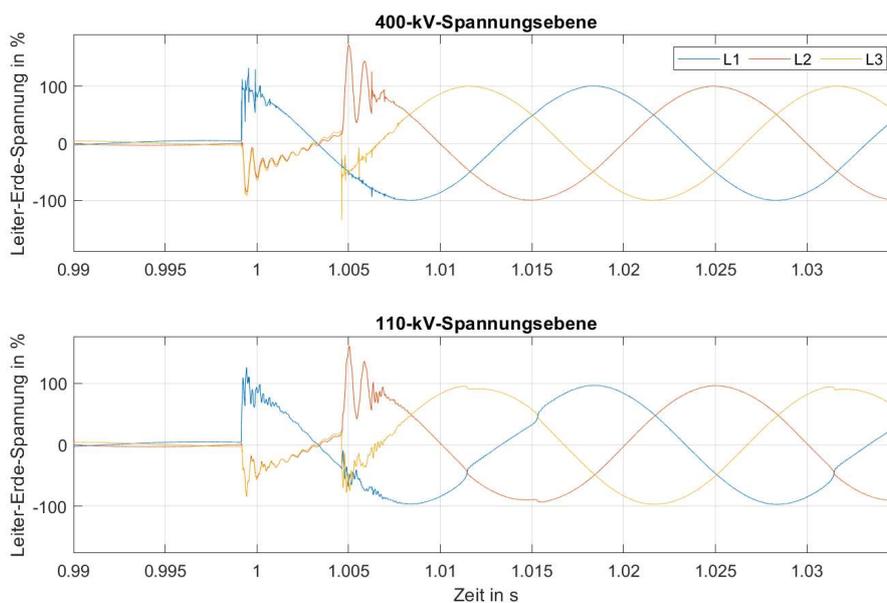


Abbildung 5-13: Gemessene Leiter-Erde-Spannung in den zwei Spannungsebenen beim primärseitigen gesteuertem Einschalten des Transformators geerdetem überspannungsseitigen Sternpunkt durch die Leistungsschalter (Hochspannungsanlage B)

Fehlerereignisse im Hochspannungsnetz:

Während des Messzeitraums konnten Fehlerereignisse mit Erdberührung im Hochspannungsnetz erfasst werden. Aufgrund der signifikanten Distanz zwischen Fehlerort und Messort konnten nicht signifikante Beeinflussungen der Leiter-Erde-Spannung ermittelt werden.

5.4.3 Hochspannungsanlage C (400 / 230 / 110 / 30 kV)

Die messtechnische Erfassung der transienten Spannung in Hochspannungsanlage C erfolgte mit Hilfe von ohmsch-kapazitiven 400-kV-Spannungsteilern, die im Abspannportal einer Hochspannungsfreileitung installiert wurden. Während des Messzeitraums wurde die Hochspannungsfreileitung mit einer Nennspannung von 230 kV anstatt mit der Nennspannung von 400 kV betrieben. Durch die verringerte Betriebsspannung konnte der induktive Spannungswandler nicht in Sättigung geraten, um in weiterer Folge eine Kippschwingung auslösen zu können.

Die Auswertung des vorhandenen Messdatensatzes hat keinen Hinweis auf das Auftreten von Kippschwingungen gezeigt.

5.5 Interpretation der messtechnischen Untersuchungen

In Hochspannungsanlagen sind induktive Spannungswandler für Mess-, Schutz- und Verrechnungszwecke installiert. Durch deren Einsatz zeigt sich, dass aufgrund der nichtlinearen Übertragungsmechanismen von induktiven Spannungswandlern einerseits die Spitzenwerte und andererseits das zeitliche Verhalten der Leiter-Erde-Spannung bei höher frequenten transienten Ereignissen nur unzureichend genau abgebildet werden können. Aufgrund dieser Basis können transiente Spannungen bei Schalthandlungen und Fehlerereignissen nicht in hoher Qualität erfasst werden.

Abhilfe schafft der Einsatz von ohmsch-kapazitiven Spannungsteilern mit geeigneter transienter Messtechnik. Die Spannungsteiler wurden in mehreren Anlagenstrukturen zur Erfassung der Leiter-Erde-Spannung über längere Zeiträume installiert. Der wesentliche Unterschied zwischen den induktiven Spannungswandlern und den Spannungsteilern mit der eingesetzten Messtechnik ist, dass diese in der Lage sind ein eindeutiges Abbild der zu messenden Spannung zu erzeugen. Mit dem Einsatz der ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler kann ein tieferer Einblick über die tatsächlich vor Ort herrschenden transienten Beeinflussungen erfolgen. Die Auswertung der erfassten transienten Spannungen umfasste die Bewertung der aufgetretenen Spitzenwerte, den Frequenzbereichen und der transienten Beanspruchungsdauer.

Die durchgeführten messtechnischen Aufzeichnungen in ausgewählten Anlagenstrukturen zeigten, dass das Auftreten von Kippschwingungen nicht vollständig ausgeschlossen werden kann und an gewisse Randbedingungen gebunden ist.

In Hochspannungsanlage A erfolgten mehrere Einschaltungen der 400-kV-Leistungsschalter, um Kippschwingungen in der 110-kV-Spannungsebene zu identifizieren. Bei aktivem Zuschaltgerät der Leistungsschalter und nicht geerdetem Sternpunkt konnten keine Kippschwingungen ausgelöst werden. Mit der Deaktivierung des Zuschaltgeräts der Leistungsschalter konnten stationäre Kippschwingungen angeregt werden. Die drei Leistungsschalter haben zeitgleich den Befehl für das Einschalten bekommen (Phase L2 wurde Nahe dem Spannungsmaximum zugeschaltet). Dadurch war es möglich, stationäre Kippschwingungen auszulösen. Neben der 50-Hz-Frequenzkomponente konnte die zweite Subharmonische Kippschwingung mit einer Frequenz von 25 Hz evaluiert werden. Der Spitzenwert der Leiter-Erde-Spannung der zweiten subharmonischen Kippschwingung war in der Größenordnung von ca. 80 %. Aus dem messtechnisch aufgezeichneten Leiter-Erde-Spannungen geht hervor, dass die nichtlineare Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler von der Magnetisierungskennlinie aus den numerischen Berechnungen abweichen. Magnetisierungskennlinie 4 kann aus den Ergebnissen der numerischen Berechnung für diese Hochspannungsanlage ausgeschlossen werden. Hätte der induktive Spannungswandler diesen Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie gehabt, wäre das Auftreten von stationären Kippschwingungen vermieden worden. Somit kann ein nichtlinearer Verlauf der Magnetisierungskennlinie 2 oder 3 in Frage kommen (siehe Abbildung 4-3).

Durch die messtechnische Untersuchung von Hochspannungsanlage B konnten beim primärseitigen Einschalten des Transformators weder transiente noch stationäre Kippschwingungen identifiziert werden. Aus dem Verlauf der Leiter-Erde-Spannung konnten Sättigungserscheinungen in der 110-kV-Spannungsebene erkannt werden. Dies kann durch das gesteuerte Einschalten der Leistungsschalter und durch den induktiven Spannungswandler begründet werden. In dieser Hochspannungsanlage waren induktive 110-kV-Spannungswandler installiert, die eine Magnetisierungskennlinie besaßen haben, welche mit den numerischen Berechnungen übereingestimmt hat.

Wesentlich ist, dass die induktiven Spannungswandler derart ausgelegt sein sollen, dass das Risiko für das Auftreten von Kippschwingungen vermindert werden kann. Sind Hochspannungsanlagen mit den installierten induktiven Spannungswandlern kippschwingungsfrei und erfolgt ein Austausch der Wandler, sollten Untersuchungen gegenüber dem Auftreten von Kippschwingungen durchgeführt werden. Der Fokus liegt in diesem Fall auf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler.

Die durchgeführten Langzeitmessungen in Hochspannungsanlagen und die Analyse der transient aufgezeichneten Leiter-Erde-Spannungen haben gezeigt, dass es zu keiner erhöhten Kippschwingungsgefährdung gekommen ist.

Die messtechnischen Aufzeichnungen der Leiter-Erde-Spannung in den Hochspannungsanlagen haben gezeigt, dass die ausgewerteten Spitzenwerte unterhalb der normativ vorgesehenen Isolationspegel liegen [60071-1]. Ein stabiler und sicherer Betrieb der untersuchten Hochspannungsanlagen ist gewährleistet.

Mit dem Einsatz von ohmsch-kapazitiven Spannungsteilern kann die Leiter-Erde-Spannung über einen definierten Frequenzbereich erfasst werden. Diese Aufzeichnungen ermöglichen damit auch eine Analyse und Interpretation von höherfrequenten Vorgängen im Hochspannungsnetz.

6 VERGLEICH DER NUMERISCHEN BERECHNUNGEN UND DER MESSTECHNISCHEN ERFASSUNG

6.1 Allgemeines

Die durchgeführten Untersuchungen in ausgewählten Anlagenstrukturen umfassten die numerische Modellbildung, die Berechnung und die messtechnische Erfassung der Leiter-Erde-Spannungen. Für die numerische Berechnung wurden dreiphasige Modelle im transienten Berechnungsprogramm EMTP-RV (Version 4.0) erstellt, auf Plausibilität geprüft und mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen wurde das Auftreten von transienten und stationären Kippschwingungen untersucht. Zur numerischen Modellbildung der einzelnen Komponenten wurden die technischen Daten der Anlagenbetreiber herangezogen oder die internationale Literatur verwendet.

Schalthandlungen in Hochspannungsanlagen sind bewusst getätigte Aktionen und führen transiente Überspannungen mit sich. Zu diesen Aktionen zählen allgemein Schalthandlungen an Transformatoren, Netzumschalten, Schalten von Kompensationsdrosselpulen und Schalthandlungen an Abgangsfeldern. Kommt es zur Anregung eines vorhandenen schwingungsfähigen Systems, bestehend aus den induktiven und kapazitiven Netzkomponenten, können stationäre oder transiente Kippschwingungen auftreten. Diese Schwingungen überlagern sich der Betriebsspannung und führen zu einer Beeinflussung des Betriebsverhaltens der Betriebsmittel oder können diese in ungünstigen Fällen beschädigen. In weiterer Folge kann die Anlagenzuverlässigkeit, die Netzsicherheit und die Netzstabilität beeinflusst werden.

Zur Analyse und Bewertung von Kippschwingungen wurden aus den numerisch berechneten Leiter-Erde-Spannungen die globalen positiven und negativen Spitzenwerte, die Schwingungsfähigkeit des Knotenpunktes der induktiven Spannungswandler und das Frequenzverhalten in Abhängigkeit der durchgeführten Sensitivitätsanalyse miteinander verglichen. Die Berechnungsergebnisse liefern für den Knotenpunkt des induktiven Spannungswandlers einen Fingerabdruck, der sich aus den technischen Daten der Hochspannungsanlage ergibt. Sind in Hochspannungsanlagen baugleich induktive Spannungswandler installiert, kann dieser Fingerabdruck für weitere Hochspannungsanlagen genutzt werden, um eine Aussage über das Auftreten von Kippschwingungen treffen zu können.

Die Auswertung der messtechnisch aufgezeichneten transienten Leiter-Erde-Spannungen umfasste die Bewertung der aufgetretenen Spitzenwerte, den Frequenzbereichen und der transienten Beanspruchungsdauer. Die drei genannten Parameter können herangezogen werden, um die Qualität der numerischen Berechnungsmodelle zu bestätigen.

Basierend auf der Qualität der numerischen Modelle wurden mit Hilfe von mathematischen Programmen Sensitivitätsanalysen durchgeführt, der numerische Berechnungsablauf gesteuert und die charakteristischen Parameter ausgewertet, gegenübergestellt und anschließend bewertet. Aus den numerisch berechneten Leiter-Erde-Spannungen konnten zur Interpretation abgeleitete Kenngrößen evaluiert werden, um eine Aussage über das Kippschwingungspotential eines Knotenpunktes einer Hochspannungsanlage zu erhalten.

6.2 Fingerabdruck

Mit der numerischen Modellbildung, der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse und der Auswertung, Interpretation und Bewertung der numerischen Berechnungsergebnisse kann ein eindeutiger Fingerabdruck eines Knotenpunktes einer Hochspannungsanlage erstellt und dieser zugeordnet werden. Dieser ist eindeutig, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind und in Hochspannungsanlagen induktive Spannungswandler mit gleicher Magnetisierungskennlinie eingebaut sind. Zur Ermittlung eines Fingerabdruckes sind die technischen Parameter der Hochspannungsanlage, der kapazitiven Verhältnisse und die technischen Daten der induktiven Spannungswandler notwendig. Die technischen Parameter einer Hochspannungsanlage sind:

- Prüfprotokolle der Transformatoren mit den Informationen von Leerlauf- und Kurzschlussversuch aus denen sich das numerische Berechnungsmodell erstellen lässt
- Leiter-Erde-Kapazitäten der Transformatordurchführungen
- Elektrische und geometrische Informationen über Sammelschienen, Transformator- und Abgangsfelder zur Berechnung eines gekoppelten Netzwerks
- Funktionsweise der Leistungsschalter (gesteuertes oder ungesteuertes Schalten)
- Größe der Steuerkapazität der Leistungsschalter

Die technischen Parameter der induktiven Spannungswandler sind:

- Elektrischen Daten der induktiven Spannungswandler
- Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie
- Größe des Eisenverlustwiderstandes
- Leiter-Erde-Kapazität induktiver Spannungswandler

Ist ein Fingerabdruck eines Knotenpunktes einer numerisch berechneten Hochspannungsanlage vorhanden, kann dieser für weitere Hochspannungsanlagen genutzt werden, sofern der gleiche Spannungswandler Typ eingesetzt wurde. Das entscheidende Kriterium zur Ermittlung des Auftretens von Kippschwingungen ist der Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler. Sind in Hochspannungsanlagen baugleiche induktive Spannungswandler in-

stalliert und die nichtlinearen Magnetisierungskennlinien ident, kann in Abhängigkeit der vorliegenden Kapazitätsverhältnisse eine Aussage über das Kippschwingungspotential getroffen werden. Der Verlauf der Magnetisierungskennlinie ist in diesem Fall das entscheidende Kriterium. Weichen jedoch die Kennlinien voneinander ab, sind weitere numerische Berechnungen mit der entsprechenden Magnetisierungskennlinie durchzuführen, um das Auftreten von Kippschwingungen abschätzen zu können.

