

Mathias Maurer, BSc

Auswirkungen transienter Spannungen im österreichischen Hochspannungsnetz

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack

Dipl.-Ing. Dr.techn. Lukas Schwalt, BSc

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Graz, September 2020

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit 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 Masterarbeit identisch.

10.09.2020

Datum



Unterschrift

Danksagung

Die vorliegende Arbeit stellt einen der bedeutsamsten und zugleich letzten Abschnitt meines Studiums an der Technischen Universität Graz dar. An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen und meinen Dank all jenen aussprechen, die mich im Laufe meines Studiums unterstützt und begleitet haben.

Ein großer Dank gilt in erster Linie meinem Betreuer Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack. Er hat mir nicht nur die Möglichkeit zum Verfassen dieser Arbeit gegeben, sondern mich auch während meines Studiums und meiner Zeit am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement immer außerordentlich unterstützt. Als langjähriger Studienassistent und Projektmitarbeiter durfte ich in einigen persönlichen Gesprächen so manchen fachlichen sowie auch freundschaftlichen Rat erfahren, welcher mich auf meinem Weg stets weitergebracht hat.

Ebenso gebührt ein großer Dank Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Lukas Schwalt, BSc, der mir als Co-Betreuer dieser Arbeit und Arbeitskollege in unzähligen Skype-Telefonaten stets eine wertvolle Hilfe war und mich fachlich sowie zwischenmenschlich immer unterstützt hat.

Meinen Mitkommilitonen und Leidensgenossen Flo, Chrissi und Chris möchte ich an dieser Stelle für diesen wichtigen gemeinsamen Lebensabschnitt und die gegenseitige Motivation in so manch schwieriger Studienphase bedanken. Speziell bei Flo möchte ich mich für den wechselseitigen Beistand, das Durchhaltevermögen und die enge Freundschaft bedanken, die uns durch das Studium geführt hat.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, allen voran meinen Eltern Maria und Hubert sowie meiner Schwester Tamara und ihrem Mann Thomas, die mir durch ihre unermüdliche Unterstützung und ihren Rückhalt dieses Studium überhaupt erst ermöglicht haben.

Mein letzter Dank gebührt meiner Lebenspartnerin Sarah, die mich mit ihrem Glauben an meinen Erfolg und ihrer Fähigkeit zur Motivation während der letzten Abschnitte meines Studiums stets bereichert hat. Ihr Einfühlungsvermögen, ihre Toleranz und ihr Verständnis in manch stressiger Phase tragen wesentlich zu meinem Studienabschluss bei.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Korrelation transienter Spannungsmessungen mit Schaltmeldeprotokoll- sowie Blitzortungsdaten. Es werden dazu vorab notwendige Datenbehandlungsmethoden sowie die eigentliche Korrelationsmethode entwickelt und an einem vorliegenden transienten Messdatensatz (13.800 Spannungsmessungen) des österreichischen Hochspannungsnetzes zur Anwendung gebracht. Dabei werden in der Arbeit Datenbehandlungsschritte zur Entfernung nicht-transienter Störanteile, Kategorisierung nach Maximalwert sowie zum Herauslösen des überlagerten transienten Spannungsanteils vorgestellt. Die entwickelte Korrelationsmethode ermöglicht die Korrelation mit Schaltmelde- und Blitzortungsdaten sowie eine Analyse des transienten Datensatzes, auf welche ebenfalls im Zuge dieser Arbeit eingegangen wird. Es erfolgt eine Analyse hinsichtlich der zuordenbaren Entstehungsursachen transienter Spannungen nach Betriebsmittel und deren Intensität sowie ihrer Aufttrittshäufigkeit an verschiedenen Messstandorten im Netz. Im Zuge der Arbeit werden ebenfalls quantitative Ergebnisse in Bezug auf die Sichtbarkeit transienter Ereignisse innerhalb des betrachteten Leitungsbereichs des Übertragungsnetzes vorgestellt, sowie Analysen hinsichtlich transienter Auswirkungen identer Schalthandlungen in Umspannwerken durchgeführt. Eine Untersuchung des Messdatensatzes auf transiente Auswirkungen aus untergeordneten Spannungsebenen rundet diese Arbeit ab.

Schlagwörter

- Transiente Spannungen
- Schaltspannungen und Fehler
- Blitzentladungen
- Korrelation

Abstract

This thesis deals with the correlation of measured transient voltages with switching protocols and data of the Austrian Lightning Location System. Preliminary signal processing methods as well as an correlation method were introduced and applied on an transient measurement data set (13.800 voltage measurements) out of the austrian highvoltage grid. Signal processing methods to remove non-transient signal parts, categorize on maximum values and to separate the superimposed transient voltage from the measured phase-to-ground-voltage are developed. The invited correlation method enables the correlation of switching and lightning location data as well as the analysis of the transient data set, which will be also discussed in this thesis. This analysis deals with assignable causes of origin, the intensities as well as the frequency of occurrenc of transient voltages. Furthermore quantitative results of visibility of transient events in the focused grid area will be presented. Transient effects on similar switching action in substations will be discussed as well. Finally in this thesis the measurement data set will be examined for transient effects from lower voltage levels.

Keywords

- transient voltages
- switching voltages and faults
- lightning discharge
- correlation

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	vii
Abstract	ix
1. Einführung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Ziel der Arbeit	1
1.3. Forschungsfragen	2
2. Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen	3
2.1. Überblick und Ursachen	3
2.2. Kenngrößen	5
2.3. Auswirkungen	6
2.4. Transiente Spannungen im Netz	8
3. Datensätze	13
3.1. Transiente Messdaten	13
3.2. Schaltmeldedaten	14
3.3. Blitzortungsdaten	15
4. Datenbehandlung	19
4.1. Datenqualität	19
4.2. Betrachtung überlagerter transienter Anteile	20
4.3. Umgang mit nicht-transienten Störanteilen	21
4.4. Endsignalbearbeitung für die Kategorisierung	23
4.5. Kategorisierung nach Maximalwert	24
4.6. Grafische Ausgabe	26
5. Korrelationsmethodik	29
5.1. Prozessentwicklung	29
5.2. Korrelationsparameter	30
5.3. Klassifizierung	31
5.4. Strukturierte Ablage der grafischen Ausgaben	32
6. Ergebnisse	33
6.1. Korrelation des Gesamtdatensatzes	33
6.2. Kategorieverteilung	36
6.3. Sichtbarkeit transienter Ereignisse an verschiedenen Messstandorten	47

Inhaltsverzeichnis

6.4. Auswirkungen identer Schalthandlungen und Betriebsmittel	50
6.5. Transiente Auswirkungen aus untergeordneten Spannungsebenen	53
7. Erkenntnis und zukünftige Forschungsthemen	55
7.1. Datenbehandlung	55
7.2. Korrelation des Gesamtdatensatzes	56
7.3. Kategorieverteilung	56
7.4. Sichtbarkeit transienter Ereignisse an verschiedenen Messstandorten	57
7.5. Auswirkungen identer Schalthandlungen und Betriebsmittel	60
7.6. Transiente Auswirkungen aus untergeordneten Spannungsebenen	60
8. Zusammenfassung	63
Literatur	65
Abkürzungsverzeichnis	66
Bildverzeichnis	68
Tabellenverzeichnis	71
Anhang	73
A. Zuordnungen von Schaltmeldedaten	75
B. Zuordnungen von Blitzortungsdaten	81
C. Interne Ordnerstruktur der SMP-Korrelation für UW A	85

1. Einführung

1.1. Motivation

Aufgrund steigender Bemühungen unser Energiesystem von fossilen Energieformen hin zu einem immer größer werdenden Anteil an volatilen erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen zu führen, befindet sich nicht nur die Erzeugerstruktur im Wandel, sondern auch die sichere und störungsfreie Übertragung und Verteilung elektrischer Energie wird zunehmend herausfordernder.

Die Erhöhung des erneuerbaren Energieanteils mit seiner schwankenden Verfügbarkeit führt zu einem vermehrten Einsatz an Konverterstationen, sowie allgemein zu einer erhöhten Anzahl an Schalthandlungen im Netz. Dies spiegelt sich einerseits in der Qualität der bereitgestellten elektrischen Energie sowie in zusätzlichen transienten Belastungen elektrischer Betriebsmittel in Hochspannungssystemen [1].

Aus diesem Grund kommt der Analyse und Kenntnis des transienten Zustandes in Hochspannungssystemen eine wichtige Rolle hinsichtlich eines zuverlässigen und sicheren Netzbetriebs zu. Wie von Dr. Sperling in [1] beschrieben, ermöglicht hierbei die transiente Spannungsmessung im Netz mit Hilfe von breitbandigen ohmsch-kapazitiven-Spannungsteilern (sog. RC-Teilern) einen wesentlichen Beitrag. Eine Korrelation solcher transienter Messdaten mit Betriebsführungsdaten kann wertvolle Erkenntnisse im Bereich transienter Überspannungen sowie bezogen auf die Ursache und Auswirkungen in Hochspannungssystemen liefern.

1.2. Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zur Korrelation transienter Spannungsmessungen mit Schaltmelde- und Blitzortungsdaten zu entwickeln sowie Analysen hinsichtlich Entstehungsursache, Intensität und Auftrittshäufigkeiten der transienten Messdaten durchzuführen. Die Basis der Arbeit sollen bereits vorliegende transiente Spannungsmessungen aus dem österreichischen Hochspannungsnetz sein. Ein wesentliches Augenmerk soll dabei auf die für die Korrelation notwendige Datenbehandlung der transienten Messdaten gelegt werden. Durch die Anwendung der Methoden auf den vorliegenden transienten Messdatensatz sollen diese einerseits verifiziert werden und die gemessenen transienten Spannungen analysiert werden. Die Analyse der

1. Einführung

transienten Messungen aus den Jahren 2017 bis 2019 soll wichtige Erkenntnisse hinsichtlich Auswirkungen transientser Spannungen innerhalb des österreichischen Hochspannungsnetzes liefern. Zusätzlich soll ein detaillierter Einblick in die transiente Spannungssituation des österreichischen Übertragungsnetzes erhalten werden.

1.3. Forschungsfragen

Ausgehend von dem in Kapitel [1.2](#) definierten Ziel dieser Arbeit können detaillierte Forschungsfragen definiert werden. Die im Zuge dieser Arbeit durchgeführte Analyse soll eine Untersuchung und Beantwortung der folgenden Fragestellungen ermöglichen:

- 1) Welche Entstehungsursachen können den erfassten transienten Spannungen an verschiedenen Messstandorten im Netz zugeordnet werden?
- 2) In welcher Intensität treten Auswirkungen transientser Spannungen an verschiedenen Messstandorten im Netz auf?
- 3) Welche Reichweite haben transiente Ereignisse innerhalb des Hochspannungssystems?
- 4) Zeigen idente Schaltheandlungen idente transiente Auswirkungen?
- 5) Treten transiente Spannungen aus untergeordneten Spannungsebenen auf?

2. Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen

2.1. Überblick und Ursachen

Unter dem Wort „transiente Spannung“ wird im elektrotechnischen Sinn eine nicht betriebsfrequente Spannung verstanden [2]. Transiente Spannungen treten in Hochspannungssystemen im Wesentlichen beim Übergang von einem stationären Zustand in einen anderen auf [3]. Diese Ausgleichsvorgänge erzeugen zusätzliche Beanspruchungen in Form von Überspannungen an den Betriebsmitteln und können zu Wanderwellenvorgängen innerhalb des Hochspannungssystems führen. Grundsätzlich werden transiente Spannungen entsprechend der Herkunft ihrer Ursache in „innere“ und „äußere“ Überspannungen unterteilt [4]. Eine weitere Unterteilung transienter Spannungen hinsichtlich des anlagentechnischen Umfelds ist in Tabelle 2.1 angeführt. Die hier dargestellten drei Bereiche transienter Spannungen werden in Vorschriften und internationalen Normen wie der EN 60071-1 [5] entsprechend ihrer Anstiegszeiten und ihrer Frequenzanteile als langsam, schnell und sehr schnell ansteigende Überspannungen bezeichnet.

Tabelle 2.1.: Überblick über transiente Spannungen [2], bearbeitet

Transiente Spannungen		
Atmosphärische Überspannungen	Schaltspannungen und Fehler	
Gesamter Bereich der Hochspannungssysteme	Bereich der Freiluft- und Innenraumanlagen	Bereich der gasisolierten Schaltanlagen
schnell ansteigende Überspannungen	langsam ansteigende Überspannungen	sehr schnell ansteigende Überspannungen

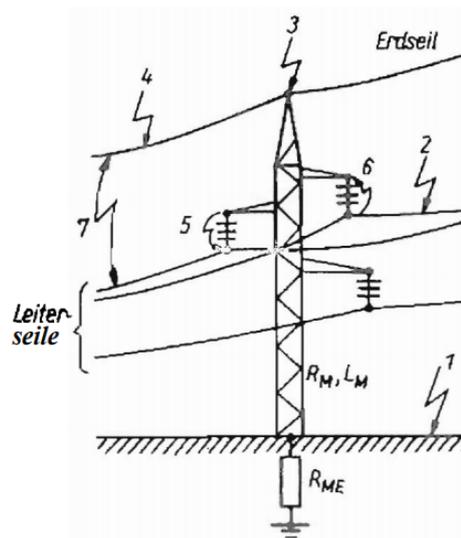
Innere Überspannungen können durch geplante oder ungeplante Schalthandlungen ausgelöst werden. Geplante Schalthandlungen umfassen vorwiegend die Schaltung von Netzabschnitten und einzelnen Betriebsmitteln hinsichtlich Lastverteilung und Betriebsführung. Zur Gruppe der ungeplanten Schalthandlungen zählt das Eintreten und Erlöschen von Fehlern wie etwa Erd- und Kurzschlüsse.

2. Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen

Grundsätzlich lassen sich Entstehungsursachen innerer transienter Überspannungen wie folgt unterteilen [2]:

- Einschalten leerlaufender Leitungen
- Einschalten von Kondensatorbänken
- Ausschalten langer Leitungen
- Ausschalten induktiver Ströme
- Ausschalten kapazitiver Ströme
- Schalten von Fehlern

Als äußere Überspannungen werden durch direkte oder indirekte Blitzentladungen verursachte Überspannungen bezeichnet. Hochspannungssysteme unterliegen durch ihre Freileitungen und Freiluftschaltanlagen unmittelbar der Wirkung atmosphärischer Entladungen. Diese Überspannungen können durch Direkteinschläge in das Leiterseil der Freileitung, durch Einschlag in ein geerdetes Anlagenteil sowie durch indirekte Blitzentladungen und deren induzierte Spannungen hervorgerufen werden (siehe Bild 2.1) [2].



- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 Naher (indirekter) Blitzeinschlag | 5 Rückwärtiger Überschlag als Folge von 3 oder 4 |
| 2 Leiterseileinschlag | 6 Überschlag zum Mast als Folge von 2 |
| 3 Masteinschlag | 7 Überschlag zwischen Erd- und Leiterseil als Folge von 2 oder 4 |
| 4 Erdseileinschlag | |

Bild 2.1.: Direkte und indirekte Blitzeinschläge in eine Freileitung [6]

Der Frequenzbereich der transienten Ausgleichsvorgänge ist von mehreren verschiedenen Parametern abhängig. So fließen etwa Trägheitsmomente elektrischer Maschinen, die Schnelligkeit von Regelkreisen, Laufzeiten und Wellenwiderstandsverhältnisse sowie die Größe von Netzinduktivitäten und -kapazitäten in die resultierenden Frequenzen mit ein [2]. Tabelle 2.2 liefert eine Auflistung üblicher Frequenzbereiche hinsichtlich ihrer Ursachen.

Tabelle 2.2.: Ursachen transients Vorgänge und deren Frequenzbereiche [7]

Ursache	Frequenzbereich
Einschaltung Transformator Ferroresonanz	0,1 Hz - 1 kHz
Einschaltung Freileitung	50/60 Hz - 20 kHz
Lastabwurf	0,1 Hz - 3 kHz
Kurzschlussabschaltung	50/60 Hz - 3 kHz
Kurzschlusseinleitung	50/60 Hz - 20 kHz
Wiederkehrende Spannung	50/60 Hz - 20 kHz
Klemmenkurzschluss	50/60 Hz - 100 kHz
Abstandskurzschluss	
Multiple Wiederzündungen bei Leistungsschaltern	10 kHz - 1 MHz
Atmosphärische Überspannung, Fehler in Schaltanlagen	10 kHz - 3 MHz
Wiederzündungen bei Trennerschaltungen (Fehler in GIS)	100 kHz - 50 MHz

2.2. Kenngrößen

Für die Beschreibung und Analyse transients Spannungen bilden die Spannungs-Zeit-Charakteristiken ein wichtiges Beurteilungskriterium. Darin sind eine Vielzahl von Informationen wie etwa Anstiegszeiten, Scheitelwerte, Spannungszusammenbruchzeiten sowie Frequenzanteile und Dämpfungsfaktoren enthalten [2]. In den Vorschriften zur Isolationskoordination werden für die drei Bereiche der transienten Spannungsformen deren Zeitparameter angegeben. Bild 2.2 zeigt einen Ausschnitt dieser Auflistung aus Tabelle 1 in [5]. Im Zuge der Analysen dieser Arbeit wurden nur die Bereiche langsam und schnell ansteigende Überspannungen betrachtet.

Die Anstiegszeiten für langsam ansteigende Überspannungen liegen im Bereich von 20 μs bis 5000 μs . Als Rückenhalbwegszeiten werden Werte unter 20 ms betrachtet. Für den Bereich der schnell ansteigenden Überspannungen liegen die Anstiegszeiten zwischen 0,1 μs und 20 μs . Rückenhalbwegszeiten bis 300 μs fallen in diesen Bereich (siehe Bild 2.2). Tabelle 2.3 zeigt für alle drei Überspannungskategorien typische Scheitelwert- und Frequenzbereiche. Für langsam und schnell ansteigende Überspannungen ist also im Zuge der Analyse mit Scheitelwerten bis etwa 5,0 p.u. und Frequenzen bis etwa 5 MHz zu rechnen.

2. Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen

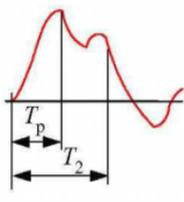
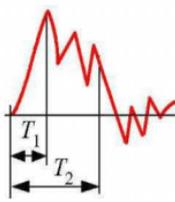
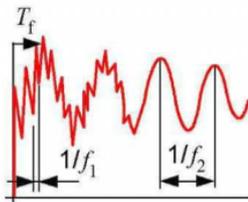
transient		
langsamer Anstieg	schneller Anstieg	sehr schneller Anstieg
		
$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5\,000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$

Bild 2.2.: Transiente Spannungen bzw. Überspannungsformen und deren Zeitparameter (Anstiegszeiten T_p, T_1, T_f , Rückenhalbwertszeit T_2 , Frequenzanteile f_1, f_2) [5]

Tabelle 2.3.: Scheitelwerte und Frequenzbereiche der verschiedenen Überspannungskategorien [2], modifiziert

Überspannungskategorie	Scheitelwerte	Frequenzbereich
Langsam ansteigende Überspannung	1,0....2,5 p.u.	bis 20 kHz
Schnell ansteigende Überspannung	1,0....5,0 p.u.	10 kHz bis 5 MHz
Sehr schnell ansteigende Überspannung	0,5....2,0 p.u.	100 kHz bis 300 MHz

2.3. Auswirkungen

Wie zuvor bereits erwähnt sind Zustandsänderungen des Hochspannungssystems maßgeblich für das Auftreten transienter Spannungen verantwortlich. Durch jede Schalthandlung werden ebensolche Zustandsänderungen hervorgerufen, aber nicht zwingend zu einer Überspannung führen. Die transienten Auswirkungen von Schalthandlungen sind von der Art des geschalteten Stromkreises, den Netzverhältnissen auf der Speiseseite und vom Schaltgerät selbst abhängig. Wiederrzündungen und Unterbrechungen treten durch Eigenschaften der Schaltstrecke sowie durch entstehende Ausgleichsvorgänge auf. Transiente Spannungen aufgrund von Schalthandlungen können in einem begrenzten Bereich des Hochspannungssystems wirken oder sich auch auf das gesamte Netz erstrecken. Die Spannungs-Zeit-Verläufe der inneren Überspannungen stellen sich in Abhängigkeit von Art und Anzahl der Betriebsmittel, dem Ort der Schalthandlung bzw. des Fehlers und der Struktur des Hochspannungssystems sehr unterschiedlich dar [2].

Bild 2.3 zeigt beispielhaft eine geplante Einschaltung eines Sammelschientrenners gemessen am Regelhauptumspanner (RHU). Zusätzlich zu den drei gemessenen Phasenspannungen ist zu erkennen, dass für Phase L1 eine generierte 50-Hz-Komponente (magenta) dargestellt ist. Diese wird für die Analyse der überlagerten transienten Spannungen verwendet und ist in Kapitel 4.2 näher beschrieben.

Eine ungeplante Schalthandlung aufgrund eines einpoligen Fehlereintritts ist beispielhaft in Bild 2.4 dargestellt. Hierbei wurde die Spannungsmessung direkt am betroffenen Leitungsabgang durchgeführt.

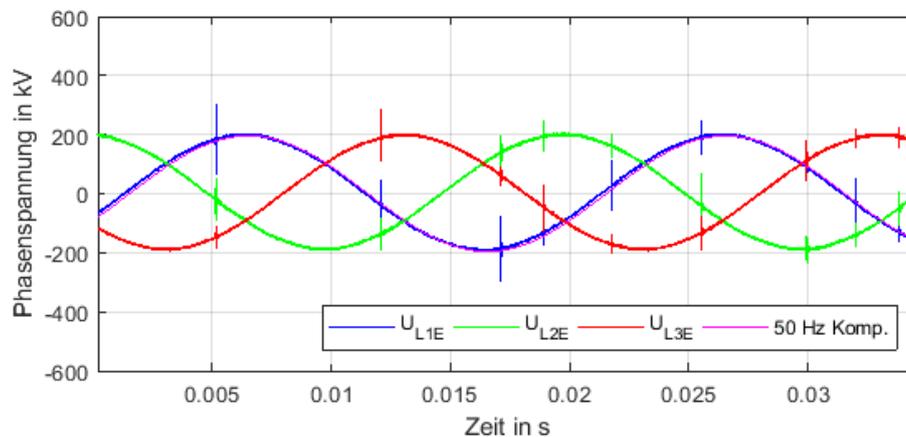


Bild 2.3.: Geplante Schalthandlung: Einschaltung Sammelschienenentrenner

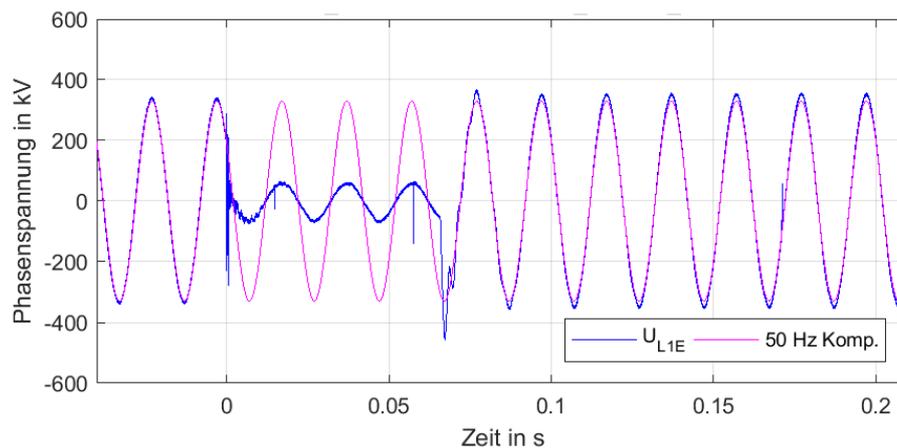


Bild 2.4.: Ungeplante Schalthandlung: Schutzauslösung und automatische Wiedereinschaltung

Äußere, also atmosphärische Überspannungen, erzeugen bei direkten Einschlägen sowie bei rückwärtigen Überschlägen Überspannungswellen, die entlang der Freileitung auf die Schaltanlage zulaufen. Die Höhe und Form der Blitzüberspannung ist von mehreren Faktoren abhängig. Einerseits spielt die Größe des Blitzstromes sowie des Wellenwiderstandes der betroffenen Leiter eine wesentliche Rolle. Andererseits haben auch Parameter wie die Bauform der Freileitung und der Stoßausbreitungswiderstand im Hochspannungssystem einen Einfluss [2].

Überschreitet die sich aus einem Direkteinschlag nach beiden Seiten ausbreitende Wanderwellenspannung die Steh-Blitz-Stoßspannung des Isolators, kommt es zu einem Überschlag zwischen Leiterseil und Mast. Dadurch wird die weiterlaufende Wanderwelle in ihrer Amplitude auf die Stehstoßspannung der Leitungsisolation begrenzt [8]. Beim Einschlag in den Mast oder das Erdseil baut sich am Stoßerdungswiderstand eine Mastspannung auf, welche beim

2. Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen

Überschreiten der Steh-Blitz-Stoßspannung der Isolation zu einem rückwärtigen Überschlag führt [2]. Indirekte Blitzeinschläge können durch ihr abgestrahltes elektromagnetisches Feld transiente Überspannungen in leitende Anlagenteile wie etwa Freileitungen und Schaltanlagen induzieren. Bild 2.5 zeigt durch eine indirekte Entladung in der Nähe einer Freileitung induzierte transiente Spannungen. Die in allen drei Phasen gleichsinnig auftretenden Spannungsspitzen lassen auf eine induzierte Einkopplung schließen.

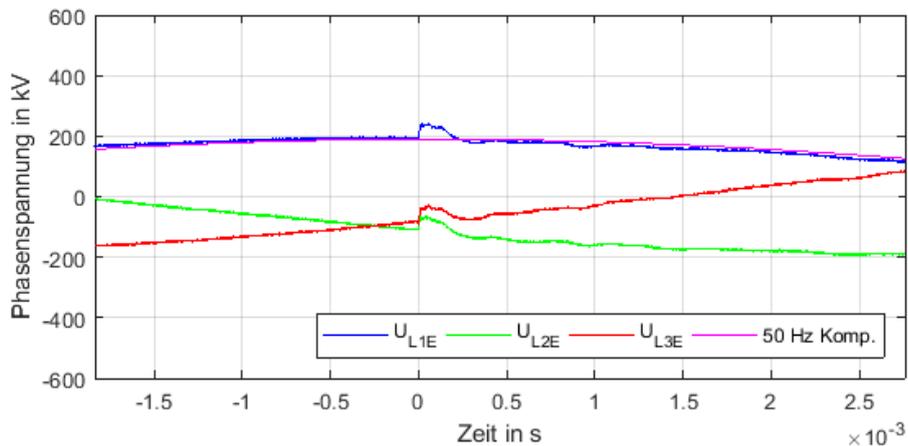


Bild 2.5.: Induziertes Spannungssignal in allen drei Phasen aufgrund einer indirekten Blitzentladung

2.4. Transiente Spannungen im Netz

Im Zuge dieser Arbeit standen transiente Messdaten aus dem Hochspannungsnetz zur Verfügung, welche mit Ohmsch-Kapazitiven-Spannungsteilern (RC-Teiler) gemessen wurden. Diese Messteiler zählen zu der Gruppe der nichtkonventionellen Messsysteme in der Hochspannungstechnik. Trotzdem erfahren sie einen zunehmend vermehrten Einsatz für Mess-, Schutz- und Verrechnungszwecke. Entsprechend dimensioniert ermöglichen sie eine hochauflösende Spannungsmessung über einen Frequenzbereich von Gleichspannung (DC) bis etwa 10 MHz [1].

Im Zuge von Auftragsmessungen des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement wurde ein Messkonzept zur transienten Spannungsmessung entwickelt. Eine detaillierte Beschreibung des Messkonzepts findet sich in [9] bzw. [10]. Auch die hier analysierten transienten Daten wurden mit dieser Methode gemessen. An dieser Stelle soll auf das zugrunde liegende Messsystem eingegangen werden, mit welchem die transienten Spannungen aufgezeichnet worden sind und seine Grundzüge bzw. die wesentlichen Bestandteile beschrieben werden.

Bild 2.6 zeigt den schematischen Messkreislauf eines transienten Messsystems. Kernstück des Messprinzips ist ein entsprechend dimensionierter RC-Spannungsteiler für die jeweilige Spannungsebene [1]. Dieser ist über doppelt geschirmte Messleitungen mit dem Tastkopfsystem bzw. mit dem digitalen Speicheroszilloskop verbunden (siehe Bild 2.6). Das Oszilloskop

2.4. Transiente Spannungen im Netz

sowie der angebundene Messrechner werden über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) versorgt. Mit einem Remotezugriff wird der externe Zugriff zur Parametrierung und Datenabfrage ermöglicht. Nachfolgende Auflistung zeigt die wesentlichen Komponenten des vorgestellten Messsystems in [10]:

- Ohmsch-kapazitiver-Spannungsteiler (RC-Teiler)
- Abgestimmte Messleitung
- Tastkopfsystem mit Hochpassfilter (TK)
- Digitales Speicheroszilloskop (DSO)
- Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)
- Messrechner mit Remotezugriff

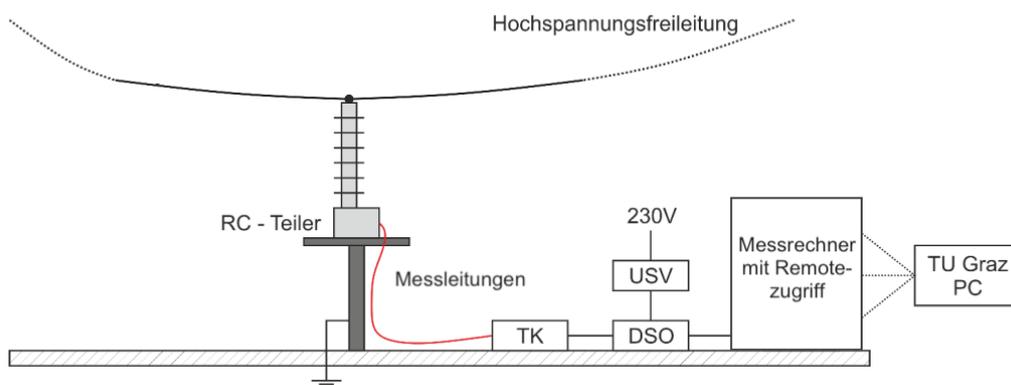


Bild 2.6.: Übersichtsskizze eines transienten Messaufbaus im Umspannwerk mit RC-Teiler an Freileitungsabgang (Quelle: [10]-bearbeitet)

Wie von Dr. Sperling in [1] beschrieben, unterliegen auch RC-Teiler durch ihre parasitären Elemente einer Frequenzabhängigkeit. In Bild [2.7] ist die Toleranz für Amplitude- und Winkelfehler in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt. Für einen Frequenzbereich von 0 bis 10 kHz wird eine Amplitudenabweichung von $\pm 0,2\%$ erreicht. Der maximale Winkelfehler liegt für denselben Frequenzbereich bei etwa -67 min (siehe Bild [2.7]). Diese geringen Fehlertoleranzen stellen einen wesentlichen Grund für die Verwendung von RC-Teilern bei transienten Messaufgaben dar. Ein repräsentatives Ersatzschaltbild zur Bestimmung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens des RC-Teilers wurde in [1] vorgestellt.

