



© fotopro

Bericht:

Schaltversuche eines 123-kV-Vakuum- Leistungsschalters 3AV1FG

Prof. DDipl.-Ing. Dr. Robert Schürhuber
Dipl.-Ing. Philipp Hackl
Dipl.-Ing. Maximilian Heinz Brestan

April 2025

Technische Universität Graz
Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Inffeldgasse 18/1
8010 Graz
Österreich

Institutsleitung
Prof. DDipl.-Ing. Dr. Robert Schürhuber

Wissenschaftliche Ausarbeitung
Dipl.-Ing. Philipp Hackl
Dipl.-Ing. Maximilian Heinz Brestan

April 2025



Institut für
Elektrische Anlagen und Netze
Technische Universität Graz
8010 Graz, Inffeldgasse 18/1

Executive Summary

Das Ziel der Schaltversuche am 22. und 23. Oktober 2024 sowie am 13. März 2025 im Umspannwerk Ternitz besteht darin, das Schaltverhalten des Vakuum-Leistungsschalters 3AV1FG der Firma Siemens Energy näher zu untersuchen. Während Vakuum-Leistungsschalter für das Schalten in der Mittelspannung das Standard-Betriebsmittel darstellen, waren SF₆-Leistungsschalter für Hochspannungsschaltanlagen bisher das Mittel der Wahl. Das Verbot des Einsatzes des Treibhausgases SF₆ als Isolier- und Löschgas in Betriebsmitteln und Schaltanlagen durch die F-Gas-Verordnung der EU bedingt den Einsatz alternativer Technologien. Im Zuge dieses Projekts setzt die APG dabei erstmals einen Vakuum-Leistungsschalter im 110-kV-Netz ein. In diesem Zusammenhang besteht der Schwerpunkt dieses Berichts darin, das Verhalten des Vakuum-Leistungsschalters im Betriebs- und Fehlerfall zu analysieren. Der Vakuum-LS ist gezielt in der Querkupplung eingebaut worden, um möglichst viele unterschiedliche Schaltzustände und Szenarien abdecken zu können.

Im Zuge der Versuche wurden Schalthandlungen an Freileitungen, nahen und fernen Trennern, das Zu- und Abschalten von Transformatoren sowie ein-, zwei- und dreipolige Fehler durchgeführt und aufgezeichnet. Im Hinblick auf das Schaltvermögen des Vakuum-Leistungsschalters für Kondensatorbatterien und Kompensationsdrosseln gibt es betriebliche Restriktionen, weshalb diese Betriebsmittel nicht in die Versuche integriert wurden. Dies liegt unter anderem an fehlenden Typprüfungen (C-Batterie) und nicht-vorhandenem Zusatz-Equipment (z.B. RC-Filterkreise, point-on wave Controller für Kompensationsdrossel). Das Schalten von Induktivitäten stellt im Allgemeinen eine große Herausforderung für Schaltgeräte dar.

Neben unterschiedlichen zusätzlichen angebrachten breitbandigen Messsystemen für Strom- und Spannungsmessungen wurden zusätzlich die Messungen der Ortsdosisleistung (AGES), die Bestimmung von Kennwerten des Leistungsschalters wie beispielsweise die Kontaktwiderstände oder die Ein- und Ausschaltzeit (Omicron) und Stromwandler-Remanenzmessungen (VUM) durchgeführt.

Im Zuge der Betriebsschaltungen wurden keine Auffälligkeiten aufgrund des Vakuum-Leistungsschalter festgestellt. Im Gegensatz zum Schalten von Kompensationsdrosseln stellt das Schalten von Transformatoren geringe Anforderungen an Leistungsschalter. Dieser Sachverhalt konnte bei den Versuchen bestätigt werden, wobei lediglich einmal als unproblematisch zu bewertende Wiederzündungen auftraten. Auch das Ausschalten des Transformators während dem Auftreten des Inrushstroms kann durch den Vakuum-Leistungsschalter durchgeführt werden. Dabei sind die Steilheiten und Amplituden dieser Schaltüberspannungen als unkritisch zu bewerten.