Für den Umkehrschluss ob eine weitere Hochspannungsanlage zu Kippschwingungen neigt, sind folgende Daten und Informationen heranzuziehen:

- Sind die technischen Daten der Transformatoren vergleichbar (Leistungsklasse, Spannungsebenen, ...)
- Kapazität der Transformatordurchführung
- Kapazität des Transformatorfeldes zwischen der Durchführung des Transformators bis zum Leistungsschalter (Berechnung eines gekoppelten Netzwerkes)
- Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinien der induktiven Spannungswandler
- Eisen- und Hystereseverluste der induktiven Spannungswandler
- Kapazität der induktiven Spannungswandler gegen Erde
- Funktionsweise der Leistungsschalter

Mit der Berechnung der sekundärseitigen Anlagenkapazität des Transformators bestehend aus der Kapazität der Transformatordurchführung, der Kapazität des Transformatorfeldes und der Leiter-Erde-Kapazität der induktiven Wandler kann eine Abschätzung getroffen werden, ob in einer Hochspannungsanlage Kippschwingungen angeregt werden können.

6.3 Anlagenstrukturen im Hochspannungsnetz

6.3.1 Hochspannungsanlage A (400 / 110 / 30 kV)

Hochspannungsanlage A kennzeichnete sich durch das Auftreten von Kippschwingungen bei der Durchführung von Schalthandlungen der 400-kV-Leistungsschalter aus. Die wesentlichen Randbedingungen für die numerische Berechnung von Kippschwingungen in der Hochspannungsanlage waren die wirksame Kapazität des Transformatorfeldes und das Schaltverhalten der Leistungsschalter (gesteuert oder ungesteuert). Zur Untersuchung des Auftretens von Kippschwingungen wurden, bei gleichbleibenden numerischen Randbedingungen, die fünf bereits dargestellten Magnetisierungskennlinien der induktiven 110-kV-Spannungswandler verwendet. Bei den numerischen Berechnungen mit der Sensitivitätsanalyse der wirksamen Kapazität wurden signifikante Unterschiede bei den verwendeten Magnetisierungskennlinien festgestellt (siehe Kapitel 4.2.1). Bei drei der fünf

verwendeten Magnetisierungskennlinien ist es zu stationären Kippschwingungen bis hin zu signifikant hohen Kapazitätswerten gekommen.

Mit den ohmsch-kapazitiven Spannungsteilern wurden bei der messtechnischen Erfassung der Leiter-Erde-Spannung Kippschwingungen aufgezeichnet. Beim Einsatz von ohmsch-kapazitiven 110-kV-Spannungsteilern ist für die messtechnische Erfassung von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen darauf zu achten, dass durch die zusätzlich eingebrachte Kapazität es zu einer Veränderung der wirksamen Kapazität kommen kann. Durch numerische Berechnungen unter Berücksichtigung des Modells des ohmsch-kapazitiven Spannungsteilers konnte das Auftreten von Kippschwingungen in der Hochspannungsanlage nicht beeinflusst werden.

Bei der Messung vor Ort konnten in Abhängigkeit vom Zuschaltaugenblick der Leistungsschalter stationäre Kippschwingungen angeregt werden. Es konnte in der 110-kV-Spannungsebene des Transformators die zweite Subharmonische Kippschwingung (25 Hz), die sich der Betriebsspannung (50 Hz) überlagert, bestätigt werden. Beim gesteuerten Einschalten der Leistungsschalter konnten keine Kippschwingungen detektiert werden.

Die sekundärseitige grundlegende Anlagenkapazität der Hochspannungsanlage A setzt sich aus der Kapazität der Transformatordurchführung und der Kapazität des Transformatorfeldes zusammen. Die zusätzlich eingebrachte Kapazität setzt sich aus der Erdkapazität der induktiven Wandler und den weiteren vorhandenen Komponenten zusammen. Mit den numerischen Berechnungen und der durchgeführten messtechnischen Aufzeichnung zeigte sich, dass die wirksame Kapazität der Hochspannungsanlage zu gering war, um das Auftreten von Kippschwingungen zu vermeiden.

Der Vergleich der numerisch berechneten und der messtechnisch aufgezeichneten Leiter-Erde-Spannungen ist in Abbildung 6-1 und in Abbildung 6-2 dargestellt (Phase L1). Aus den Berechnungsergebnissen der verwendeten Magnetisierungskennlinien wurden jene mit der wirksamen Kapazität von $C = 1,7 \text{ nF}$ ausgewählt. Diese Kapazität entspricht jener eines induktiven 110-kV-Kombiwandlers. Die Interpretation der Ergebnisse ist wie folgt:

- Magnetisierungskennlinie 1: Es gibt keine Übereinstimmung der Leiter-Erde-Spannungen zwischen der numerischen Berechnung und der Messung vor Ort.
- Magnetisierungskennlinie 2: Eine Übereinstimmung im Schwingungsverhalten der Leiter-Erde-Spannung ist zu erkennen. Der nichtlineare Verlauf der Magnetisierungskennlinie des induktiven Spannungswandlers mit der wirksamen Kapazität und das verwendete numerische Berechnungsmodell zeigen eine Übereinstimmung des Verlaufs der Leiter-Erde-Spannung im gesättigten Bereich. Mit dem Vergleich kann angenommen werden, dass der vor Ort installierte induktive Spannungswandler im gesättigten Bereich denselben Verlauf der Magnetisierungskennlinie aufgewiesen hat. Durch gesteuertes Einschalten der Leistungsschalter

kann das Auftreten von Kippschwingungen vermieden werden. Eine zusätzliche eingebrachte Kapazität kann als mögliche Option angedacht werden, um eine Verschiebung in den unkritischen Kapazitätsbereich zu erreichen, sodass transiente und stationäre Kippschwingungen vermieden werden.

- Magnetisierungskennlinie 3: Der Vergleich zwischen den numerisch berechneten und den messtechnisch aufgezeichneten Leiter-Erde-Spannungen zeigen eine gute Korrelation. Das Auftreten von Kippschwingungen könnte durch eine zusätzlich eingebrachte wirksame Kapazität oder durch gesteuertes Schalten vermieden werden.
- Magnetisierungskennlinie 4: Mit dieser nichtlinearen Magnetisierungskennlinie sind in den numerischen Berechnungen keine Kippschwingungen aufgetreten. Da jedoch Kippschwingungen aufgetreten sind, kann diese Kennlinie für die messtechnisch vor Ort erfassten Kippschwingungsvorgänge ausgeschlossen werden. Es ist zu vermuten, dass, wenn ein induktiver Spannungswandler mit dieser Magnetisierungskennlinie in der Hochspannungsanlage installiert gewesen wäre, keine Kippschwingungen zu Stande gekommen wären.
- Magnetisierungskennlinie 5: Diese Magnetisierungskennlinie gehört zu einem bauähnlichen Spannungswandler, der in Hochspannungsanlage A installiert ist. Der Vergleich der numerisch berechneten und der messtechnisch erfassten Leiter-Erde-Spannungen zeigen eine gute Übereinstimmung im stationären Bereich der Kippschwingungen.

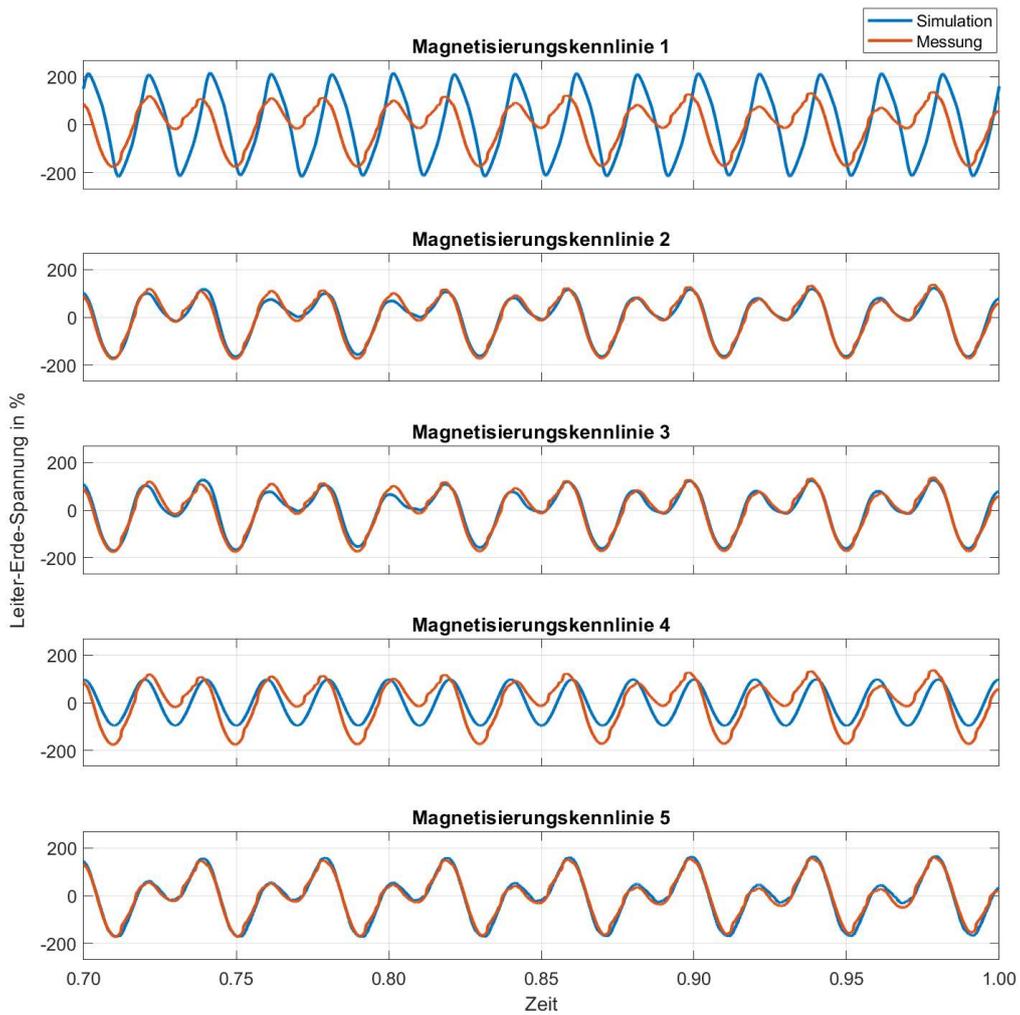


Abbildung 6-1: Vergleich der numerischen Berechnungsergebnisse mit der messtechnischen Aufzeichnung (Messung 3)

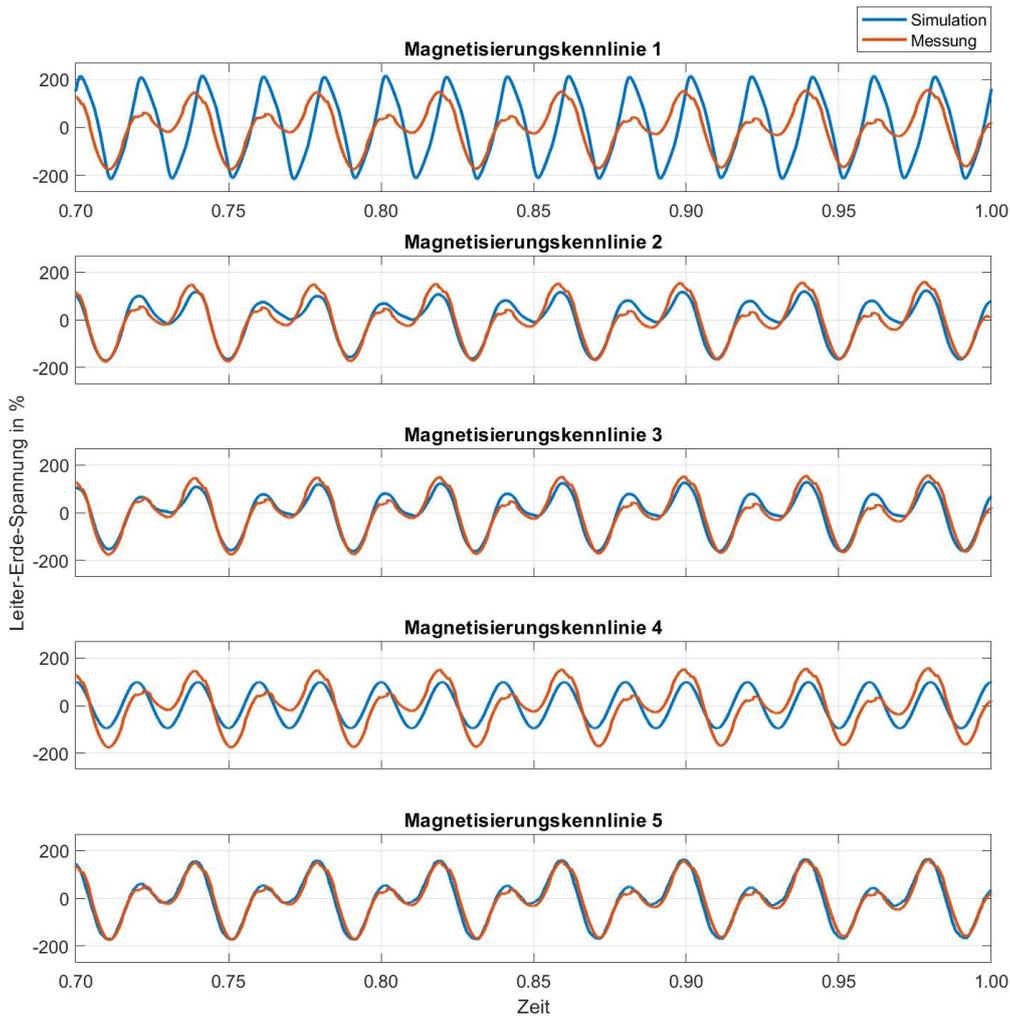


Abbildung 6-2: Vergleich der numerischen Berechnungsergebnisse mit der messtechnischen Aufzeichnung (Messung 5)

Ein Vergleich des Einschwingverhaltens der numerisch berechneten Leiter-Erde-Spannung unter Verwendung von Magnetisierungskennlinie 5 und der messtechnisch aufgezeichneten Leiter-Erde-Spannung kann aus Abbildung 6-3 entnommen werden. Im Zeitbereich von ca. 0,1 s bis ca. 0,18 ms ist eine gute Übereinstimmung vorhanden. Anschließend weichen die numerisch berechneten Leiter-Erde-Spannungen von den messtechnisch aufgezeichneten ab. Aus dem zur Verfügung gestellten Prüfprotokoll sind keine Informationen über die primär- und sekundärseitigen Wicklungswiderstände und Streuinduktivitäten vorhanden. Sind diese Informationen verfügbar, üben diese einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Leiter-Erde-Spannung im Fall von anregenden Kippschwingungen aus. Die numerischen Berechnungsmodelle für die Untersuchung von transienten und stationären Kippschwingungen reagieren sensibel auf kleinste Änderungen der elektrischen Parameter.