Wie von Plesch et al. in [10] erläutert, wurden für die sichere und flexible Aufstellung der Teiler im Umspannwerk mobile Untergestelle verwendet. Bild [2.8] zeigt zwei 400-kV-RC-Teiler am Portal eines Regelhauptumspanners. Man erkennt den primärseitigen Anschluss an die Hochspannung über kurze Seilschlaufen. Die sekundärseitige Anbindung an das digitale Speicheroszilloskop erfolgte über doppelt geschirmte und entsprechend niederinduktiv verlegte Messleitungen.

Bild [2.9] zeigt die Komponenten der Datenaufzeichnung im Umspannwerk. Wie Plesch et al. in [10] beschreiben, erfolgt die Messdatenaufzeichnung mit einem digitalen Speicheroszilloskop

2. Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen

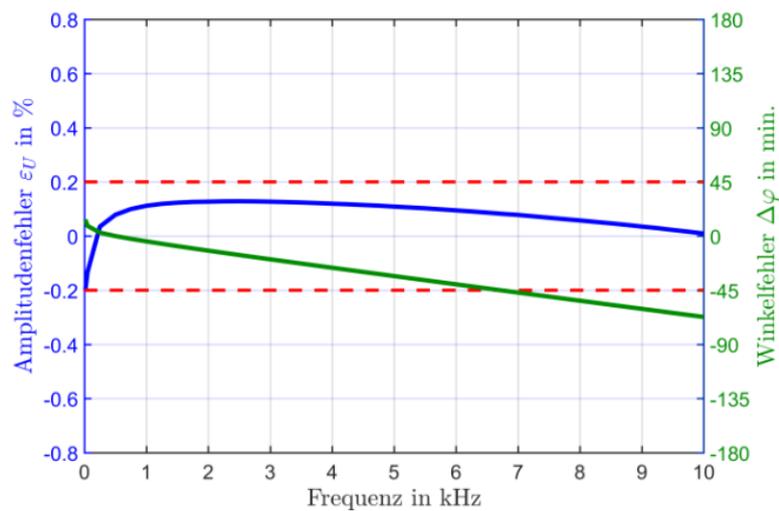


Bild 2.7.: Amplituden- und Winkelfehler in Abhängigkeit der Frequenz (bis 10 kHz) für einen 420-kV-RC-Teiler



Bild 2.8.: Installierte 400-kV-RC-Teiler (orange) im Umspannwerk auf mobilen Untergestellen ([10]-bearbeitet)

(siehe Bild [2.9 b](#)). Hierbei werden die Daten vorerst lokal am Messrechner vor Ort abgelegt (siehe Bild [2.9 a](#)). Über die Möglichkeit eines Remote-Zugriffs können die Parametrierung des Messsystems und die Datenabfrage durchgeführt werden (siehe Bild [2.9 d](#)). Mit Hilfe eines Tastkopfsystems mit Hochpassfilter (siehe Bild [2.9 c](#)) können transiente Ereignisse identifiziert und die Datenaufzeichnung entsprechend gestartet bzw. getriggert werden [\[11\]](#).

2.4. Transiente Spannungen im Netz

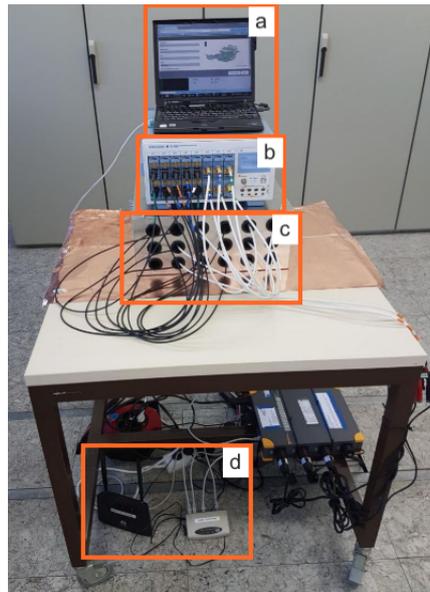


Bild 2.9.: Systemaufbau zur Datenaufzeichnung im Umspannwerk: (a) Messrechner, (b) Digitales Speicheroszilloskop (DSO), (c) Tastkopfsystem (TK) und (d) Remotezugriff ([10]-bearbeitet)

Tabelle 2.4 zeigt wichtige Parameter der verwendeten digitalen Speicheroszilloskope. Wesentliche Kriterien für die Aufzeichnung transientser Signale sind die Anzahl an hochauflösenden Kanäle mit entsprechender Abtastrate (12 Bit bis 16 Bit) sowie eine ausreichend hohe Bandbreite des Messgeräts (DC bis 20 MHz).

Tabelle 2.4.: Spezifikationen verwendeter digitaler Speicheroszilloskope ([10]-bearbeitet)

Anzahl der Eingänge	16
Maximale Abtastrate	100 kS/s bis 100 MS/s
A/D Auflösung	12 Bit bis 16 Bit
Frequenzbereich	DC bis 20 MHz

Einen wichtigen Punkt für eine nachfolgende Korrelation der transienten Daten stellt die kontinuierliche (z.B. stundenweise) zeitliche Synchronisierung auf einen Referenzzeitwert dar. Wie von Schwalt et al. in [9] erwähnt, nutzt die Blitzortung den GPS-Zeitstempel zur Synchronisierung. Bei der beschriebenen Messmethode wurde eine Synchronisierung auf die Serverzeit durchgeführt.

3. Datensätze

3.1. Transiente Messdaten

Die bereits vorliegenden transienten Messdaten bilden die Basis für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Analysen. Zusätzlich waren für die Korrelationen weitere Datensätze notwendig. Dazu zählen Betriebsführungsdaten des Netzbetreibers, sog. Schaltmeldeprotokolle (SMP) und Daten des österreichischen Blitzortungssystems ALDIS (LLS). Diese sind in den nachfolgenden Kapiteln [3.2](#) und [3.3](#) beschrieben.

Die analysierten transienten Daten, wurden in vier Umspannwerken des österreichischen Übertragungsnetzes (siehe Bild [3.3](#)) gemessen. In Bild [3.1](#) ist die Verteilung der transienten Messdaten auf die vier Umspannwerke dargestellt. Der zugrunde liegende Ausgangsdatenpool beinhaltet rund 3.700 transiente Messungen. Ein Großteil der Messungen stammt dabei aus der 380-kV-Ebene (siehe Tabelle [3.1](#)). Etwa ein Drittel der transienten Spannungen wurde in Netzknoten der 220-kV-Ebene gemessen.

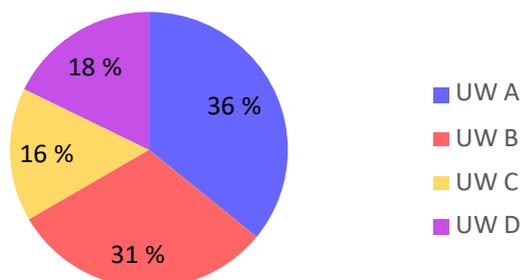


Bild 3.1.: Verteilung der transienten Messdaten nach Messstandorten

Der Messdatensatz beinhaltet transiente Spannungsmessungen der Jahre 2017 bis 2019. Grundsätzlich lassen sich die transienten Daten hinsichtlich der Spannungsebene in 220-kV- und 380-kV-Messungen unterteilen. In Tabelle [3.1](#) ist die Messdauer grafisch aufgetragen und zeigt die einzelnen Überschneidungsbereiche (Bereich 1 bis 4). Bereich 1 beinhaltet für Umspannwerk (UW) A und UW B eine überschneidende Messperiode von April 2017 bis Mai 2018 in der 380-kV-Ebene. Für die 220-kV-Ebene ergibt Bereich 4 (UW C und UW D) einen

3. Datensätze

überschneidenden Messzeitraum von Dezember 2018 bis Juni 2019. Bereich 2 und 3 umfassen darüber hinaus Messungen aus drei unterschiedlichen Netzknoten sowie zwei verschiedenen Spannungsebenen.

Tabelle 3.1.: Auflistung der Messperioden für die 220- und 380-kV-Ebene für die Jahre 2017 bis 2019 und Überschneidungsbereiche 1 bis 4

Bezeichnung Messort	Spn. Ebene	2017												2018												2019					
		Apr.17	Mai.17	Jun.17	Jul.17	Aug.17	Sep.17	Okt.17	Nov.17	Dez.17	Jän.18	Feb.18	Mär.18	Apr.18	Mai.18	Jun.18	Jul.18	Aug.18	Sep.18	Okt.18	Nov.18	Dez.18	Jän.19	Feb.19	Mär.19	Apr.19	Mai.19	Jun.19			
UW A	380 kV																														
UW B	380 kV																														
UW C	220 kV																														
UW D	220 kV																														

Bereich 1
Bereich 2
Bereich 3
Bereich 4

Je nach Messauftrag wurden die RC-Teiler an unterschiedlichen Punkten innerhalb der Umspannwerke installiert. In UW A wurde direkt am Freileitungsabgang der Verbindungsleitung zu UW C gemessen. An den Netzknoten B und C wurde direkt am Regelhauptumspanner gemessen. Für UW D wurden die RC-Teiler direkt am Phasenschiebertransformator installiert. Als Zeitbasis für die Messungen ist in [10] eine synchronisierte Serverzeit in MEZ (Mittleuropäische Zeitzone) angegeben.

3.2. Schaltmeldedaten

Um den gemessenen transienten Spannungen Schalthandlungen als Ursachen zuordnen zu können, werden Schaltinformationen aus den Betriebsführungsdaten des Übertragungsnetzbetreibers (Transmission System Operator - TSO) herangezogen. Diese Meldungen werden von Primär- bzw. Sekundärkomponenten an das Netzleitsystem übertragen, dort abgearbeitet und entsprechend archiviert [12]. Für die durchgeführte Analyse wurden Schaltmeldeprotokolle für die Jahre 2017 bis 2019 vom österreichischen Übertragungsnetzbetreiber zur Verfügung gestellt.

Diese Protokolle sind äußerst umfangreich und enthalten nicht nur Meldungen zu Schalthandlungen sondern auch Status- und Kommunikationsmeldungen [12]. Aus diesem Grund wurden die Daten für die Analyse transienter Messdaten auf relevante Parameter eingeschränkt.

Tabelle 3.2 zeigt einen Auszug bereits vorgefilterter Schaltmeldeprotokolle. Hierbei wurden die Spalten „Spannungsebene“, „Meldung“ und „Aktiv/Inaktiv“ entsprechend den Parametern in Tabelle 3.3 gefiltert. Dabei wird zwischen Korrelationsschritt 1 (K1) und einem „erweiterten“ zweiten Korrelationsschritt (K2) unterschieden. Dieser zusätzliche SMP-Korrelationsschritt ist in Kapitel 5 näher erläutert. Wie in der ersten Spalte in Tabelle 3.2 ersichtlich, werden die Betriebsführungsdaten mit einem Zeitstempel im Millisekundenbereich abgelegt. Die Felder

„Station 1“ und „Station 2“ beinhalten Informationen zur Meldungsherkunft bzw. zur Zuordnung des Umspannwerks, in dem geschaltet wurde. Wie in Tabelle 3.2 dargestellt, gehört zu jeder Befehlsmeldung (BF) auch eine Signalrückmeldung (SR) der jeweiligen Schalthandlung (siehe Spalte „Station 1“). Die Spalte „Betriebsmittel“ liefert Informationen über das geschaltene Betriebsmittel wie etwa Leitung, Hauptumspanner, Sammelschiene etc. Im Feld „Meldung“ wird das Betriebsmittel angegeben. Hier können Leistungsschalter (LS), Trenner (TR) sowie Schutzauslösungen verzeichnet sein. Die letzte Spalte „Aktiv/Inaktiv“ gibt an, ob es sich um eine Ein- oder Ausschaltung des jeweiligen Betriebsmittels handelt.

Tabelle 3.2.: Datenauszug aus den verwendeten Schaltmeldeprotokollen - TSO

Datum und Zeit	Station 1	Station 2	Spannungsebene	Betriebsmittel	Meldung	Aktiv/Inaktiv
02.01.2017 05:38:33,000	BF	SO	380kV	435A	LS	EIN
02.01.2017 05:38:33,910	SR	SO	380kV	435A	LS	EIN
02.01.2017 05:38:42,000	BF	DU-neu	380kV	435A	LS	EIN
02.01.2017 05:38:42,450	SR	DU-neu	380kV	435A	LS	EIN

Der gewählte Korrelationsschritt „K1“ berücksichtigt nur Leistungsschalter- und Trennerschaltungen sowie Schutzauslösungen der 220- und 380-kV-Ebene. Für diese Arten von Schalthandlungen werden nur Ein- und Aus-Meldungen herangezogen. „K2“ berücksichtigt zusätzlich zuvor genannte Schalthandlungen in den Spannungsebenen 30-, 110-, 132-kV. Auf die erarbeitete Korrelationsmethodik wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

Tabelle 3.3.: Filterparameter für ersten und zweiten SMP-Korrelationsschritt (K1 und K2)

Spalte	Filterparameter	
	K1	K2
Spannungsebene	220 kV, 380 kV	30 kV, 110 kV, 132 kV, 220 kV, 380 kV
Meldung	LS- und TR-Schaltungen sowie Schutzauslösungen	
Aktiv/Inaktiv	EIN, AUS	

3.3. Blitzortungsdaten

Für die Korrelation atmosphärischer Entladungen zu gemessenen transienten Spannungen werden Daten von georteten Blitzen im Umkreis des Hochspannungssystems herangezogen. Diese Daten werden österreichweit durch das Blitzortungssystem ALDIS (Austrian Lightning Detection and Information System) erfasst.

Das ALDIS-Netzwerk besteht aus acht Blitzortungssensoren, die verteilt über ganz Österreich seit 1992 in Betrieb sind. Jeder dieser Sensoren erreicht Ortungreichweiten von etwa 400 km. Als Teil des europäischen Blitzortungssystems (EUCLID, siehe Bild 3.2) liefert das System einen Beitrag zur Ortung von Blitzentladungen in und um Österreich [13]. Wie von Schwalt et al. in [11] erwähnt, stellt die Ortungsgenauigkeit von Blitzortungssystemen einen wesentlichen Parameter für eine Korrelation mit transienten Messdaten dar. Stetige Verbesserungen ermöglichen

3. Datensätze

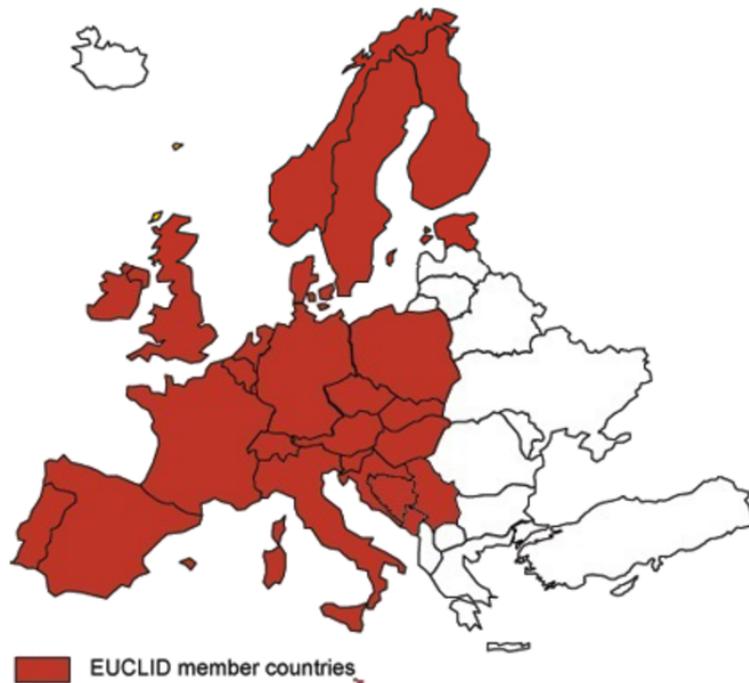


Bild 3.2.: Übersichtskarte der EUCLID-Mitgliedsländer (Stand:2013) [ALDIS]

aktuell Detektionen mit mittleren Ortungsfehlern von 100 m [11], [14]. Die Blitzortungsdaten wurden über die Geoinformationssystem-Software QGIS aus der ALDIS-Datenbank abgerufen. Das von ALDIS entwickelte und zur Verfügung gestellte Softwaretool bietet die Möglichkeit, einen österreichweiten Datensatz für die entsprechenden Zeiträume zu generieren oder nur Ortungsdaten in einem definierten Korridor (z.B. ± 1 km) um hinterlegte Leitungszüge zu verwenden.

Da für diese Analyse nur atmosphärische Entladungen im Bereich der abgehenden Freileitungszüge sowie im unmittelbaren Umspannungsbereich von Interesse waren, wurden Blitzortungsdaten in einem Korridor abgefragt. Hierbei wurde für jeden von den untersuchten Netzknoten abgehenden Leitungszug der 220/380-kV-Ebene Blitzentladungen in einem Korridor von ± 3 km abgespeichert. Diese Erweiterung des Korridors von ± 1 km auf ± 3 km liefert zwar, wie in [15] beschrieben, keinen wesentlichen Unterschied hinsichtlich jährlicher Blitzdichten, gewährleistet jedoch eine optimale Abdeckung des atmosphärischen Einflussbereichs um die Netzknoten.

Bild 3.3 zeigt eine Überlagerung der für die Analyse herangezogenen LLS-Daten als Punktwolken entlang der abgehenden Leitungszüge der jeweiligen Umspannwerke. Dabei wird zwischen negativen (blau) und positiven (rot) Wolke-Erde-Blitzen sowie Wolke-Wolke-Blitzen (gelb) unterschieden. Die Leitungszüge wurden entsprechend der Messzeiten des zugehörigen Messstandortes aus der ALDIS-Datenbank entnommen. Aufgrund der überlagerten Darstellung besteht in Bild 3.3 kein zeitlicher Zusammenhang zwischen den einzelnen Leitungszügen und ihren Punktwolken.

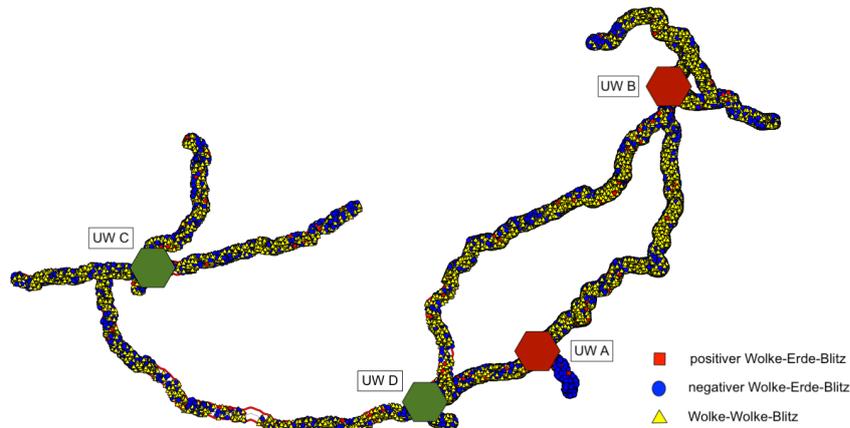


Bild 3.3.: Negative (blau) und positive (rot) Wolke-Erde-Blitzentladungen sowie Wolke-Wolke-Blitzentladungen (gelb) für abgehende Leitungszüge der Netzknoten (Sechsecke) [ALDIS] modifiziert

Die von ALDIS erfassten Blitzortungsdaten beinhalten, ähnlich wie die SMP-Daten, eine Vielzahl an Informationen und Parametern. Aus diesem Grund ist es auch in diesem Fall notwendig, die Rohdaten einzugrenzen und nur die benötigten Informationen für die Analyse zu verwenden. Tabelle 3.4 zeigt einen Auszug der verwendeten Blitzortungsdaten der ALDIS-Datenbank.

Tabelle 3.4.: Auszug aus den verwendeten österreichischen Blitzortungsdaten - ALDIS

num	date	nano	amplitude	nbloc	numloc	icloud	Long	lat
429581	2017-04-04 1	209681920	-4.650000000000000	2	2	1	15.4583000	46.9017000
429581	2017-04-04 1	183402240	-8.570000000000000	2	1	1	15.4403000	46.9139000
429669	2017-04-04 1	28269056	-6.950000000000000	2	2	1	15.4435000	46.9146000
429669	2017-04-04 1	981704960	-17.699999999999999	2	1	1	15.4322000	46.9193000

Die Parameter des LLS-Datensatzes seien an dieser Stelle kurz erläutert:

- num Zugewiesene Identifikationsnummer
- date Datum und Zeitstempel
- nano Nanosekunden
- amplitude Geortete Amplitude des Strokes
- nbloc Anzahl der Teilblitze eines Blitzes
- numloc Nummerierung der Teilblitze innerhalb eines Blitzes
- icloud Klassifikation als Wolke-Wolke-Blitz (icloud = 1) oder
Wolke-Erde-Blitz (icloud = 0)
- long Längengrad des Ortungspunktes
- lat Breitengrad des Ortungspunktes

3. Datensätze

In den LLS-Daten sind alle im Korridor um den Leitungszug detektierten Teilblitze mit ihren Ortungsinformationen und GPS-Zeitstempeln angeführt. Diese Teilblitze (sog. Strokes) werden dabei zu Gesamtblitzentladungen (sog. Flashes) gruppiert. Gekennzeichnet wird dies durch eine eindeutige Blitznummer in Spalte „*num*“. Verschiedene Stroke-Gruppierungsmethoden sind in [16] vorgestellt worden. Im Blitzortungssystem ALDIS werden Strokes einem Flash zugeordnet, falls der Stroke innerhalb einer Zeitdauer von 1 s nach dem Erstblitz auftritt und in einem Radius von 10 km um den Ortungspunkt des Erstblitz detektiert wurde. Zusätzlich darf die Zeitdauer zwischen Teilblitzen nicht größer als 500 ms sein [16].

4. Datenbehandlung

4.1. Datenqualität

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Datenbehandlung der transienten Messdaten. Im Zuge dieser Datenbehandlung werden die transienten Spannungssignale analysiert, auf ihre Qualität untersucht und für die Weiterverarbeitung entsprechend aufbereitet. Die dazu entwickelten Methoden wurden anhand eines reduzierten Testdatenpools (siehe Tabelle 4.1) verifiziert. Der Testfall umfasst Messdaten aus UW A und berücksichtigt nur Leistungsschalter- und Trennerschaltungen. Bei den Blitzortungsdaten wurden zu Testzwecken nur Entladungen im Korridor um einen abgehenden Leitungszug des UW A berücksichtigt.

Tabelle 4.1.: Definitionsparameter für den Testdatensatz (Testfall 1)

Messtandort	Zeitraum	SMP-Einschränkung	LLS-Einschränkung
UW A	03.04.2017 - 24.10.2018	alle LS- und Trennerschaltungen	± 3 km um einen definierten Leitungszug

Da nach der Ausschaltung einer Leitung an beiden Enden der Abgang spannungsfrei ist, greift die in Kapitel 4.2 vorgestellte Methode der 50-Hz-Subtraktion nicht mehr. Dies trifft zum Beispiel auf eine LS-Ausschaltung des Freileitungsabgangs zu, an dem die RC-Teiler installiert sind. Aus diesem Grund werden diese Fälle keiner automatischen Datenbehandlung unterzogen und die grafische Ausgabe wird separat in einem Ordner (Sonderfälle) abgelegt. Die Kategorisierung dieser Fälle wurde manuell durchgeführt.

Die Sichtung der transienten Messdaten und die Eruiierung der Datenqualität stellten einen wesentlichen ersten Schritt in der Datenbehandlung dar. Ein Vorhandensein nicht-transienter Störanteile im Signal kann hier bereits erkannt werden. Der vorliegende Datentyp sowie die Auflösung der gemessenen Spannungsdaten bilden wichtige Punkte für die weitere softwaretechnische Verarbeitung der transienten Daten. Die hier behandelten Messdaten lagen in einem Binärformat (*.wvf) vor. Um diese Daten in der Software „Matlab“ einlesen und verarbeiten zu können, war eine eigenständige Software-Routine nötig. Verwendet wurde hierbei die Funktion *wvfreed.m* von Erik Benkler [17]. Beim Einlesen der sekundärseitigen Messdaten ist zusätzlich auf das zugrunde liegende Übertragungsverhältnis des verwendeten Messteilers zu achten. Aufgrund der hier verwendeten RC-Teiler und ihres linearen Frequenzübertragungsverhaltens konnte direkt mit dem gegebenen Übersetzungsverhältnis [1] auf Primärgrößen umgerechnet werden.

¹400.000 V/ $\sqrt{3}$: 100 V/ $\sqrt{3}$

4. Datenbehandlung

4.2. Betrachtung überlagerter transienter Anteile

Um transiente Spannungen entsprechend analysieren und klassifizieren zu können, ist es notwendig die überlagerten transienten Spannungsanteile aus dem gemessenen Netzspannungssignal herauszulösen.

Als zielführende Methode hat sich die 50-Hz-Subtraktion des generierten Signals vom Messsignal etabliert. Dabei kann gewährleistet werden, dass nur der Grundschwingsanteil entfernt wird und das transiente Spannungssignal in seiner Form und Intensität unverfälscht herausgelöst wird. Die überlagerten transienten Spannungsanteile werden durch Subtraktion eines generierten 50-Hz-Sinussignals mit entsprechender Amplitude und Phasenlage vom Messsignal getrennt. Bild 4.1 zeigt im oberen Teil das originale Messsignal der Leiter-Erde-Spannung sowie das generierte 50-Hz-Sinussignal. Dieses Signal muss eine entsprechende Amplitude und Phasenlage in Bezug auf die jeweils gemessene Netzspannung aufweisen, um die überlagerten Anteile herauslösen zu können. Eine Herausforderung stellte hierbei vor allem die Bestimmung der korrekten Phasenlage dar. Durch Anwendung einer Phasenvariation konnte dies effizient realisiert werden.

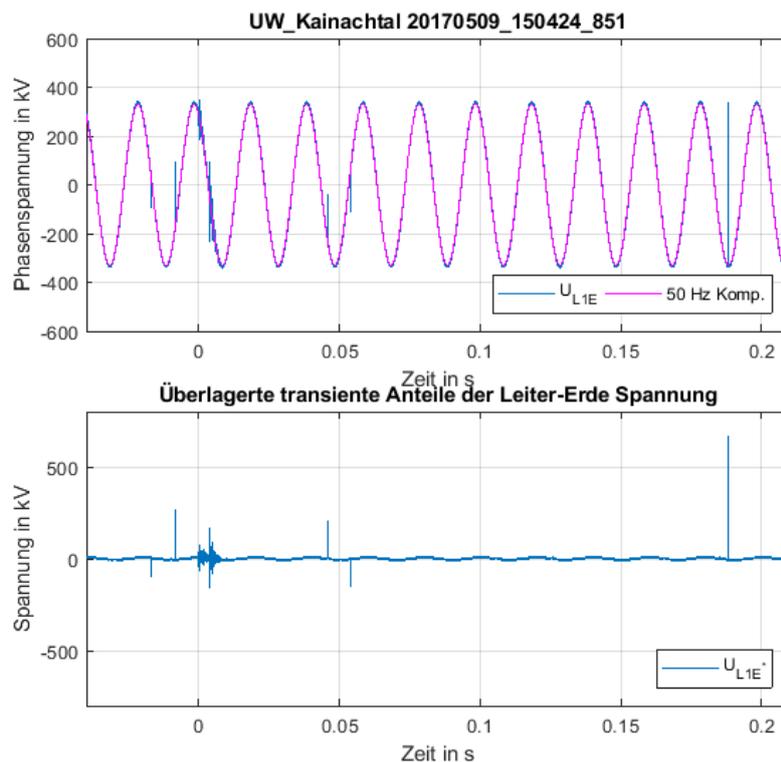


Bild 4.1.: Herauslösen überlagerter transienter Spannungsanteile durch 50-Hz-Sinussubtraktion
oben: originales Messsignal, unten: überlagerter transienter Spannungsanteil

Das Subtraktionsergebnis ist im unteren Teil des Bildes 4.1 dargestellt und zeigt den überlagerten transienten Anteil der gemessenen Spannung. Zu erkennen ist, dass eine Restwelligkeit verbleibt. Diese ist auf die gewählte Schrittweite im Zuge der Phasenbestimmung zurückzuführen.

4.3. Umgang mit nicht-transienten Störanteilen

Diese Schrittweite beeinflusst maßgeblich die Berechnungszeit pro Messfile. Ebenso wirken sich Schwankungen der Netzfrequenz unweigerlich auf die Restwelligkeit aus. Analysen haben gezeigt, dass eine Phasenungenauigkeit von 0.01 Radiant (0.57 Grad) eine Welligkeit von $\pm 1\%$ zur Folge hat.