Bei Klären von dreipoligen Klemmenkurzschlüssen treten beim Ausschalten Wiederzündungen auf. Diese entstehen während des Öffnungsvorgangs der Schalterpole, währenddessen der Leistungsschalter noch nicht seine volle Isolationsfestigkeit besitzt. Dieser Effekt ist bei einem ungünstigen Schaltzeitpunkt nicht vermeidbar und ist in den einschlägigen Normen als zulässig definiert.

Bei der Klärung eines dreipoligen Abstandskurzschlusses konnten zwei sog. Non-Sustained Disruptive Discharges (NSDD) beobachtet werden. Dabei handelt es sich um einen, für Vakuum-Leistungsschalter seltenen, jedoch gut zu beherrschenden Effekt, welcher den Betrieb nicht einschränkt.

Die Ergebnisse aller Versuche sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

		Beschreibung der Versuche	Besonderheiten	Bemerkung
Betriebschaltungen	Schalten von leerlaufender Leitung (Einschalten, am 22.10.2025)		Nein	-
	Schalten von leerlaufender Leitung (Ausschalten, am 13.03.2025)		Nein	-
	Schalten von entferntem Trenner (Vakuum-LS geschlossen)		Nein	-
	Schalten von nahem SS-Trenner (Vakuum-LS offen)		Nein	-
	Schalten von FL-Trenner bei offenem Vakuum-LS		Nein	-
	Schalten von FL-Trenner bei geschlossenem Vakuum-LS		Nein	-
	Schalten von nahem SS-Trenner bei beidseitiger Besspannung (Vakuum-LS offen)		Nein	-
	Schalten von leerlaufendem Trafo		Ja	Wiederzündungen
	Schalten von leerlaufendem Trafo mit Inrush-Strom		Nein	Schaltüberspannung
Fehlerschaltungen	Klemmen- Fehler	1-poliger Klemmenerdschluss	Nein	-
		1-poliger Erdschluss mit Zünddraht (anstehend)	Nein	-
		2-poliger Kurzschluss ohne AWE (mit Erdberührung)	Nein	-
		3-poliger Kurzschluss ohne AWE (mit Erdberührung)	Ja	Wiederzündungen
		3-poliger Kurzschluss mit AWE (mit Erdberührung)	Ja	Wiederzündungen
		3-poliger Kurzschluss mit Zünddraht (ohne Erdberührung)	Nein	-
	Abstands- Fehler	1-poliger Abstandserdschluss	Nein	-
		3-poliger Kurzschluss ohne AWE (mit Erdberührung)	Nein	-
		3-poliger Kurzschluss mit AWE (mit Erdberührung)	Ja	NSDDs

Tabelle 1: Zusammenfassende Bewertung aller Versuche

Symbolverzeichnis

C_b'	Betriebskapazitätsbelag / Kapazitätsbelag (Mitsystem)
f_r	Bemessungsfrequenz des Vakuum-LS
I_k	Kurzschlussstrom
I_r	Bemessungs-Betriebsstrom des Vakuum-LS
I_{SC}	Bemessungs-Kurzschluss-Ausschaltstrom
k_{pp}	Polfaktor des Vakuum-LS
L	Induktivitätsbelag (Mitsystem)
R_1'	Mitsystem-Widerstandsbelag
R_0'	Nullsystem-Widerstandsbelag
t_k	Bemessungs-Kurzschlussdauer
$U_{abzweigsseitig}$	Spannung abzweigsseitig vom Leistungsschalter
U_d	Bemessungs-Kurzzeit-Stehwechselspannung
u_{LS}	Spannung über Leistungsschalterpolen
U_p	Bemessungs-Stehblitzstoßspannung
U_r	Bemessungsspannung des Leistungsschalters
$U_{speiseseitig}$	Spannung speiseseitig vom Leistungsschalter
X_1'	Mitsystem-Reaktanzbelag
X_0'	Nullsystem- Reaktanzbelag
Z_w	Wellenwiderstand der Leitung

Abkürzungsverzeichnis

AWE	Automatische Wiedereinschaltung
DUT	Device-Under-Test
EB	Erdberührung
EG	Erdungsgarnitur
ES	Erdschluss
FOCS	Faseroptische Strommessung
LS	Leistungsschalter
NSDD	Non-Sustained Disruptive Discharge
RRRV	Rise of Rate of Recovery Voltage
TRV	Transient Recovery Voltage / Transiente wiederkehrende Spannung
VHE	Umspannwerk Hessenberg
VTE	Umspannwerk Ternitz
VOS	Umspannwerk Obersielach
ZD	Zünddraht