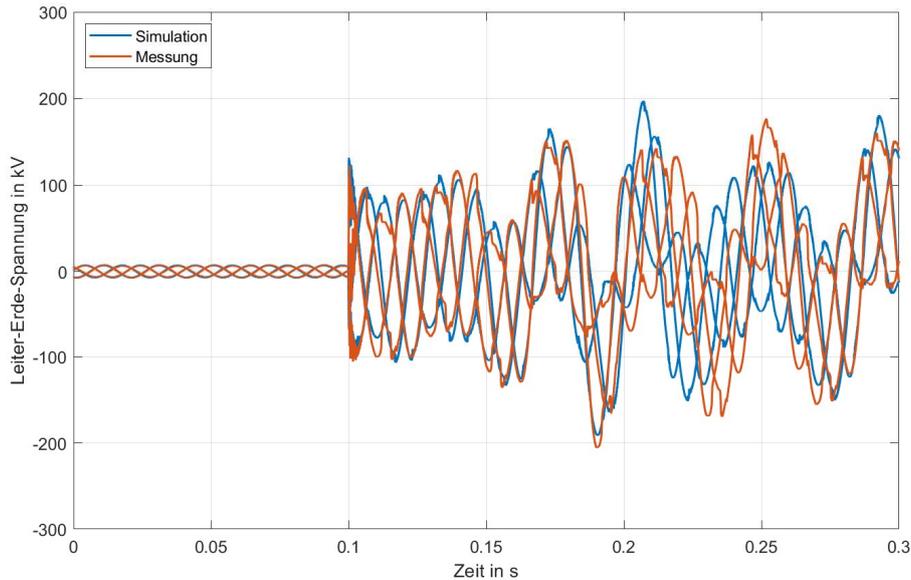


Abbildung 6-3: Vergleich der numerisch berechneten mit der messtechnisch vor Ort aufgezeichneten Leiter-Erde-Spannungen (Magnetisierungskennlinie 5, Messung 5)

Bei den numerischen Berechnungen erfolgte eine zeitdiskrete Vergrößerung des Zuschaltaugenblicks der Leistungsschalter von Phase L2 und L3 zu Phase L1 (Einschaltung im Spannungsmaximum) und eine Variation der Magnetisierungskennlinien 1 bis 4. Als wirksame Kapazität wurde die Erdkapazität des induktiven Spannungswandlers mit $C = 1,7 \text{ nF}$ verwendet. Es konnte ein zeitlicher Versatz der einzelnen Pole der Leistungsschalter von ca. 3,2 ms bis ca. 8,0 ms evaluiert werden, in dem keine transienten oder stationären Kippschwingungen aufgetreten sind. Bei der messtechnischen Erfassung vor Ort konnten beim gesteuerten Einschalten keine stationären Kippschwingungen angeregt werden. Nur für den Fall des ungesteuerten Einschaltens konnten stationäre Kippschwingungen angeregt werden. Das gesteuerte Einschalten der Leistungsschalter kann in diesem Fall als wirksame Maßnahme gegenüber dem Auftreten von transienten und stationären Kippschwingungen angewendet werden.

Wenn in einer Hochspannungsanlage ein induktiver Spannungswandler mit einer Kennlinie installiert wäre, die gleich der Magnetisierungskennlinie 4 ist, so können keine Kippschwingungen auftreten. Wenn ein Austausch des induktiven Spannungswandlers erfolgt, so sind in erster Linie die technischen Daten zu vergleichen. Bei identischen technischen Parametern und Verlauf der Magnetisierungskennlinie kann davon ausgegangen werden, dass Kippschwingungen nicht auftreten können. Sind Abweichungen im linearen oder gesättigten Bereich der Magnetisierungskennlinie vorhanden, so ist zu überprüfen ob Kippschwingungen auftreten können.

Mit den Informationen aus Hochspannungsanlage A und dem erhaltenen Fingerabdruck bei Verwendung der Magnetisierungskennlinie des am Knotenpunkt eingesetzten induktiven 110-kV-Span-

nungswandlers konnte gezeigt werden, dass dieser Fingerabdruck für weitere Hochspannungsanlagen genutzt werden kann. Mit diesen Informationen kann eine Aussage für das Auftreten von Kippschwingungen bei vergleichbaren Anlagenanordnungen getroffen werden.

6.3.2 Hochspannungsanlage B (400 / 110 / 30 kV)

Mit Kenntnis des Fingerabdruckes von Hochspannungsanlage A konnte für Hochspannungsanlage B mit der sekundärseitigen Anlagenkapazität eine Kippschwingungsgefährdung bei ungesteuertem Einschalten identifiziert werden. Der Fingerabdruck kann angewendet werden, wenn in beiden Hochspannungsanlagen gleiche induktive Spannungswandler eingesetzt werden. Die Anlagenkapazität war in diesem Fall kleiner als die wirksame Kapazität zur Vermeidung von stationären Kippschwingungen.

Mit Hilfe des numerischen Berechnungsmodells konnten in Abhängigkeit der Magnetisierungskennlinie kippschwingungsgefährdete Zustände identifiziert werden. Die numerischen Berechnungen zeigen, dass beim gesteuerten Einschalten und fehlendem Sternpunkt am Transformator sich in erster Linie ein stationärer Zustand der Leiter-Erde-Spannung einstellt. Es kommt jedoch zu einer verzögerten Ausbildung einer stationären Kippschwingung. Diese kommt dadurch zustande, dass zwei von drei Spannungswandler in Sättigung geraten und aufgrund der kapazitiven Koppelmechanismen anschließend eine dreiphasige Kippschwingung auslösen.

Mit der berechneten sekundärseitigen Anlagenkapazität konnte gezeigt werden, dass beim primärseitigen ungesteuerten Einschalten der Leistungsschalter Kippschwingungen aufgetreten sind. Diese können jedoch beim gesteuerten Einschalten vermieden werden, wenn der Transformatorsternpunkt geerdet ist.

Bei Verwendung einer tatsächlichen Magnetisierungskennlinie treten bei den numerischen Berechnungen transiente Kippschwingungen in der Hochspannungsanlage auf. Diese bedämpfen sich selbstständig und die Ausbildung einer stationären Kippschwingung konnte nicht festgestellt werden. Kippschwingungen sind aufgetreten, wenn beim einschaltenden Transformator der Sternpunkt nicht geerdet war.

Bei der messtechnischen Erfassung der Leiter-Erde-Spannung vor Ort konnten beim Einschalten der 400-kV-Leistungsschalter keine transienten und stationären Kippschwingungen festgestellt werden. Das Einschalten der 400-kV-Leistungsschalter erfolgte im vorliegenden Fall gesteuert (Phase L1 im Spannungsmaximum).

Der Vergleich der numerisch berechneten und der messtechnisch aufgezeichneten Leiter-Erde-Spannungen ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Da, für den Fall des gesteuerten Einschaltens der Leistungsschalter und des geerdeten Sternpunkts am Transformator Tr2, weder transiente noch stationäre Kippschwingungen aufgetreten sind, zeigt der Vergleich der Leiter-Erde-Spannungen eine gute

Übereinstimmung. Die Anregung einer Kippschwingung kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden, wenn das Einschalten der Leistungsschalter ungesteuert erfolgt.

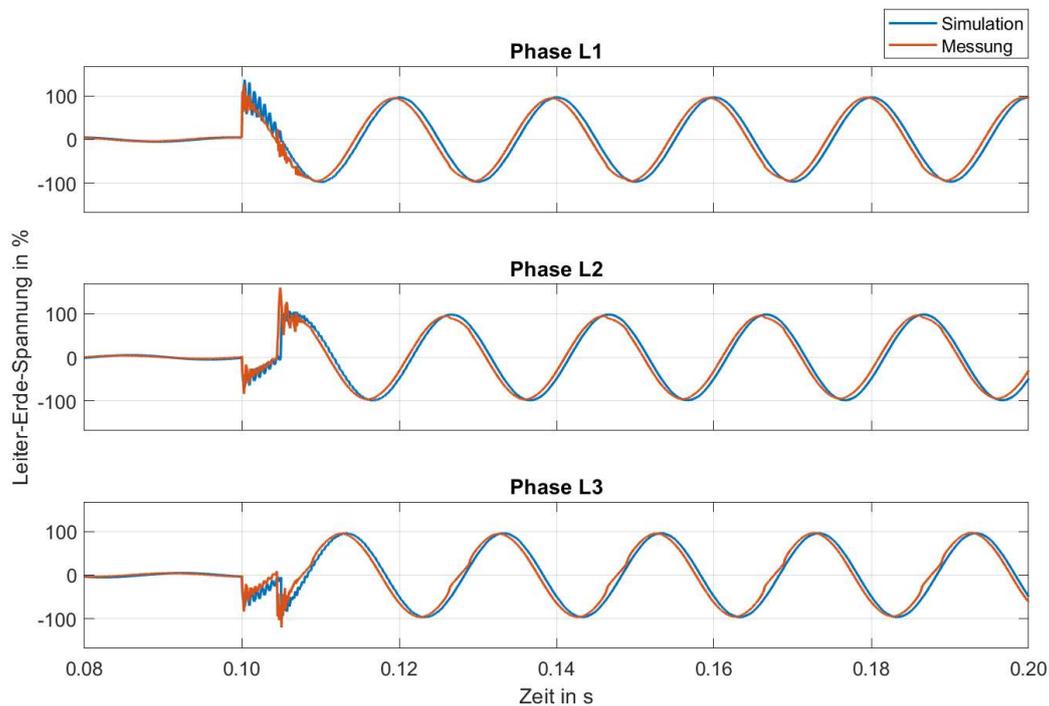


Abbildung 6-4: Vergleich der numerischen Berechnungsergebnisse mit der messtechnischen Aufzeichnung in Hochspannungsanlage B (Magnetisierungskennlinie 3)

Sind induktive Spannungswandler mit einer Magnetisierungskennlinie Nr. 4 (Abbildung 4-3) in der Hochspannungsanlage installiert, so treten keine Kippschwingungen auf.

6.3.3 Hochspannungsanlage C (400 / 230 / 110 / 30 kV)

Beim ungesteuerten und gesteuerten Einschalten der Leistungsschalter konnten mit der zur Verfügung gestellten Magnetisierungskennlinie weder transiente noch stationäre Kippschwingungen angeregt werden. Die Kapazität des Transformatorfeldes ist hinreichend groß um Anregen einer Kippschwingungen zu vermeiden.

Mit einer zur Verfügung gestellten Magnetisierungskennlinie der induktiven 230-kV-Spannungswandler konnten weder beim ungesteuerten noch beim gesteuerten Einschalten der 400-kV-Leistungsschalter mit Einschaltzeitpunkten gemäß einer Gaußschen Verteilung der einzelnen Pole Kippschwingungen angeregt werden.

6.4 Erkenntnisse

Die in Hochspannungsanlagen installierten induktiven und kapazitiven Komponenten stellen ein schwingungsfähiges System dar. Mit der Durchführung von Schalthandlungen kann dieses vorhandene schwingungsfähige System angeregt werden und kann zu stationären oder transienten Kippschwingungen führen. Das wesentliche Zusammenspiel für das Auftreten von Kippschwingungen ist der Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler und den wirksamen Kapazitäten. Die wirksamen Kapazitäten werden durch Freileitungen, Energiekabel, Sammelschienen (Transformator- und Abgangsfelder), den Leiter-Erde-Kapazitäten der Betriebsmittel und durch Streukapazitäten repräsentiert.

Die Qualität der technischen Daten der induktiven Spannungswandler und vor allem der Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie sind entscheidend für die numerischen Berechnungen. Erst mit detaillierten Informationen kann eine Abschätzung des Auftretens von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen getroffen werden. Mit den numerischen Berechnungen und der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse konnten transiente und stationäre Kippschwingungen untersucht werden. Mit der Variation der wirksamen Kapazität konnten kritische Bereiche stationärer Kippschwingungen evaluiert werden. Hierbei ist die Kenntnis über die Struktur der Hochspannungsanlage und deren enthaltenen Komponenten entscheidend.

Durch den erhaltenen Fingerabdruck einer Hochspannungsanlage bestehend aus den globalen positiven und negativen Spitzenwerten, dem Frequenzverhalten und der Schwingungsfähigkeit eines Knotenpunktes können Aussagen für das Auftreten von Kippschwingungen getroffen werden. Ist ein Fingerabdruck bekannt, kann dieser für weitere Hochspannungsanlagen genutzt werden, um eine Aussage zu treffen, ob Kippschwingungen auftreten können. Dieser kann verwendet werden, sofern in den Hochspannungsanlagen der gleiche Spannungswandlertyp eingesetzt wurde

Durch die unterstützende messtechnische Erfassung konnte gezeigt werden, dass bei der numerischen Modellbildung alle wesentlichen Komponenten berücksichtigt wurden. Der Vergleich der numerisch berechneten und der messtechnisch aufgezeichneten Leiter-Erde-Spannungen zeigen eine gute Übereinstimmung bei drei von fünf Magnetisierungskennlinien im gesättigten Bereich. Es zeigte sich, dass die Magnetisierungskennlinien 2, 3 und 5 eine Korrelation mit den vor Ort aufgezeichneten Kippschwingungen aufweisen, wenn das Einschalten der Leistungsschalter ungesteuert erfolgt. Magnetisierungskennlinie 1 und 4 der induktiven Spannungswandler konnten für Hochspannungsanlage A ausgeschlossen werden.

Durch das Heranziehen einer Magnetisierungskennlinie (Nr. 5) eines bauähnlichen Spannungswandlertyp erfolgte die Validierung des numerischen Berechnungsmodells von Hochspannungsanlage A. Der Vergleich der numerische berechneten und der messtechnisch vor Ort aufgezeichneten

Leiter-Erde-Spannungen zeigte eine mehr oder weniger gute Übereinstimmung. Im gesättigten Bereich der Magnetisierungskennlinie konnte eine gute Übereinstimmung der stationär aufgetretenen Kippschwingungen identifiziert werden. Im Zuschaltaugenblick der 400-kV-Leistungsschalter sind Abweichungen in den Leiter-Erde-Spannungen identifiziert worden. Die Größe von Wicklungswiderständen und Streuinduktivitäten üben einen wesentlichen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Leiter-Erde-Spannung im Fall von transienten und stationären Kippschwingungen aus. Die numerischen Berechnungsergebnisse reagieren sensibel bei kleinsten Veränderungen der Parameter der elektrischen Komponenten.

Ist eine Hochspannungsanlage gegenüber Kippschwingungen sensitiv, können diese entweder durch den Einbau einer zusätzlichen Kapazität oder durch gesteuertes Einschalten der Leistungsschalter vermieden werden. Wenn jedoch die wirksame sekundärseitige Anlagenkapazität hinreichend groß ist, können Kippschwingungen vermieden werden.