Die Methode zur Phasenwinkelbestimmung ist in Bild 4.2 schematisch dargestellt. Der in Blau dargestellte Signalverlauf repräsentiert dabei das Originalsignal. Die rot-strichlierte Kurve entspricht einem generierten 50-Hz-Sinussignal mit gleicher Amplitude, jedoch zeitlich um einen definierten Phasenwinkel verschoben. Die Subtraktion dieser beiden Kurven ist jeweils im unteren Teil des Bildes in Grün dargestellt. Die Phasenvariation verfolgt den Ansatz das generierte Sinussignal nach festgelegter Schrittweite sukzessive in einem Bereich von $-\pi$ bis π zu verschieben, vom Originalsignal zu subtrahieren und die resultierende Restwelligkeit auszuwerten. Die Grundschiwingung der Netzspannung wird durch eine Sinusschwingung mit Nennfrequenz f und Phasenwinkel φ_0 beschrieben, siehe Gleichung (4.1). Das generierte sowie phasenverschobene Signal kann durch Gleichung (4.2) beschrieben werden. Hierbei bezeichnet $\Delta\varphi$ die Schrittweite der Phasenvariation. Die Subtraktion (siehe Gleichung 4.3) dieser beiden Signale liefert den überlagerten transienten Spannungsanteil U_{LxE}^* .

$$U_{LxE} = \sin(\omega t + \varphi_0) = \sin(2\pi f \cdot t + \varphi_0) \quad (4.1)$$

$$U_{gen} = \sin(\omega t + \varphi_0 + \Delta\varphi) = \sin(2\pi f \cdot t + \varphi_0 + \Delta\varphi) \quad (4.2)$$

$$U_{LxE}^* = U_{LxE} - U_{gen} \quad (4.3)$$

Wie in Bild 4.2 zu erkennen ist, stellt sich bei größtmöglicher Überdeckung der beiden Kurven ein Minimum der Restwelligkeit ein. Der Phasenwinkel des generierten Sinussignals entspricht an dieser Stelle dem genauestmöglich zu bestimmenden Phasenwinkel des originalen Messsignals für die gewählte Schrittweite. Die Auflösung der einzelnen Phasenschritte beeinflusst direkt die erreichbare Genauigkeit der Phasenbestimmung. Eine feinere Auflösung (bspw. 0.001 Rad) liefert zwar eine äußerst genaue Phasenlage, zieht jedoch einen deutlichen Anstieg in der Rechenzeit nach sich. In Abwägung zwischen erforderlicher Phasengenauigkeit und Rechenzeit hat sich eine Auflösung von 0.05 Radiant als zielführend erwiesen. Damit wird eine Restwelligkeit aufgrund der Phasenungenauigkeit von $\pm 5\%$ toleriert.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Toleranz nicht für die Kategorisierung nach Maximalwert gilt. Hierfür wird das überlagerte transiente Spannungssignal durch einen zusätzlichen Bearbeitungsschritt aufbereitet, siehe Kapitel 4.4.

4.3. Umgang mit nicht-transienten Störanteilen

Wie in Kapitel 4.1 bereits erwähnt, liefert eine erste Sichtung der transienten Messdaten einen Eindruck über die Qualität der Messdaten und das Vorhandensein nicht-transienter Störanteile. Im Zuge dieser Sichtungen sind bei einigen Messdaten nicht-transiente Störanteile aufgetreten. Hierbei handelt es sich um Defekte einer Einschubkarte eines digitalen Speicheroszilloskops.

4. Datenbehandlung

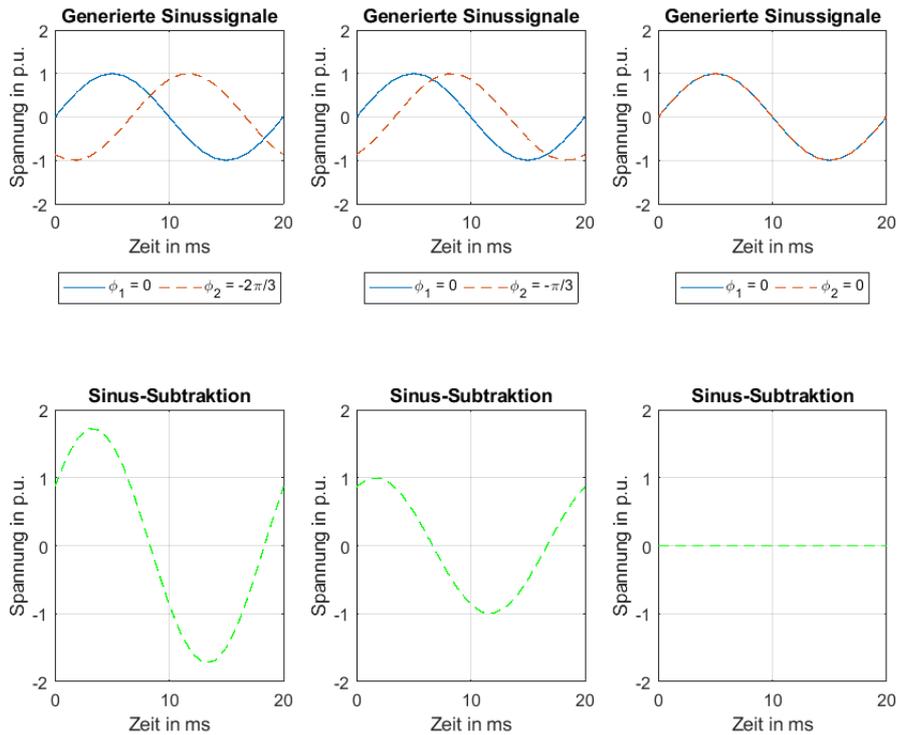


Bild 4.2.: Methode der Phasenvariation ($-2\pi/3$ bis 0) zur Ermittlung des Phasenwinkels der gemessenen Netzspannung

Da solche Störeinflüsse bei Vor-Ort-Messungen auch aufgrund anderer Ursachen wie etwa äußere elektromagnetische Einkopplungen auftreten können, stellt ein Bereinigungsprozess in der Datenbehandlung einen äußerst wichtigen Punkt transients Datenanalysen dar [2].

In Bild 4.3 ist der angewandte Bereinigungsprozess an einem Beispielfall dargestellt. Hierbei zeigt die oberste Grafik das Originalsignal des überlagerten transienten Spannungsanteils mit den gelb markierten Störanteilen. Das ermittelte, charakteristisch auftretende Muster dieser nicht-transienten Störanteile ist herausgezoomt dargestellt. Dieses Muster ermöglicht es, die Störstellen im Signal zu erkennen und die entsprechend betroffenen Datenpunkte (siehe Bild 4.3, Zoom) durch repräsentative Werte zu ersetzen. Um die charakteristischen Muster im Signal erkennen zu können, erfolgt eine Gradientenanalyse. Der Anstieg an der Störstelle erfolgt innerhalb einer Quantisierungsstufe. Dies bedeutet, dass die Anstiegszeit des Störanteils zur Abtastrate proportional ist. Somit hebt sich diese deutlich von den Anstiegszeiten transienter Ereignisse ab und ermöglicht so, den Störanteil eindeutig zu identifizieren. Übersteigt der Gradientenwert eines Datenpunktes einen definierten Schwellwert (Kriterium 1), so stellt dieser Datenpunkt den Beginn eines nicht-transienten Störanteils dar. Der vierte und fünfte Datenpunkt des charakteristischen Musters kommt im Wertebereich des Ausgangspunktes zu liegen. Es ist nun möglich, durch entsprechende Wertevergleiche beider Datenpunkte (2 und 3) die Charakteristik des Störanteils zu identifizieren (Kriterium 2). In Tabelle 4.2 sind die softwaremäßig implementierten Kriterien zusammengefasst.

4.4. Endsignalbearbeitung für die Kategorisierung

Tabelle 4.2.: Kriterien zur Identifikation nicht-transienter Störstellen im Signalverlauf

Kriterium 1	Änderung des Gradienten im Datenpunkt 1 ≥ 10 kV
Kriterium 2	Signalwertdifferenz zwischen Datenpunkt 2 und 3 < 10 kV

Um keine transienten Signalanteile zu beeinflussen wurde ein wesentliches Augenmerk auf die Verifikation der Bereinigungsverfahren gelegt. Die durchgeführte Verifikation für den entwickelten Bereinigungsprozess ist in Bild 4.3 zu sehen. Im mittleren Teil von Bild 4.3 ist das bereits bereinigte Signal (grün) zu sehen. Subtrahiert man dieses vom Originalsignal (rot), so liefert das Ergebnis bis auf die bereinigten Störanteile eine Nulllinie. Wie Bild 4.3 zu sehen ist, werden nur die nicht-transienten Störstellen entfernt. Das auftretende transiente Ereignis bleibt dabei unverfälscht erhalten.

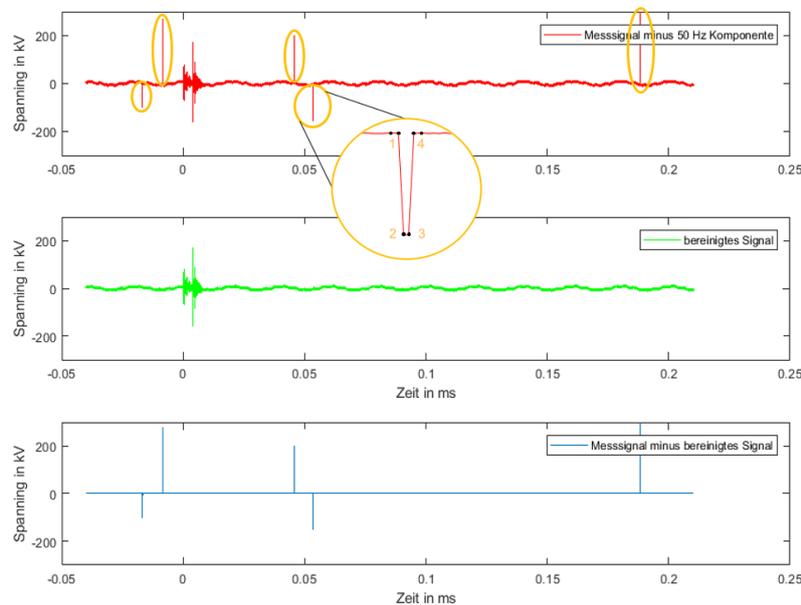


Bild 4.3.: Bereinigung nicht-transienter Störanteile
original (rot), bereinigt (grün), bereinigt - original (blau), Datenpunkte 1 bis 4

4.4. Endsignalbearbeitung für die Kategorisierung

Wie in Kapitel 4.2 bereits gezeigt, verbleibt nach der Subtraktion der Grundschwingung eine Restwelligkeit bestehen. Um im nächsten Schritt eine automatisierte Kategorisierung der transienten Spannungen nach ihren Maximalwerten zu ermöglichen (siehe Kapitel 4.5), muss diese Restwelligkeit weiter reduziert werden. Hierbei kommt eine Endsignalbearbeitung zum Einsatz, welche nur für diesen Kategorisierungsschritt Anwendung findet. Für die eigentliche

4. Datenbehandlung

Analyse der transienten Ereignisse wird das ursprünglich herausgelöste Spannungssignal verwendet. Die Endsignalbearbeitung betrachtet ausschließlich Frequenzanteile, die über dem gewählten Wert von 52 Hz liegen. Implementiert wurde dazu ein digitales Filter vom Typ „butterworth“ in Matlab mit einer Abtastrate von 1 MHz. Die Stopband-Frequenz beträgt 52 Hz. Der Passband-Bereich beginnt bei 100 Hz.

Bild 4.4 zeigt die Reduktion der Restwelligkeit durch die Endsignalbearbeitung. Im oberen Teil des Bildes ist das überlagerte transiente Spannungssignal bereits um nicht-transiente Störanteile bereinigt dargestellt. Im unteren Teil wird das Signal ohne Frequenzanteile unter 52 Hz gezeigt. Man erkennt deutlich, dass die Restwelligkeit abgenommen hat. Dadurch wird eine korrekte Kategorisierung nach Maximalwert transienter Spannungen möglich.

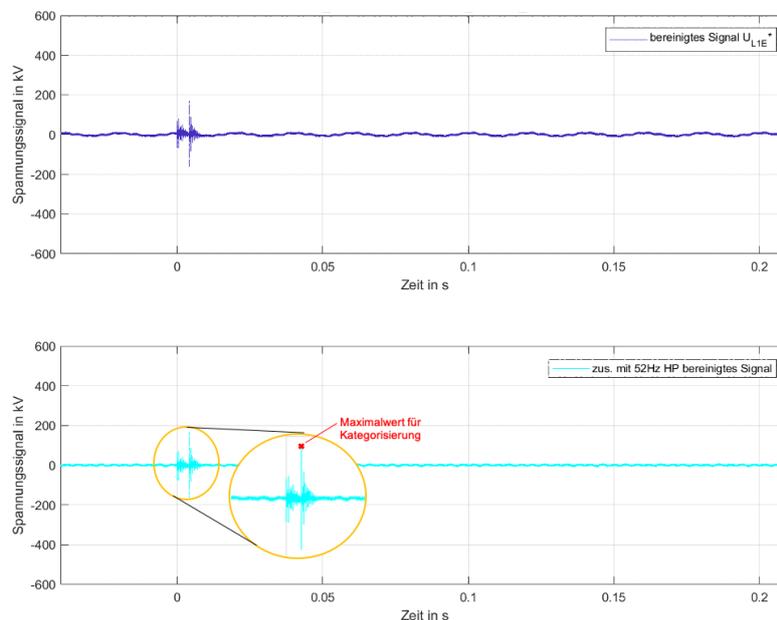


Bild 4.4.: Endsignalbearbeitung zur Kategorisierung nach Maximalwert, oben: Signal nach 50-Hz-Subtraktion, unten: 52-Hz-Hochpass gefiltertes Signal

4.5. Kategorisierung nach Maximalwert

Um die auftretenden transienten Spannungen entsprechend ihrer Intensität einzuordnen, wurde eine Kategorisierungsmethode nach Maximalwert der transienten Spannung eingeführt. Die transienten Messungen liegen für die 220- und 380-kV-Ebene vor. Für diese Nennspannungsebenen legt die Isolationskoordinationsnorm DIN EN 60071-1 unterschiedliche Isolationspegel mit zugehörigen Bemessungsspannungen fest [5]. Grundsätzlich unterscheidet die Isolationskoordination zwei Spannungsbereiche (siehe Tabelle 4.3). Aus diesem Grund ergeben sich für beide Spannungsebenen entsprechend unterschiedliche Kategoriegrenzwerte.

4.5. Kategorisierung nach Maximalwert

Das verwendete Schema zur Festlegung dieser Grenzwerte ist in Bild 4.5 beispielhaft für die 380-kV-Nennspannungsebene dargestellt.

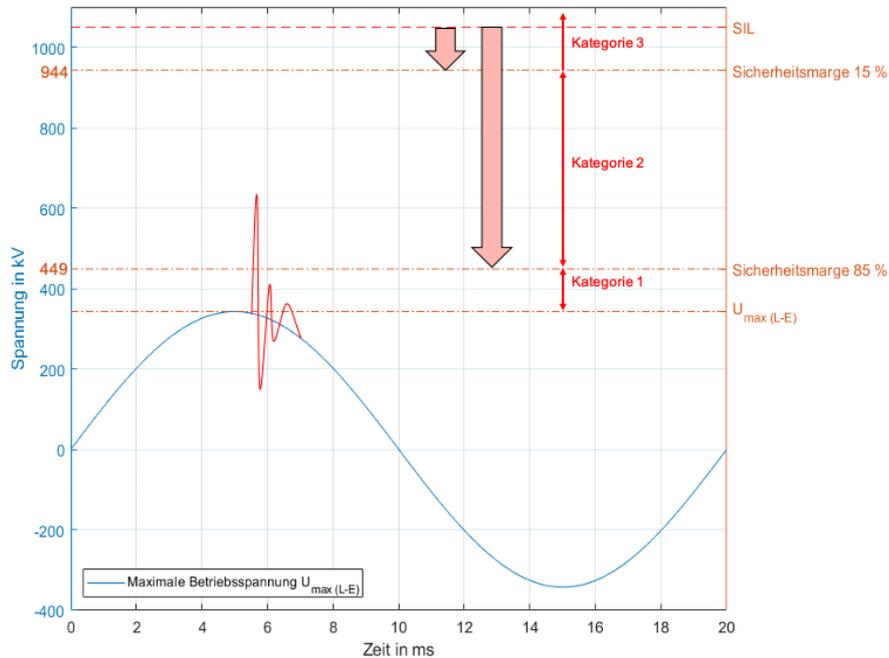


Bild 4.5.: Kategorisierungsmethode der transienten Spannungen für die Nennspannungsebene 380 kV, Sicherheitsmargen und Kategorien

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass hier eine Kategorisierung nach Maximalwerten der überlagerten transienten Spannungen erfolgt. Die Phasenlage der ausgewerteten Spitzenwerte wird dabei nicht berücksichtigt. Die Interpretation der einzelnen Kategoriegewichtung hinsichtlich der gemessenen Netzspannung erfolgt immer für den schlechtesten Fall (d.h. Auftritt des Spitzenwertes im Scheitelpunkt der Grundschwingung).

Tabelle 4.3.: Definierter Spannungsbereich für die höchste Spannung für Betriebsmittel lt. EN60071-1 [5]

Bereich I	$1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$
Bereich II	$U_m > 245 \text{ kV}$

Für den Bereich II in Tabelle 4.3 der höchsten Spannung für Betriebsmittel gilt eine maximal zulässige Betriebsspannung von 420 kV (Effektivwert) [5]. Mit Gleichung (4.4) kann diese in die Leiter-Erde-Spannung umgerechnet werden. Die maximal zulässige Leiter-Erde-Spannung für die 380-kV-Ebene beträgt $342,9 \text{ kV}$.

$$U_{m(LE)} = \frac{U_m \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

Zusätzlich ist für diesen Spannungsbereich eine maximale Bemessungs-Schaltstoßspannung, im Englischen auch als Switching Insulation Level (SIL) bezeichnet, von 1050 kV zwischen

4. Datenbehandlung

Leiter und Erde definiert [5]. Diese beiden Grenzpegel sind auf der rechten Ordinate im Bild 4.5 dargestellt. Zwischen diesen zwei Referenzwerten werden in weiterer Folge sogenannte Sicherheitsmargen hinsichtlich des Erreichens des SIL-Pegels definiert. Einerseits wird eine 15-%-Sicherheitsmarge entsprechend eines definierten Sicherheitsfaktors der Isolationskoordination in DIN EN 60071-2 [18] von 1,15 festgelegt. Zusätzlich wird eine 85-%-Sicherheitsmarge als weiterer Schwellwert gewählt. Zwischen diesen einzelnen Schwellwerten werden nun die Kategorien 1 bis 3 definiert, (siehe Bild 4.5). Für die 220-kV-Ebene gilt ein identes Schema. Der einzige Unterschied ist die Verwendung des sogenannten Basic Insulation Level (BIL) als Isolationspegel, da für diese Spannungsebene kein SIL in der Norm DIN EN 60071-1 [5] definiert ist. Der BIL-Wert für den Bereich I in Tabelle 4.3 ist ebenfalls mit 1050 kV zwischen Leiter und Erde definiert. Somit ändern sich die 15-%- und 85-%-Sicherheitsmargen und daraus resultierend auch die Kategoriegrenzwerte. Eine detaillierte Auflistung der einzelnen Kategoriegrenzwerte für die jeweilige Nennspannungsebene liefert Tabelle 4.4. Bei den hier

Tabelle 4.4.: Kategoriegrenzwerte additiv zur Betriebsspannung

Nennspannungsebene	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3
380 kV	$< 106 \text{ kV}$	$\geq 106 \text{ kV}$ und $\leq 601 \text{ kV}$	$> 601 \text{ kV}$
220 kV	$< 127 \text{ kV}$	$\geq 127 \text{ kV}$ und $\leq 722 \text{ kV}$	$> 722 \text{ kV}$

angeführten Spannungswerten handelt es sich um Relativwerte, (d.h. sie sind additiv zur jeweiligen Betriebsspannung zu sehen). Wie zuvor erwähnt, erfolgt die Interpretation auf Betriebsspannungspegel dem schlechtesten Fall entsprechend. Ein beispielsweise in Kategorie 2 zugeordnetes und im Scheitelpunkt aufgetretenes transientes Ereignis weist einen Maximalwert zwischen einer Sicherheitsmarge von 85 % und 15 % auf.

4.6. Grafische Ausgabe

Um die herausgelösten transienten Spannungen und deren Zuordnungen zu SMP- bzw. LLS-Einträgen entsprechend darstellen und für weitere Analysen ablegen zu können, wurde eine grafische Ausgabe in die Software-Routine implementiert. Bild 4.6 zeigt die grafische Ausgabe an einem Beispielfall der Einschaltung einer Kupplung. Das grafische Ausgabefenster setzt sich aus fünf Bereichen zusammen. In Bereich (1) in Bild 4.6 wird das originale und unbehandelte Messsignal der Leiter-Erde-Spannung dargestellt. In Magenta ist das generierte 50-Hz-Sinussignal hinterlegt. Um die transienten Ereignisse rund um den Auslösebereich ($-5 \text{ ms} \leq t \leq 10 \text{ ms}$) detaillierter darzustellen, ist dieser Bereich in Bild 4.6 (2) mit vergrößertem Zeitmaßstab abgebildet. Die herausgelöbte transiente Spannungsüberlagerung ist in Bereich (3) in Bild 4.6 grafisch dargestellt. Die nicht-transienten Störanteile wurden im Signal bereits wie in Kapitel 4.3 beschrieben bereinigt. Der Bereich (4) in Bild 4.6 stellt, ähnlich wie in (2), einen vergrößerten Ausschnitt um den Auslösezeitpunkt dar. Die Zuordnung im Zuge der Korrelation wird unter Bereich (5) Bild 4.6 in Tabellenform dargestellt. Hierbei werden jeweils die zugeordneten SMP-Einträge bzw. Informationen der georteten Blitzentladungen angezeigt.

4.6. Grafische Ausgabe

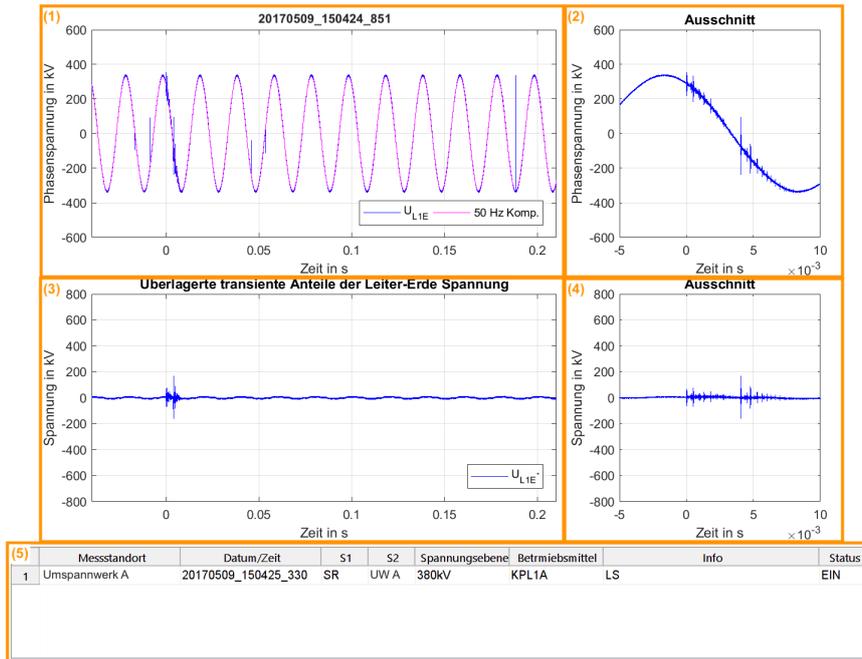


Bild 4.6.: Grafische Ausgabe der korrelierten transienten Messungen am Beispiel der SMP-Daten

Für die am Beginn dieses Kapitels angesprochenen Sonderfälle (Grundschiwingung nicht dauerhaft vorhanden) erfolgt eine reduzierte grafische Ausgabe. Da hier keine Datenbehandlung und somit kein Herauslösen transienter Spannungsüberlagerungen stattfindet, entfallen die Bereiche (3) und (4). Bild 4.7 zeigt die grafische Ausgabe dieser Sonderfälle am Beispiel einer Leitungsausschaltung. Die Bereiche (1),(2) und (5) zeigen dieselben Informationen wie für Bild 4.6 beschrieben.

4. Datenbehandlung

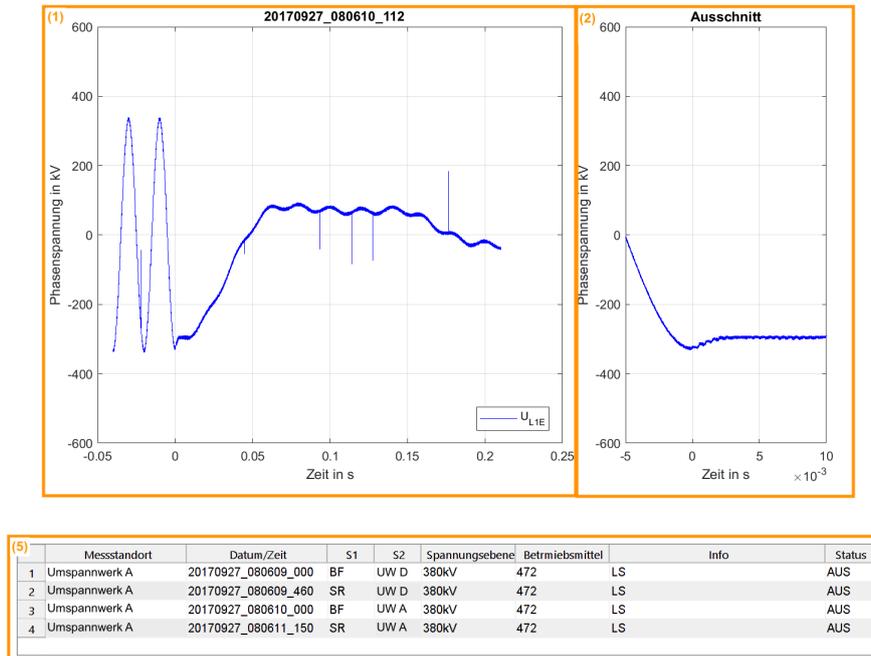


Bild 4.7.: Grafische Ausgabe der korrelierten Sonderfälle der transienten Messungen am Beispiel der Ausschaltung einer Freileitung

5. Korrelationsmethodik

5.1. Prozessentwicklung

Ein zweiter wesentlicher Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Korrelationsmethodik. Diese soll eine zeitliche Korrelation transienter Spannungsmessungen mit Schaltmeldeprotokollen und Blitzortungsdaten ermöglichen. In diesem Kapitel soll auf die Entwicklung der Korrelationsmethodik eingegangen werden. Zusätzlich soll auf die Parameter der Gesamtkorrelation näher eingegangen werden.

Die im Zuge der Arbeit entwickelte Korrelationsmethodik soll eine strukturierte Aufteilung und Klassifizierung des transienten Ausgangsdatensatzes ermöglichen. Durch mehrere Korrelationsschritte mit SMP- bzw. LLS-Daten soll der transiente Messdatensatz analysiert und kategorisiert werden. Bild 5.1 zeigt schematisch die entwickelte Methode mit den einzelnen Korrelationsschritten und die Klassifizierung nach Art der transienten Ereignisse. Es sei darauf hingewiesen, dass die Breite der einzelnen Bereiche in Bild 5.1 nicht als quantitatives Ergebnis der Gesamtkorrelation zu interpretieren ist.

Den Ausgangspunkt bildet der transiente Messdatensatz (siehe Bild 5.1, Datenpool). Dieser wird in einem ersten SMP-Korrelationsschritt zeitlich in einem Intervall von ± 1 s mit den Schaltmeldedaten abgeglichen. Somit wird der Datenpool in zwei Anteile aufgetrennt, siehe Bild 5.1.

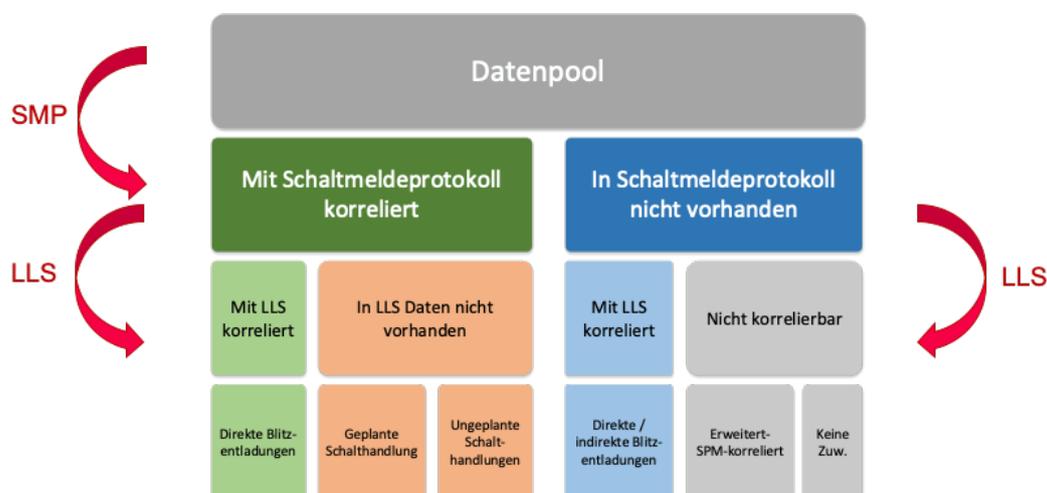


Bild 5.1.: Korrelationsmethodik zur strukturierten Klassifizierung des Ausgangsdatenpools

5. Korrelationsmethodik

Der linke Anteil (dunkelgrün) beinhaltet transiente Messdaten, denen Schaltmeldungen zugeordnet werden konnten. Im rechten Anteil (dunkelblau) finden sich Messdaten, die dem Schaltmeldeprotokoll nicht zugeordnet werden konnten. Ausgehend von diesen zwei Bereichen kann durch einen folgenden LLS-Korrelationsschritt weiter unterteilt werden.