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Überblick.....	1
1.1	Übersicht.....	1
1.2	Messpunkte und zugehörige Spezifikationen	3
1.3	Prüfplan	5
1.4	Modellierung der Leistungsschalter-Polöffnung	5
1.5	Besonderheiten von Vakuum-Leistungsschaltern	6
1.5.1	Wiederzündungen.....	6
1.5.2	Non-Sustained Disruptive Discharge (NSDD).....	7
1.5.3	Betriebliche Restriktionen	8
1.5.3.1	Schalten der Kompensationsdrossel	8
1.5.3.2	Schalten der C-Batterie	8
2	Detailbetrachtung: Betriebsschaltungen I (22.10.2024).....	9
2.1	Freileitung bespannen	9
2.2	(Zu-) Schaltung naher SS-Trenner	12
3	Detailbetrachtung: Betriebsschaltungen III	15
3.1	Vakuum-LS Aus, Bespannung 122/8 Leerlauf	16
3.2	Vakuum-LS Ein, Bespannung RHU3.....	19
3.3	Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3.....	23
3.4	Vakuum-LS Ein / Aus, Bespannung RHU3 während Inrush	26
3.5	Zusammenfassende Bewertung der Betriebsschaltungen III.....	30
4	Detailbetrachtung: Fehlerschaltungen.....	31
4.1	3-poliger Klemmenkurzschluss mit Zünddraht (ohne Erdberührung, ohne AWE, Versuch 4e um 15:23).....	32
4.1.1	Übersicht des Versuchs.....	32
4.1.2	Spannung über LS.....	33
4.1.3	Verlagerungsspannung	34
4.1.4	Ermittlung der Steilheit der TRV	36
4.2	2-poliger Klemmenkurzschluss mit Erdungsgarnitur (mit Erdberührung, ohne AWE, Versuch 4a um 12:33).....	37

4.2.1	Übersicht des Versuchs.....	37
4.2.2	Spannung über LS.....	38
4.2.3	Verlagerungsspannung	39
4.3	1-poliger Klemmenerdschluss mit Erdungsgarnitur (ohne AWE, Versuch 4d um 14:50) .	42
4.3.1	Übersicht des Versuchs.....	42
4.3.2	Spannung über LS.....	43
4.3.3	Verlagerungsspannung	44
4.4	3-poliger Klemmen-KS mit EG (mit Erdberührung, mit AWE, 1. Auslösung, Versuch 4c um 13:49)	46
4.4.1	Übersicht des Versuchs.....	46
4.4.2	Spannung über LS.....	47
4.4.3	Spannung über LS und faseroptische Strommessung.....	49
4.4.4	Verlagerungsspannung	50
4.5	3-poliger Abstands-KS mit EG (mit Erdberührung, mit AWE, 1. Auslösung, Versuch 5b um 16:06)	52
4.5.1	Übersicht des Versuchs.....	52
4.5.2	Spannung über LS.....	53
4.5.3	Spannung über LS bei Betrachtung der NSDDs	54
4.5.4	Verlagerungsspannung	56
4.6	Zusammenfassung der Fehlerschaltungen	57
5	Zusammenfassung und Fazit.....	59
6	Referenzen	62
7	Anhang	62
7.1	Ansprechpersonen.....	62
7.2	Betriebsmitteldaten	63
7.2.1	Leistungsdaten	63
7.2.2	Bemessungsdaten des Vakuum-Leistungsschalters 3AV1FG.....	63
7.2.3	CONDIS CR-Teiler	64
7.3	Dokumentation der Versuchs-Zeitpunkte und -Beschreibungen.....	65
7.4	Übersicht RRRV: zweit- und drittlöschende Pole	67