Bei der messtechnischen Erfassung der Leiter-Erde-Spannung in Hochspannungsanlagen wurden zusätzlich zu den vorhandenen induktiven Spannungswandlern, ohmsch-kapazitive Spannungsteiler in ausgewählten Knotenpunkten installiert. Im niederfrequenten transienten Bereich ist die Erfassung der Sekundärspannungen von induktiven Spannungswandlern für die Ermittlung des Auftretens von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen hinreichend genau. Stationäre Kippschwingungen konnten in einer Hochspannungsanlage erfolgreich durch ungesteuertes Schalten der Leistungsschalter ausgelöst werden. Zur 50-Hz-Netzfrequenz hat sich die zweite Subharmonische mit einer Frequenz von 25 Hz und einem Spitzenwert der Leiter-Erde-Spannung von 80 % überlagert.

Für die numerische Untersuchung von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen wird empfohlen umfangreiche Berechnungen durchzuführen, um das Auftreten von Kippschwingungen abschätzen zu können. Es ist entscheidend, dass für die Modellbildung die technischen Parameter der elektrischen Komponenten und vor allem der nichtlineare Verlauf der Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler vorliegen. Auch beim Austausch von induktiven Spannungswandlern ist zu überprüfen, ob Kippschwingungen auftreten oder vermieden werden können.

Aus den numerischen Berechnungen ist hervorgegangen, dass der Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler in Kombination mit den wirksamen Kapazitäten von entscheidender Bedeutung für das Auftreten von Kippschwingungen ist. Aus diesem Grund sollte darauf geachtet werden, ob Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen auftreten können.

7 RESÜMEE

Mit dem Zusammenspiel der vorhandenen induktiven und kapazitiven Komponenten in Hochspannungsanlagen können bei der Durchführung von Schalthandlungen transiente und stationäre Schwingungen der Leiter-Erde-Spannung angeregt werden. Diese Schwingungen sind als Kippschwingungen bekannt.

Damit Hochspannungsanlagen hinsichtlich der auftretenden Beanspruchungen untersucht werden können, kann die numerische Berechnung und die messtechnische Erfassung transienter Spannungen herangezogen werden. Beide Herangehensweisen liefern einen wertvollen Beitrag zur Abschätzung der auftretenden Beanspruchung und können einen Einblick geben in die Anlagensicherheit, der Anlagenverfügbarkeit und Tragen letztendlich zur Versorgungssicherheit bei.

Vor allem der Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler in Kombination mit der wirksamen Kapazität der vorhandenen Komponenten ist von entscheidender Bedeutung ob in Hochspannungsanlagen transiente oder stationäre Kippschwingungen auftreten können. Geraten induktive Spannungswandler bei der Durchführung von Schalthandlungen in Sättigung und ist die wirksame Anlagenkapazität in einer geeigneten Größenordnung, so können sich Kippschwingungen ausbilden. Diese Schwingungen überlagern sich der Betriebsspannung und beanspruchen die Betriebsmittel elektrisch und als auch thermisch.

Aus den numerischen Berechnungen können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden:

- Zur Abschätzung des Kippschwingungspotentials in Hochspannungsanlagen sind die technischen Parameter der induktiven Spannungswandler und vor allem der nichtlineare Verlauf der Magnetisierungskennlinie und die kapazitiven Verhältnisse entscheidend.
- Es hat sich gezeigt, dass Abweichungen im Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Wandler zu einem vollständig neuen Verhalten der Leiter-Erde-Spannung führen können. Bei der numerischen Berechnung und der Durchführung von Schalthandlungen konnten in Abhängigkeit der verwendeten Magnetisierungskennlinie transiente und stationäre Kippschwingungen evaluiert werden.
- Die Erdkapazität von induktiven Spannungs-, Strom-, und Kombinationswandlern sollten für die numerische Modellbildung aus Prüfprotokollen zur Verfügung stehen. Mit der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse kann das Gefährdungspotential gegenüber Kippschwingungen ermittelt werden. Abhängig von der Größe der wirksamen Erdkapazität der eingesetzten induktiven Wandler können innerhalb der Bandbreite der Anlagenparameter Kippschwingungen auftreten oder vermieden werden.

- Die wirksame Anlagenkapazität setzt sich aus der Kapazität der Transformatordurchführung, der Kapazität der induktiven Spannungswandler und der Kapazität des Transformatorfeldes zusammen. Befindet sich diese Kapazität in einer geeigneten Größenordnung können weder transiente noch stationäre Kippschwingungen ausgelöst werden. Abweichungen aus diesem Kapazitätsbereich können wiederum zum Auftreten von Kippschwingungen führen.
- Die Auswertung der numerischen Berechnungsergebnisse (Leiter-Erde-Spannung) zielt auf einen Vergleich von Spitzenwerten, Frequenzbereichen, transiente Beanspruchungsdauer und der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung ab. Die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse zeigt, dass nicht signifikante Änderungen einzelner Parameter der elektrischen Komponenten zu einer signifikanten Beeinflussung der Leiter-Erde-Spannung führen. Aus den numerischen Berechnungsergebnissen kann für einen Knotenpunkt einer Hochspannungsanlage ein eindeutiger Fingerabdruck erstellt und dieser zugeordnet werden.
- Mit der Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung können Aussagen über das transiente und stationäre Verhalten von Kippschwingungen getroffen werden. In Abhängigkeit einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse können Bereiche identifiziert werden, in denen Kippschwingungen auftreten oder vermieden werden können.
- Bei der Untersuchung von transienten und stationären Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen reagieren die numerischen Berechnungsergebnisse sensibel auf kleinste Änderungen der Parameter der elektrischen Komponenten.
- Der generierte Fingerabdruck eines Knotenpunktes einer Hochspannungsanlage kann für weitere Hochspannungsanlagen genutzt werden, um Informationen über das Potential des Auftretens von Kippschwingungen zu erhalten. Sind in beiden Hochspannungsanlagen baugleiche induktive Spannungswandler mit derselben Charakteristik der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie installiert, kann der Fingerabdruck verwendet werden.
- Das gesteuerte oder ungesteuerte Einschalten der Leistungsschalter ist ein wesentlicher Faktor, ob in Hochspannungsanlagen Kippschwingungen auftreten können. Mit den verwendeten Magnetisierungskennlinien konnte gezeigt werden, dass beim ungesteuerten Einschalten der Leistungsschalter zusätzliche Kapazitäten notwendig sind, um das Auftreten von Kippschwingungen zu vermeiden. Beim gesteuerten Einschalten konnten Zeitbereiche evaluiert werden, in denen weder stationäre noch transiente Kippschwingungen angeregt werden konnten.
- Erfolgt in Hochspannungsanlagen ein Austausch der induktiven Spannungswandler ist zu überprüfen ob Kippschwingungen auftreten können.

Aus der messtechnischen Erfassung können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden:

- Stationäre Kippschwingungen konnten erfolgreich in einer Hochspannungsanlage erfasst werden. In Abhängigkeit vom Zuschaltaugenblick der Leistungsschalter konnten stationäre Kippschwingungen beim ungesteuerten Einschalten ausgelöst werden. Es ist die zweite subharmonische Kippschwingung aufgetreten.
- Werden in Hochspannungsanlagen induktive Spannungswandler ausgetauscht, ist es notwendig Untersuchungen durchzuführen, um das Kippschwingungspotential abschätzen zu können.
- Messtechnische Aufzeichnungen in Hochspannungsanlagen sind für die numerischen Berechnung unterstützend, um die Qualität der Berechnungsmodelle bestätigen zu können.
- Die durchgeführten messtechnischen Aufzeichnungen in den Hochspannungsanlagen haben gezeigt, dass die ausgewerteten Spitzenwerte unterhalb der normativ festgelegten Isolationspegel liegen [60071-1]. Ein stabiler und sicherer Betrieb der untersuchten Hochspannungsanlagen ist gewährleistet.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit hat sich mit dem Auftreten von Kippschwingungen in ausgewählten Strukturen von Hochspannungsanlagen beschäftigt. Durch den Einsatz von numerischen Berechnungsprogrammen und der messtechnischen Aufzeichnungen in Hochspannungsanlagen konnte das Auftreten von Kippschwingungen untersucht werden.

Einleitung und Motivation: Durch die, in Hochspannungsanlagen, installierten induktiven Komponenten (Transformatoren, induktive Spannungswandler und Kompensationsdrosselspulen) und den vorhandenen wirksamen Kapazitäten kann ein schwingungsfähiges System gebildet werden. Dieses schwingungsfähige System kann bei der Durchführung von Schalthandlungen der Leistungsschalter angeregt werden. Die auftretenden Schwingungen der Leiter-Erde-Spannung sind als Kippschwingungen bekannt. Treten Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen auf, beanspruchen diese die elektrischen Komponenten durch Überspannungen und Überströme. Für die Untersuchung von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen wurde einerseits die numerische Modellbildung und die Berechnung sowie die messtechnische Aufzeichnung der Leiter-Erde-Spannung gewählt. Zur Abschätzung des Entstehungspotentials von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen, wurden ausgewählte Anlagenstrukturen im transienten Berechnungsprogramm EMTP-RV (Version 4.0) numerisch nachgebildet, auf Plausibilität geprüft und mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen untersucht. Der Fokus der numerischen Berechnungen ist es, das Entstehungspotential von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen abschätzen zu können und in weitere Folge einen sicheren und zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten.

Theoretische Grundlagen zur Untersuchung von Hochspannungsnetzen und -anlagen: Schalthandlungen in Hochspannungsanlagen sind bewusst getätigte Aktionen vom Freischalten eines Anlagenteils, der Durchführung von Umschaltungen bis hin zum sicheren Erden eines abgeschalteten Anlagenteils. Bei der Durchführung von Schalthandlungen können sich in Abhängigkeit der vorliegenden Anlagenstruktur Kippschwingungen ausbilden. Für das Auftreten von Kippschwingungen sind induktive Spannungswandler (nichtlineare Magnetisierungskennlinie) in Kombination mit den wirksamen Kapazitäten der Hochspannungsanlage verantwortlich. Aus der Literatur können Fallbeispiele von Kippschwingungen sowie technische Parameter für die numerische Modellbildung entnommen werden.

Methoden der numerischen Modellbildung und Berechnung: Es wurde die numerische Nachbildung der wesentlichen Komponenten vorgestellt, die für die numerische Berechnung des Entstehungspotentials von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen entscheidend sind. Die Kenntnis

der technischen Daten von induktiven Spannungswandlern samt dem Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie bis in den gesättigten Bereich ist ein entscheidender Schlüsselfaktor für das Auftreten von Kippschwingungen.

Basierend auf den auf Plausibilität erstellten numerischen Berechnungsmodellen erfolgten Sensitivitätsanalysen ausgewählter Parameter der elektrischen Komponenten. Mit dem erstellten Basismodell wurden Sensitivitätsanalyse durchgeführt und aus den numerisch berechneten Signalverläufen wurden charakteristische Kenngrößen evaluiert. Diese Kenngrößen beschreiben das transiente und stationäre Verhalten von ausgewählten Knotenpunkten einer Hochspannungsanlage.

Numerische Berechnung von Kippschwingungen: Bei den drei Hochspannungsanlagen wurde der Fokus auf das Auftreten von Kippschwingungen bei der Durchführung von Schalthandlungen der Leistungsschalter gelegt. Diese Hochspannungsanlagen wurden anhand des Wirkungsgebietes transienter Spannungen numerisch nachgebildet.

Beim primärseitigen Einschalten der Leistungsschalter konnten Kippschwingungen an den Knotenpunkten der induktiven Spannungswandler ausgelöst werden. Für das numerische Berechnungsmodell der induktiven Spannungswandler wurden fünf nichtlineare Magnetisierungskennlinien verwendet und das Auftreten von Kippschwingungen untersucht. Aus den berechneten zeitlichen Spannungsverläufen erfolgte, in Abhängigkeit einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse, die Auswertung und Darstellung der globalen positiven und negativen Spitzenwerte, der Frequenzbereiche und der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung. Mit den erhaltenen Berechnungsergebnissen konnte aufgrund der ausgewerteten charakteristischen Parameter ein Fingerabdruck in Abhängigkeit der vorhandenen elektrischen Betriebsmittel, der geometrischen Ausdehnung und der durchgeführten Sensitivitätsanalyse erstellt werden und eindeutig dem Knotenpunkt der induktiven Spannungswandler der Hochspannungsanlage zugeordnet werden.

Der erhaltene Fingerabdruck einer numerisch berechneten Hochspannungsanlage kann für weiterer Hochspannungsanlagen genutzt werden, um das Auftreten von Kippschwingungen abschätzen zu können. Wesentliches Kriterium hierbei ist, dass ein baugleicher induktiver Spannungswandler in der Hochspannungsanlage installiert ist.

Messtechnik und messtechnische Untersuchungen in Hochspannungsanlagen: Induktive Spannungswandler in Hochspannungsanlagen werden für Schutz-, Mess- und Abrechnungszwecke verwendet und erzeugen im niederfrequenten Bereich ein eindeutiges Abbild der 50-Hz-Komponente. Durch den Einsatz von ferromagnetischen Materialien besitzen diese ein von der Frequenz abhängiges Übertragungsverhalten und können auftretende transiente Ereignisse nicht über einen definierten Frequenzbereich abbilden. Mit dem Einsatz von breitbandigen Spannungsteilern können transiente Ereignisse über einen definierten Frequenzbereich eindeutig abgebildet werden. Diese können in ausgewählten Knotenpunkten von Hochspannungsanlagen über einen längeren Zeitraum

installiert werden und erfassen in Kombination mit geeigneten Messgeräten den Einfluss auf die Betriebsspannung.

Mit dem Einsatz von breitbandigen Spannungsteilern konnten in drei Hochspannungsanlagen transiente Ereignisse in hoher Zeitaufösung erfasst werden. In einer Hochspannungsanlage konnten Kippschwingungen, durch das ungesteuerte Einschalten der Leistungsschalter, erfolgreich angeregt und aufgezeichnet werden. Die Analyse der aufgezeichneten Kippschwingung hat gezeigt, dass neben der 50-Hz-Netzfrequenz die zweite subharmonische Kippschwingung (25 Hz) mit einer Amplitude von ca. 80 % aufgetreten ist.

Wesentlich ist, dass die induktiven Spannungswandler derart ausgelegt sein sollen, dass das Risiko für das Auftreten von Kippschwingungen vermindert werden kann. Sind Hochspannungsanlagen mit den installierten induktiven Spannungswandlern kippschwingungsfrei und erfolgt ein Austausch der Wandler, sollten Untersuchungen gegenüber dem Auftreten von Kippschwingungen durchgeführt werden.