Dadurch wird in der linken Spalte eine sogenannte Kreuzkorrelation zwischen SMP- und LLS-Daten durchgeführt. Der hellgrüne Datenpool enthält also Messdaten, welche mit SMP- bzw. LLS-Daten korreliert werden konnten. Die restlichen Daten (orange) enthalten nur SMP-korrelierte Messfiles.

In der rechten Spalte entsteht durch den LLS-Korrelationsschritt ein transienter Datenpool, welcher mit LLS-Daten korreliert wurde. Der restliche Anteil wird einem nicht-korrelierbaren Datenpool zugeordnet. Innerhalb dieser Messdaten konnten durch einen erweiterten SMP-Korrelationsschritt (Zeitintervall ± 1 s) weitere Zuordnungen zu Schalthandlungen gefunden werden. Der Begriff „erweiterter“ SMP-Korrelationsschritt wird in Kapitel [5.2](#) näher erläutert.

Mit Hilfe dieses Korrelationsprozesses konnte eine Aufteilung des Ausgangsdatenpools erfolgen. Die in weiterer Folge durchgeführte Klassifizierung nach Art bzw. Ursache der transienten Spannungen ist in Kapitel [5.3](#) näher erläutert.

5.2. Korrelationsparameter

Wie in Kapitel [5.1](#) angesprochen, erfolgt die Korrelation auf zeitlicher Basis. Das bedeutet, dass eine Zuordnung zwischen den Datensätzen durch Abgleich der Ereigniszeitstempel der jeweiligen Datensätze erfolgt. Die unterschiedlichen Zeitbasen der Datensätze wurden in Kapitel [3](#) gezeigt. Tabelle [5.1](#) zeigt eine Auflistung der Zeitstempel. Diese unterschiedlichen Zeitstempel brachten Herausforderungen in der softwaretechnischen Implementierung sowie in der Korrelationsfähigkeit mit sich. Um eine Vergleichbarkeit der Zeitstempel zu erreichen, wurde als

Tabelle 5.1.: Auflistung verschiedener Zeitbasen der verwendeten Datensätze

Datensatz	Zeitbasis	Zeitstempelauflösung
Transient	MEZ	Millisekunden
SMP	MEZ	Millisekunden
LLS	UTC+0	Nanosekunden

gemeinsame Zeitbasis die MEZ gewählt. Somit mussten die Zeitstempel der Blitzortungsdaten entsprechend von UTC+0 auf MEZ umgerechnet werden. Hierbei ist die unterschiedliche Stundenabweichung aufgrund der Sommer- und Winterzeit zu beachten. Zusätzlich wurde der GPS-Zeitstempel der LLS-Daten an die Millisekundenauflösung der restlichen Datensätze angepasst.

In Kapitel 3 wurde bereits die Zeiterfassung durch Synchronisierung mit einem Zeitserver erwähnt. Aufgrund unterschiedlicher Synchronisierungsintervalle kommt es bei der Aufzeichnung einzelner Datensätze zu Zeitdrifts. Um trotz dieser zeitlichen Abweichungen eine Zuordnung zwischen den Datensätzen zu ermöglichen, muss die Korrelation über ein definiertes Zeitintervall erfolgen. Im Zuge dieser Arbeit wurde aufgrund der unterschiedlichen Zeitstempel ein Zeitintervall von ± 1 s im Sekundenbereich gewählt. Aus diesem Grund wird im Zuge des Korrelationsvorgangs jeweils der Zeitstempel der transienten Messung in diesem Intervall von ± 1 s variiert und wiederholt mit dem Korrelationsdatensatz (SMP oder LLS) abgeglichen. In Bild 5.2 ist diese zeitliche Variation schematisch dargestellt. Der Zeitpunkt t_0 bezeichnet dabei den Erfassungszeitpunkt der transienten Messung. Das Durchlaufen des Korrelationsintervalls ergibt somit insgesamt drei Zeitstempel. Diese Zeitpunkte werden in weiterer Folge mit jenen des Korrelationsdatensatzes abgeglichen.

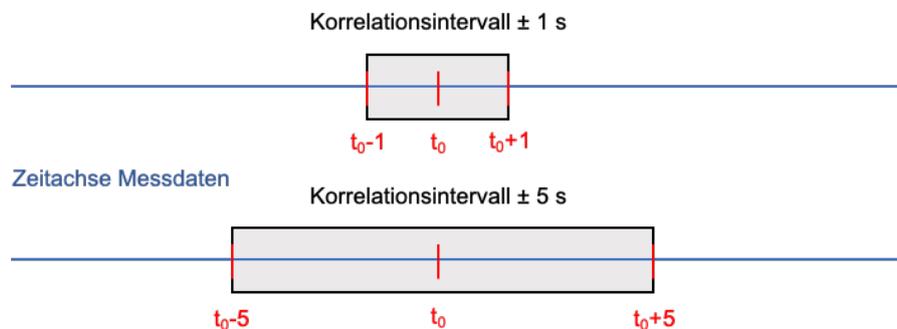


Bild 5.2.: Schematische Darstellung der Korrelationsintervalle für ± 1 s und ± 5 s

Nach dem ersten Korrelationsschritt verbleibt innerhalb der rechten Spalte in Bild 5.1 ein Anteil an nicht-korrelierbaren Messdaten übrig. Als Grund für diesen verbleibenden Teil kann einerseits eine zu große Zeitabweichung in Bezug auf das gewählte Korrelationsintervall genannt werden. Andererseits entfallen in diesen Datenpool möglicherweise auch erfasste transiente Spannungen aus untergeordneten Spannungsebenen oder externen Übertragungsnetzen. Für diese Arbeit lagen keine Schaltmeldeprotokolle externer Netzbetreiber vor. Daher wurde versucht erstgenannte Gründe auszuschließen. Der erweiterte SMP-Korrelationsschritt berücksichtigt neben einem vergrößerten Korrelationsintervall von ± 5 s (siehe 5.2) zusätzlich Schalthandlungen aus untergeordneten Spannungsebenen. Die Filterparameter der Schaltmeldeprotokolle für den zweiten SMP-Korrelationsschritt werden in Kapitel 3.2, Tabelle 3.3 vorgestellt.

5.3. Klassifizierung

Nach erfolgter Korrelation wurde eine Klassifizierung der erhaltenen Datenpools durchgeführt. Diese Klassifizierung ermöglicht eine weitere Auffächerung der separierten Datenbereiche hinsichtlich der Ursache der gemessenen transienten Spannungen.

5. Korrelationsmethodik

Für die linke Spalte in Bild [5.1](#) können somit drei finale Klassifizierungen angegeben werden:

- Direkte Blitzentladungen mit nachfolgender Abschaltung
- Geplante Schalthandlungen
- Ungeplante Schalthandlungen

In der Klassifizierung der rechten Spalte finden sich ebenfalls drei Ursachenbereiche wieder. Hierbei wurde neben direkten und indirekten Blitzentladungen auch zwischen Daten des erweiterten SMP-Korrelationsschritts unterschieden (siehe Bild [5.1](#)). Zusätzlich wurden die nicht-korrelierbaren Daten in eine eigene Klasse eingeteilt. Nachfolgende Auflistung zeigt die definierten Klassen der rechten Seite:

- Indirekte oder direkte Blitzentladungen ohne nachfolgende Abschaltung
- Erweitert-SMP-korreliert
- Keine Zuweisung

Die Klasse „Erweitert-SMP-korreliert“ beinhaltet einerseits Schalthandlungen, die in den vorhergehenden Schritten nicht zugeordnet werden konnten, sowie andererseits Schalthandlungen aus untergeordneten Spannungsebenen. In der Klasse „Keine Zuweisung“ verbleiben alle übrigen Messdaten, für die keine Korrelation im Zuge dieser Analyse möglich ist.

5.4. Strukturierte Ablage der grafischen Ausgaben

Nachdem die Korrelation entsprechend Punkt [5.1](#) durchgeführt wurde, erfolgt die grafische Ausgabe jeder zugeordneten transienten Messung, wie in Bild [4.6](#) gezeigt. Damit die generierten Bilder für nachfolgende Analysen verfügbar sind, wurden diese strukturiert in einem Ordnerschema abgelegt. Als Basisablageort wird für jeden Messstandort und jede Art von Korrelation (SMP, SMP + LLS, LLS, etc.) ein Hauptordner erstellt. Dieser wird mit dem Umspannwerk und der Abkürzung der Korrelation benannt (Bsp.: *UW_A_SMP*). Anhang [C](#) zeigt die interne Ordnerstruktur des Basisordners am Beispiel der SMP-Korrelation in UW A.

Für den Fall der SMP-Korrelationen werden entsprechend des geschalteten Betriebsmittels (Spalte: „*Meldung*“) Unterordner erstellt. So werden bspw. alle Trennerschaltungen des *SSTR2* aus UW A im entsprechenden Ordner *UW_A_SMP/SSTR2* abgelegt. Zusätzlich zu den einzelnen Unterordnern nach Schaltbetriebsmittel wird ein Gesamtordner (*Alle*) erstellt. In diesem befinden sich alle in den Unterordnern verteilten Bilder. Der Unterordner *Sonderfälle* beinhaltet Ein- bzw. Ausschaltungen direkt am gemessenen Betriebsmittel (siehe Bild [4.7](#)). Da in diesen Fällen keine Datenbehandlung durchgeführt wurde, erfolgte die Kategorisierung dieser Fälle, wie in Kapitel [4](#) erwähnt, manuell per Hand. Ein Kategorisierungsordner im Basisordner (siehe Anhang [C](#) Bild [C.1](#) Pfeil 2) beinhaltet jeweils einen Unterordner für jede Kategorie. Darin liegen die Ausgaben entsprechend ihrer Kategorisierung nach Maximalwert unterteilt. Die jeweiligen Unterordner nach Betriebsmittel enthalten noch weitere Unterordner für jeden mit dem Betriebsmittel geschalteten Leitungsabgang, Hauptumspanner etc. (siehe Anhang [C](#) Pfeil 1 Bild [C.1](#)).

6. Ergebnisse

6.1. Korrelation des Gesamtdatensatzes

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Gesamtkorrelation und der anschließenden Analysen näher erläutert. Zusätzlich zu den Korrelationsergebnissen und der Kategorieverteilung der transienten Spannungen wird hier auch auf Ergebnisse zu den in Kapitel 1.3 definierten Forschungsfragen eingegangen.

Wie in Kapitel 3 bereits erwähnt, umfasst der transiente Datensatz knapp 13.800 Messungen. Durch Anwendung der entwickelten Korrelationsmethode konnte dieser Datenpool entsprechend aufgefächert werden. Bild 6.1 zeigt eine Aufschlüsselung der Ergebnisse der Gesamtkorrelation. Dabei sind die einzelnen Zuordnungen der Korrelationsschritte (SMP, LLS, erweitert SMP) dargestellt. Die Anteile an zugeordneten Messungen ist jeweils in Absolut- und Prozentwerten angegeben.

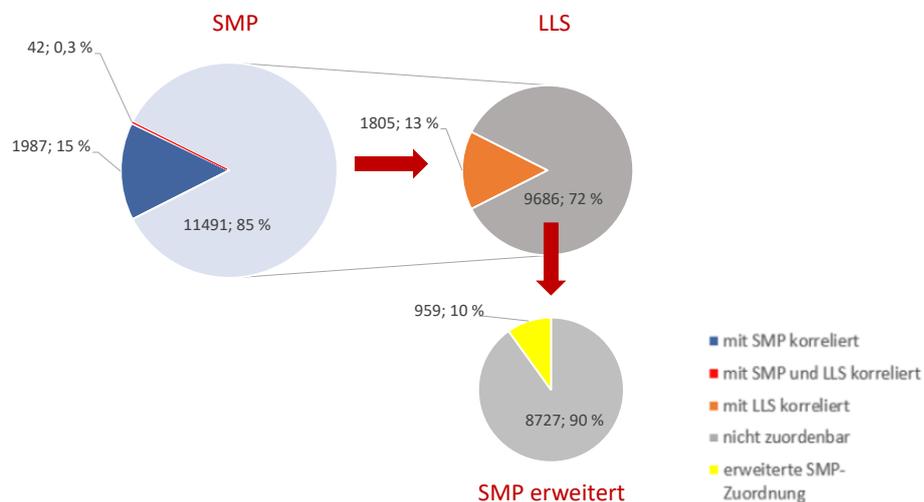


Bild 6.1.: Ergebnisse der Gesamtkorrelation des transienten Datensatzes mit SMP- sowie LLS-Daten und Ergebnisse der erweiterten SMP-Korrelation

6. Ergebnisse

Der erste Korrelationsschritt zwischen transienten Messdaten und SMP-Daten liefert, wie in Bild 5.1 links schematisch gezeigt, zwei Anteile. Dabei konnten ca. 15 % der transienten Messungen mit SMP-Einträgen korreliert werden (siehe Bild 6.1, blau). Die restlichen 85 % entfallen auf den nicht mit SMP korrelierbaren Bereich (hellgrau). Ein weiterer Korrelationsschritt des SMP-korrelierten Datenbereichs mit LLS-Daten lieferte eine Kreuzkorrelation zwischen SMP- und LLS-Daten. Es konnten 42 Messungen (0,3 %) einer Kreuzkorrelation und somit direkten Blitzentladungen mit nachfolgender Schutzauslösung zugeordnet werden.

Ein Beispiel einer Kreuzkorrelation ist in Bild 6.2 dargestellt. Darin wurden im ersten Schritt Schutzauslösungen an Phase L1 zugeordnet. Zusätzlich wurde im Zuge der LLS-Korrelation eine Blitzentladung entlang eines Leitungszugs zugewiesen (siehe Bild 6.2 unten). Die Blitzentladung besteht insgesamt aus drei Teilblitzen, wobei für den ersten eine Blitzstromamplitude von -10,63 kA berechnet wurde (Der Zeitmaßstab wurde zur besseren Sichtbarkeit entsprechend verkleinert). Im Spannungssignal ist ein deutlicher Spannungseinbruch aufgrund eines Isolationsfehlers, hervorgerufen durch einen der Teilblitze, zu sehen. Anhand der Ortungskoodinaten dieser Blitzentladung konnte eine Entfernung zur Freileitung von ca. 2 km gemessen werden. Der Spannungseinbruch und somit der Isolationsfehler tritt für eine Dauer von 100 ms auf. Dies liegt im Rahmen der gängigen Fehlerklärungszeit eines modernen Schutzsystems. Wie Schwab in [19] erwähnt, liegt die minimale Fehlerklärungszeit unter 100 ms, wobei der Maximalwert hinsichtlich Reserveschutz und damit einhergehender Verzögerung des Auslösebefehls bis in den Sekundenbereich reichen kann.

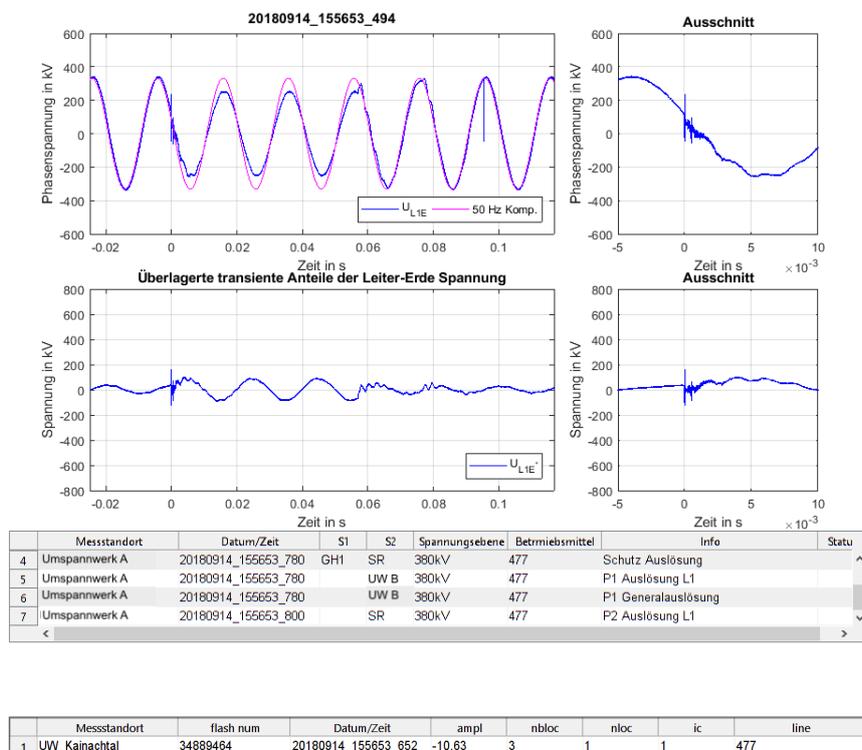


Bild 6.2.: SMP-LLS Zuordnung: Isolationsversagen im Zuge einer direkten Blitzentladung entlang eines Leitungszugs mit anschließender Schutzauslösung

6.1. Korrelation des Gesamtdatensatzes

Die restlichen 14,7 % des Korrelationsschritts mit SMP-Daten beinhalten geplante und ungeplante Schalthandlungen. Bild 6.3 zeigt eine geplante Schalthandlung an einem Sammelschienentrennschalters. Es handelt sich dabei um eine Einschaltung eines Sammelschienentrennschalters des Regelhauptumspanners in UW D. Die aufgezeichnete Leiter-Erde-Spannung wurde dabei ebenfalls in UW D gemessen. Deutlich zu erkennen sind mehrfache Rückzündungen während des Schließens des Trenners (ca. 0.6 s). Weitere Beispielfälle zugeordneter Schalthandlungen sind in Kapitel 6.2 jeweils für Kategorie 1 bis 3 beschrieben. Weitere Zuordnungsbeispiele der SMP-Korrelation werden in Anhang A dargestellt.

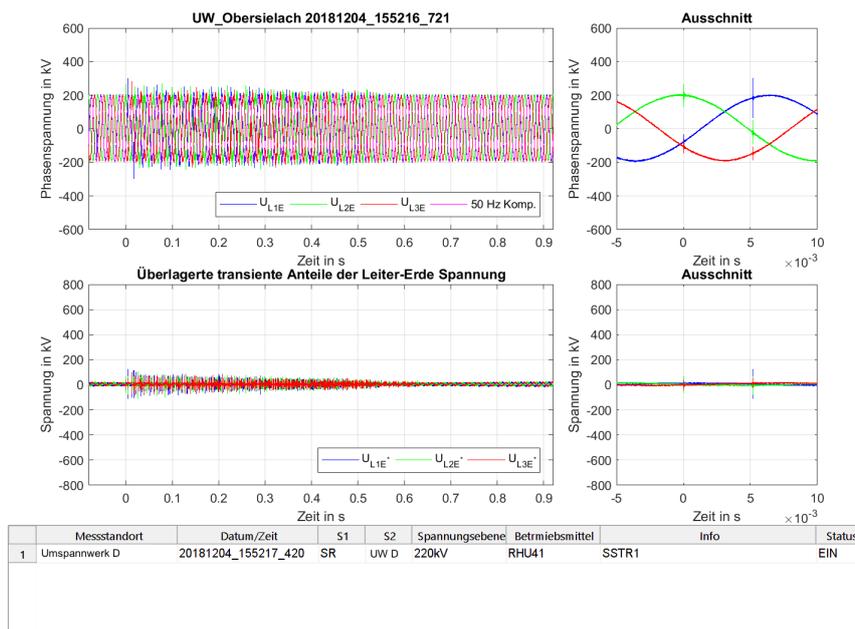


Bild 6.3.: SMP Zuordnung: Einschalten eines Sammelschienentrennschalters am Regelhauptumspanner in UW D, gemessen in UW D

Der nicht-SMP-korrelierte Datenpool (siehe rechte Spalte in Bild 5.1) wurde ebenfalls durch einen LLS-Korrelationsschritt weiter aufgeteilt. Rund 13 % entfallen auf rein LLS-korrelierte Messungen (siehe Bild 6.1 orange). Darin befinden sich direkte oder indirekte Blitzentladungen ohne nachfolgende Abschaltung. Ein Beispiel einer solchen LLS-Zuordnung zeigt Bild 6.4. Darin ist eine Blitzzuordnung im Korridor um einen Leitungszug zu sehen. Der negativen Blitzentladung wurden insgesamt 11 Teilblitze vom Blitzortungssystem zugeordnet. Die gemessene Leiter-Erde-Spannung zeigt die ersten fünf Teilblitze als Spannungsspitzen. Der überlagerte Maximalwert der Spannung liegt für Teilblitz 4 bei ca. 390 kV (Kategorie 2). Weitere Beispielfälle für LLS-Korrelationen sind in Anhang B angeführt.

10 % der Messungen konnten durch die erweiterte SMP-Korrelation (siehe Kapitel 5.2) weiteren Schalthandlungen zugeordnet werden. Diese Zuweisungen beinhalten aufgrund von Erweiterungen der Spannungsebenen in den SMP-Daten neben 380-kV- und 220-kV-Schalthandlungen auch Schalthandlungen der 30-kV- und 110-kV-Ebene. Beispiele aus diesen Spannungsebenen

6. Ergebnisse

werden in Kapitel [6.5](#) vorgestellt.

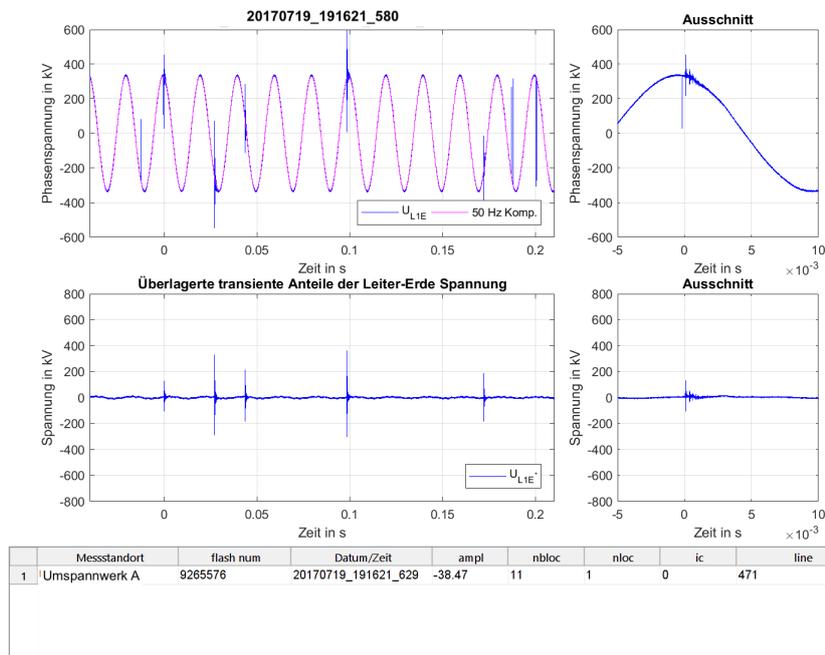


Bild 6.4.: LLS Zuordnung: Blitzentladung mit 11 zugewiesenen Teilblitzen und einer Blitzstromamplitude des Erstblitzes von -38,47 kA.

Für die verbleibenden 8.727 Messungen (65 % des Gesamtdatensatzes) kann keine Zuweisung zu vorhandenen SMP- oder LLS-Daten erfolgen. Gründe warum hier keine Zuweisung erfolgen konnte, wurden in Kapitel [5.2](#) genannt. Zusätzliche Betriebsführungsdaten anderer Übertragungs- bzw. Verteilnetzbetreiber könnten hier zur Verringerung des nicht-korrelierbaren Datenpools beitragen. Das Auslösesystem des transienten Messsystems muss für die präzise Erfassung auch weit entfernter Ereignisse entsprechend hochsensibel parametrisiert werden. Aus diesem Grund werden eventuell auch Messungen aufgrund äußerer Einflüsse auf das Messsystem ausgelöst werden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass auch Messungen welchen keine Ursache aus Schaltmelde- oder Blitzortungsdaten zugrunde liegen, im Messdatenpool enthalten sind.

6.2. Kategorieverteilung

Die in Kapitel [4.5](#) eingeführte Kategorisierungsmethode liefert zusätzlich zur Korrelation Ergebnisse der auftretenden Intensitäten der transienten Spannungen verschiedener Ursachen. Die Kategorieverteilung der SMP-korrelierten Messungen ist in Bild [6.5](#) dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass 15 % an SMP-korrelierten transienten Daten (siehe Bild [6.1](#)) zu knapp 90 % in Kategorie 1 liegen und nur geringe transiente Spannungen aufweisen.

6.2. Kategorieverteilung

Etwa 10 % liegen in Kategorie 2 und stellen somit bereits größere transiente Auswirkungen dar. Nur 5 Fälle (0,2 %) zeigten erhebliche Spitzenwerte, die in Kategorie 3 liegen.

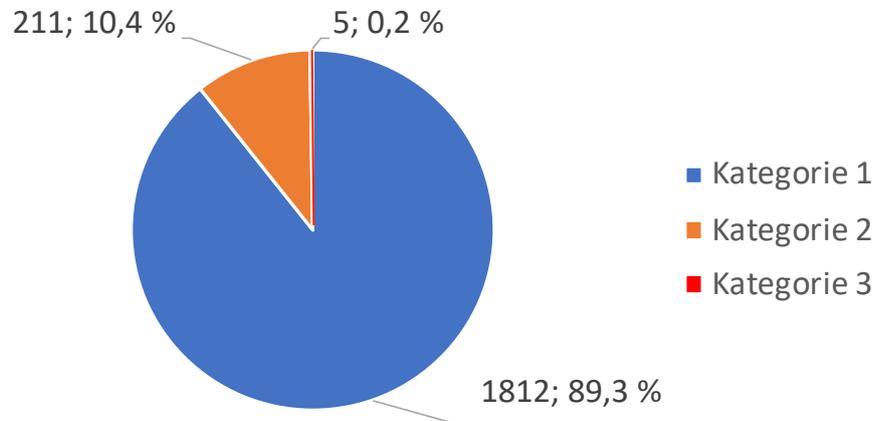


Bild 6.5.: Kategorieverteilung der SMP-korrelierten Messdaten

Bild 6.6 zeigt im Vergleich dazu die Gesamtkategorieverteilung der LLS-korrelierten Messdaten. Wie zu erkennen ist, war in den korrelierten Blitzentladungen kein Kategorie-3-Fall enthalten. Ein geringer Anteil von 2,6 % wurde Kategorie 2 zugewiesen. Der Großteil der LLS-korrelierten Messungen liegt in Kategorie 1. Die Kategorieverteilung der nicht-korrelierbaren Fälle in

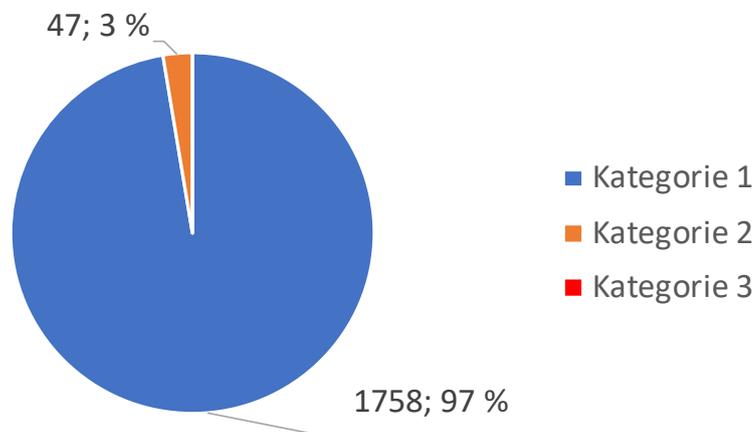


Bild 6.6.: Kategorieverteilung der LLS-korrelierten Messdaten

Bild 6.7 verdeutlicht, dass nur wenige markante transiente Ereignisse von dieser Korrelation unerfasst bleiben. Die meisten (7 von 11) der Fälle in Kategorie 3 der nicht zuordenbaren Messungen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Trennerschaltungen zurückzuführen. Der Großteil der nicht-korrelierbaren Messungen liegt in Kategorie 1. Die einzelnen Anteile in Bild 6.5 wurden zusätzlich auf ihre Ursachen (Schaltarten) hin analysiert. Somit konnte für jeden Kategorieanteil eine weitere Auffächerung hinsichtlich LS-, TR-Schaltungen und

6. Ergebnisse

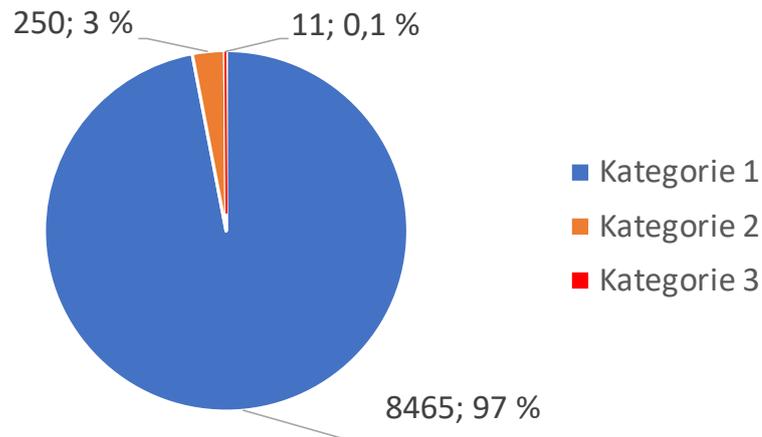


Bild 6.7.: Kategorieverteilung der nicht-korrelierbaren Messdaten

Schutzauslösungen ermittelt werden. Der Anteil der Schutzauslösungen beinhaltet eventuell ebenfalls LS-Schaltungen. Diese erfolgen jedoch ungeplant und sind deshalb als eigener Bereich angeführt. Die Bilder [6.8](#) bis [6.10](#) zeigen die Zusammensetzung nach Schaltart für alle drei Kategorien.