7.5	Messtabelle: Fehlerströme (110-kV-Seite) und Spannungen vor Transformator (220-kV-Seite).....	68
7.6	Anmerkung: Auslösekommando von Schutzgeräten	68
7.7	Zusätzliche Kurvenverläufe: Betriebsschaltungen 22.10.2024	69
7.7.1	Versuch 3b um 10:27.....	69
7.8	Zusätzliche Kurvenverläufe: Betriebsschaltungen 13.03.2025	71
7.8.1	Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3.....	71
7.8.2	Vakuum-LS Ein / Aus, Bespannung RHU3 während Inrush	72
7.9	Zusätzliche Kurvenverläufe: Klemmenfehler 22.10.2024.....	73
7.9.1	Versuch 4b um 13:05.....	73
7.9.2	Versuch 4c um 14:12 (1. Auslösung)	78
7.9.3	Versuch 4c um 14:12 (Wiedereinschaltung)	83
7.9.4	Versuch ES um 17:08.....	88
7.10	Zusätzliche Kurvenverläufe: Abstandsfehler 22.10.2024.....	90
7.10.1	Versuch 5a um 15:59.....	90
7.10.2	Versuch 5b um 16:06 (Wiedereinschaltung)	94
7.10.3	Versuch 5c um 16:42.....	98

1 Einleitung und Überblick

Am 22. und 23. Oktober 2024 sowie am 13. März 2025 führte die APG Schaltversuche im Umspannwerk Ternitz (VTE) durch. Das Ziel dieser Schaltversuche bestand darin, das Verhalten eines 123-kV-Vakuum-LS (Device-Under-Tests, DUT) des Typs 3AV1FG von Siemens Energy AG im Betriebs- und Fehlerfall zu untersuchen. Diese Versuche wurden vom Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz wissenschaftlich begleitet, die Ergebnisse werden in diesem Bericht zusammengefasst.

In diesem Kapitel wird der Aufbau der durchgeführten Versuche beschrieben. Weiters sind hier die Rahmenbedingungen zu der Abwicklung der Versuche dokumentiert. Darüber hinaus ist ein Auszug über allgemeine Phänomene beim Schalten mit Vakuum-LS Teil dieses Abschnitts. Die Spezifikationen der Betriebsmittel sowie die Netzdaten sind in Kapitel 7.2 hinterlegt.

1.1 Übersicht

Die Schaltversuche gemäß des in Kapitel 1.3 angeführten Prüfplans fanden während drei Tage statt. Am 22.10.2024 wurden vormittags erste Betriebsschaltungen, und nachmittags – mit einer speziellen Netzkonstellation – Fehlerversuche durchgeführt. Die dabei angewandte Sonderschaltung der Netzkonstellation ist in Abbildung 1 dargestellt.

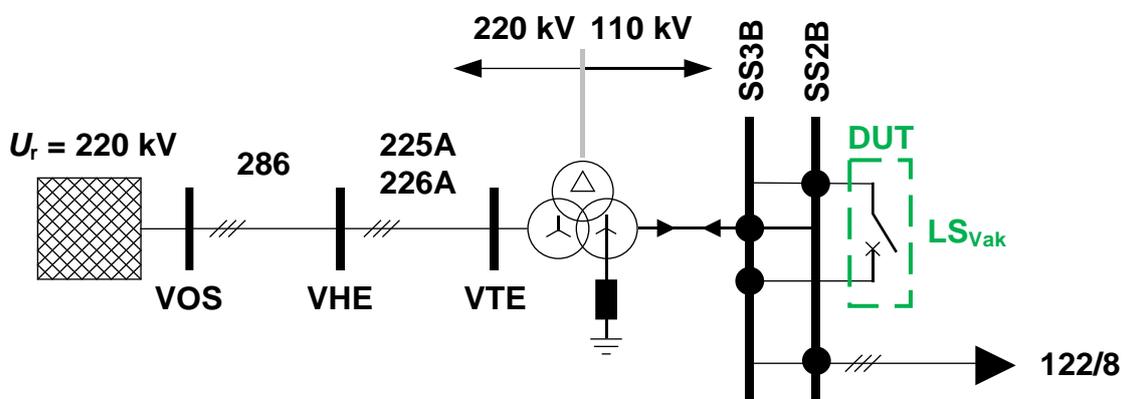


Abbildung 1: Netzkonstellation für die Durchführung der Fehlerversuche

Dabei ist das Umspannwerk Ternitz (VTE) über Leitung 225A mit dem Umspannwerk Hessenberg (VHE) und über Leitung 286 mit dem Umspannwerk Obersielach (VOS) verbunden. Mit dieser Netzkonstellation liegt der Wert für die Kurzschlussleistung im 110-kV-Netz bei ca. 450 MVA. Diese Netzkonstellation wurde als Maßnahme gewählt, um Spannungseinbrüche durch die Versuche im gesunden Netz zu begrenzen (Tabelle 13). Am 23.10.2024 sowie am 13.03.2025 wurden zusätzliche Betriebsschaltungen mit dem Vakuum-LS durchgeführt.