Vergleich der numerischen und messtechnischen Untersuchungen: Mit der numerischen Modellbildung und der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse konnte die Bandbreite für das Auftreten von Kippschwingungen in Hochspannungsanlagen ermittelt und analysiert werden. Die erhaltenen numerischen Berechnungsergebnisse lassen sich zu einem Fingerabdruck zusammenführen, der eindeutig einem Knotenpunkt einer Hochspannungsanlage zugeordnet werden kann. Dieser setzt sich einerseits aus den technischen Daten der elektrischen Komponenten der Hochspannungsanlage und des induktiven Spannungswandlers mit einer nichtlinearen Magnetisierungskennlinie zusammen.

Der Vergleich zwischen der numerischen Berechnung von Hochspannungsanlagen und der messtechnischen Aufzeichnung zeigte eine gute Übereinstimmung. Das Auftreten von Kippschwingungen in Anlagenstrukturen mit der Durchführung von Schalthandlungen der Leistungsschalter konnte bestätigt werden.

Resümee: Mit dem Einsatz von numerischen Berechnungsprogrammen kann unter Kenntnis der technischen Daten einer Hochspannungsanlage und den darin enthaltenen Komponenten das Auftreten von Kippschwingungen ermittelt werden. Der Verlauf der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler ist von entscheidender Bedeutung. Bei der Durchführung von Schalthandlungen der Leistungsschalter hat sich in Abhängigkeit der verwendeten Magnetisierungskennlinie gezeigt, dass transiente und stationäre Kippschwingungen aufgetreten sind. Der, durch eine Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter, ermittelte Fingerabdruck eines Knotenpunktes einer Hochspannungsanlage kann für weitere Hochspannungsanlagen genutzt werden, um das Auftreten von Kippschwingungen abschätzen zu können.

Mit der messtechnischen Erfassung konnten Kippschwingungen in einer Hochspannungsanlage erfolgreich aufgezeichnet werden. Der Einsatz von ohmsch-kapazitiven Spannungsteilern hat die Erfassung von transienten Erscheinungen ermöglicht. Die durchgeführten messtechnischen Aufzeichnungen in den Hochspannungsanlagen haben gezeigt, dass die normativ festgelegten Isolationspegel eingehalten werden. Ein stabiler und sicherer Betrieb der untersuchten Hochspannungsanlagen ist gewährleistet.

LITERATURVERZEICHNIS

- [50110-1] ÖVE/ÖNORM EN 50110-1 (EN 50110-2-100 eingearbeitet), „Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (Teil 2-100: Nationale Ergänzungen eingearbeitet)“, Ausgabe: 2014-10-01
- [50160] ÖVE/ÖNORM EN 50160, „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen“, Ausgabe: 2011-03-01
- [60071-1] ÖVE/ÖNORM EN 60071-1, „Isolationskoordination – Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen (IEC 60071-1:2006 + A1:2010)“, Ausgabe: 2010-10-01
- [60071-2] DIN EN 60071-2, „Isolationskoordination – Teil 2: Anwendungsrichtlinie (IEC 71-2:1996) Deutsche Fassung EN 60071-2: 1997“, Ausgabe: September 1997
- [60071-4] IEC TR 60071-4, „Insulation coordination – Part 4: Computational guide to insulation coordination and modelling of electrical networks“, Edition: 2004-06
- [61869-3] ÖVE/ÖNORM EN 61869-3, „Messwandler – Teil 3: Zusätzliche Anforderungen für induktive Spannungswandler (IEC 61869-3:2011)“, Ausgabe: 2012-06-01
- [61869-102] ÖVE/ÖNORM TR 61869-102, „Messwandler – Teil 102: Ferroresonanzschwingungen in Schaltanlagen mit induktiven Spannungswandlern (IEC TR 61869-102:2014)“, Ausgabe: 2015-03-01
- [61869-103] ÖVE/ÖNORM 61869-103, „Messwandler, Anwendung von Messwandlern bei der Messung der Spannungsqualität (IEC TR 61869-103:2012)“, Ausgabe: 2013-03-01
- [61936-1] ÖVE/ÖNORM 61936-1, „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV – Teil 1: Allgemeine Bestimmungen (IEC 61936-1:2010, modifiziert + Cor.:2011 + A1:2014)“, Ausgabe: 2015-01-01
- [AND66] W. Andrä, R. Peiser, „Kippschwingungen in Drehstromnetzen“, ETZ-B Bd. 18, H. 22, 1966
- [ANG10] S. P. Ang, „Ferroresonance simulation studies of transmission systems“, PhD-Thesis, University of Manchester, 2010
- [BRA06] R. Bräunlich, H. Däumling, M. Hofstetter, U. Prucker, J. Schmid, H. W. Schlierf, R. Minker, „Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen – Teil 1: Definitionen und Allgemeine Erklärungen“, Bulletin SEV/AWS 23/06, 2006
- [BRA06a] R. Bräunlich, H. Däumling, M. Hofstetter, U. Prucker, J. Schmid, H. W. Schlierf, R. Minker, „Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen – Teil 2: Fallbeispiele“, Bulletin SEV/AWS 24/25 06, 2006
- [BRA08] R. Bräunlich, H. Däumling, M. Hofstetter, U. Prucker, J. Schmid, H. W. Schlierf, R. Minker, „Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen – Teil 3: Parameter von Ferroresonanzkreisen und Methoden zur Untersuchung“, Bulletin SEV/AWS 22/23, 2008
- [BRA09] R. Bräunlich, H. Däumling, M. Hofstetter, U. Prucker, J. Schmid, H. W. Schlierf, R. Minker, „Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen – Teil 4: Behebung von Ferroresonanzschwingungen“, Bulletin SEV/AES 1/2009
- [BER66] C. Bergmann, „Kippschwingungen in Drehstromnetzen“, Dissertation, Fakultät der Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, Berlin, 1966
- [CER15] M. Cernan, J. Tlustý, Z. Müller, R. Procházka, „Ferroresonance Phenomena in medium voltage systems“, 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015

- [CHI05] N. Chiesa, „Power Transformer – Modelling Advanced Core Model”, Politecnico Di Milano, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Elettrotecnica, 2005
- [CHI10] N. Chiese, „Power Transformer – Modelling for Inrush Current Calculation”, Norwegian University of Science and Technology, Doctoral theses, 2010
- [CHO96] P. Chowdhuri, „Electromagnetic Transients in Power Systems“, Research Studies Press Ltd., England, 1996
- [CIG33-210] Cigré WG33.10, „Temporary Overvoltages: Causes, Effects and Evaluation”, Paper presented in the name of Working Group 33.10, Cigré Session 1990
- [CIG039] Cigré WG 02 (Internal overvoltages) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination): „Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients”, Technical Brochure 39, 1990
- [CIG262] Cigré WG A3.07. „Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers”, Technical Brochure 262, 2004
- [CIG568] Cigré WG C4.307, „Transformer Energization in Power Systems: A Study Guide”, Technical Brochure 568, 2014
- [CIG569] Cigré WG C4.307, „Resonance and Ferroresonance in Power Networks“, Technical Brochure 569, 2014
- [CIG577A] Cigré JWG A2/C4.39, „Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System“, Technical Brochure 577A, 2014
- [COL07] L. Colla, S. Lauria, F. M. Gatta, „Temporary Overvoltages due to Harmonic Resonance in Long EHV Cables”, International Conference on Power Systems Transients, IPST, Lyon, France, 2007
- [DAU90] H. Däumling, „Kippschwingungen – Auftreten und Beseitigung“, KG Ritz Messwandler GmbH & Co., Hamburg, 1990
- [DEN09] S. Dennetière, „Transformer modelling for transient simulations“, EMTP-RV training course, Dubrovnik, Croatia, 2009
- [DET85] K. H. Dettmann, „Ferroresonanzgefährdete Betriebszustände in Netzen mit Spannungswandlern“, *etzArchiv* Bd. 7 (1985), H 1, 1985
- [DOL72] E. J. Dolan, D A. Gilles, E. W. Kimbark, „Ferroresonance in a Transformer switched with an EHV Line“, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Volume: PAS-91, Issue: 3, 1972
- [EMI01] Z. Emin, Y. K. Thong, „Ferroresonance Experience in UK: Simulations and Measurements”, International Conference on Power System Transients, IPST, Rio de Janeiro, Brazil, 2001
- [EMT95] EMTP Rule Book, „Electro Magnetic Transient Program Theory Book“, Portland, Oregon, 1995
- [ESC05] M. V. Escudero, I. Dudurych, M. A. Redfern, „Characterization of Ferroresonant Modes in HV Substation with CB Grading Capacitors“, International Conference on Power System Transients, Montreal, Canada, 2005
- [ESC11] M. V. Escudero, I. Dudurych, „Ferroresonance on Power Systems: Fundamentals and Analysis with ATP”, *EEUG Meeting 2011, European EMTP-ATP Conference*, Ohrid, Macedonia, 2011
- [FER98] P. Ferracci, „Ferroresonance”, *Cahier Technique Schneider* n^o 190, ECT90, 1998
- [GRE91] A. Greenwood, „Electrical Transients in Power Systems“, Second Edition ed.: John Wiley & Sons, Inc., 1991

- [GUS05] B. Gustavsen, J. A. Martinez, D. Durbak, „Parameter Determination for Modelling System Transients – Part II: Insulated Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No.3, 2005
- [HAR04] J. H. Harlow, „Electric Power Transformer Engineering“, CRC Press LLC, 2004
- [HEU02] K. Heuck, H-D. Dettmann, „Elektrische Energieversorgung“, 5. Auflage, Springer Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 2002
- [IRA00] M. R. Iravani, A. K. S. Chaudhary, W. J. Giesbrecht, I. E. Hassan, A. J. F. Keri, K. C. Lee, J. A. Martinez, A. S. Morched. B. A. Mork, M. Parniani, A. Sharshar, D. Shirmohammadi, R. A. Walling, D. A. Woodford, „Modelling and Analysis Guidelines for Slow Transients – Part III: The Study of Ferroresonance“, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, No. 1., 2000
- [JAC96] D. A. N. Jacobson, D. R. Swatek, R. W. Mazur, „Mitigating Potential Transformer Ferroresonance in a 230 kV converter station“, Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE, 1996
- [JAC00] D. A. N. Jacobson, „Field Testing, Modelling and Analysis of Ferroresonance in a High Voltage Power System“, PhD-Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2000
- [JAC03] D. A. N. Jacobson, „Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System“, IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. NO.03CH37491), Toronto, Canada, 2003
- [KOE86] H. Koettnitz, G. Winkler, K-D. Weißnigk, „Grundlagen elektrischer Betriebsvorgänge in Elektroenergiesystemen“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986
- [KOE95] G. Köppl, S. Läderach, E. Lücke, A. Umlauf, „Ferroresonanz – ein weiterhin aktuelles Problem“, Bulletin SEV/VSE 19/95, 1995
- [MAR91] J. R. Marti, A. C. Soudack, „Ferroresonance in power systems: Fundamental solutions“, IEEE Proceedings C – Generation, Transmission and Distribution, Volume: 138, Issue: 4, 1991
- [MAR03] J. A. Martinez, B. Mork, „Transformer Modelling for Low Frequency Transient – The State of the Art“, International Conference on Power System Transients, IPST, New Orleans, USA, 2003
- [MAR05] J. A. Martinez, B. Gustavsen, D. Durbak, „Parameter Determination for Modeling System Transients – Part I: Overhead lines“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, 2005
- [MAR05a] J. A. Martinez, B. A. Mork, „Transformer Modeling for Low- and Mid-Frequency Transients – A Review“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, 2005
- [MAR05b] J. A. Martinez, R. Walling, B. A. Mork, J. Martin-Arnedo, D. Durbak, „Parameter Determination for Modeling System Transients – Part III: Transformer“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, 2005
- [MAR05c] J. A. Martinez, J. Mahseredjian, B. Khodabakhian, „Parameter Determination for Modeling System Transients – Part VI: Circuit Breakers“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20, No. 3, 2005
- [MAR07] J. A. Martinez, „Parameter Determination for Power System Transients“, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA, 2007
- [MEY11] J. Mayer, R. Stiegler, M. Klatt, M. Elst, E. Sperling, „Accuracy of Harmonic Voltage Measurement in the Frequency Range up to 5 kHz using Conventional Instrument

- Transformers”, 21st International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Germany, 2011
- [MOR88] G. Moraw, W. Richter, H. Hutegger, J. Wögerbauer, „Point-on-wave controlled switching of high voltage circuit-breakers”, International Conference on Large High Voltage Systems, Cigré Session, Paris, France, 1988
- [NEV93] W. L. A. Neves, H. W. Dommel, „On Modelling Iron Core Nonlinearities“, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, 1993
- [QIA97] G. Qiang, L. Tianyu, L. Qingbo, „Study on Features of Ferromagnetic Resonance of 110 kV Substation and it’s Eliminating Method“, CIRED 97, Conference Publication No. 438, 1997
- [PAC98] S. Pack, „Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen der Energieversorgung“, Habilitationsschrift, 2. überarbeitete Auflage, TU Graz, 1998
- [PEI64] R. Peiser, „Kippschwingungen und Subharmonische im Serienschwingkreis mit Eisendrossel“, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 1964
- [PAT07] K. Pattanakdee, C. Banmongkol, „Failure of Riser Pole Arrester due to Station Service Transformer Ferroresonance“, International Conference on Power System Transients, Lyon, France, 2007
- [PIN15] J. F. Piñeros, J. A. Vélez, D. Rodríguez, „Ferroresonance in a 115 kV Network Due to a Single Line Fault“, International Conference on Power System Transients, Cavtat, Croatia, 2015
- [PLE13] J. Plesch, S. Pack, „On-site measurement of switching transients in high voltage systems“, 11th Höfler’s Days, Portoroz, Slovenia, 2013
- [PLE14] J. Plesch, S. Pack, „Optimization of the overvoltage protection and analysis of lightning stress in substations“, Cigré International Colloquium on Lightning and Power Systems, Lyon, France, 2014
- [PLE14a] J. Plesch, S. Pack, G. Achleitner, U. Schichler, „Analysis of Transient Switching Events in Substations“, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Jeju, South Korea, 2014
- [PLE14b] J. Plesch, S. Pack, G. Achleitner, „Measurement and simulation of switching events on a three phase three winding transformer“, International Conference on High Voltage Engineering and Application, Poznan, Poland, 2014
- [PLE15] J. Plesch, E. Sperling, G. Achleitner, S. Pack, „Measurement of transient voltages in a substation“, Cigré Symposium Across Border – HVDC Systems and Market Integration, Lund Sweden, 2015
- [PLE15a] J. Plesch, S. Pack, „Resonance and Ferroresonance in High Voltage Grid Structure“, Instrument Transformer Measurement Forum, ITMF Omicron, Feldkirch, Austria, 2015
- [PLE16] J. Plesch, S. Pack, U. Schichler, G. Wurzer, I. Hübl, „Erfassung von transienten Spannungen an einer 110-kV-Hochgebirgsleitung“, VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik 2016, Berlin, Deutschland, 2016
- [PLE17] J. Plesch, S. Pack, W. Huska, G. Achleitner, „Investigation of Ferroresonance in a High Voltage Substation – Measurement and Numerical Simulation“, 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017
- [PLE18] J. Plesch, L. Schwalt, S. Pack, „Hochspannungssysteme unter transiente Beanspruchung – Korrelationsmethodik“, 15. Symposium Energieinnovation: Neue Energie für unser bewegtes Europa, EnInnov 2018, Graz, Österreich, 2018