Kategorie 1 (Bild [6.8](#)) setzt sich etwa zu gleichen Teilen aus LS- und TR-Schaltungen zusammen. Ein geringer Anteil der LS-Schaltungen (ca. 7 %) entfällt auf Schutzauslösungen. Bild [6.9](#) zeigt die Verteilung für Kategorie 2. Darin ist zu erkennen, dass über 50 % auf LS-Schaltungen allgemein zurückzuführen sind. Die restlichen 35 % werden von Trennerschaltungen gebildet. 10 % der Kategorie 2 Fälle können ungeplanten LS-Schaltungen im Zuge von Schutzauslösungen zugeordnet werden. Die Analyse zeigte, dass der Großteil (80 %) der Kategorie 3 Fälle durch Trennerschaltungen hervorgerufen werden (siehe Bild [6.10](#)). Die restlichen 20 % der fünf korrelierten Fälle entfallen auf LS-Schaltungen. Mit Schutzauslösungen konnte kein Kategorie 3 Fall in Verbindung gebracht werden. Dies kann der geringen Anzahl an Zuordnungen geschuldet sein. Ähnlich wie für die einzelnen Kategorieanteile kann auch eine Aufschlüsselung nach Schaltarten für jeden Messstandort erfolgen. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass den einzelnen Messstandorten unterschiedliche Messperioden zugrunde liegen. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Messstandorten herzustellen, wurden die Anteile auf 100 Messtage bezogen dargestellt.

Bild [6.11](#) bis [6.14](#) zeigen die auf 100 Messtage bezogenen Anteile der unterschiedlichen Schaltarten für die einzelnen Messstandorte. Hierbei zeigten sich deutlich unterschiedliche Verteilungen. Die SMP-korrelierten Messungen in UW A teilten sich zu rund 41 % auf Trennerschaltungen sowie zu 51 % auf LS-Schaltungen auf. Die restlichen 17 % bilden Schutzauslösungen. Im Gegensatz dazu wird in UW B der Großteil (62 %) der zugeordneten Schaltheandlungen von Trennerschaltungen gebildet. Nur etwa ein Drittel (34 %) entfällt auf reine LS-Schaltungen. Die restlichen Anteile werden von Schutzauslösungen gebildet. Messstandort C liefert eine deutlich gegensätzliche Zusammensetzung. Hier entfallen rund 71 % auf Leistungsschal-

6.2. Kategorieverteilung

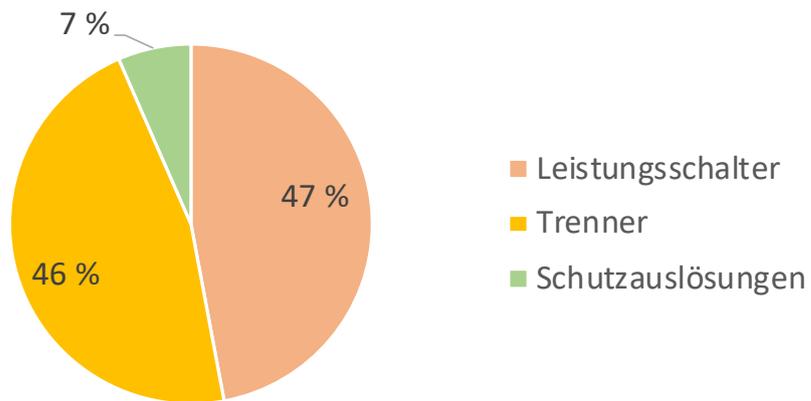


Bild 6.8.: Aufteilung der Kategorie 1 Fälle nach Schaltarten

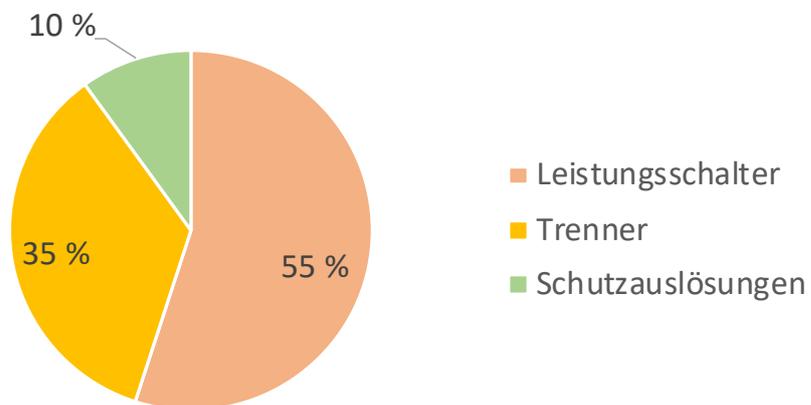


Bild 6.9.: Aufteilung der Kategorie 2 Fälle nach Schaltarten

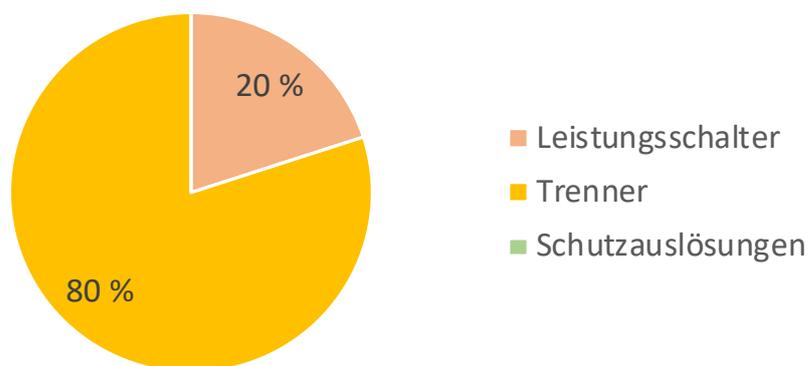


Bild 6.10.: Aufteilung der Kategorie 3 Fälle nach Schaltarten

6. Ergebnisse

, und nur etwa 13 % auf Trennerschaltungen. 22 % sind auf Schutzauslösungen zurückzuführen.

Betrachtet man Bild [6.14](#), ist zu erkennen, dass sich die in UW D zugeordneten Schalt-handlungen zur Hälfte aus Trennerschaltungen zusammensetzen. Die andere Hälfte entfällt auf geplante und ungeplante LS-Schaltungen. Davon werden etwa 12 % von Schutzauslösungen (ungeplante LS-Schaltungen) gebildet.

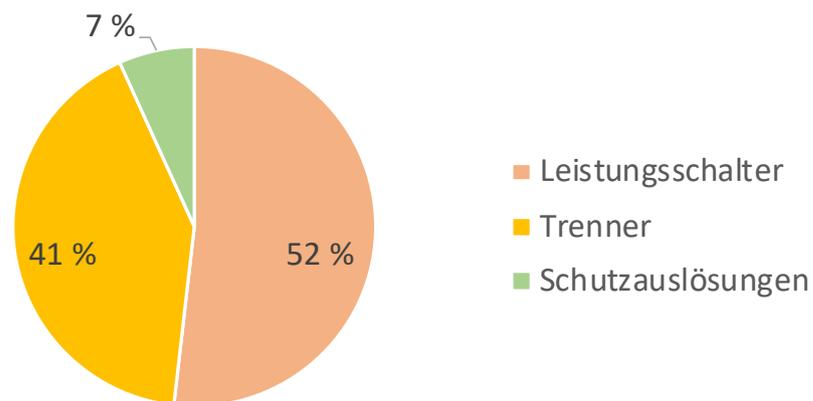


Bild 6.11.: Aufteilung der Messungen aus UW A nach Schaltarten, bezogen auf 100 Messtage

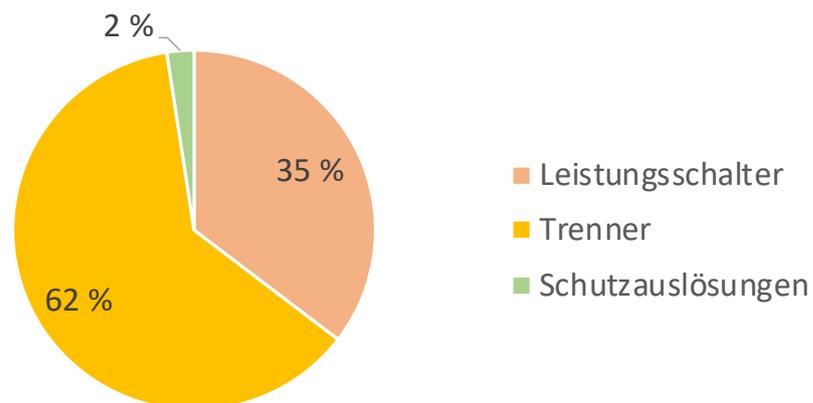


Bild 6.12.: Aufteilung der Messungen aus UW B nach Schaltarten, bezogen auf 100 Messtage

6.2. Kategorieverteilung

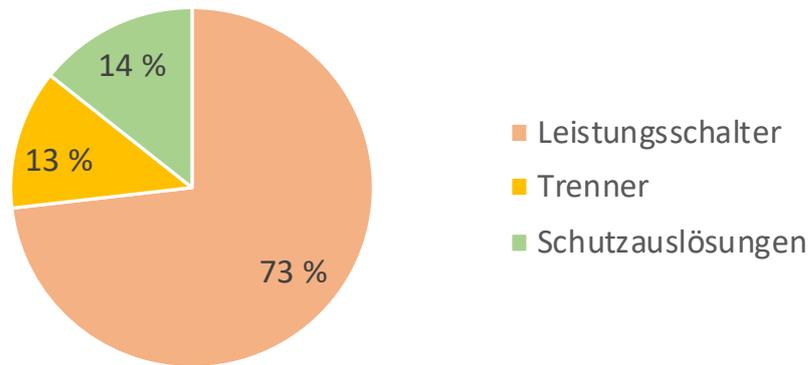


Bild 6.13.: Aufteilung der Messungen aus UW C nach Schaltarten, bezogen auf 100 Messtage

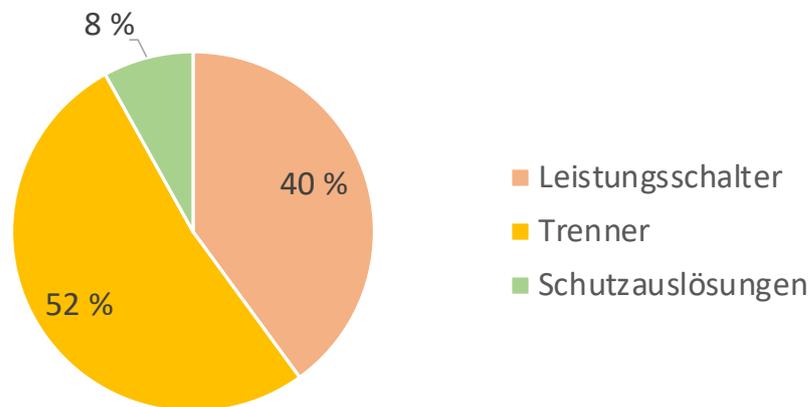


Bild 6.14.: Aufteilung der Messungen aus UW D nach Schaltarten, bezogen auf 100 Messtage

Nachfolgend ist zu jeder Kategorie ein Beispielfall mit unterschiedlichen Schaltarten aus der Korrelation dargestellt. Bild [6.15](#) zeigt einen beispielhaften Fall der Kategorie 1. Hierbei handelt es sich um eine Einschaltung des Leistungsschalters eines Leitungszugs, gemessen in UW B. Der Maximalwert der transienten Überlagerung beträgt etwa 50 kV und liegt in Kategorie 1. In Bild [6.16](#) ist der transiente Ausgleichsvorgang vergrößert dargestellt. Neben Wanderwellenvorgängen aufgrund des Aufladevorgangs der Leitung sind darin Ausgleichsschwingungen im Bereich von 5 kHz zu erkennen. Die Amplitude der Spannungswelle in die Freileitung ist im Wesentlichen abhängig von der Spannungsdifferenz zwischen Speise- und Leitungsseite [2](#).

In Bild [6.18](#) ist ein Beispielfall für Kategorie 2 dargestellt. Dieser beinhaltet eine Ausschaltung des Sammelschienentrenners einer Kupplung in UW B. Gemessen wurde dabei ebenfalls im UW B. Zu erkennen sind multiple Wieder- bzw. Rückzündungen des Trennschalters.

6. Ergebnisse

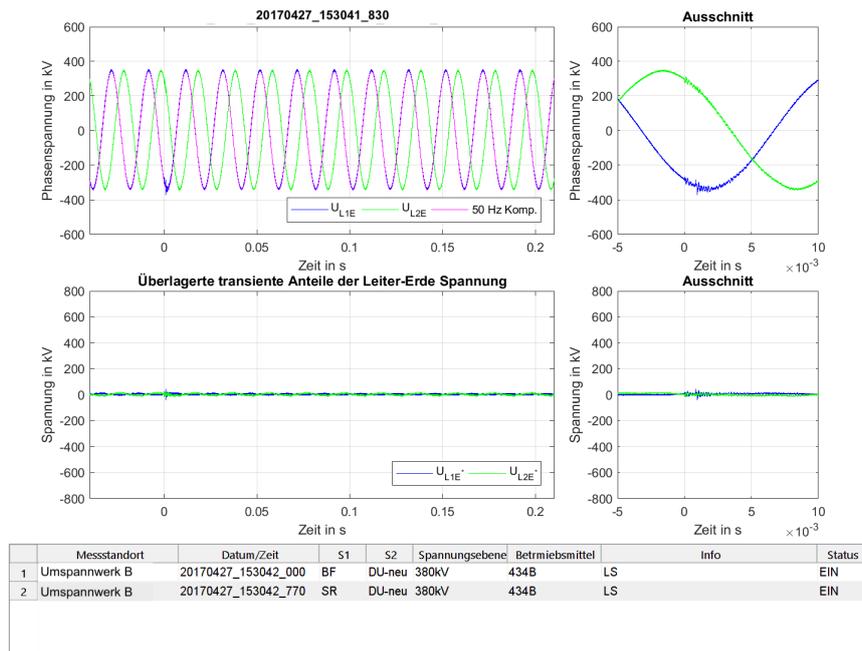


Bild 6.15.: SMP-Zuordnung: LS-Einschaltung eines Leitungszugs, gemessen in UW B - Kategorie 1

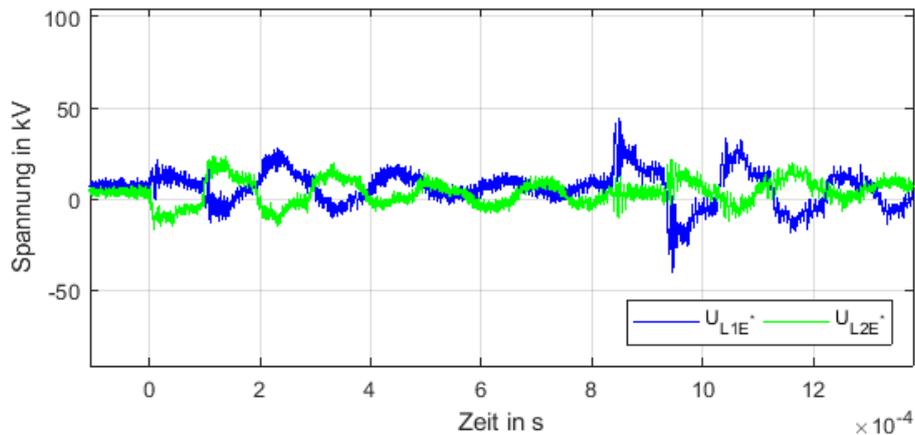


Bild 6.16.: Transienter Ausgleichsvorgang der LS-Einschaltung eines Leitungszuges mit Schwingungen im Frequenzbereich um 5 kHz zum Zeitpunkt $t = 0$ s

Diese treten, wie von Balzer und Neumann in [3] beschrieben, dann auf, wenn die Spannungsdifferenz zwischen Speise- und Lastseite die Spannungsfestigkeit der aktuellen Schaltstrecke überschreitet (siehe Bild 6.17). Diese Wieder- bzw. Rückzündungen wiederholen sich solange, bis die Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke groß genug ist.

Die Ausgleichsvorgänge infolge der Wieder- bzw. Rückzündungen können nach [3] wie folgt unterschieden werden:

- Hochfrequente Ausgleichsvorgänge
 - Wanderwellenvorgänge, einige MHz bis einige 10 MHz
 - Hochfrequente Schwingungen, einige 100 kHz bis einige MHz
- Niederfrequente Ausgleichsvorgänge
 - Mittelfrequente Schwingungen, einige 10 kHz
 - Niederfrequente Schwingungen, einige kHz

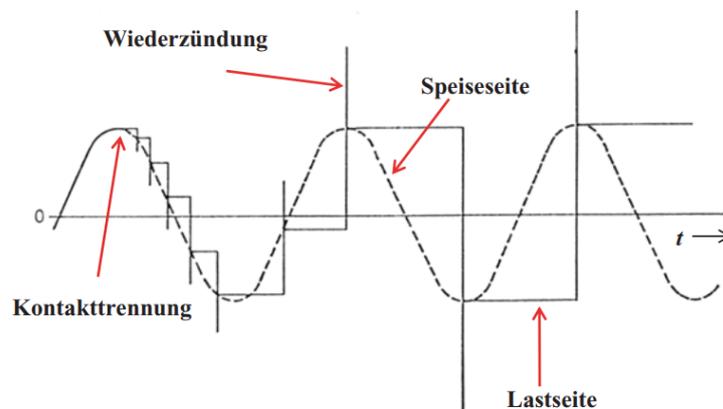


Bild 6.17.: Ausgleichsvorgänge bei einem kapazitiven Schaltvorgang [3]

Im vorliegenden Fall ist der für Freilufttrenner ausgeprägtere niederfrequente Ausgleichsvorgang im Zuge von Wiederzündungen zu sehen (siehe Bild [6.19] [3]). Zu erkennen ist eine maximale Frequenz von ca. 15 kHz. Der Ausschaltvorgang und das Auseinanderbewegen der Trennerkontakte ist anhand der ansteigenden Amplituden der Rückzündungen in Bild [6.18] ebenfalls zu erkennen. Der Maximalwert der überlagerten transienten Spannung liegt hierbei etwa bei 190 kV. Die Ausschaltzeit beträgt etwa 1,15 Sekunden.

6. Ergebnisse

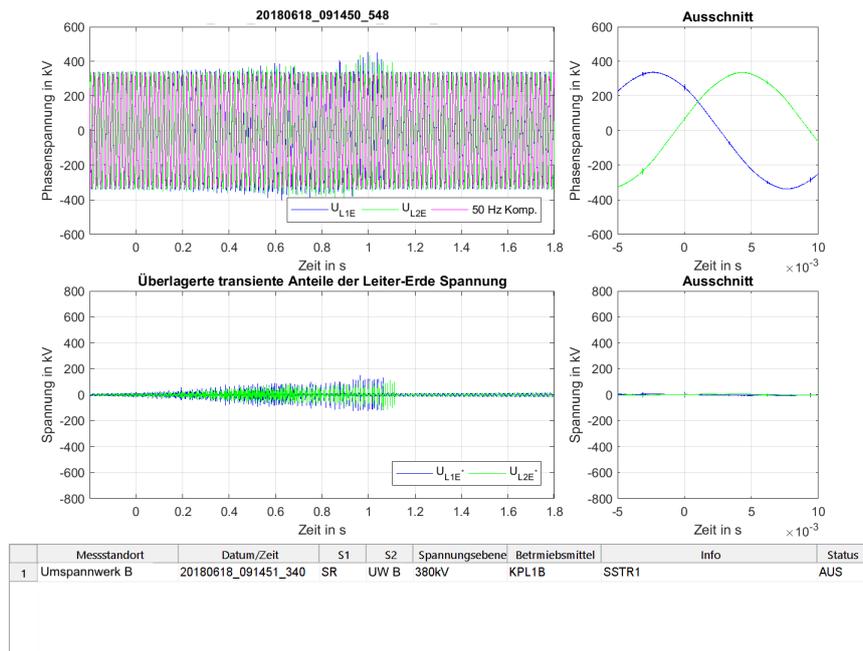


Bild 6.18.: SMP-Zuordnung: Ausschaltung des Sammelschientrenners einer Kupplung in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 2

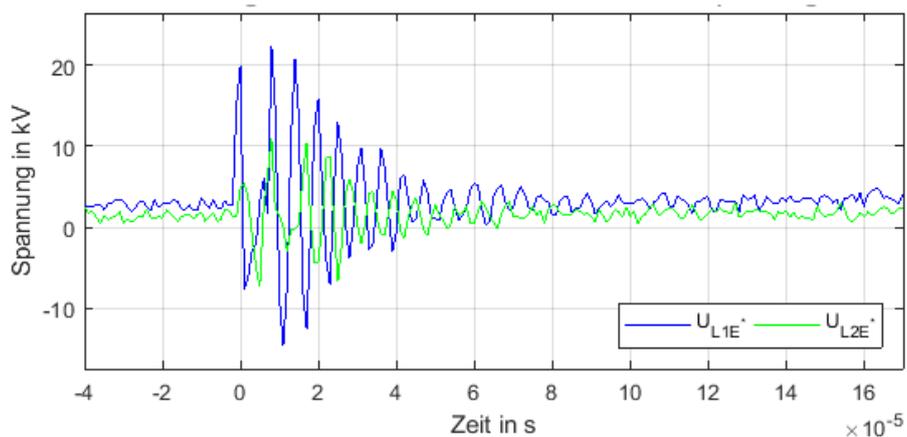


Bild 6.19.: Niederfrequenter Ausgleichvorgang einer Rückzündung mit einer Frequenz von ca. 15 kHz zum Zeitpunkt $t = 0$ s

6.2. Kategorieverteilung

Ein Beispielfall für Kategorie 3 ist in Bild [6.20](#) dargestellt. Zu sehen ist eine Einschaltung eines Hilfsschienentrenners eines Leitungszugs in UW B. Gemessen wurde ebenfalls in UW B. Es kommt bei dieser Einschaltung zu deutlichen transienten Überspannungen aufgrund mehrfacher Rückzündungen der Schaltstrecke. Diese Rückzündungen generieren, ähnlich wie vorher beschrieben, niederfrequente Ausgleichsvorgänge mit einer Frequenz von ca. 20 kHz (siehe Bild [6.21](#)). Dabei ist ein überlagerter Maximalwert von über 600 kV zu erkennen, was zur entsprechenden Eingliederung in Kategorie 3 führt. Der Einschaltvorgang und das Schließen der Kontakte ist durch die abfallenden Entladungsamplituden zu erkennen. Die Einschaltzeit beträgt hierbei etwa 2,25 s. Die ansteigende Restwelligkeit vor und nach dem Schließen des Trenners ist laut SMP-Daten des Übertragungsnetzbetreibers auf Regelfahrten der Phasenschiebertransformatoren zurückzuführen.

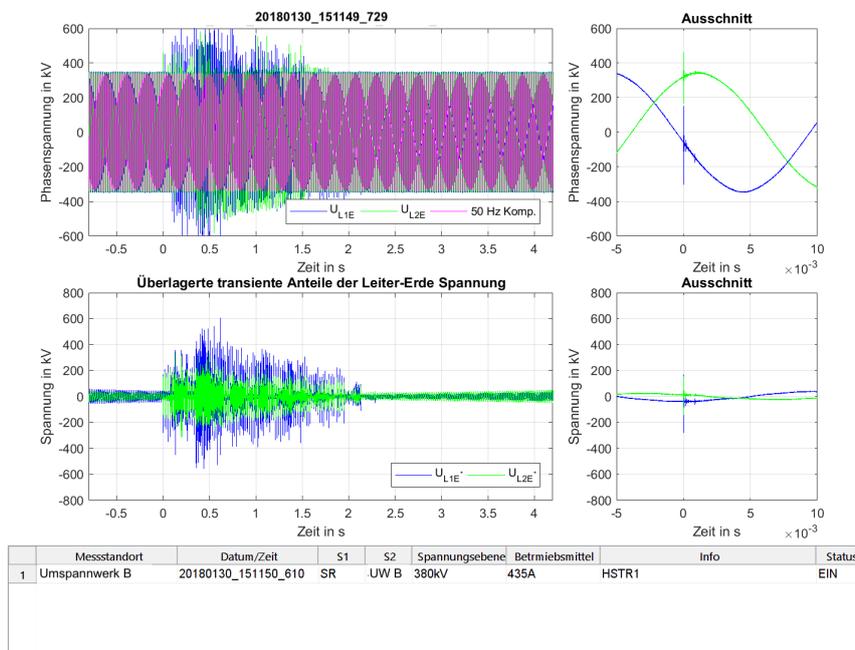


Bild 6.20.: SMP-Zuordnung: Einschaltung Hilfsschienentrenner eines Leitungszugs in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 3

6. Ergebnisse

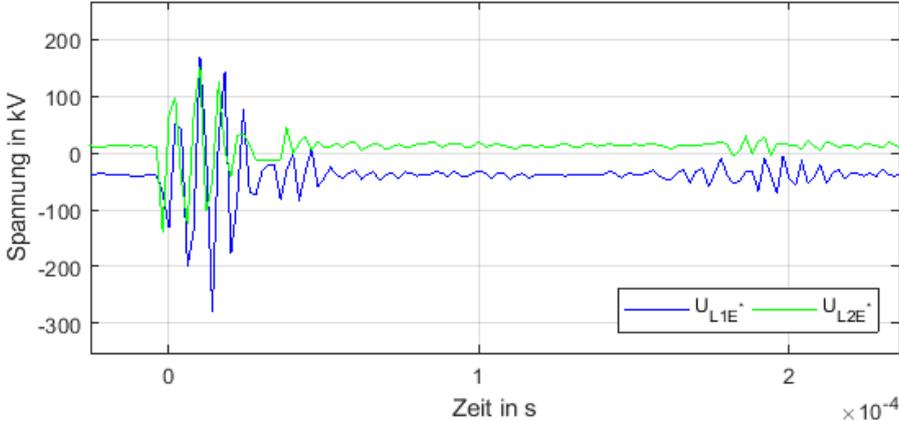


Bild 6.21.: Niederfrequenter Ausgleichsvorgang einer Rückzündung mit einer Frequenz von ca. 20 kHz zum Zeitpunkt $t = 0$ s

6.3. Sichtbarkeit transienter Ereignisse an verschiedenen Messstandorten

Die Analyse der Sichtbarkeit transienter Ereignisse konnte über zwei Methoden erfolgen. Einerseits über zugewiesene Schalthandlungen aus entfernten Netzknoten. Andererseits ausgehend von den in Tabelle 3.1 definierten Überschneidungsbereichen, bei denen untersucht werden konnte ob dieselbe Schalthandlung ebenfalls in anderen Messstandorten erkennbar war. Die erste Methode wurde im Zuge der visuellen Sichtung der grafischen Ergebnisse im Anschluss an die Korrelation angewandt. Für die Umsetzung der zweiten Methode wurde in den SMP-korrelierten Messdaten nach identen Zuordnungen von Schalthandlungen gesucht. Dies erfolgte durch softwaretechnische Unterstützung, wobei die grafischen Ausgaben der gefundenen Fälle in einem eigenen Ordner abgelegt wurden. Im Zuge dieser Analysen konnten transienten Ereignisse in Entfernungen von über 400 km nachgewiesen werden.

Bild 6.22 zeigt beispielsweise eine Zuschaltung einer Kondensatorbank, gemessen in UW D. Diese zugeordnete Schalthandlung stammt aus einem weit entfernten Netzknoten. Die Freileitungslänge zwischen diesem Netzknoten und dem Messstandort D beträgt etwa 300 km. Diese Verbindung beinhaltet drei dazwischenliegende Netzknoten. Die auftretenden transienten Überspannungen beim Einschalten der Kompensationsanlage werden durch das umliegende Hochspannungssystem und die Ausbreitung entlang der Freileitungsverbindung stark gedämpft und sind in UW D nur mehr als geringe Spannungsdeformierung auf allen drei Phasen erkennbar (siehe Bild 6.22).

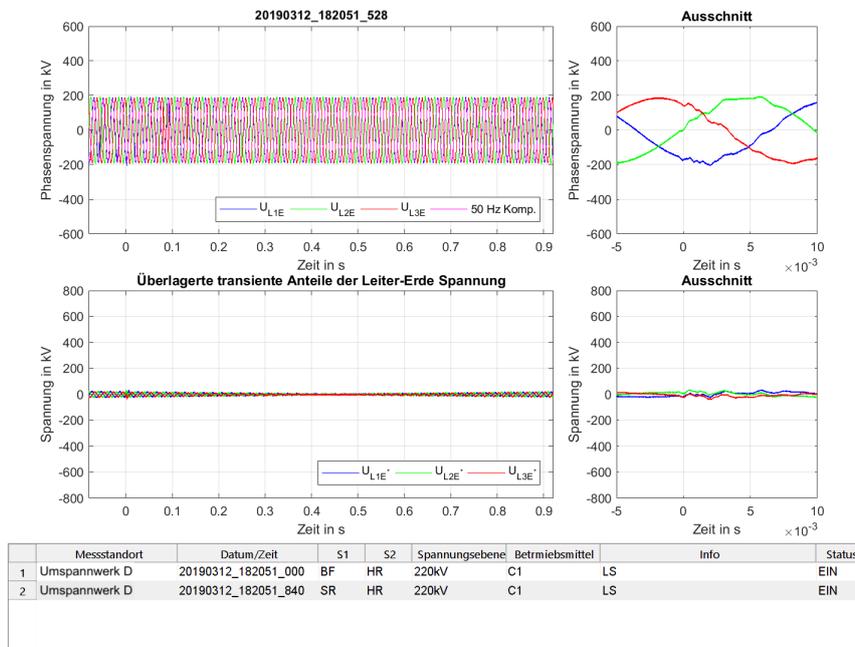


Bild 6.22.: SMP-Zuordnung: Einschaltung einer 300 km entfernten Kompensationsanlage, gemessen in UW D

6. Ergebnisse

Dieselbe Schalthandlung wurde ebenfalls im Messstandort C (Distanz zwischen Schaltort und UW C ca. 250 km) erfasst. Bild 6.23 zeigt die gemessenen Spannungen der oben genannten Einschaltung einer Kompensationsanlage. Die Auswirkungen dieser Schalthandlung sind hierbei deutlich ausgeprägter als in UW D. Es sind dabei Frequenzen im unteren kHz-Bereich zu erkennen.