1.2 Messpunkte und zugehörige Spezifikationen

Folgend sind die einzelnen Messsysteme und ihre individuellen Spezifikationen dokumentiert.

Strom- und Spannungsmessung durch APG, Firma Artemes und TU Graz (Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik):

- **Störschriebe durch Schutzgeräte der APG (Abk. IND):** Die installierten Schutzgeräte in den jeweiligen Abzweigen im Umspannwerk Ternitz lieferten bei vorhandener Anregung einen Störschrieb, welcher für die Auswertung genutzt wird. Dabei sind die Störschriebe des Transformatorschutzes (OS und US), der Kupplung und des Leitungsabzweiges 122/8 für die Auswertung verfügbar (Abbildung 2 Abkürzung IND). Die Auflösung beträgt 1 kHz. Neben den Strom- und Spannungsmessungen nach dem Trigger sind durch die Störschriebe zusätzliche allfällige interne Signale wie Anregungen, Auslösungen und Kommandosignale durch die Störschriebe verfügbar, welche für die folgenden Auswertungen genutzt wurden.
- **Strom/- und Spannungsmessungen durch MoCa-Messsysteme der Firma Artemes (Abk. IND):** Mit Hilfe des MoCa-Messsystems der Firma Artemes wurde am RHU3 (OS und US), in der Querkupplung und im Leitungsabzweig 122/8 Ströme und Spannungen mit einer Sampling-Frequenz von 10 kHz gemessen (Abbildung 2 Abkürzung IND). Diese Messungen dienten als Ergänzung zu den Störschriebe (höhere Auflösung) und zu den hochfrequenten Messungen (längerer Zeitraum).
- **Spannungsmessung über CR-Teiler mit Oszilloskop Tektronix MSO58B (Abk. CR):** Die hochfrequente Spannungsmessungen mit Hilfe der CONDIS CR-Teiler und den Tektronix MSO58B Oszilloskopen wurden speiseseitig, und abzweigsseitig des Leistungsschalters installiert. Die Spannung über den Vakuum-LS (u_{LS}) berechnet sich gemäß:

$$u_{LS} = u_{\text{speiseseitig}} - u_{\text{abzweigsseitig}} \quad (1)$$

Zusätzlich wurde eine Spannungsmessung an der E-Spule installiert. Das Typenschild der CR-Teiler ist in Kapitel 7.2.3 hinterlegt.

Der CR-Teiler zeichnet sich im Gegensatz zu induktiven Messwandlern durch eine wesentlich größere Bandbreite aus, wodurch diese Wandler gut für die Messung hochfrequenter Spannungssignale am Leistungsschalter und an der E-Spule geeignet sind. Die Genauigkeitsklasse 0,5P-WB2 bedeutet gemäß IEC 61869-1:2023 eine Messungengenauigkeit von $\pm 5\%$ für $f_r < f \leq 5$ kHz und $\pm 10\%$ für $5 \text{ kHz} < f \leq 20$ kHz. In Abbildung 2 sind die Messungen mit CR-Teilern durch die Abkürzung CR bezeichnet.

Die erstmals zur Spannungsmessung eingesetzten CR-Teiler ermöglichen eine breitbandige Aufzeichnung der Vorgänge und so eine korrekte Interpretation und Analyse der Abläufe. Dies trägt wesentlich zum Wissensaufbau in Bezug auf das Schaltverhalten von Betriebsmitteln neuer Technologien bei.