- [RUD53] R. Rüdberg, „Elektrische Schaltvorgänge in geschlossenen Stromkreisen von Starkstromanlagen“, Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1953
- [SAN90] B. Sander, J. Dobsa, J. Grandl, „Ableiterdefekte infolge Ferroresonanz einer Transformatorbank in einer 220/65-kV-Schaltanlage“, Bulletin SEV/VSE 81 (1990) 19, 1990
- [SAN01] S. Santoso, R. C. Dugan, T. E. Grebe, P. Nedwick, „Modeling Ferroresonance Phenomena in an Underground Distribution System“, International Conference on Power System Transients, Rio De Janeiro, Brazil, 2001
- [SCH15] H.H. Schramm, „Schalten im Hochspannungsnetz“, VDE Verlag GmbH, Offenbach, Berlin, 2015
- [SCH17] L. Schwalt, J. Plesch, S. Pack, W. Schulz, „Transient Measurements in the Austrian High Voltage Transmission System“, International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, Brazil, 2017
- [SCH18] L. Schwalt, J. Plesch, S. Pack, „Verhalten von Freileitungen unter Einfluss atmosphärischer Entladungen“, VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, 2018
- [SME15] R. Smeets, L. Sluis, M. Kapetanovic, D. Peelo, A. Janssen, „Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems“, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2015
- [SPE13] E. Sperling, P. Schegner, „A possibility to measure Power Quality with RC-Dividers“, 22nd International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Stockholm, 2013
- [SPE13a] E. Sperling, „Ferroresonanz – Phänomen, Gefahren und Gegenmaßnahmen“, Omicron Diagnosewoche, Dornbirn, Österreich, 2013
- [SPE14] E. Sperling, P. Schegner, „Dimensions of influence of RC-dividers on the measurement of power quality parameters in high-voltage transmission systems“, Cigré Session, Paris, France, 2014
- [TRA95] T. Tran-Quoc, L. Pierrat, „An Efficient Non Linear Transformer Model and Its Application to Ferroresonance Study“, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 31, No. 3, 1995
- [VAL07] V. Valverde, A.J. Mazon, I. Zamora, G. Buigues, „Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulation“, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ, 2011.
- [WER15] P. Werdelmann, „Power Quality in a 110 kV DSO System Measured by Means of Non-Conventional Instrument Transformer“, Instrument Transformer Measurement Forum, ITMF Omicron, Feldkirch, Österreich, 2015
- [ZAR09] A. Rezaei-Zare, R. Iravani, „Impact of Various Representations of Core Saturation Curve on Ferroresonance Behaviour of Transformer“, International Conference on Power Systems Transients, IPST, Kyoto, Japan, 2009

ANHANG

Anhang A	Verwendete Quellen für die numerischen Modellbildung	i
Anhang B	Technische Daten der Transformatoren	iii
Anhang C	Magnetisierungskennlinien der induktiven Spannungswandler	vi
Anhang D	Transformatormodell	vii
Anhang E	Magnetisierungskennlinien und Eisenverlustwiderstände induktiver Spannungswandler	ix
Anhang F	Sensitivitätsanalyse der numerischen Berechnungsmodelle induktiver Spannungswandler	xi
Anhang G	Einlinienschalbilder der Hochspannungsanlagen A bis C	xiv
Anhang H	Technische Daten der Messgeräte	xvi
Anhang I	Technische Daten der ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler	xvii
Anhang J	Checkliste für den Messaufbau	xviii

Anhang A **Verwendete Quellen für die numerischen Modellbildung**

Für die numerische Modellbildung wurden folgende Quellen herangezogen:

Spannungswandler:

- [Spa01] Prüfprotokolle induktiver 110-kV-Spannungswandler
- [Spa02] Magnetisierungskennlinie des Spannungswandlerkernes
- [Spa03] Prüfprotokolle induktiver 245-kV-Spannungswandler

Hochspannungsanlage A (400 / 110 / 30 kV):

- [QC1] Gesamtlageplan
- [QC2] Schnittbilder der Hochspannungsanlage
- [QC3] Schnittbild der Kupplung
- [QC4] Einlinienschalbild der Hochspannungsanlage
- [QC5] Werke 30 kV + Grundriss 380 kV
- [QC6] Werke 30 kV + Schnitt Transformator
- [QC7] Prüfberichte der Transformatoren (400 / 110 / 30 kV)
- [QC8] Leitungsdatenblätter
- [QC9] Fotodokumentation der Hochspannungsanlage
- [QC10] Normalschaltzustand der Hochspannungsanlage

Hochspannungsanlage B (400 / 110 / 30 kV):

- [QD1] Gesamtlageplan
- [QD2] Gesamtgrundriss
- [QD3] Einlinienschalbild der Hochspannungsanlage
- [QD4] Prüfbericht der Transformatoren (400 / 115 / 30 kV)
- [QD5] Schnittbilder der Hochspannungsanlage
- [QD6] Leitungsdatenblätter
- [QD7] Fotodokumentation der Hochspannungsanlage
- [QD8] Normalschaltzustand der Hochspannungsanlage

Hochspannungsanlage C (400 / 230 / 110 / 30 kV):

- [QE1] Gesamtlageplan
- [QE2] Gesamtgrundriss
- [QE3] Einlinienschalbild der Hochspannungsanlage
- [QE4] Prüfbericht Transformator (400 / 230 / 30 kV)

Anhang A: Verwendete Quellen für die numerischen Modellbildung

- [QE5] Schnittbilder der Hochspannungsanlage
- [QE6] Leitungsdatenblätter
- [QE7] Fotodokumentation der Hochspannungsanlage
- [QE8] Normalschaltzustand der Hochspannungsanlage

Allgemeine Quellen:

- [Q1] Grading Capacitors for H.V. Circuit Breakers & Coupling Capacitor from 72.5 kV to 800 kV

Anhang B Technische Daten der Transformatoren

Nennspannung: 400 / 115 / 30 kV

Nennleistung: 200 / 200 / 58 MVA

Schaltgruppe: YNyn0/d5

Kurzschlussspannung und Kurzschlussverluste:

Betriebsspannung	Bezugsleistung	Kurzschlussspannung	Kurzschlussverluste
kV	MVA	%	KW
400 / 115	200	17,6	406
400 / 30	58	13,2	135
115 / 30	58	7,3	126

Leerlaufverluste und Leerlaufstrom:

Frequenz	Spannung	Strom	Leistung	Leerlaufbedarf
Hz	V	A	kW	kVA
50	27000	2,62	43,4	125
		2,85		
		2,51		
	30000	2,89	54,5	151
		3,11		
		2,71		
	33000	3,07	68,3	174
		3,27		
		2,78		

Anhang B: Technische Daten der Transformatoren

Nennspannung: 400 / 115 / 30 kV

Nennleistung: 300 / 300 / 100 MVA

Schaltgruppe: YNyn0/d5

Kurzschlussspannung und Kurzschlussverluste:

Betriebsspannung	Bezugsleistung	Kurzschlussspannung	Kurzschlussverluste
kV	MVA	%	KW
115 / 400	300	17,9	620,6
30 / 400	100	14,4	214,2
30 / 115	100	7,3	198,5

Leerlaufverluste und Leerlaufstrom:

Frequenz	Spannung	Strom	Leistung	Leerlaufbedarf
Hz	V	A	kW	kVA
50	27000	2,40	57,92	101,79
		1,94		
		2,19		
	30000	2,60	72,69	122,80
		2,07		
		2,42		
	33000	2,72	90,60	141,56
		2,10		
		2,61		

Nennspannung: 400 / 230 / 30 kV

Nennleistung: 600 / 600 / 150 MVA

Schaltgruppe: YNyn0/d5

Kurzschlussspannung und Kurzschlussverluste:

Betriebsspannung	Bezugsleistung	Kurzschlussspannung	Kurzschlussverluste
kV	MVA	%	KW
230 / 400	600	17,95	1161
30 / 400	150	16,51	282
30 / 230	150	11,29	257

Leerlaufverluste und Leerlaufstrom:

Frequenz	Spannung	Strom	Leistung	Leerlaufbedarf
Hz	V	A	kW	kVA
50	27000	10,40	222,15	424,80
		9,25		
		7,60		
	30000	19,60	296,10	915,40
		18,50		
		14,75		
	33000	47,90	431,85	2597,0
		47,10		
		41,30		

Anhang C Magnetisierungskennlinien der induktiven Spannungswandler

Für die numerische Berechnung von Kippschwingungen in den Hochspannungsanlagen wurden mehrere Magnetisierungskennlinien der induktiven Spannungswandler verwendet. Die Magnetisierungskennlinien wurden unter Einhaltung des normativ festgelegten Bemessungsspannungsfaktors von $1,9 \times U_n$ ausgelegt [61869-3].

Magnetisierungskennlinie 2 ist aus einem Rohdatensatz entstanden. Dieser Rohdatensatz war für den linearen Bereich, bis zu einer Spannung von 70 kV, vorhanden. Durch Interpolation des Rohdatensatzes im linearen Bereich erfolgt für Magnetisierungskennlinie 2 die Bestimmung des ersten Punktes im ungesättigten Bereich bei 65 kV/0,9 mA. Ausgehend von diesem Punkt erfolgte eine Extrapolation der Magnetisierungskennlinie in den nichtlinearen Bereich durch Vergrößerung des Stromes und Verringerung der Steigung.

Für Magnetisierungskurve 3 wurde ein Arbeitspunkt bei 70 kV/1 mA angenommen. Mit der Vorgabe eines zweiten Punktes bei 125 kV/50 mA erfolgt durch die Anwendung der Berechnungsvorschrift die Bestimmung der Parameter a und b. Die beiden Parameter errechnen sich zu:

$$a = 1 * 10^{-3}$$

$$b = 200 * 10^{-9}$$

Die Berechnungsvorschrift ermittelt die Parameter durch einen rekursiven Fitting-Algorithmus. Durch das Einsetzen in Formel (4) erfolgt durch die Vorgabe des magnetischen Flusses die Ermittlung des Magnetisierungsstromes für die Magnetisierungskennlinie der induktiven Spannungswandler.

Anhang D Transformatormodell

Zur Berechnung des numerischen Ersatzschaltbildes für Transformatoren werden die Leerlauf- und Kurzschlussdaten aus Prüfberichten des Anlagenbetreibers herangezogen. Aufgrund der vorhandenen technischen Daten der Transformatoren (siehe Anhang B) wurde das Transformatormodell BCTRAN verwendet. Dieses Modell gibt das Verhalten eines dreiphasigen Transformators mit mehreren Wicklungen bei Netzfrequenz genau wieder. Das BCTRAN-Modell repräsentiert das lineare Verhalten des Transformators mit einer Genauigkeit von sehr niedrigen Frequenzen bis Frequenzen von ca. 6 kHz bis ca. 10 kHz. Für höhere Frequenzen sind Kapazitäten hinzuzufügen [EMT95]. Aus den technischen Daten erfolgt die Berechnung eines gekoppelten mehrphasigen ohmsch-induktiven Netzwerkes.

Die Realisierung der Schaltgruppe erfolgte bei den verwendeten Transformatormodellen intern (siehe Abbildung D-1) und die Anbindung der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie und des Eisenverlustwiderstandes extern. Die schematische Anbindung der beiden Elemente kann aus Abbildung D-2 entnommen werden. Der oberspannungsseitige Sternpunkt ist in diesem Fall geerdet und der mittelspannungsseitige nicht geerdet.

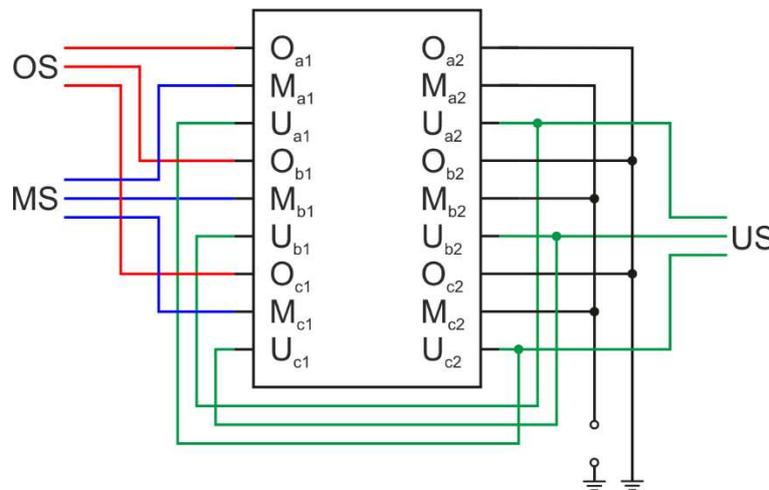


Abbildung D-1: Interne Realisierung der Schaltgruppe der Transformatoren (YNyn0/d5)

OS	Oberspannungsseite	O _{an}	Anschlusspunkte der Oberspannungsseite
MS	Mittelspannungsseite	M _{an}	Anschlusspunkte der Mittelspannungsseite
US	Unterspannungsseite	U _{cn}	Anschlusspunkte der Unterspannungsseite

Der Verlauf der nichtlinearen Induktivität erfolgt durch Heranziehen der technischen Daten der Leerlaufmessung und wird nach [ANG10] berechnet. Die Implementierung des Eisenverlustwiderstandes erfolgt als konstanter Widerstand bei Betriebsspannung.

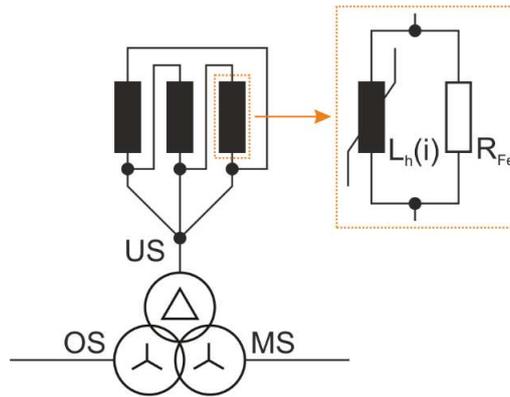


Abbildung D-2: Schematische Darstellung eines Transformators mit drei Wicklungen und der Implementierung der nichtlinearen Induktivität und des Eisenverlustwiderstandes in Dreieckschaltung

OS	Oberspannungsseite	$L_h(i)$	(Nichtlineare) Hauptinduktivität in H
MS	Mittelspannungsseite	R_{Fe}	Eisenverlustwiderstand in Ω
US	Unterspannungsseite		

Anhand der zur Verfügung gestellten Daten aus dem Kurzschluss- und Leerlaufversuch der Transformatoren erfolgte im numerischen Berechnungsprogramm eine Plausibilitätsprüfung. Tabelle D-1 und Tabelle D-2 zeigen eine Gegenüberstellung der Daten aus einem Prüfprotokoll der Transformatoren und den Ergebnissen der numerischen Berechnung. Der Vergleich der Daten zeigt eine gute Übereinstimmung.