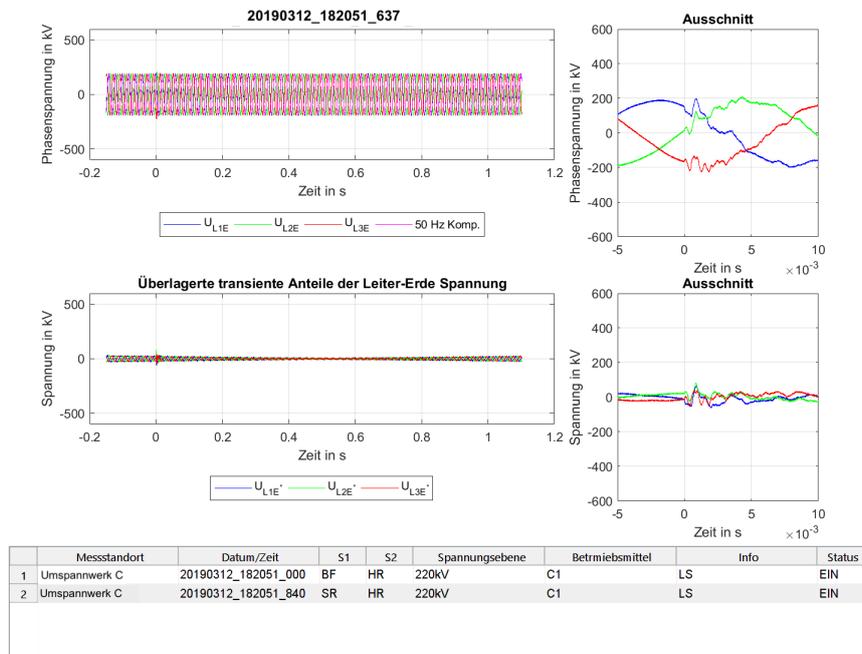


Bild 6.23.: SMP-Zuordnung: Einschaltung einer 250 km entfernten Kompensationsanlage, gemessen in UW C

In den Bildern 6.24 bis 6.26 sind Schutzauslösungen im Überschneidungsbereich 2 (siehe Tabelle 3.1) dargestellt. Hier wurden drei transiente Spannungsmessung aus unterschiedlichen Messstandorten miteinander korreliert. In allen drei Netzknoten wurde eine Abfolge von Schutzauslösung einer Leitung im 380-kV-Netz aufgrund eines Erdschlussfehlers im darunterliegenden 110-kV-Netz zugeordnet. Es wurden hier jedem der drei Fälle mehrere aufeinanderfolgende SMP-Einträge zugeordnet. Die überschneidende Meldung in allen drei Messungen ist eine Ausschaltung des Leistungsschalter eines entlang der Leitung liegenden Netzknotens. Diese verbindet Netzknoten A und B mit dazwischenliegenden teilweise eingeschliffenen, Umspannwerken.

In UW C (Bild 6.26) wurden die Schutzauslösungen im Zuge des 110-kV-Erdschlusses ebenfalls erfasst und zugeordnet. Aufgrund der leitungsgebundenen Entfernung von über 430 km treten die transienten Auswirkungen merklich gedämpft auf. Ein Spannungseinbruch tritt nicht mehr auf, vielmehr ist ein leichter Spannungsrippel auf allen Phasen zu erkennen. In Bild 6.24 und 6.25 ist ein deutlicher Spannungseinbruch von etwa 100 ms in UW A und UW B zu erkennen. Dieser tritt aufgrund des erhöhten Fehlerstroms in den betroffenen Netzknoten bzw. in die fehlerhafte 110-kV-Leitung auf. Der Bildausschnitt der überlagerten transienten Anteile zeigt den Spannungseinbruch als gegengleichen Spannungsanstieg.

6.3. Sichtbarkeit transienter Ereignisse an verschiedenen Messstandorten

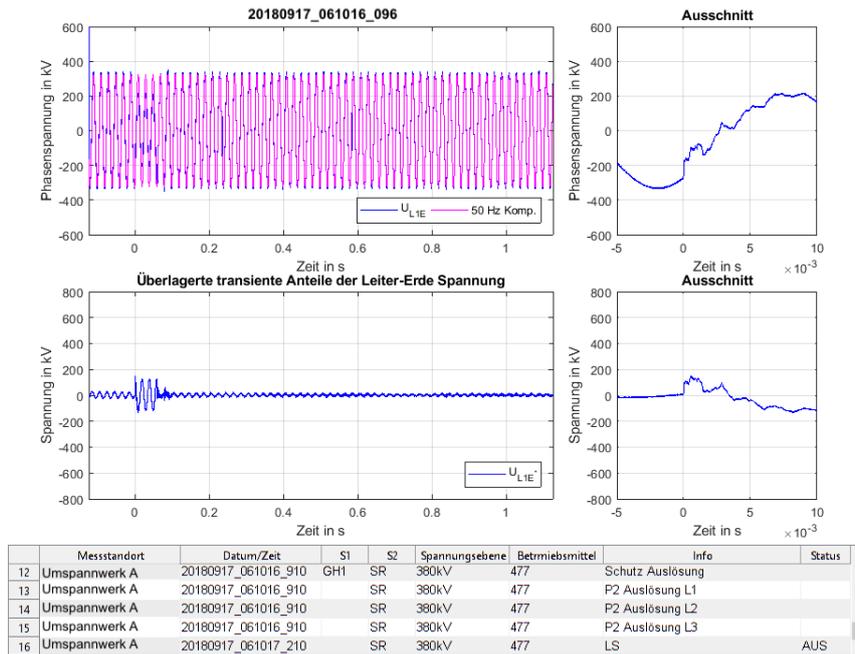


Bild 6.24.: SMP-Zuordnung: Folge von Schutzauslösungen auf einer Leitung im 380-kV-Netz, gemessen in UW A

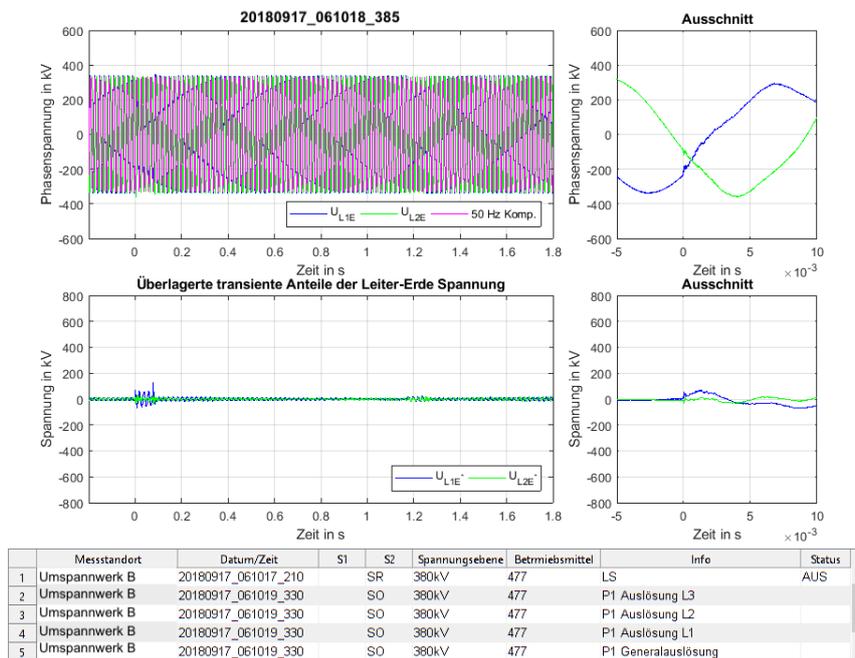


Bild 6.25.: SMP-Zuordnung: Folge von Schutzauslösungen auf einer Leitung im 380-kV-Netz, gemessen in UW B

6. Ergebnisse

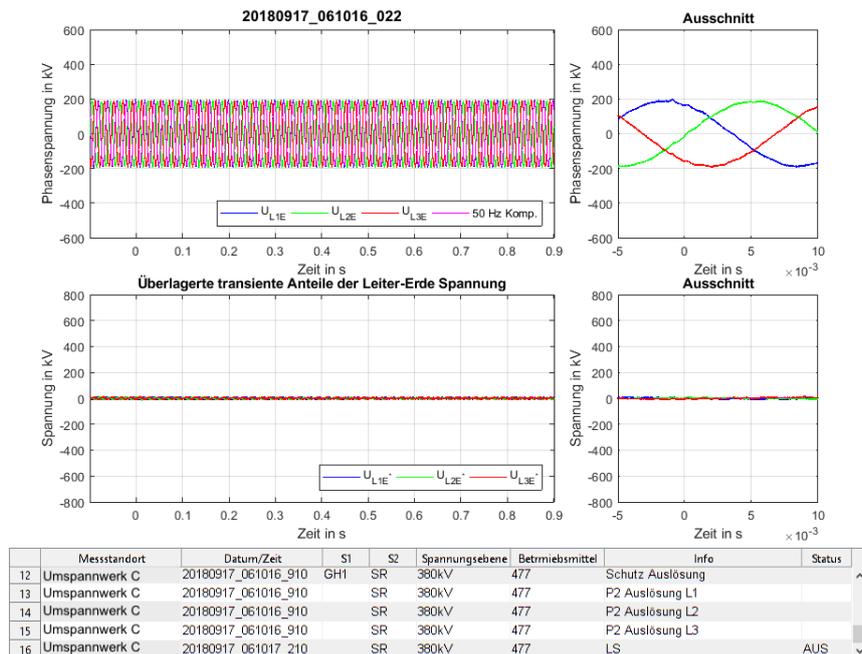


Bild 6.26.: SMP-Zuordnung: Folge von Schutzauslösungen auf einer Leitung im 380-kV-Netz, gemessen in UW C

In UW B (Bild [6.25](#)) zeigt sich, dass der Spannungseinbruch auf Phase L1 deutlich ausgeprägter ist als auf Phase L2. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Fehler auf Phase L1 aufgetreten sein muss. Dies konnte im Zuge der Analyse des gesamten ungefilterten Schaltmeldeprotokolls bestätigt werden.

6.4. Auswirkungen identer Schalthandlungen und Betriebsmittel

Ein weiterer Punkt der Analyse umfasst die Untersuchung von identen Schalthandlungen und deren Auswirkungen. Von Interesse war hierbei, ob idente Schalthandlungen auch konstant idente Auswirkungen zeigen oder ob es Abweichungen gibt. Bild [6.27](#) zeigt eine Einschaltung des Leistungsschalters an einer Kupplung am 08.Juni 2017. Dabei treten für LS-Einschaltungen charakteristische transiente Spannungen aufgrund von Wiederzündungen auf. Diese erreichen hierbei einen Spitzenwert der überlagerten transienten Spannung von etwa 150 kV. Damit wurde die Messung als Kategorie 2 eingestuft.

Dieselbe Schalthandlung am 11. Mai 2017 ist in Bild [6.27](#) dargestellt. Hier erfolgte ebenfalls ein Einlegen derselben Kupplung mittels Leistungsschalter. Die auftretenden transienten Spannungen erreichen hierbei über 550 kV an überlagertem Spannungsmaximalwert. Neben

6.4. Auswirkungen identer Schalthandlungen und Betriebsmittel

mehreren Vorentladungen sind drei markante Wiederzündungen zu erkennen. Diese verursachen transiente Schwingungen mit Frequenzen von etwa 150 kHz (siehe Bild 6.29). Der Schaltzeitpunkt liegt bei beiden Fällen nahezu ident im negativen Spannungsmaximum.

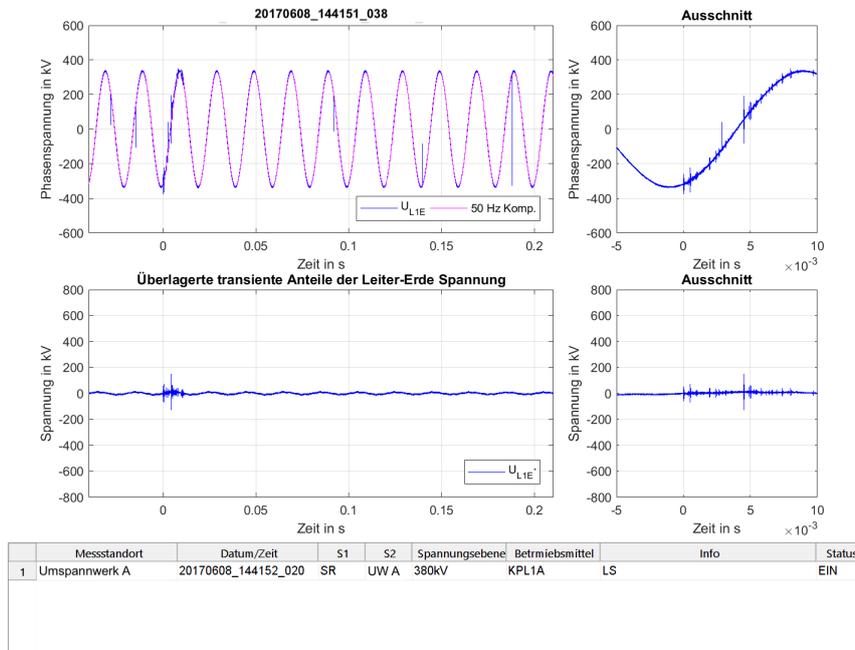


Bild 6.27.: SMP-Zuordnung 08. Juni 2017: Einschaltung Leistungsschalter einer Kupplung in UW A, gemessen in UM A

Gründe für die transienten Überspannungen in Bild 6.28 könnten unterschiedliche Schalt- bzw. Lastzustände der gekoppelten Systembereiche sein. Hierzu bedarf es jedoch Kenntnis über die Anlagenkonfiguration und deren Betriebszustände zum Zeitpunkt der Messung. Eine Untersuchung dieser Fragestellung in zukünftigen Forschungsarbeiten wird empfohlen.

6. Ergebnisse

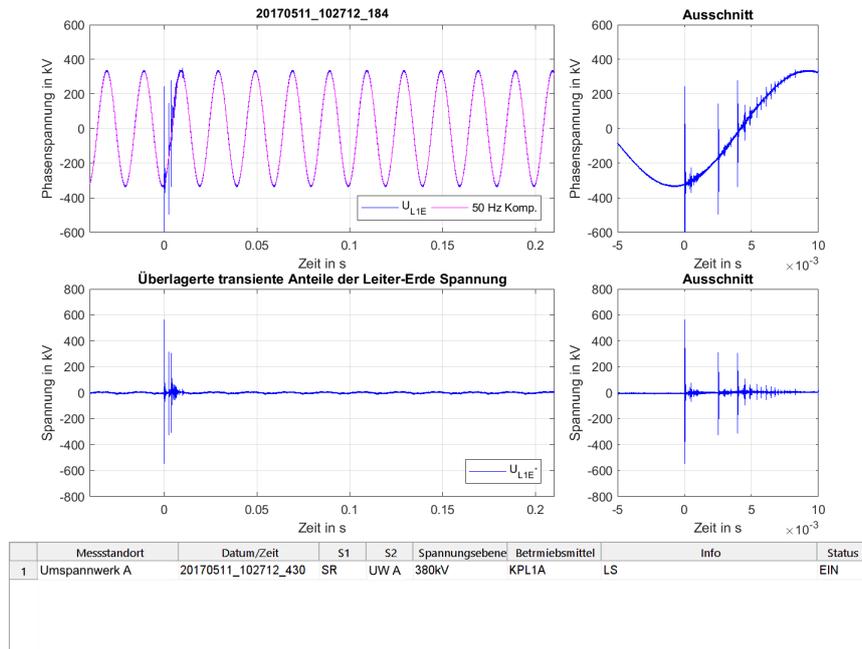


Bild 6.28.: SMP-Zuordnung 11. Mai 2017: Einschaltung Leistungsschalter einer Kupplung in UW A, gemessen in UW A

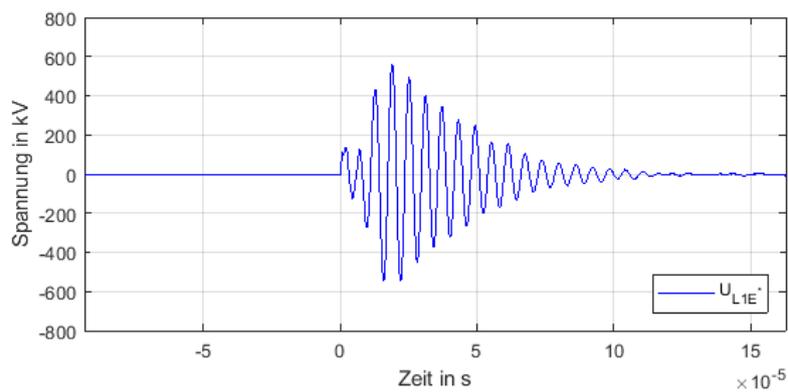


Bild 6.29.: Resultierender Einschwingvorgang mit einer Frequenz von etwa 150 kHz aufgrund des ersten Wiedereinschaltens im Leistungsschalters zum Zeitpunkt $t = 0$ s

6.5. Transiente Auswirkungen aus untergeordneten Spannungsebenen

Im Zuge der in Kapitel 5.2 beschriebenen erweiterten SMP-Korrelation erfolgte eine detailliertere Analyse der im ersten und zweiten Korrelationsschritt (erweiterete SMP-Korrelation) nicht zugeordneten Messdaten. Dabei berücksichtigten die hierzu verwendeten SMP-Daten (siehe K2 Tabelle 3.3) ebenfalls Schalthandlungen aus untergeordneten Spannungsebenen. Somit war es möglich, Schalthandlungen aus bspw. der 110-kV und 30-kV-Ebene zuzuordnen. Dabei ist es wichtig sicherzustellen, dass es sich bei der Messung wirklich um ein Ereignis in einer unterlagerten Spannungsebene handelt. Aus diesem Grund wurde im erweitert korrelierten Datenpool nach Messungen gesucht, in deren Zuordnungen ausschließlich Schalmeldungen aus den Spannungsebenen 110 kV bzw. 30 kV enthalten sind. Zur Verifikation wurde im ungefilterten Schalmeldeprotokoll überprüft, ob keine örtlich und zeitlich näheren Schalthandlungen in der 220- und 380-kV-Ebene zu finden sind.

Bild 6.30 zeigt eine zugeordnete Schalthandlung aus der 110-kV-Ebene, gemessen in UW A. Wie in der Liste der Zuordnungen in Bild 6.30 zu erkennen ist, wurden trotz des erweiterten Zeitintervalls von ± 5 s nur zwei 110 kV Schalthandlungen korreliert. Nachforschungen im ungefilterten Schalmeldeprotokoll bestätigten ebenfalls die Richtigkeit der Zuordnung. Hierbei wurde ein Zeitbereich von ± 10 s um den Messzeitpunkt auf näheren Schalthandlungen aus der 220- und 380-kV-Ebene hin untersucht. Eine der beiden zugewiesenen Schalthandlungen wurde in UW B getätigt. Aufgrund der zeitlichen Nähe und der direkten Verbindung zwischen UW A und B über die 380-kV-Ebene wird nach durchgeführter Analyse davon ausgegangen, dass der transienten Messung diese Schalthandlung zugrunde liegt. Somit konnte der Messung die Einschaltung eines Sammelschienentrennschalters der 110-kV-Ebene in UW B zugeordnet werden. Insgesamt konnten 28 Fälle der 110-kV-Ebene zugeordnet werden.

Einen weiteren Fall aus untergeordneten Spannungsebenen zeigt Bild 6.31. Hierbei zeigt die Messung in UW A eine Drosselzuschaltung in der 30-kV-Ebene. Diese Zuschaltung erfolgt im über die 220-kV-Ebene verbundenen Umspannwerk D. Diese Zuordnung liefert erneut ausschließlich zwei Schalmeldungen aus der unterlagerten Spannungsebene. Weitere unmittelbare Schalthandlungen aus höheren Spannungsebenen konnten auch hier ausgeschlossen werden. Die Auswirkungen der Drosselzuschaltung in Bild 6.31 sind gering, dennoch ist die Zuschaltung in der 30-kV-Ebene deutlich mess- und erkennbar. Der gemessenen Leiter-Erde-Spannung ist eine deutliche Schwingung mit einer Frequenz von ca. 1 kHz überlagert. Es konnten 4 Fälle der 30-kV-Ebene zugeordnet werden.

6. Ergebnisse

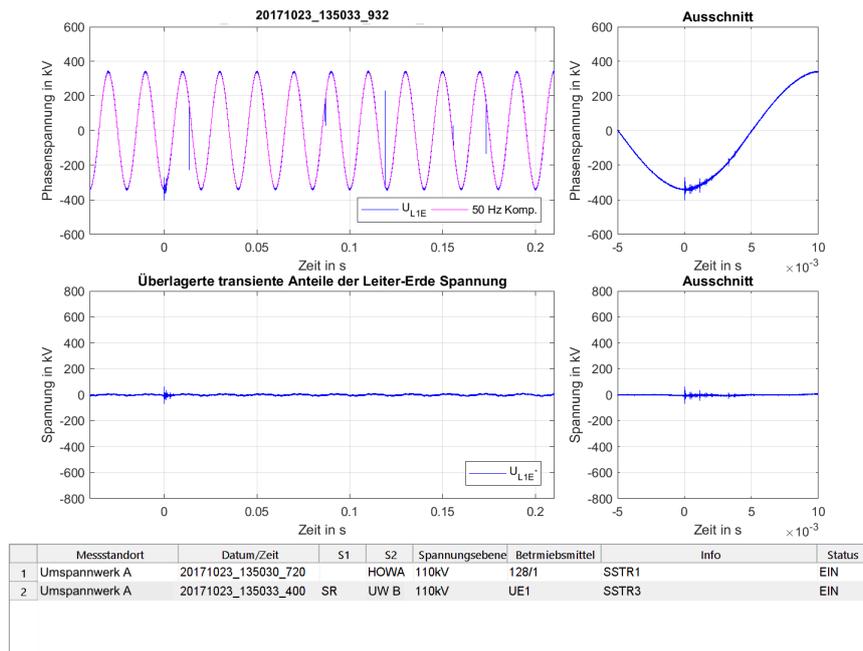


Bild 6.30.: SMP-Zuordnung: Sammelschientrenner der 110-kV-Ebene in UW B, gemessen in UW A

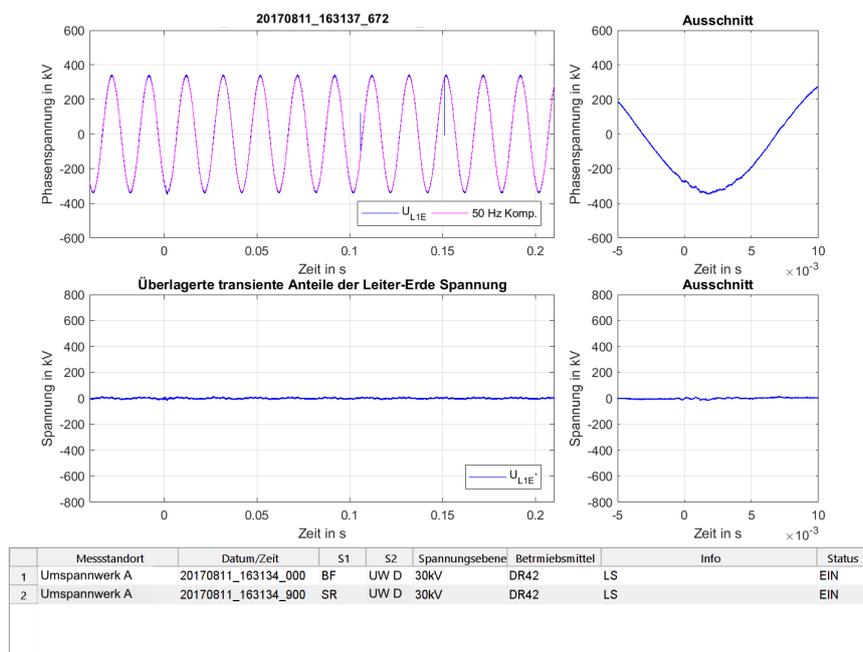


Bild 6.31.: SMP-Zuordnung: 30-kV-Drosselzuschaltung in UW D, gemessen in UW A

7. Erkenntnis und zukünftige Forschungsthemen

7.1. Datenbehandlung

Mit Hilfe der in Kapitel 4 vorgestellten Datenbehandlungsmethoden konnte eine adäquate Aufbereitung transients Messdaten für die anschließende Korrelationsanalyse realisiert werden. Die beschriebenen Methoden stellen eine allgemein anwendbare Vorgehensweise transients Korrelationsanalysen dar. Das Herauslösen der transienten Anteile durch eine numerische Subtraktion stellt hier einen effizienten und verifizierbaren Weg dar. Im Gegenzug zur Methode mit digitalen Filtern konnte eine ausschließliche Entfernung der 50-Hz-Komponente zur weiteren visuellen Analyse gewährleistet werden.

Die Genauigkeit der Phasenwinkelbestimmung der gemessenen Netzspannung bildet das wichtigste Kriterium. Die Implementierung dieser Phasenwinkelbestimmung durch eine Phasenvariation lieferte gute Ergebnisse. Hier galt es, eine Abwägung zwischen notwendiger Genauigkeit der Phasenbestimmung und des Rechenaufwands der Software zu treffen, gewählt wurde eine Winkelauflösung von 0.05 Rad. Eine mögliche Implementierung der Phasenwinkelbestimmung bzw. des Herauslösen der transienten Spannungen für die in Kapitel 4.6 erwähnten Sonderfälle wäre zukünftig von Interesse.

Die Signalbereinigung hinsichtlich nicht-transients Störanteile konnte für die auftretenden Defekte der Einschubkarten eingeführt werden. Für Störanteile mit abweichenden charakteristischen Mustern muss eine Anpassung des mathematischen Modells der vorgestellten Methode erfolgen.

Eine Reduktion der Restwelligkeit der transienten Spannungsüberlagerung erfolgte im Zuge der Endsignalbearbeitung mit der Anwendung eines digitalen Filters. Diese Filterung wurde nur zur automatisierten Kategorisierung nach Maximalwert angewandt. Zur eigentlichen Analyse des transienten Ereignisses wurde das originale transiente Spannungssignal verwendet. Die Restwelligkeit könnte auch durch entsprechende Rechenleistung bzw. Winkelauflösung deutlich reduziert werden, jedoch verbleiben systembedingte Phasenänderungen. Darunter fallen beispielsweise Regelfahrten von Phasenschiebertransformatoren und netzseitige Frequenzabweichungen (siehe Bild 6.20).

7.2. Korrelation des Gesamtdatensatzes

In diesem Abschnitt wird auf Basis der Ergebnisse in Kapitel [6.1](#) auf die Beantwortung der in Kapitel [1.3](#) formulierten ersten Forschungsfrage eingegangen.

- 1) *Welche Entstehungsursachen können den erfassten transienten Spannungen an verschiedenen Messstandorten im Netz zugeordnet werden?*

Die Ergebnisse der Gesamtkorrelation (siehe Kapitel [6.1](#)) haben gezeigt, dass rund 38 % der untersuchten transienten Messungen korreliert werden konnten. Hierbei konnten sowohl Schalthandlungen als auch direkte und indirekte Blitzentladungen zugeordnet werden. Ein wesentlicher Parameter für die Zuordnungsrate im Zuge der Korrelation bildet eine einheitliche Zeitbasis der Datensätze. Im Zuge der erweiterten SMP-Korrelation konnte gezeigt werden, dass durch die Aufweitung des Korrelationsintervalls von ± 1 s auf ± 5 s weitere Schalthandlungen aus den Spannungsebenen 220 kV und 380 kV zugeordnet werden konnten. Eine GPS-synchronisierte Zeiterfassung des Messsystems zur Erhöhung der Zuordnungsraten bei Korrelationen wird zukünftig empfohlen.

Die Korrelation zeigte ebenfalls, dass auch die Sensitivität des Messsystems einen wesentlichen Einfluss auf die Menge an nicht zuordenbaren Fällen hat. Das Messsystem wird dabei oftmals bereits von äußeren Einflüssen ausgelöst (getriggert), ohne dass eine transiente Auswirkung auf den Spannungssignalen zu sehen ist. Aufgrund der Notwendigkeit einer hohen Sensitivität des transienten Messsystems muss dieser vergleichsweise große Anteil an nicht-korrelierbaren Fällen in Kauf genommen werden.

Zusätzlich hat die Korrelation gezeigt, dass unter den vorerst nicht zuordenbaren Messungen Schalthandlungen aufgezeichnet wurden, die aus untergeordneten Netzebenen stammen. Aus diesem Grund sollten zukünftig für eine weitreichendere Analyse Schalthandlungen aus untergeordneten Spannungsebenen sowie eventuell auch Betriebsführungsdaten von angrenzenden Übertragungsnetzbetreibern berücksichtigt werden.

7.3. Kategorieverteilung

Die Kategorisierung ermöglichte einen Einblick in die Intensitäten unterschiedlicher Entstehungsursachen an verschiedenen Messstandorten. Nachfolgend kann somit auf die Beantwortung der in Kapitel [1.3](#) angeführten zweiten Forschungsfrage eingegangen werden.