- **Faseroptische Strommessung mit Tektronix MSO58B (Abk. FOCS):** Für die faseroptische Strommessung wurden zwei unterschiedliche Messsysteme verwendet. Diese Stromsensoren wurden von dem Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik der TU Graz (EMS) sowie der Firma Artemes entwickelt.
 1. **AC-Messung (Standard SMF28 – Messkopf):** hohe Bandbreite, hoher Rauschanteil, schlechte Arbeitspunktstabilität, ausgeführt in den Phasen L1, L2 und L3
 2. **DC-Messung (Spun Fase – Messkopf):** genaue Messung von AC- und DC-Komponenten, geringere Bandbreite, aufwendige Handhabung, hohe Arbeitspunktstabilität, Messung ausschließlich in Phase L3

Aufgrund von Komplikationen im Hinblick auf die Arbeitspunktstabilität stehen für die AC-Messung ausschließlich Messergebnisse der Phase L1 zur Verfügung. Die DC-Messung in Phase L3 lieferte zuverlässige Messergebnisse.

Die Ergebnisse der Strom- und Spannungsmessungen sind in Kapitel 2, Kapitel 3 und 4 sowie im Anhang (Kapitel 7) dargestellt.

Zusätzliche Messsysteme und deren Ergebnisse:

- **Leistungsschalterprüfung durch Firma Omicron [3]:** Vor- und nach den Schaltversuchen wurden Leistungsschalterprüfungen durch die Firma Omicron mit einem Omicron CIBANO 500 Messgerät durchgeführt. Dabei wurden charakteristische Größen wie die Betätigungszeiten (Ein- und Ausschaltzeit sowie die Ein- und Ausschaltsynchronität), Kontaktweigeigenschaften, Spulencharakteristika und Kontaktwiderstände ermittelt. Der Vakuum-LS hat alle zugehörigen Tests bestanden. Zwischen den Messergebnissen, welche vor und nach den Schaltversuchen durchgeführt wurden, sind keine maßgeblich Unterschiede feststellbar. Die Ausschalt-Dynamik des Vakuum-LS ist in Kapitel 1.4 ausführlicher behandelt.
- **Remanenzmessung der Stromwandler durch VUM [6]:** Im Rahmen der Schaltversuche wurden in der Querkupplung zusätzlich Remanenzmessung und Entmagnetisierungen der Stromwandler durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Remanenz der Stromwandler-Kerne vom DC-Anteil im Kurzschlussstrom abhängt. Es ist anzumerken, dass bei zukünftigen Schalter-Vermessungen (Firma Omicron) kein DC-Prüfstrom über den Wandler fließen darf, da in diesem Fall eine unerwünschte Remanenz der Wandlerkerne durch die Vakuum-LS-Prüfung auftreten kann.
- **Messung von Röntgenstrahlung AGES [7]:** Bei Schaltversuchen ist zusätzlich die Ortsdosisleistung von etwaiger Röntgenstrahlung durch die AGES gemessen worden. Es wurde keine vom LS ausgehende Röntgenstrahlung festgestellt. Die Messung der Ortsdosisleistung wurde bei den Versuchen sowohl mit offenem als auch mit geschlossenem Vakuum-LS durchgeführt.

1.3 Prüfplan

Der Prüfplan für die Durchführungen der Versuche am 22. und 23. Oktober 2024 sowie für den 13. März 2025 wurde durch das Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz (IEAN) angefertigt und mit der APG abgestimmt und freigegeben. Dieser dokumentiert die Versuchsanweisungen für alle durchgeführten Versuche. Die Versuche können in die Kategorien Betriebsschaltungen und Fehlerschaltungen differenziert werden:

Betriebsschaltungen I (22.10.2024)

1. Schalten einer leerlaufenden Leitung
2. Schalten von entferntem SS-Trenner
3. Schalten von nahem SS-Trenner

Fehlerschaltungen (22.10.2024)

4. Klemmen-Kurzschluss (3-, 2- und 1-polig)
5. Abstands-Kurzschluss (3-, 2- und 1-polig)

Betriebsschaltungen II (23.10.2024)

6. Schalten von Freileitungs-Trenner mit FL-Bespannung
7. Schalten von nahem SS-Trenner mit FL-Bespannung

Betriebsschaltungen III (13.03.2025)

8. Bespannen und Abschalten einer leerlaufenden Leitung
9. Bespannen und Abschalten von leerlaufendem Transformator
10. Ausschalten des Inrushstroms von leerlaufendem Transformator

Die detaillierte Versuchsbeschreibung aller Schaltversuche kann den Prüfplänen [1] und [5] entnommen werden. In diesem Bericht sind einige vorselektierte Versuche dokumentiert, sodass alle betriebsrelevanten Effekte behandelt sind. Kapitel 2 und 3 dokumentieren die Ergebnisse von ausgewählten Betriebsschaltungen und Kapitel 4 die Ergebnisse der Fehlerschaltungen. Alle weiteren Ergebnisse sind im Anhang dargestellt.