Tabelle D-1: Vergleich der Kurzschlussdaten aus dem Transformatorprüfprotokoll und den numerischen Berechnungen

Spannung	Daten aus Prüfprotokoll		Berechnet (BCTTRAN)	
	Strom	Leistung	Strom	Leistung
kV	A	kW	A	kW
OS / MS bezogen auf 200 MVA				
70,18	288,7	405,7	288,5	405,0
OS / MS bezogen auf 58 MVA				
52,77	83,7	134,8	83,7	134,0
MS / US bezogen auf 58 MVA				
8,40	291,2	125,6	291,2	125,0

Tabelle D-2: Vergleich der Leerlaufdaten aus dem Transformatorprüfprotokoll und den numerischen Berechnungen

Spannung	Daten aus Prüfprotokoll		Berechnet (BCTTRAN)	
	Strom	Leistung	Strom	Leistung
kV	A	kW	A	kW
27	2,6	43,4	2,4	45,6
30	2,9	54,5	2,6	56,0
33	3,1	68,3	2,8	68,0

Anhang E Magnetisierungskennlinien und Eisenverlustwiderstände induktiver Spannungswandler

Magnetisierungskennlinien induktiver Spannungswandler:

Abbildung E-1 zeigt die Magnetisierungskennlinie eines induktiven 400-kV-Spannungswandlers.

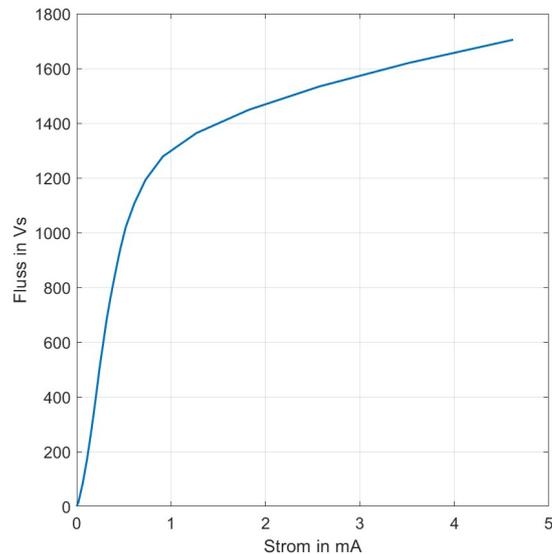


Abbildung E-1: Magnetisierungskennlinie eines induktiven 400-kV-Spannungswandlers [ESC05]

Eisenverlustwiderstände induktiver Spannungswandler:

Abbildung E-2 zeigt das Verhalten des Eisenverlustwiderstandes als Funktion des Stromes für einen induktiven 230-kV-Spannungswandler.

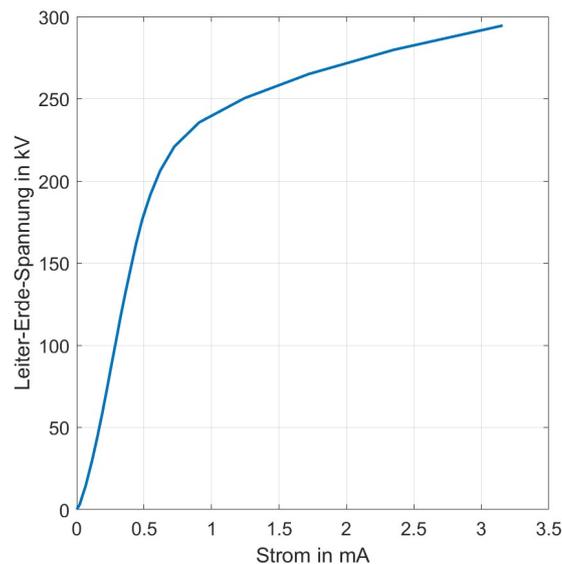


Abbildung E-2: Verlauf des Eisenverlustwiderstandes als Funktion des Stromes eines induktiven 230-kV-Spannungswandlers

Anhang E: Magnetisierungskennlinien und Eisenverlustwiderstände induktiver Spannungswandler

Abbildung E-3 zeigt das Verhalten des Eisenverlustwiderstandes als Funktion des Stromes für einen induktiven 110-kV-Spannungswandler.

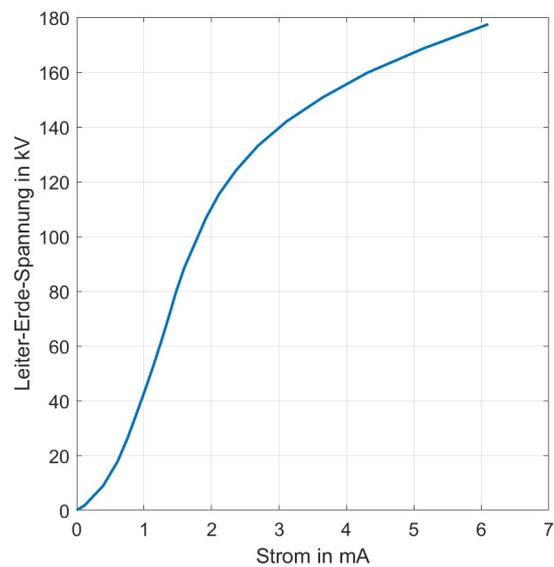


Abbildung E-3: Verlauf des Eisenverlustwiderstandes als Funktion des Stromes eines induktiven 110-kV-Spannungswandlers

Anhang F Sensitivitätsanalyse der numerischen Berechnungsmodelle induktiver Spannungswandler

Aus Abbildung 3-9 kann das numerische Berechnungsmodell eines induktiven Spannungswandlers entnommen werden. Um die Abhängigkeit der numerischen Modellbildung analysieren zu können, wurden die verschiedenen Repräsentation einer Parametervariation der wirksamen Kapazität (C_{LE}) im Bereich von 0,1 nF bis 10 nF (mit $\Delta C = 0,1$ nF) und dem sich öffnenden Leistungsschalter beim Zeitpunkt $t = 100$ ms unterzogen und die berechneten Größen gegenübergestellt. Für die verschiedenen Repräsentationen wurde die nichtlineare Magnetisierungskennlinie als ident angenommen. Abbildung F-1 zeigt das schematische Berechnungsmodell zur Ermittlung der Sensitivität der unterschiedlichen Repräsentation von induktiven Spannungswandler (einphasiges Berechnungsmodell).

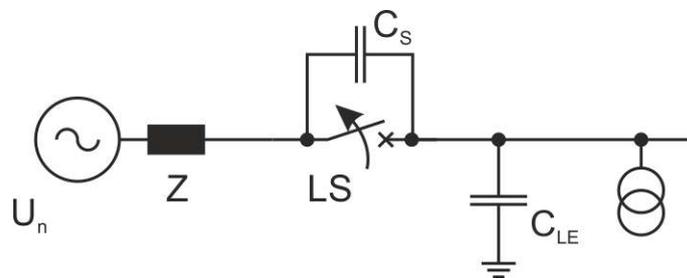


Abbildung F-1: Schematische Darstellung für die Ermittlung der Sensitivität der unterschiedlichen Repräsentation von induktiven Spannungswandlern

U_n	Betriebsspannung in V	C_s	Steuerkapazität in F
Z	Impedanz des Netzes in Ω	C_{LE}	Leiter-Erde-Kapazität in F
LS	Leistungsschalter		

Für die Untersuchung der Sensitivitätsanalyse wurde die nichtlineare Magnetisierungskennlinie sowie der Eisenverlustwiderstandes als Funktion des Stromes von einem induktiven 110-kV-Spannungswandler verwendet (siehe Anhang E). Ab dem Moment des Ausschaltens, wirkt sich das Verhältnis zwischen der Steuerkapazität des Leistungsschalters und der sich ändernden Leiter-Erde-Kapazität in Kombination mit dem induktiven Spannungswandler auf die Schwingfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung am Knotenpunkt des induktiven Spannungswandlers aus.

Abbildung F-2 zeigt die Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung bei der ersten Repräsentation des induktiven Spannungswandlers mit Kapazitäten (R_{Fe2} und L_{H2}). Es ist zu erkennen, dass mit steigender Kapazität die Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung abnimmt. Zudem verringert sich die Amplitude der Spitzenwerte, die auf ein dämpfendes Verhalten zurückschließen lässt. Es kommen stationäre Kippschwingung mit konstanter Frequenz bis zu einer Kapazität von ca. $C = 1,4$ nF zu Stande. Danach ist die wirksame Kapazität des Modellnetzes hinreichend groß und die Schwingungsfähigkeit nimmt ab. Bei Vernachlässigung der Kapazitäten (Hochspannungskapazität und Lagenkapazität der Primärspule) des induktiven Spannungswandlers weichen die numerischen Berechnungsergebnisse nicht signifikant ab (siehe Abbildung F-3).

Anhang F: Sensitivitätsanalyse der numerischen Berechnungsmodelle induktiver Spannungswandler

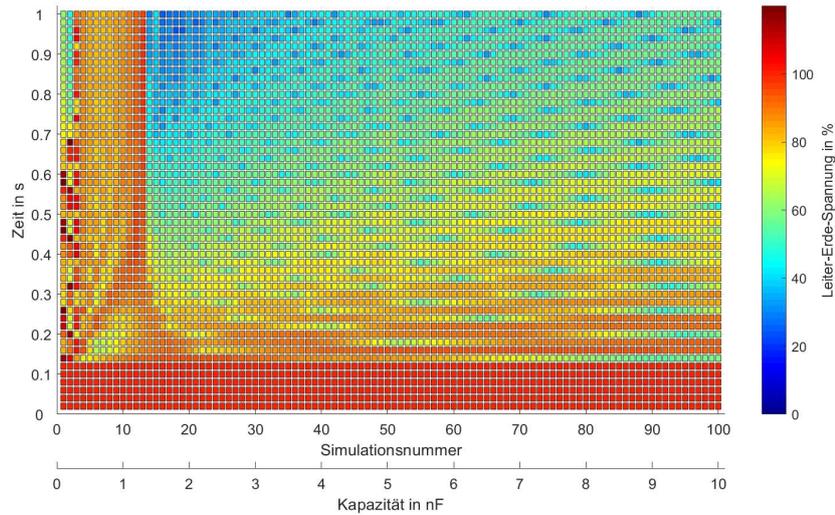


Abbildung F-2: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung für die vollständige Repräsentation (R_{Fe2} und L_{H2}) eines induktiven Spannungswandlers mit Kapazitäten

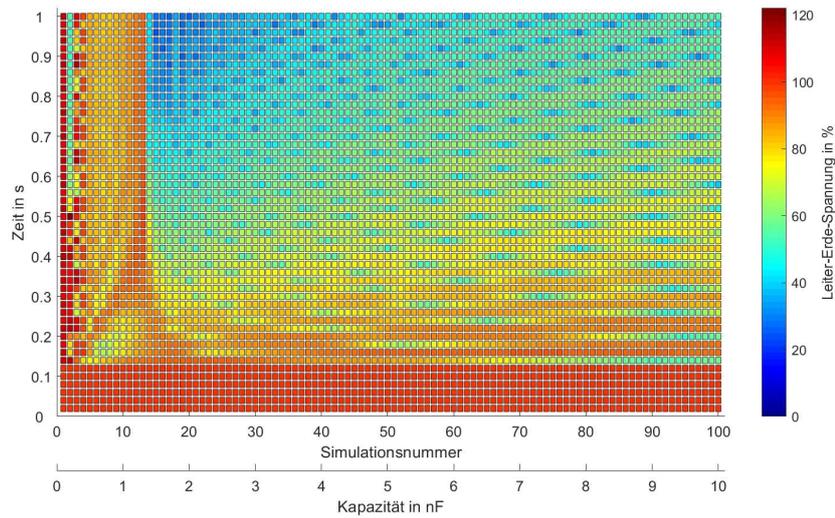


Abbildung F-3: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung für die vollständige Repräsentation (R_{Fe2} und L_{H2}) eines induktiven Spannungswandlers ohne Kapazitäten

Anhang F: Sensitivitätsanalyse der numerischen Berechnungsmodelle induktiver Spannungswandler

Abbildung F-4 zeigt die Repräsentation des induktiven Spannungswandlers mit den beiden Komponenten R_{Fe1} und L_{H2} . Der Abbildung ist zu entnehmen, dass im Vergleich zu vorher eine Leiter-Erde-Kapazität von 0,6 nF hinreichend ist, um das Auftreten von Kippschwingung zu vermeiden. Das numerische Berechnungsergebnis unter Vernachlässigung der Kapazitäten weicht nicht signifikant von der gezeigten Darstellung ab (siehe Abbildung F-5).