- 2) *In welcher Intensität treten Auswirkungen transienter Spannungen an verschiedenen Messstandorten im Netz auf?*

7.4. Sichtbarkeit transienter Ereignisse an verschiedenen Messstandorten

Der Großteil (rund 94 %) der zugeordneten Messungen zeigte geringe transiente Auswirkungen und lag in Kategorie 1. Ein kleiner Anteil von etwa 258 Fällen weist bereits große transiente Überspannungen auf. Fünf Fälle konnten als Kategorie 3 zugewiesen werden und zeigten erhebliche Maximalwerte der transienten Spannungsüberlagerung.

Durch die zusätzliche Auftrennung der einzelnen Kategorien nach Schaltart (siehe Bild [6.8](#) bis [6.10](#)) konnte ein Einblick in die Ursachen unterschiedlicher Zuordnungen nach Kategorien erhalten werden. Hier ist zu erkennen, dass sich die einzelnen Schaltarten unterschiedlich an den Kategorien beteiligen. Während Kategorie 1 und 2 recht ähnliche Verteilungen zwischen LS-, TR-Schaltungen und Schutzauslösungen aufzeigen, weicht Kategorie 3 deutlich ab. Diese Abweichung relativiert sich jedoch aufgrund der geringen Zuordnungszahl von fünf Kategorie-3-Fällen. Die größten transienten Auswirkungen konnten dabei größtenteils (80 %) auf Trennerschaltungen zurückgeführt werden. Auch Leistungsschalter lieferten einen Anteil (20 %) an den Kategorie-3-Fällen.

Mithilfe der Analyse der Messstandorte hinsichtlich Schaltart konnte ein Eindruck über die Schalthandlungen in den einzelnen Netzknoten gewonnen werden (siehe Bild [6.11](#) bis [6.14](#)). In UW A teilten sich die zugeordneten Schalthandlungen zu gleichen Teilen auf Trenner und Leistungsschalter auf. Für UW B zeigte die Analyse eine erhöhte Zuordnung an Trennerschaltungen. Messstandort C wiederum lieferte einen deutlich erhöhten Anteil an Leistungsschalterzuweisungen. In UW D konnte ähnlich wie in UW B ein Großteil der Schalthandlungen auf Trenner zurückgeführt werden. Ob hierbei die unterschiedlichen Messpunkte innerhalb des Umspannwerks (siehe Kapitel [3.1](#)) Einfluss auf die einzelnen Ergebnisse haben, konnte im Zuge dieser Arbeit nicht eindeutig geklärt werden. Etwaige Zusammenhänge könnten in zukünftigen Untersuchungen näher beleuchtet werden.

7.4. Sichtbarkeit transienter Ereignisse an verschiedenen Messstandorten

Ein wesentliches Augenmerk dieser Arbeit lag auf der Analyse der Reichweite transienter Spannungen. Die teilweise zeitgleich vorliegenden Messdaten für mehrere Umspannwerke ermöglichten, wie in Kapitel [6.3](#) beschrieben, eine Analyse der Sichtbarkeit transienter Spannungen innerhalb des Hochspannungssystems. In diesem Abschnitt wird auf die Beantwortung der in Kapitel [1.3](#) formulierten dritten Forschungsfrage eingegangen.

3) Welche Reichweite haben transiente Ereignisse innerhalb des Hochspannungssystems?

Mit den in Kapitel [6.3](#) erwähnten Methoden zur Analyse der Sichtbarkeit transienter Ereignisse konnten Reichweiten von bis zu 430 km nachgewiesen werden. Es konnten 232 idente Zuordnungen zu verschiedenen Messungen gefunden werden. Darunter konnte eine dreifache Zuordnung (vorhandene Messung in drei Umspannwerken) nachgewiesen werden. Die

7. Erkenntnis und zukünftige Forschungsthemen

restlichen Zuordnungen traten jeweils in zwei verschiedenen Messknoten auf. Die im Kapitel 6.3 vorgestellten Beispiele zeigen eine Zweifach- und eine Dreifach-Zuordnung.

Die Einschaltung der Kompensationsanlage in Bild 7.1 im ca. 300 Freileitungskilometer entfernten Netzknoten wurde in UW C und UW D erfasst. Mit Hilfe dieses Falls konnte nachgewiesen werden, dass sich die transienten Spannungen ausgehend von der Kompensationsanlage zu den beiden Messstandorten hin ausbreitet. Beide Messstandorte sind einerseits über ein Teilstück der 380-kV-Ebene, einen zwischenliegenden Netzknoten und über einen Abschnitt in der 220-kV-Ebene verbunden (siehe Bild 7.1). Andererseits besteht auch eine leitungsbundene Verbindung ausschließlich über die 220-kV-Ebene mit zwei dazwischenliegenden Umspannwerken. Auf welchem der beiden Wege die Ausbreitung stattgefunden hat, kann an dieser Stelle nicht restlos geklärt werden. Da die Ursache jedoch in der 220-kV-Ebene liegt, wird angenommen, dass die Ausbreitung primär über den letztgenannten Leitungsweg erfolgt ist.

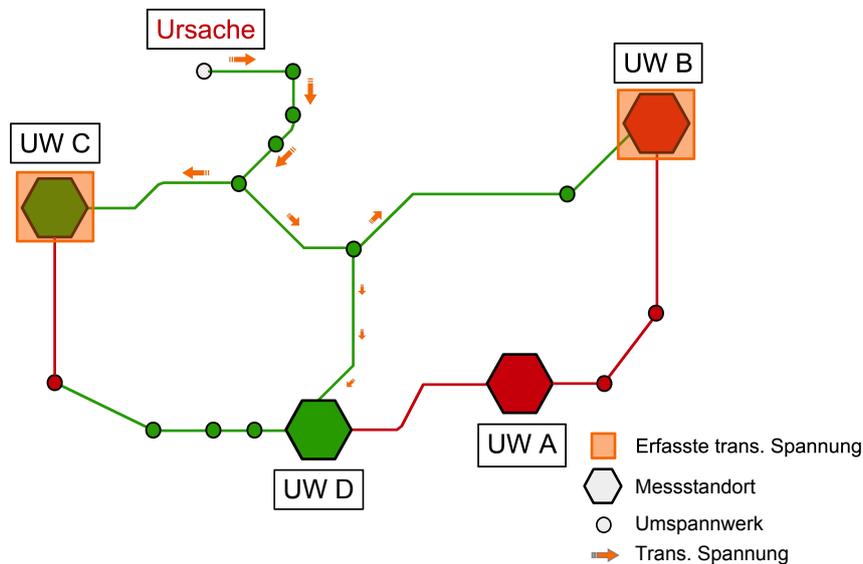


Bild 7.1.: Netzschema zur Ausbreitung transienter Spannungen aufgrund der Einschaltung einer 220-kV-Kompensationsanlage

Der zweite vorgestellte Beispielfall stellt eine Dreifach-Zuordnung dar (siehe Bild 7.2). Hierbei handelt es sich um eine Folge von Schalthandlungen im Zuge einer Schutzauslösung aufgrund eines Fehlers im 110-kV-Netz. Dieser Fall bildet den einzigen zugeordneten Fall transienter Messungen in drei Umspannwerken. Er zeigt die Ausbreitung transienter Spannungen innerhalb des Übertragungsnetzes. Die Ursache der Schutzauslösung liegt im unterlagerten 110-kV-Netz an einem Netzknoten zwischen UW A und UW B. Von dort breiten sich die transienten Auswirkungen leitungsbunden über die 380-kV-Ebene in Richtung Messstandort A und B aus. In beiden Umspannwerken konnte die transiente Auswirkung messtechnisch erfasst werden. Zusätzlich zu diesen zwei Messungen konnte in UW C ebenfalls eine entsprechende Zuweisung

7.4. Sichtbarkeit transienter Ereignisse an verschiedenen Messstandorten

erfolgen. Die Verbindung zwischen Messstandort C und dem fehlerbehafteten Umspannwerk besteht einerseits über die 380-kV-Ebene bis UW D und anschließend auf zwei möglichen Verbindungen. Die erste Variante führt über einen 220-kV-Abschnitt sowie erneut über einen Netzknoten fortlaufend auf der 380-kV-Ebene (siehe Bild 7.2). Dazwischen liegen drei Umspannwerke der 220-kV-Ebene. Die zweite Variante führt ausschließlich auf der 220-kV-Ebene von UW D ausgehend über zwei Umspannwerke. Zusätzlich existiert eine Leitungsverbindung vom fehlerbehafteten Umspannwerk hin zu UW B über die 380-kV-Ebene und anschließend über die 220-kV-Ebene mit drei dazwischenliegenden Umspannwerken. Die zeitgleiche Messung an drei Netzknoten ermöglichte einen Einblick in die Ausbreitung innerhalb der Netzstruktur. Da zum Messzeitpunkt kein Messsystem im Netzknoten D installiert war, konnte eine Ausbreitung über den Zweig in Richtung UW A bzw. UW D nicht nachgewiesen werden. Aus diesem Grund kann der exakte Ausbreitungsweg in Richtung Messstandort C nicht definiert werden. Die wenigsten dazwischenliegenden Freileitungskilometer liefert mit 423 km die Ausbreitung über die 380-kV-Ebene (UW A - UW D) mit einem dazwischenliegenden 220-kV-Abschnitt (siehe Bild 7.2).

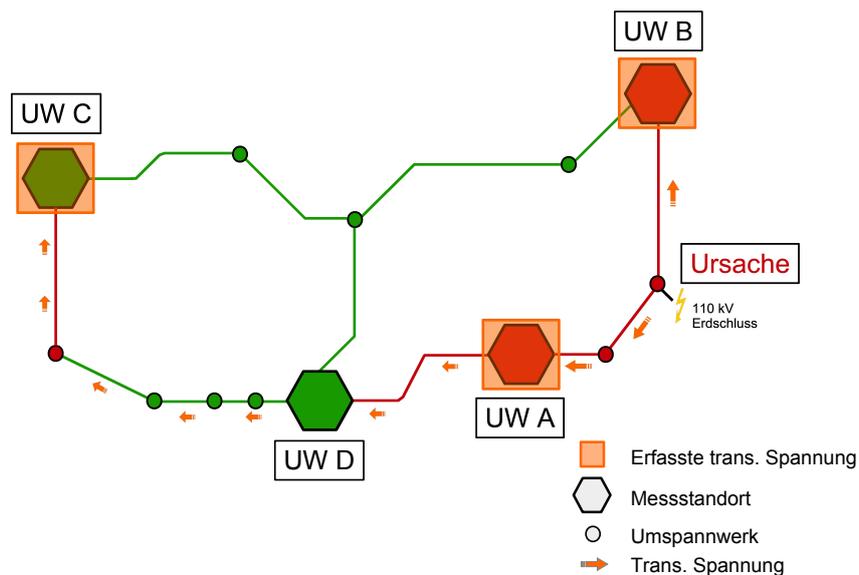


Bild 7.2.: Netzschema zur Ausbreitung transienter Spannungen aufgrund eines 110-kV-Erdschlusses mit anschließenden Schutzauslösungen

7.5. Auswirkungen identer Schalthandlungen und Betriebsmittel

Wie in Kapitel 6.4 beschrieben, erfolgte eine Analyse hinsichtlich transienter Auswirkungen von identen Schalthandlungen. Nachfolgend wird näher auf die Beantwortung der in Kapitel 1.3 formulierten vierten Forschungsfrage eingegangen.

4) Zeigen idente Schalthandlungen idente transiente Auswirkungen?

Die Analyse identer Schalthandlungen hinsichtlich ihrer auftretenden Auswirkungen zeigte großteils ein ähnliches Verhalten. In einigen Fällen wurden jedoch auch unterschiedliche Ausprägungen festgestellt. Das in Kapitel 6.4 beschriebene Beispiel zeigt deutliche Unterschiede bei den transienten Auswirkungen im Zuge der identen LS-Einschaltung einer Kupplung. Dabei treten Unterschiede im transienten Maximalwert von bis zu 400 kV überlagerter Leiter-Erde-Spannung auf. Da das Schaltbetriebsmittel zwischen den Messzeitpunkten nachweislich nicht verändert wurde, kann an dieser Stelle ein Einfluss des Betriebsmittels selbst ausgeschlossen werden. Deshalb wird von einem Einfluss des Schalt- bzw. Lastzustandes der zu kuppelnden Bereiche auf die transienten Spannungen ausgegangen.

Aufgrund fehlender Kenntnis über Schalt- und Lastzustände zum jeweiligen Zeitpunkt, wurden im Zuge dieser Arbeit etwaige Einflüsse auf transiente Auswirkungen nicht näher untersucht. Zukünftige Untersuchungen könnten durch eine gezielte transiente Spannungsmessung an auffälligen Betriebsmitteln und anschließender Analyse verschiedener Betriebszustände diesen Zusammenhang näher beleuchten.

7.6. Transiente Auswirkungen aus untergeordneten Spannungsebenen

Die erweiterte SMP-Korrelation ermöglicht die Zuordnung transienter Auswirkungen aus untergeordneten Spannungsebenen. In diesem Abschnitt wird auf die Beantwortung der in Kapitel 1.3 formulierten fünften Forschungsfrage eingegangen.

5) Treten transiente Spannungen aus untergeordneten Spannungsebenen auf?

Hier konnten 28 Fälle mit ausschließlich aus der 110-kV-Ebene stammenden Schalthandlungen erfasst werden. In der 30-kV-Ebene wurden vier Fälle gefunden. Die repräsentativen Fälle in Kapitel 6.5 zeigen Auswirkungen aus den unterlagerten Spannungsebenen in den Messspannungsebenen (380 kV und 220 kV).

7. Erkenntnis und zukünftige Forschungsthemen

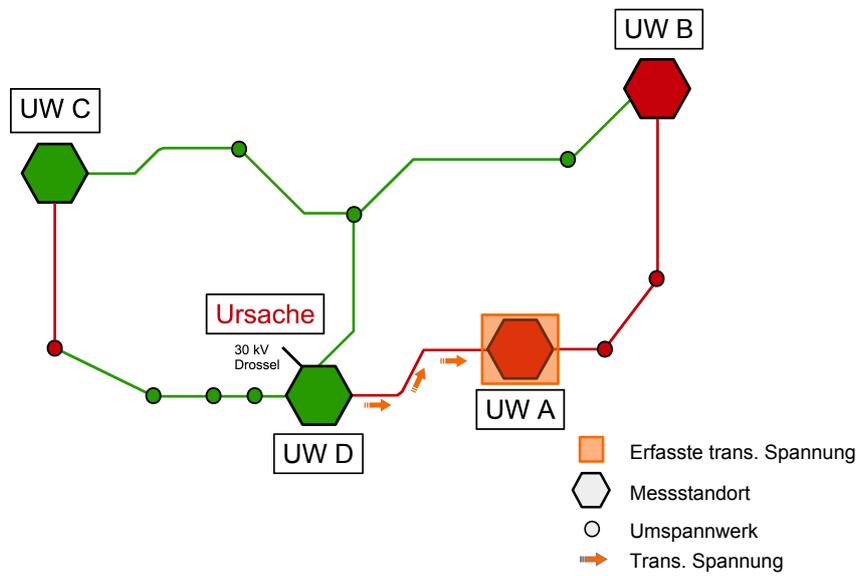


Bild 7.4.: Netzschema zur Ausbreitung transienter Spannungen aufgrund einer 30-kV-Drosselzusaltung in UW D

8. Zusammenfassung

Die entwickelte Methode zur Korrelation transienter Spannungsmessungen mit Schaltmelde- sowie Blitzortungsdaten, welche zur Analyse eines vorliegenden transienten Messdatensatzes aus dem österreichischen Hochspannungsnetz verwendet wird, wird in der vorliegenden Arbeit gezeigt. Diese Analyse liefert wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der transienten Spannungssituation im untersuchten Hochspannungssystem sowie zur Herangehensweise ähnlicher transienter Spannungsanalysen.

Die Grundlagen transienter Spannungen in Hochspannungssystemen werden behandelt und dabei wird ein Überblick über Entstehungsursachen, Spannungsformen und deren Kenngrößen gegeben. Das den vorliegenden transienten Messdaten zugrunde liegende Messkonzept wird erläutert.

Einer der Schwerpunkte der Arbeit beschäftigt sich mit der vorab notwendigen Datenbehandlung transienter Messdaten. In diesem Zusammenhang werden vier Datenbehandlungsschritte, die für eine Korrelation sowie Analyse transienter Messdaten notwendig sind, vorgestellt. Einerseits wird ein mathematisches Verfahren entwickelt, um die überlagerten transienten Spannungen aus der gemessenen Leiter-Erde-Spannung herauszulösen. Zusätzlich wird eine Methode zur Entfernung nicht-transienter Störanteile realisiert. Eine eingeführte Endsignalbearbeitung zur Kategorisierung nach Maximalwert ermöglicht die Kategorisierung transienter Spannungsüberlagerungen hinsichtlich ihrer Intensität nach Maximalwert.

Die in der Arbeit vorgestellte Korrelationsmethode hat eine sukzessive Einteilung des transienten Ausgangsdatensatzes hinsichtlich Entstehungsursachen der transienten Spannungen zum Ziel. Dies erfolgt durch schrittweise Korrelation mit Schaltmelde- und Blitzortungsdaten. An einem umfangreichen transienten Messdatensatz aus dem österreichischen Hochspannungsnetz wird die Korrelationsmethode zur Anwendung gebracht. Dies ermöglicht einerseits die Verifizierung der Methode und andererseits die detaillierte Analyse des transienten Messdatensatzes hinsichtlich der transienten Spannungssituation.

Eine Gesamtkorrelation des transienten Messdatensatzes mit Schaltmelde- und Blitzortungsdaten liefert eine Zuordnung von rund 38 % der ca. 13.800 Messungen. Dabei entfallen rund 15 % auf Schalthandlungen und ca. 13 % auf Blitzentladungen. Eine Erweiterung des Korrelationsintervalls von ± 1 s auf ± 5 s und die zusätzliche Berücksichtigung von Schalthandlungen aus untergeordneten Spannungsebenen liefern weitere 10 % an zugeordneten Schalthandlungen.

8. Zusammenfassung

Im Zuge der Arbeit wird ebenfalls die Kategorisierung der korrelierten transienten Spannungen nach Maximalwert durchgeführt. Dabei werden drei Kategorien hinsichtlich der Intensität der auftretenden Maximalwerte definiert. Die Analyse zeigt, dass der Großteil der zugeordneten transienten Spannungen in Kategorie 1 (bis 106 kV additiv für die 220-kV-Ebene, bis 127 kV additiv für die 380-kV-Ebene) zu liegen kommt. Knapp ein Achtel der Fälle zeigt starke transiente Auswirkungen und liegt in Kategorie 2 (zwischen 106 kV und 601 kV additiv für die 220-kV-Ebene, zwischen 127 kV und 722 kV additiv für die 380-kV-Ebene). Transiente Auswirkungen in Kategorie 3 (über 601 kV additiv für die 220-kV-Ebene, über 722 kV additiv für die 380-kV-Ebene) treten nur in vereinzelt Fällen auf. Analysen im abschließenden Teil dieser Arbeit gehen zusätzlich auf die Sichtbarkeit transienter Ereignisse an verschiedenen Messstandorten ein, vergleichen die Auswirkungen identer Schalthandlungen und untersuchen den Messdatensatz auf transiente Spannungen aus untergeordneten Spannungsebenen. In Bezug auf die Sichtbarkeit transienter Spannungen innerhalb des Hochspannungssystems können Ausbreitungen über eine Strecke von 430 km Freileitung nachgewiesen werden. Die Analyse identer Schalthandlungen liefert Fälle, bei denen deutlich unterschiedliche Auswirkungen zu erkennen sind. Es wurden Maximalwertunterschiede von 400 kV überlagerter Leiter-Erde-Spannung festgestellt. Durch die zuvor erwähnte Erweiterung der Schaltmeldeprotokolle auf Schalthandlungen aus untergeordneten Spannungsebenen kann eine Untersuchung des transienten Messdatensatzes auf Schalthandlungen aus diesen Spannungsebenen erfolgen. Hierbei können 32 Fälle aus der 30-kV- und 110-kV-Ebene zugeordnet werden.

Die Analysen dieser Arbeit liefern auch weiterführende Fragestellungen für zukünftige Forschungsarbeiten. Eine Untersuchung hinsichtlich Einfluss des Schaltzustands auf transiente Ereignisse, kann Aufschluss über Ursachen unterschiedlicher transienter Auswirkungen identer Schalthandlungen liefern. Ebenso trägt eine detaillierte Analyse bzw. Berechnung der Dämpfung transienter Spannungen entlang von Freileitungszügen zur Interpretation der Auswirkungen entfernter transienter Spannungsmessungen bei.

Literatur

- [1] E. Sperling, „Messung von Power Quality Parametern im Hochspannungsnetz mit Hilfe der RC-Teiler Technologie“, *VDE-Hochspannungstechnik 2016*, S. 626–631, 2016.
- [2] S. Pack, „Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen der Energieversorgung“, Habilitation, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Graz, 1998.
- [3] G. Balzer und C. Neumann, „Schalt- und Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen“, Springer-Verlag, 2016.
- [4] A. Küchler, „Hochspannungstechnik“, Springer, 2009.
- [5] DIN EN 60071-1:2006 + A1:2010, „Isolationskoordination - Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen“, 2010.
- [6] H. Koettnitz, G. Winkler und K. Wessnig, „Grundlagen elektrischer Betriebsvorgänge in Elektroenergiesystemen“, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1986.
- [7] CIGRE ,WG 33.02, „Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients“, in *CIGRE Brochure 39*, 1990.
- [8] D. Oeding und B. R. Oswald, „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Bd. 6, Springer, 2011.
- [9] L. Schwalt, J. Plesch, S. Pack, W. Schulz und G. Achleitner, „Transient measurements in the Austrian high voltage transmission system“, in *2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, IEEE, 2017, S. 208–211.
- [10] J. Plesch, S. Pack, U. Schichler, G. Wurzer und I. Hübl, „Erfassung von transienten Spannungen an einer 110-kV-Hochgebirgsleitung“, in *VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik 2016*, 2016.
- [11] L. Schwalt, J. Plesch und S. Pack, „Verhalten von Freileitungen unter Einfluss atmosphärischer Entladungen“, in *VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik 2018*, 2018.
- [12] R. Schmaranz, „Zuverlässigkeits- und sicherheitsorientierte Auslegung und Betriebsführung elektrischer Netze: Technische und organisatorische Maßnahmen unter Berücksichtigung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse“, Verlag d. Technischen Universität Graz, 2015.
- [13] C. Vergeiner, W. Schulz und S. Pack, „On the Performance of the Austrian Lightning Detection and Information System (ALDIS)“, in *Institute of High Voltage Engineering and System Management*, Graz University of Technology, 2013.
- [14] W. Schulz, G. Diendorfer, S. Pedebay und D. R. Poelman, „The European lightning location system EUCLID–Part 1: Performance analysis and validation“, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Jg. 16, Nr. 2, S. 595–605, 2016.

Literatur

- [15] G. Diendorfer und W. Schulz, „Ground flash density and lightning exposure of power transmission lines“, in *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, Bd. 3, 2003, 3 pp. Vol.3-.
- [16] G. Diendorfer u. a., „Lightning location systems (LLS)“, in *IX International Symposium on Lightning Protection, 26th-30th November, 2007*.
- [17] B. Erik, *Read Yokogawa *.wvf files*, 2011. Adresse: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20830-read-yokogawa-wvf-files>.
- [18] DIN EN 60071-2:1997, „Teil 2 - Anwendungsrichtlinien“, 1997.
- [19] A. J. Schwab, „Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, Springer-Verlag, 2017.

Abkürzungsverzeichnis

RC	ohmsch-kapazitiv
SMP	Schaltmeldeprotokoll
LLS	Lightning Location System
ALDIS	Austrian Lightning Detection and Information System
DSO	Digitales Speicheroszilloskop
TK	Tastkopfsystem
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
TSO	Transmission System Operator
p.u.	Per Unit
DC	Gleichspannung
UW	Umspannwerk
UTC	Koordinierte Weltzeit
MEZ	Mitteleuropäische Zeitzone
LS	Leistungsschalter
TR	Trennschalter
SSTR	Sammelschientrenner
RHU	Regelhauptumspanner
GIS	Gasisolierte Schaltanlage
U_{LxE}	gemessene Leiter-Erde-Spannung
U_{gen}	generiertes 50-Hz-Sinussignal
U_{LxE}^*	transiente Spannungsüberlagerung
ω	Kreisfrequenz
f	Nennfrequenz
φ_0	Phasenlage des Messsignals
$\Delta\varphi$	Schrittweite der Phasenvariation
T_p, T_1, T_f	Anstiegszeit
T_2	Rückenhalbwärtszeit
f_1, f_2	Frequenzanteile des Signals

Bildverzeichnis

2.1. Direkte und indirekte Blitzeinschläge in eine Freileitung [6]	4
2.2. Transiente Spannungs bzw. Überspannungsformen und deren Zeitparameter (Anstiegszeiten T_p, T_1, T_f , Rückenhalbwärtszeit T_2 , Frequenzanteile f_1, f_2) [5]	6
2.3. Geplante Schalthandlung: Einschaltung Sammelschientrenner	7
2.4. Ungeplante Schalthandlung: Schutzauslösung und automatische Wiederein- schaltung	7
2.5. Induziertes Spannungssignal in allen drei Phasen aufgrund einer indirekten Blitzentladung	8
2.6. Übersichtsskizze eines transienten Messaufbaus im Umspannwerk mit RC-Teiler an Freileitungsabgang (Quelle: [10]-bearbeitet)	9
2.7. Amplituden- und Winkelfehler in Abhängigkeit der Frequenz (bis 10 kHz) für einen 420-kV-RC-Teiler	10
2.8. Installierte 400-kV-RC-Teiler (orange) im Umspannwerk auf mobilen Unterge- stellen ([10]-bearbeitet)	10
2.9. Systemaufbau zur Datenaufzeichnung im Umspannwerk: (a) Messrechner, (b) Digitales Speicheroszilloskop (DSO), (c) Tastkopfsystem (TK) und (d) Remotzugriff ([10]-bearbeitet)	11
3.1. Verteilung der transienten Messdaten nach Messstandorten	13
3.2. Übersichtskarte der EUCLID-Mitgliedsländer (Stand:2013) [ALDIS]	16
3.3. Negative (blau) und positive (rot) Wolke-Erde-Blitzentladungen sowie Wolke- Wolke-Blitzentladungen (gelb) für abgehende Leitungszüge der Netzknoten (Sechsecke) [ALDIS] modifiziert	17
4.1. Herauslösen überlagerter transienter Spannungsanteile durch 50-Hz-Sinussubtraktion oben: originales Messsignal, unten: überlagerter transienter Spannungsanteil	20
4.2. Methode der Phasenvariation ($-2\pi/3$ bis 0) zur Ermittlung des Phasenwinkels der gemessenen Netzspannung	22
4.3. Bereinigung nicht-transienter Störanteile original (rot), bereinigt (grün), berei- nigt - original (blau), Datenpunkte 1 bis 4	23
4.4. Endsignalbearbeitung zur Kategorisierung nach Maximalwert, oben: Signal nach 50-Hz-Subtraktion, unten: 52-Hz-Hochpass gefiltertes Signal	24
4.5. Kategorisierungsmethode der transienten Spannungen für die Nennspannungs- ebene 380 kV, Sicherheitsmargen und Kategorien	25
4.6. Grafische Ausgabe der korrelierten transienten Messungen am Beispiel der SMP-Daten	27

4.7. Grafische Ausgabe der korrelierten Sonderfälle der transienten Messungen am Beispiel der Ausschaltung einer Freileitung	28
5.1. Korrelationsmethodik zur strukturierten Klassifizierung des Ausgangsdatenpools	29
5.2. Schematische Darstellung der Korrelationsintervalle für ± 1 s und ± 5 s	31
6.1. Ergebnisse der Gesamtkorrelation des transienten Datensatzes mit SMP- sowie LLS-Daten und Ergebnisse der erweiterten SMP-Korrelation	33
6.2. SMP-LLS Zuordnung: Isolationsversagen im Zuge einer direkten Blitzentladung entlang eines Leitungszugs mit anschließender Schutzauslösung	34
6.3. SMP Zuordnung: Einschalten eines Sammelschienentrennschalters am Regelhauptumspanner in UW D, gemessen in UW D	35
6.4. LLS Zuordnung: Blitzentladung mit 11 zugewiesenen Teilblitzen und einer Blitzstromamplitude des Erstblitzes von -38,47 kA.	36
6.5. Kategorieverteilung der SMP-korrelierten Messdaten	37
6.6. Kategorieverteilung der LLS-korrelierten Messdaten	37
6.7. Kategorieverteilung der nicht-korrelierbaren Messdaten	38
6.8. Aufteilung der Kategorie 1 Fälle nach Schaltarten	39
6.9. Aufteilung der Kategorie 2 Fälle nach Schaltarten	39
6.10. Aufteilung der Kategorie 3 Fälle nach Schaltarten	39
6.11. Aufteilung der Messungen aus UW A nach Schaltarten, bezogen auf 100 Messtage	40
6.12. Aufteilung der Messungen aus UW B nach Schaltarten, bezogen auf 100 Messtage	40
6.13. Aufteilung der Messungen aus UW C nach Schaltarten, bezogen auf 100 Messtage	41
6.14. Aufteilung der Messungen aus UW D nach Schaltarten, bezogen auf 100 Messtage	41
6.15. SMP-Zuordnung: LS-Einschaltung eines Leitungszugs, gemessen in UW B - Kategorie 1	42
6.16. Transienter Ausgleichsvorgang der LS-Einschaltung eines Leitungszuges mit Schwingungen im Frequenzbereich um 5 kHz zum Zeitpunkt $t = 0$ s	42
6.17. Ausgleichsvorgänge bei einem kapazitiven Schaltvorgang [3]	43
6.18. SMP-Zuordnung: Ausschaltung des Sammelschienentrenners einer Kupplung in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 2	44
6.19. Niederfrequenter Ausgleichsvorgang einer Rückzündung mit einer Frequenz von ca. 15 kHz zum Zeitpunkt $t = 0$ s	44
6.20. SMP-Zuordnung: Einschaltung Hilfsschienentrenner eines Leitungszugs in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 3	45
6.21. Niederfrequenter Ausgleichsvorgang einer Rückzündung mit einer Frequenz von ca. 20 kHz zum Zeitpunkt $t = 0$ s	46
6.22. SMP-Zuordnung: Einschaltung einer 300 km entfernten Kompensationsanlage, gemessen in UW D	47
6.23. SMP-Zuordnung: Einschaltung einer 250 km entfernten Kompensationsanlage, gemessen in UW C	48
6.24. SMP-Zuordnung: Folge von Schutzauslösungen auf einer Leitung im 380-kV-Netz, gemessen in UW A	49
6.25. SMP-Zuordnung: Folge von Schutzauslösungen auf einer Leitung im 380-kV-Netz, gemessen in UW B	49