1.4 Modellierung der Leistungsschalter-Polöffnung

Die Ergebnisse dieses Kapitels basieren auf [3, Seite 21]. Mit den bekannten Zeitpunkten der Schutz-Auslösungen in der Kupplung (von jenen Schutzgeräten, welche den Vakuum-LS steuern), sowie den charakteristischen Größen des Vakuum-LS wird ein Modell entwickelt, welches die Schalteröffnung des Vakuum-LS durch eine lineare Zeit-Weg-Funktion modelliert. Alle Schalterpole werden dabei synchron geöffnet bzw. geschlossen. Folgende Parameter sind dabei von Relevanz:

- **Ausschaltssynchronität:** beschreibt mit welcher maximalen Zeitabweichung bei allen Schalterpolen eine Kontakttrennung stattfindet, wenn ein gemeinsames Steuersignal für alle

Schalterpole angelegt wird. Dieser Wert liegt in der Größenordnung von ca. 0,4 ms und wird daher für die folgenden Schritte vernachlässigt.

- **Ausschalteigenzeit:** beschreibt die Zeitverzögerung vom Anlegen des Steuersignals an die LS-Steuerung bis zur Kontaktöffnung des Vakuum-LS. Diese liegt beim verwendeten Vakuum-LS bei ca. 29 ms.
- **Bewegungszeit:** beschreibt die Zeitverzögerung vom Zeitpunkt der Kontaktöffnung bis zu jenem Zeitpunkt, bei dem die Pole die Endposition erreichen. Diese kann näherungsweise über den Gesamtweg der Schaltstrecke = 60 mm und die mittlere Geschwindigkeit der Kontakte von $v = 2,46$ m/s zu 24,4 ms berechnet werden.

Mit der Ausschalteigenzeit und der Bewegungszeit kann schließlich die Schalterposition in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Auslösung durch den Schutz in der Kupplung linear angenähert werden. Als Zeitstempel für die Auslösung des Schutzes wurde die erste Meldung eines Ausschalt-Kommandos in der Kupplung im zugehörigen Störschrieb genutzt.