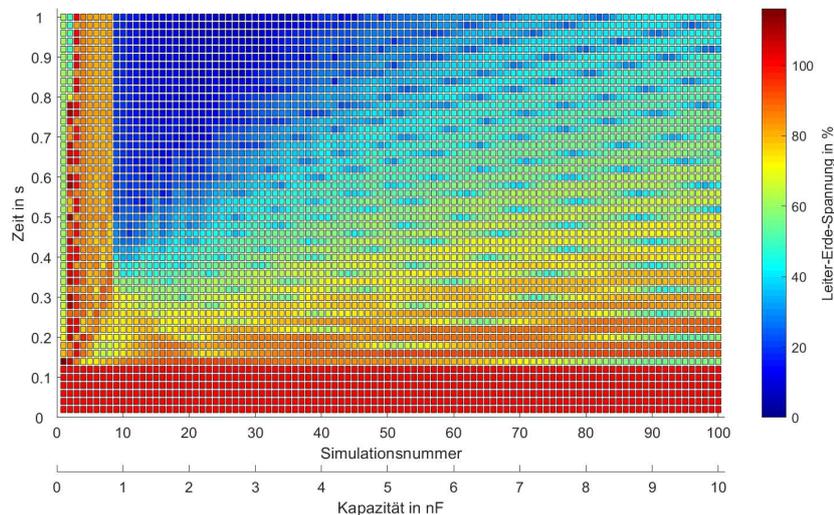


Abbildung F-4: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung für die vollständige Repräsentation (R_{Fe1} und L_{H2}) eines induktiven Spannungswandlers mit Kapazitäten

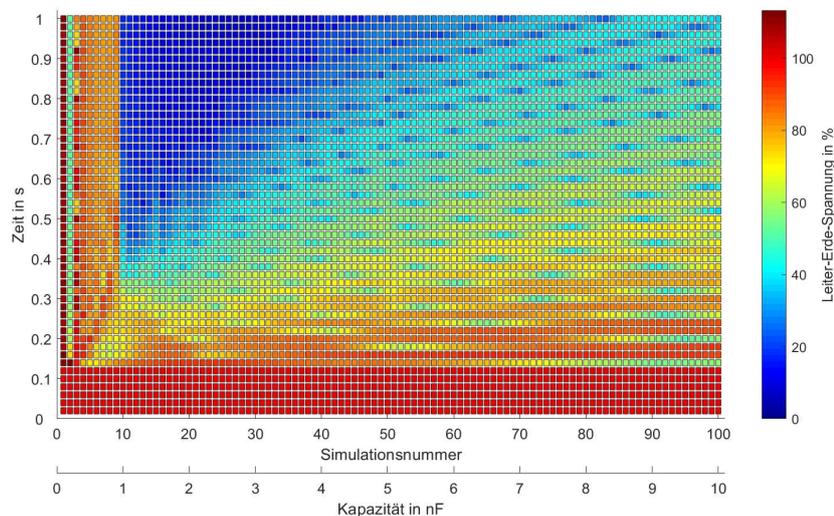


Abbildung F-5: Auswertung der Schwingungsfähigkeit der Leiter-Erde-Spannung für die vollständige Repräsentation (R_{Fe1} und L_{H2}) eines induktiven Spannungswandlers ohne Kapazitäten

Die Durchführung von numerischen Berechnungen am Modellnetz zur Untersuchung von Kippschwingungen zeigte bei der Variation der verschiedenen Repräsentationen der induktiven Spannungswandler mehr oder weniger signifikante Unterschiede.

Anhang G Einliniensaltbilder der Hochspannungsanlagen A bis C

Hochspannungsanlage A (400 / 110 / 30 kV):

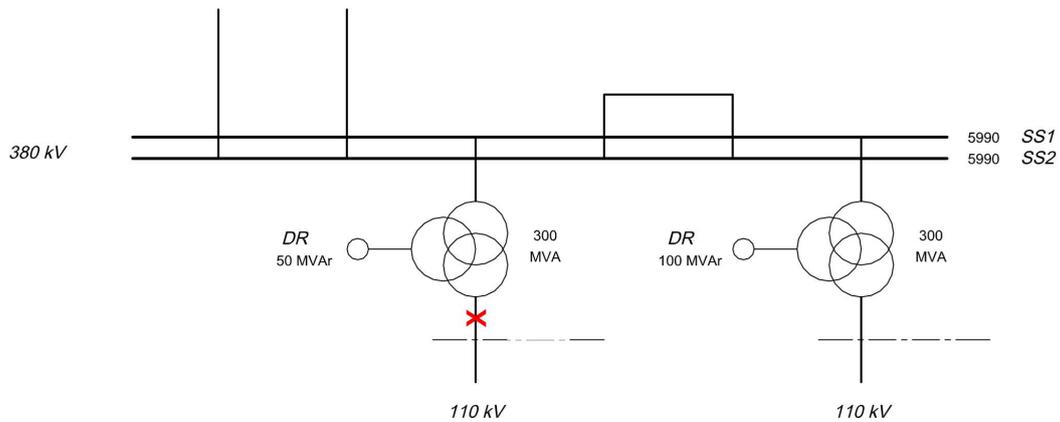


Abbildung G-1: Einliniensaltbild von Hochspannungsanlage A mit dem Messknoten der ohmsch-kapazitiven 110-kV-Spannungsteiler

Hochspannungsanlage B (400 / 110 / 30 kV):

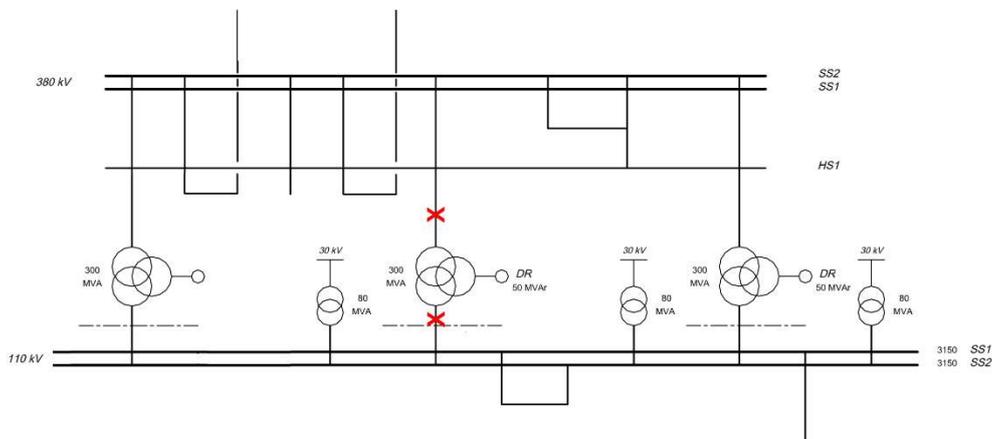


Abbildung G-2: Einliniensaltbild von Hochspannungsanlage B mit dem Messknoten der ohmsch-kapazitiven 110-kV- und 400-kV-Spannungsteiler

Hochspannungsanlage C (400 / 230 / 110 / 30 kV):

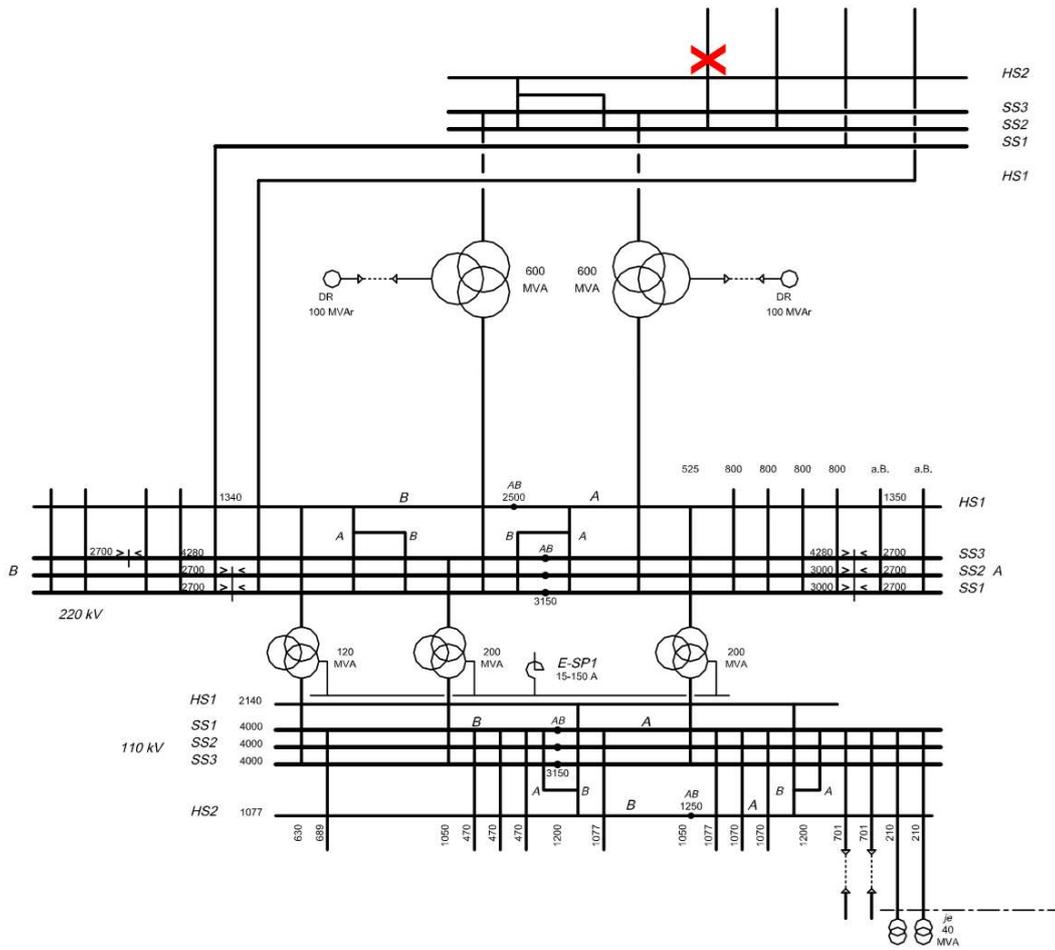


Abbildung G-3: Einlinienschaltbild von Hochspannungsanlage C mit dem Messknoten der ohmsch-kapazitiven 400-kV-Spannungsteiler

Anhang H Technische Daten der Messgeräte

Die technischen Daten der Messgeräte und Einschubkarten können aus Tabelle H-1, Tabelle H-2 und Tabelle H-3 entnommen werden. Für den Schutz der Einschubkarten der digitalen Speicheroszilloskope ist ein Überspannungsschutz in den Unterkapazitäten der eingesetzten Spannungsteiler vorhanden. Ein zusätzlicher Schutz der Einschubkarten erfolgt durch den Einsatz von passiven Tastköpfen (10:1) mit geeigneter Bandbreite (Tabelle H-4).

Tabelle H-1: Technische Daten des digitalen Speicheroszilloskops – Yokogawa SL1000

Hersteller	Yokogawa
Messgerät	SL1000 PC-Based Data Acquisition Units
Maximale Abtastrate	100 MS/s
A/D-Auflösung	12 Bit
Anzahl Messeinschub	8
Anzahl der Eingänge	16

Tabelle H-2: Technische Daten des digitalen Speicheroszilloskops – Yokogawa DL850V

Hersteller	Yokogawa
Messgerät	DL850/DL850V ScopeCorder
Maximale Abtastrate	100 MS/s
A/D-Auflösung	16 Bit
Anzahl Messeinschub	8
Anzahl der Eingänge	16

Tabelle H-3: Technische Daten der Einschubkarten

Typ	720120 (Analog Voltage Input Module)
Maximale Abtastrate	100 MS/s
A/D-Auflösung	12 Bit
Anzahl der Eingänge	2
Frequenzbereich	DC – 20 MHz
Maximale Spannungsfestigkeit	200 V DC + AC-Spitze für $f \leq 1$ kHz

Tabelle H-4: Technische Daten der Tastköpfe

Hersteller	Testec
Typ	TT-HF312 30/300 MHz
Teilverhältnis	1:1 / 10:1
Bandbreite	30 / 300 MHz
Anstiegszeit	<12 ns / 1,2 ns
Betriebsspannung	600 V CATI, DC & AC Spitze

Anhang I Technische Daten der ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler

Technische Daten der ohmsch-kapazitiven 400-kV-Spannungsteiler:

Hersteller	PIFFNER Messwandler AG
Typ	ROF 420
Spannung	420 / 630 / 1425 / 1050 kV
Frequenz	50 Hz
Teilverhältnis	400000 V/ $\sqrt{3}$:100 V/ $\sqrt{3}$
Klasse	$\pm 0,5 \%$
Anzahl der Sekundäranschlüsse	2
Bürde	
Anschluss 1a-1n	1 M Ω /35 pF (Oszilloskop)
Anschluss 2a-2n	10 M Ω /2,2 pF (PQ-Messgerät)
Messkabellänge	250 m

Die Kalibrierung der ohmsch-kapazitiven 400-kV-Spannungsteiler erfolgt durch den Hersteller (internes Kalibrationslabor).

Technische Daten der ohmsch-kapazitiven 110-kV-Spannungsteiler:

Hersteller	PIFFNER Messwandler AG
Typ	ROF 123
Spannung	123 / 230 / 550 kV
Frequenz	50 Hz
Teilverhältnis	110000 V/ $\sqrt{3}$:100 V/ $\sqrt{3}$
Genauigkeit	$\pm 0,5 \%$
Anzahl der Sekundäranschlüsse	2
Bürde	
Anschluss 1a-1n	1 M Ω /35 pF (Oszilloskop)
Anschluss 2a-2n	10 M Ω /2,2 pF (PQ-Messgerät)
Messkabellänge	250 m

Die Kalibrierung der ohmsch-kapazitiven 110-kV-Spannungsteiler erfolgt durch den Hersteller (internes Kalibrationslabor).

Anhang J Checkliste für den Messaufbau

Vorbereitungen organisatorisch:		
Begehung der Hochspannungsanlage		
Aufstellungsort		
Aufstellungsort – statische Stabilität gewährleisten		
Verlegungsmöglichkeiten der Messleitungen (Kabelschacht, Kabelgang, ...)		
Transport der Messteiler und der Untergestelle zur Hochspannungsanlage		
Seil- und Klemmverbindungen		
Verfügbarkeit des Leitungstrupps		
Vorbereitungen technisch:		
Teile der Hochspannungsanlage nach den Sicherheitsregeln vorbereiten		
Positionierung der Untergestelle		
Höhenanpassung der Untergestelle mit den Submodulen		
Untergestelle und Submodule verbinden		
Positionierung der Messteiler		
Befestigung der Messteiler am Untergestell		
Beidseitige Erdungsverbindung der Messteiler zum Untergestell		
Kurze Seilverbindungen vom Messteilerkopf zu den einzelnen Phasen		
Verwendung geeigneter Seilklemmen		
Vorbereitungen Messtechnik:		
Messtechnik vorbereiten und Vollständigkeit prüfen		
Breitbandiges Messgerät zur Erfassung transienter Spannungen		
Anzahl der Kanäle/Einschubkarten definieren		
Aufstellungsort des Messsystems besprechen und vorbereiten		
Messtisch vorbereiten		
Großflächige niederinduktive Erdungsplatte am Messtisch		
Erdungsplatte mit lokaler Erdung der Hochspannungsanlage verbinden		
Messgerät niederinduktiv positionieren		
Tastkopfsystem positionieren und mit Erdungsplatte verbinden		
Messleitungen verlegen (Kabelschacht, Kabelgang, ...)		
Enge Verlegung der Messleitungen		
Anschluss der Messleitungen an den Messteilern		
Bürde beachten bei Verwendung eines Messanschlusses am Messteiler (Externe oder interne Beschaltung)		
Messgerät parametrieren – Daueraufzeichnung		
Zeitsynchronisierung parametrieren		
Fernzugriff vorbereiten		
Messaufbau freigeben:	a) Hochspannungsseitig	
	b) Messtechnisch-seitig	