6.26. SMP-Zuordnung: Folge von Schutzauslösungen auf einer Leitung im 380-kV-Netz, gemessen in UW C	50
6.27. SMP-Zuordnung 08. Juni 2017: Einschaltung Leistungsschalter einer Kupplung in UW A, gemessen in UM A	51
6.28. SMP-Zuordnung 11. Mai 2017: Einschaltung Leistungsschalter einer Kupplung in UW A, gemessen in UW A	52
6.29. Resultierender Einschwingvorgang mit einer Frequenz von etwa 150 kHz aufgrund des ersten Wiederzündens im Leistungsschalters zum Zeitpunkt $t = 0$ s	52
6.30. SMP-Zuordnung: Sammelschientrenner der 110-kV-Ebene in UW B, gemessen in UW A	54
6.31. SMP-Zuordnung: 30-kV-Drosselzusaltung in UW D, gemessen in UW A	54
7.1. Netzschema zur Ausbreitung transienter Spannungen aufgrund der Einschaltung einer 220-kV-Kompensationsanlage	58
7.2. Netzschema zur Ausbreitung transienter Spannungen aufgrund eines 110-kV-Erdschluss mit anschließenden Schutzauslösungen	59
7.3. Netzschema zur Ausbreitung transienter Spannungen aufgrund der Einschaltung eines 110-kV-Sammelschientrenners in UW B	61
7.4. Netzschema zur Ausbreitung transienter Spannungen aufgrund einer 30-kV-Drosselzusaltung in UW D	62
A.1. SMP Zuordnung: Leistungsschaltereinschaltung einer 380-kV-Leitung, gemessen in UW A - Kategorie 1	75
A.2. SMP Zuordnung: Leistungsschaltereinschaltung eines Regelhauptumspanners in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 2	76
A.3. SMP Zuordnung: Schutzauslösung der Phase L1 an einem abgehenden Leitungszug von UW B, gemessen in UW B - Kategorie 2	77
A.4. SMP Zuordnung: Einschaltung eines 380-kV-Sammelschientrenners am Regelhauptumspanner in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 2	78
A.5. SMP Zuordnung: Einschaltung eines 380-kV-Leitung mittels Leistungsschalter, gemessen in UW C - Kategorie 2	79
A.6. SMP Zuordnung: Einschaltung eines 380-kV-Hilfsschientrenners in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 3	80
B.1. LLS Zuordnung: Blitzentladung mit zwei Teilblitze entlang eines Leitungszugs zwischen UW A und UW D, gemessen in UW A - Kategorie 2	81
B.2. LLS Zuordnung: Blitzentladung mit sieben Teilblitzen entlang eines Leitungszugs zwischen UW A und UW D, gemessen in UW A - Kategorie 2	82
B.3. LLS Zuordnung: Blitzentladung mit fünf Teilblitzen entlang eines von UW B abgehenden 220-kV-Leitungszugs, gemessen in UW B - Kategorie 2	83
C.1. Strukturierte Ablage der grafischen Ausgaben aus UW A für die SMP-Korrelation	85

Tabellenverzeichnis

2.1. Überblick über transiente Spannungen [2], bearbeitet	3
2.2. Ursachen transienter Vorgänge und deren Frequenzbereiche [7]	5
2.3. Scheitelwerte und Frequenzbereiche der verschiedenen Überspannungskategorien [2], modifiziert	6
2.4. Spezifikationen verwendeter digitaler Speicheroszilloskope ([10]-bearbeitet)	11
3.1. Auflistung der Messperioden für die 220- und 380-kV-Ebene für die Jahre 2017 bis 2019 und Überschneidungsbereiche 1 bis 4	14
3.2. Datenauszug aus den verwendeten Schaltmeldeprotokollen - TSO	15
3.3. Filterparameter für ersten und zweiten SMP-Korrelationsschritt (K1 und K2)	15
3.4. Auszug aus den verwendeten österreichischen Blitzortungsdaten - ALDIS	17
4.1. Definitionsparameter für den Testdatensatz (Testfall 1)	19
4.2. Kriterien zur Identifikation nicht-transienter Störstellen im Signalverlauf	23
4.3. Definierter Spannungsbereich für die höchste Spannung für Betriebsmittel lt. EN60071-1 [5]	25
4.4. Kategoriegrenzwerte additiv zur Betriebsspannung	26
5.1. Auflistung verschiedener Zeitbasen der verwendeten Datensätze	30

Anhang A.

Zuordnungen von Schaltmeldedaten

Bild **A.1** zeigt eine Leistungsschaltereinschaltung einer 380-kV-Leitung in einem nahegelegenen Umspannwerk von UW A. Gemessen wurde dabei an einem Freileitungsabgang in UW A. Zu erkennen sind geringe transiente Reflexionen aufgrund von Wanderwellenvorgängen. Hinsichtlich Maximalwert können die auftretenden transienten Spannungen in Kategorie 1 (siehe Kapitel **4.5**) eingeordnet werden.

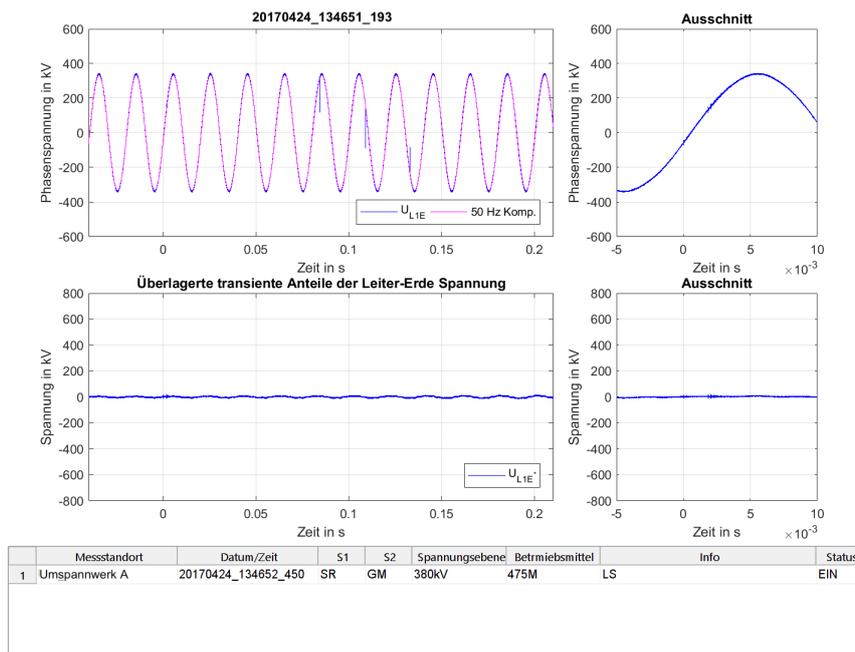
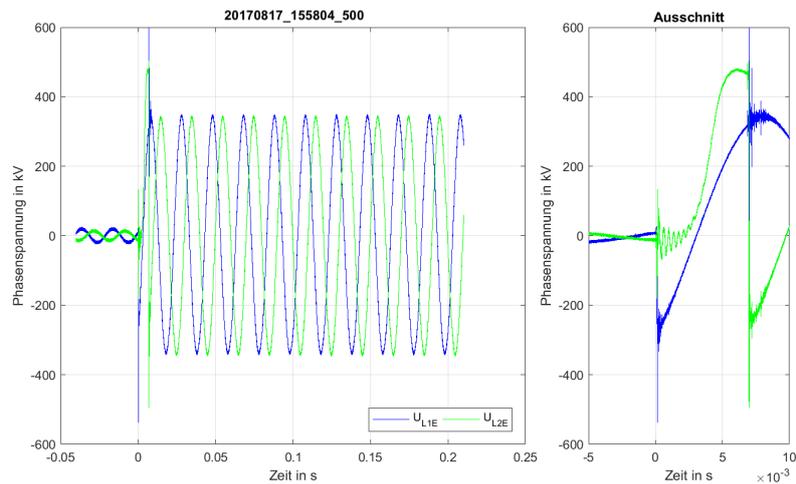


Bild A.1.: SMP Zuordnung: Leistungsschaltereinschaltung einer 380-kV-Leitung, gemessen in UW A - Kategorie 1

Anhang A. Zuordnungen von Schaltmeldedaten

Bild **A.2** zeigt eine Leistungsschaltereinschaltung eines 380-kV-Regelhauptumspanners in UW B. Gemessen wurde dabei direkt am geschalteten Regelhauptumspanner in UW B. Zu erkennen sind deutliche transiente Überspannungen aufgrund von Wiederzündungen. Hinsichtlich ihrer Intensität können die auftretenden transienten Spannungen in Kategorie 2 (lt. Kapitel **4.5**) eingeordnet werden.



	Messstandort	Datum/Zeit	S1	S2	Spannungsebene	Betriebsmittel	Info	Status
1	Umspannwerk B	20170817_155805_860	SR	UW B	380kV	RHU41	LS	EIN

Bild A.2.: SMP Zuordnung: Leistungsschaltereinschaltung eines Regelhauptumspanners in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 2

Bild A.3 zeigt eine SchutzAuslösung der Phase L1 an einem abgehenden 380-kV-Leitungszug von UW B. Gemessen wurde dabei direkt am Regelhauptumspanner in UW B. Zu erkennen ist ein Spannungszusammenbruch auf Phase L1 zum Zeitpunkt des Fehlereintritts ($t = 0$ s). Nach etwa 60 ms erfolgt eine Wiederschaltung der Phase L1. Aufgrund der Spannungsanhebung in Phase L2 handelt es sich mit größter Wahrscheinlichkeit um einen Erdschluss auf Phase L1. Nach der Wiederschaltung kommt es zu einer transienten Spannungsüberhöhung. Kategorisiert wurde dieser Fall hinsichtlich des auftretenden Maximalwerts in Kategorie 2 (lt. Kapitel 4.5).

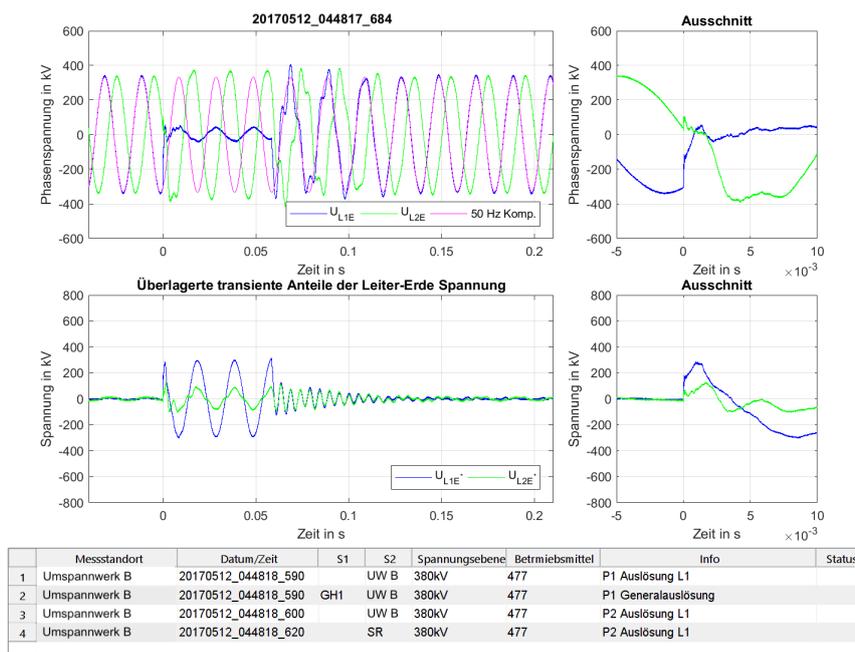


Bild A.3.: SMP Zuordnung: SchutzAuslösung der Phase L1 an einem abgehenden Leitungszug von UW B, gemessen in UW B - Kategorie 2

Anhang A. Zuordnungen von Schaltmeldedaten

Bild A.4 zeigt eine Einschaltung eines 380-kV-Sammelschientrenners am Regelhauptumspanner in UW B. Gemessen wurde dabei direkt am Regelhauptumspanner. Die Hochspannungsseite des RHU ist spannungsfrei. Zu erkennen sind eingekoppelte multiple Durchzündungen während des Schließens des Trennschalters. Kategorisiert wurde dieser Fall hinsichtlich des auftretenden Maximalwerts in Kategorie 2 (lt. Kapitel 4.5).

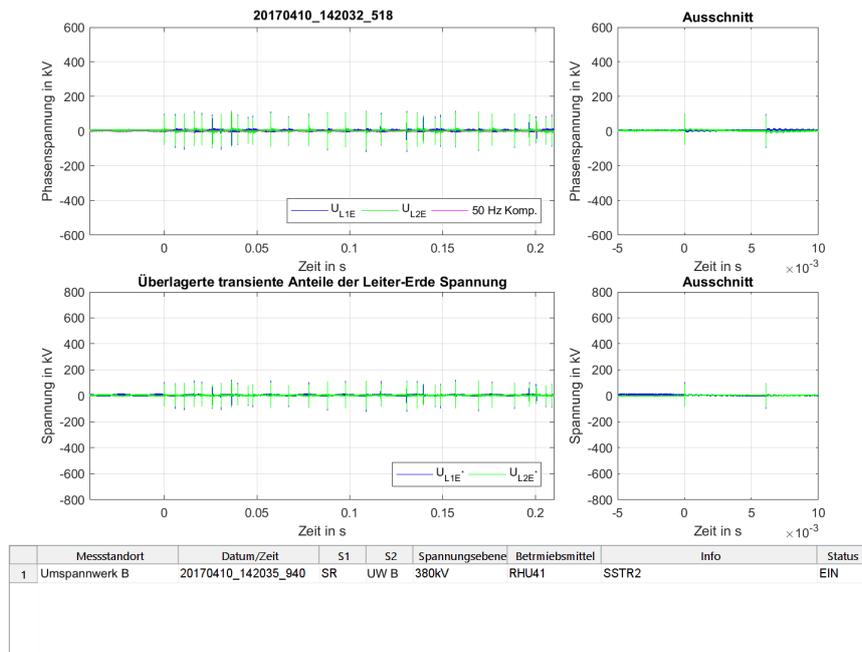


Bild A.4.: SMP Zuordnung: Einschaltung eines 380-kV-Sammelschientrenners am Regelhauptumspanner in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 2

Bild A.4 zeigt eine Einschaltung einer 380-kV-Leitung mittels Leistungsschalter in einem nahe-
 liegenden Umspannwerk von UW C. Gemessen wurde dabei am Phasenschiebertransformator
 in UW C. Zu erkennen sind mehrere Reflexionen aufgrund von Wanderwellenvorgängen entlang
 der eingeschalteten Leitung. Dieser Fall wurde hinsichtlich des auftretenden Maximalwerts als
 Kategorie-2-Fall (lt. Kapitel 4.5) deklariert.

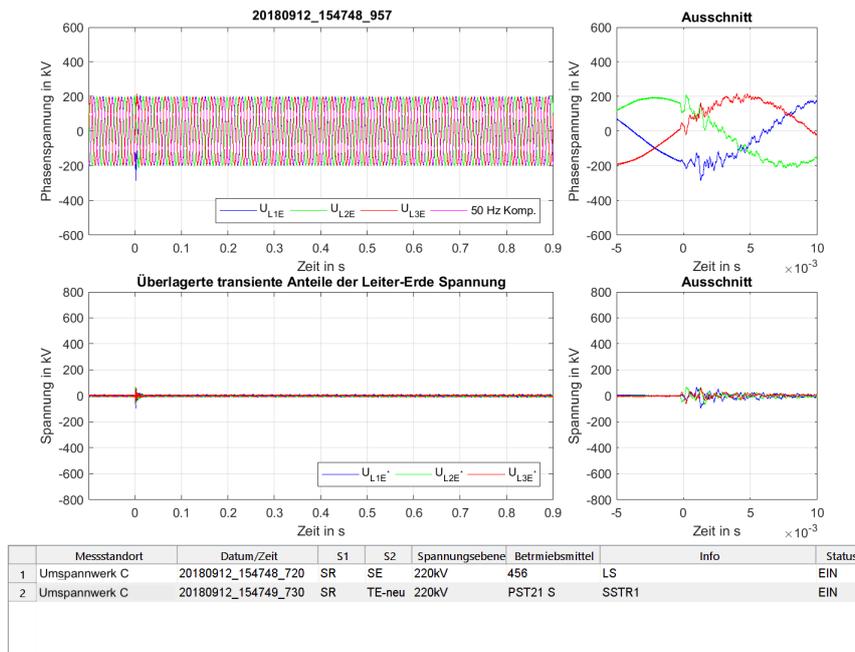


Bild A.5.: SMP Zuordnung: Einschaltung eines 380-kV-Leitung mittels Leistungsschalter,
 gemessen in UW C - Kategorie 2

Anhang A. Zuordnungen von Schaltmeldedaten

Bild **A.6** zeigt eine Einschaltung eines 380-kV-Hilfsschienentrenners in UW B. Gemessen wurde dabei am Regelhauptumspanner in UW B. Zu erkennen sind erhebliche transiente Überspannungen aufgrund multipler Rückzündungen während des Schließens des Trenners. Dieser Fall wurde hinsichtlich der auftretenden Maximalwerte als Kategorie-3-Fall (lt. Kapitel **4.5**) eingeordnet.

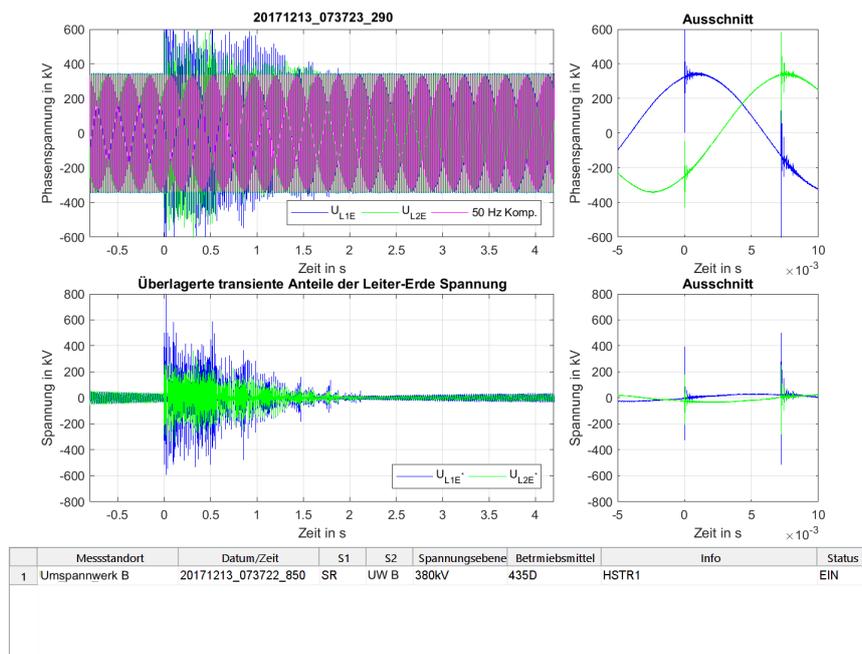


Bild A.6.: SMP Zuordnung: Einschaltung eines 380-kV-Hilfsschienentrenners in UW B, gemessen in UW B - Kategorie 3

Anhang B.

Zuordnungen von Blitzortungsdaten

Bild **B.1** zeigt eine gemessene transiente Spannung aufgrund einer negativen Blitzentladung entlang eines Leitungszugs zwischen UW A und UW D. Gemessen wurde direkt am betroffenen Leitungszug in UW A. Die Blitzentladung besteht aus zwei Teilblitzen, welche auch im Spannungsverlauf deutlich sichtbar sind. Der erste Teilblitz weist lt. Zuordnung eine berechnete Blitzstromamplitude von $-22,71$ kA auf. Kategorisiert wurde dieser Fall in Kategorie 2.

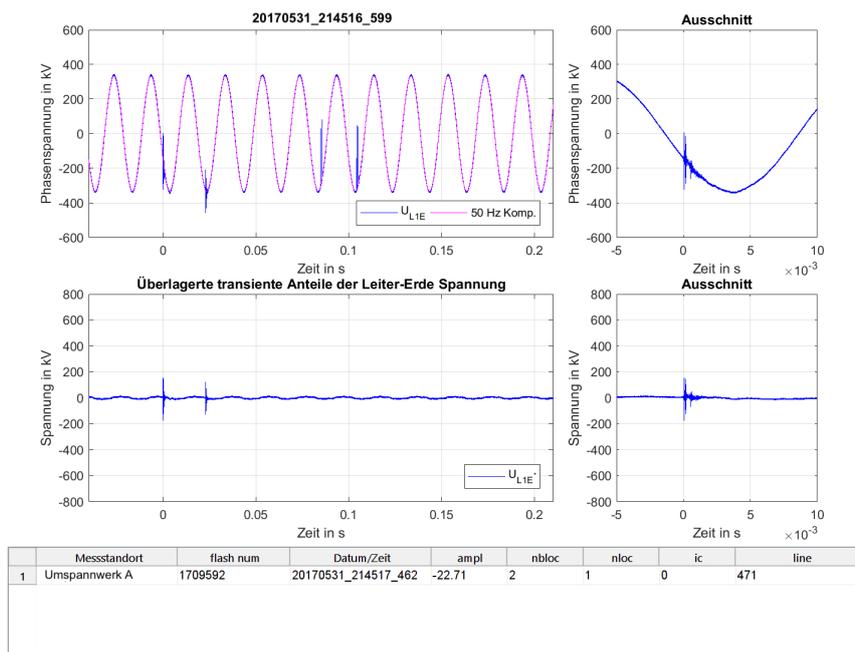


Bild B.1.: LLS Zuordnung: Blitzentladung mit zwei Teilblitze entlang eines Leitungszugs zwischen UW A und UW D, gemessen in UW A - Kategorie 2

Anhang B. Zuordnungen von Blitzortungsdaten

Bild **B.2** zeigt eine gemessene transiente Spannung aufgrund einer negativen Blitzentladung entlang eines Leitungszugs zwischen UW A und UW D. Gemessen wurde direkt am betroffenen Leitungszug in UW A. Die Blitzentladung besteht aus sieben Teilblitzen, welche im Spannungsverlauf deutlich sichtbar sind. Der erste Teilblitz weist lt. Zuordnung eine berechnete Blitzstromamplitude von $-7,43 \text{ kA}$ auf. Kategorisiert wurde dieser Fall in Kategorie 2.

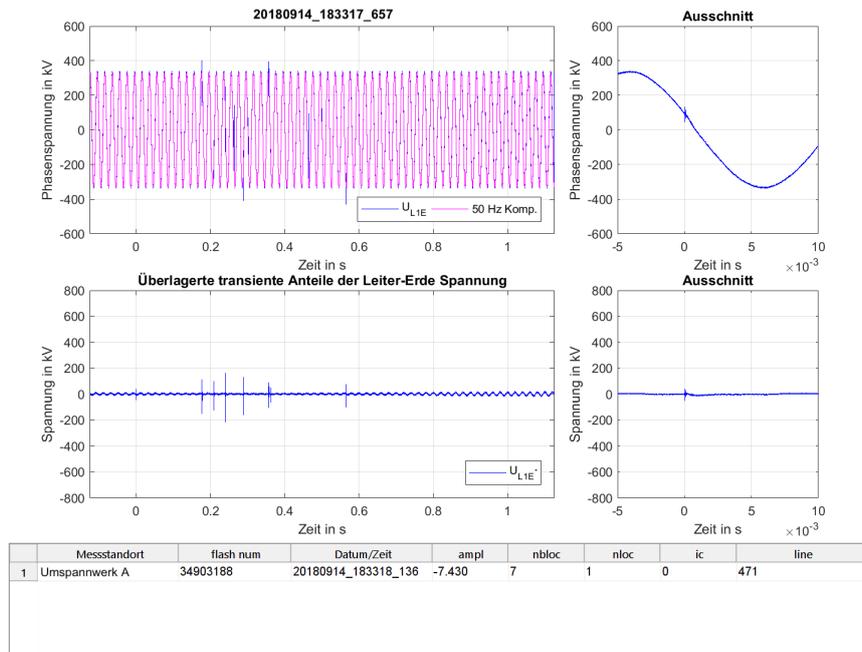


Bild B.2.: LLS Zuordnung: Blitzentladung mit sieben Teilblitzen entlang eines Leitungszugs zwischen UW A und UW D, gemessen in UW A - Kategorie 2

Bild B.3 zeigt eine gemessene transiente Spannung aufgrund einer negativen Blitzentladung entlang eines abgehenden Leitungszugs zwischen in UW B. Gemessen wurde am Regelhauptumspanner in UW B. Die Blitzentladung besteht aus fünf Teilblitzen, welche im Spannungsverlauf deutlich sichtbar sind. Der erste Teilblitz weist lt. Zuordnung eine berechnete Blitzstromamplitude von -35,18 kA auf. Kategorisiert wurde dieser Fall in Kategorie 2.

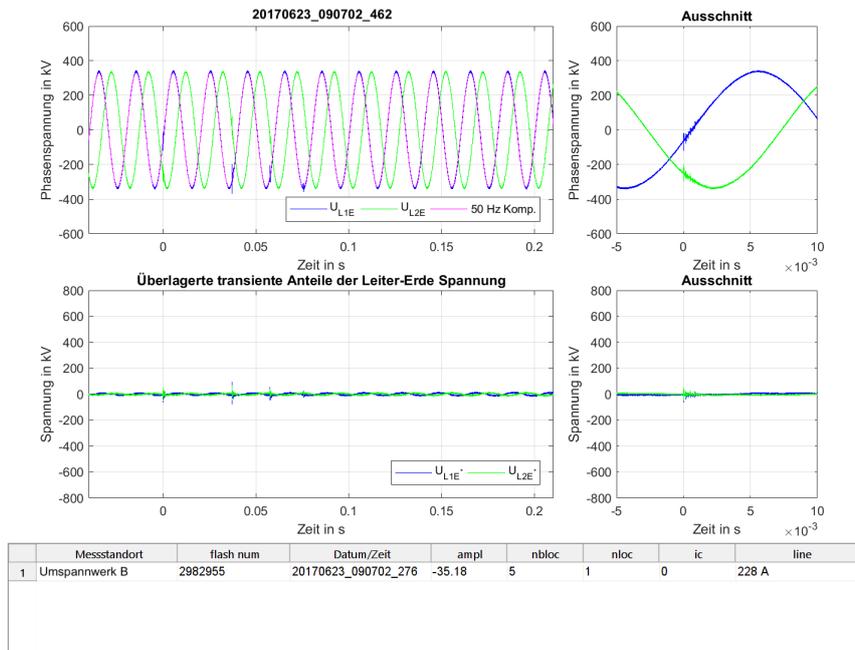


Bild B.3.: LLS Zuordnung: Blitzentladung mit fünf Teilblitzen entlang eines von UW B abgehenden 220-kV-Leitungszugs, gemessen in UW B - Kategorie 2

Anhang C.

Interne Ordnerstruktur der SMP-Korrelation für UW A

Bild C.1 zeigt die interne Ordnerstruktur am Beispiel der SMP-Korrelation in UW A. Wie in Kapitel 5.4 beschrieben, werden die Kategorisierungsfiles in einem eigenen Ordner nach Kategorien abgelegt (siehe Bild C.1 Pfeil 2). Zu den jeweils erstellten Unterordnern nach Betriebsmittel ist dies in Bild C.1 (Pfeil 1) beispielhaft dargestellt.

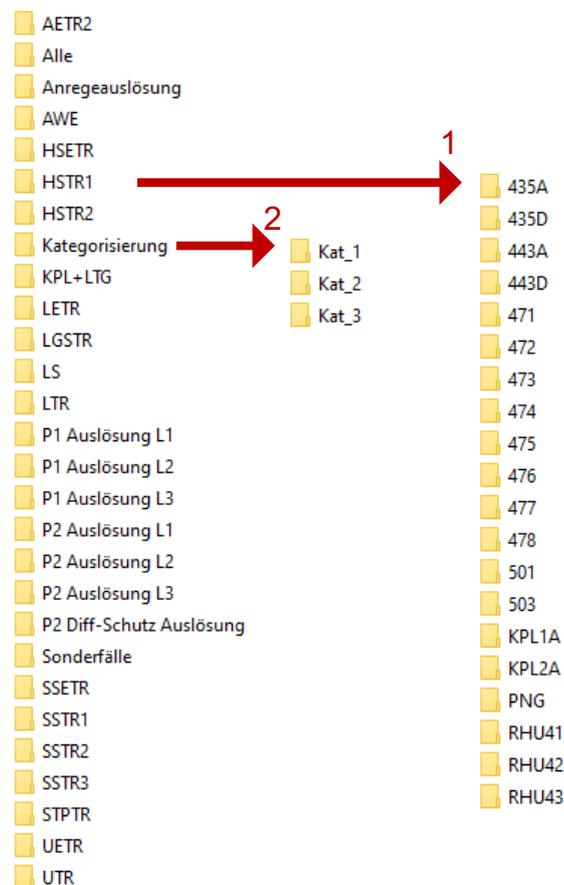


Bild C.1.: Strukturierte Ablage der grafischen Ausgaben aus UW A für die SMP-Korrelation