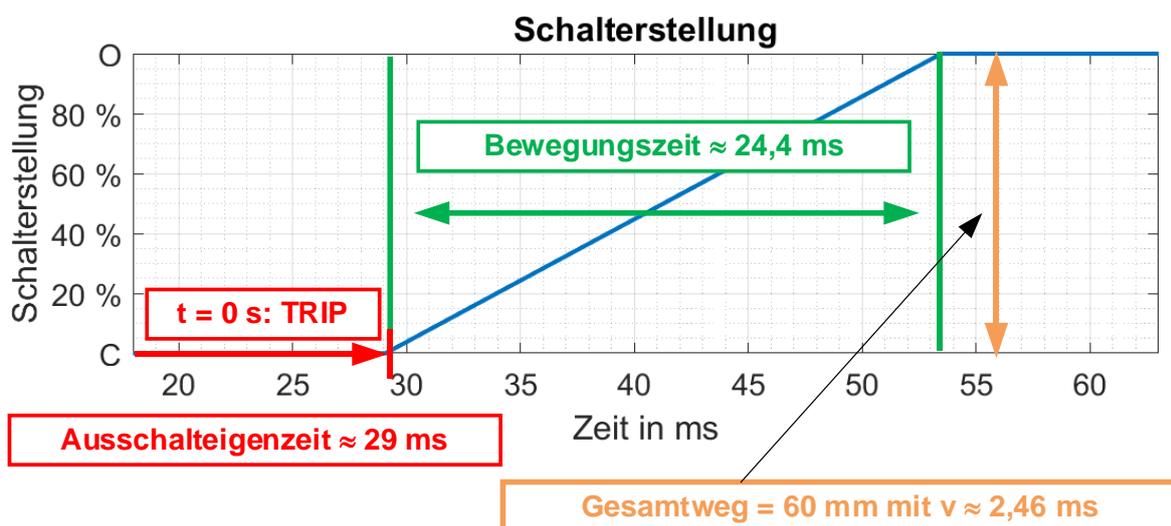


Abbildung 3: Modell für die Schätzung der Schalterstellung

1.5 Besonderheiten von Vakuum-Leistungsschaltern

Im Vergleich zu konventionellen SF6-Hochspannung-LS, können bei Vakuum-LS die Effekte von Wiederzündungen und Non-Sustained Disruptive Discharge (NSDD) vermehrt auftreten. In diesem Sinn sind Wiederzündungen in Kapitel 1.5.1 und NSDDs in Kapitel 1.5.2 weiter ausgeführt. Das Schalten von Drosseln und C-Batterien muss zusätzlich individuell betrachtet werden. Diese Thematiken werden in Kapitel 1.5.3 weiter behandelt.

1.5.1 Wiederzündungen

Die Spannungsfestigkeit der sich öffnenden Schalterpole steigt beim Vakuum-LS sehr rasch an, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Wiederzündungen geringgehalten wird. Tritt dennoch eine Wiederzündung bei geringem Polabstand auf, wird der dann fließende hochfrequente Strom wieder in einem Stromnulldurchgang unterbrochen. Dies kann einen hohen Spannungsanstieg über die Pole zur

Folge haben, was schließlich zu einer weiteren Wiederzündung führen kann. Dieses Phänomen wird als multiple Wiederzündung bezeichnet.

Wiederzündungen können im Allgemeinen in zwei Kategorien unterteilt werden:

- Dielektrische Wiederzündungen treten dann auf, wenn die wiederkehrende Spannung über dem Schalterpol die Isolationsfestigkeit (in Abhängigkeit der Schalterposition) überschreitet. Dieses Überschreiten des Isolationspegels führt schließlich zu einer Wiederzündung bzw. zu einem wiederkehrenden 50-Hz-Stromfluss.
- Thermische Wiederzündungen treten dann auf, wenn die Leitfähigkeit des Plasmas unmittelbar nach dem Stromnulldurchgang zu groß ist und der Lichtbogen nicht komplett erlischt. Thermische Wiederzündungen sind für Vakuum-LS nicht relevant

Abbildung 4, entnommen [4] zeigt multiple dielektrische Wiederzündungen. Dabei treten in Summe 9 Wiederzündungen auf, wobei laut Norm OVE EN IEC 62271-110:2018-09-01, S. 24 diese als eine einzelne Wiederzündung gezählt werden dürfen.

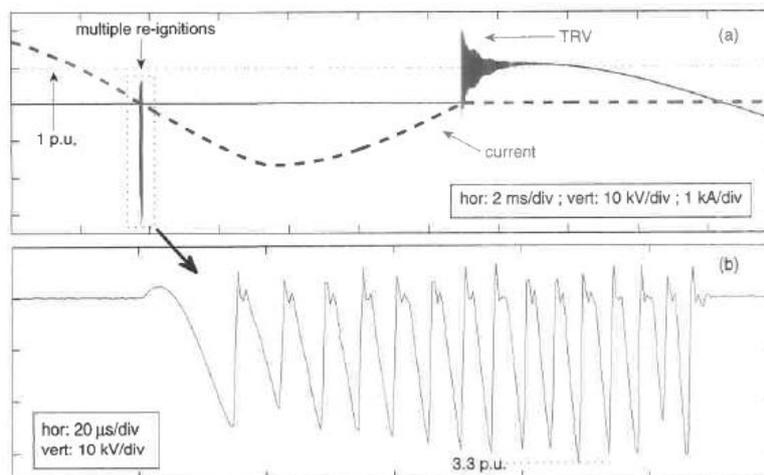


Abbildung 4: Multiple, dielektrische Wiederzündungen ([4])

1.5.2 Non-Sustained Disruptive Discharge (NSDD)

Während der Öffnung der Schalterpole wurden außer Wiederzündungen sog. NSDDs festgestellt. Bei diesem Phänomen, welches speziell bei Vakuum-LS auftritt, entladen sich Streukapazitäten über Streuinduktivitäten, welche sich in unmittelbarer Nähe der Schalterpole befinden, dabei bricht die Spannung über dem betroffenen Schalterpol kurzzeitig zusammen. Diese Entladungen sind mit hochfrequenten Strömen (> 1 MHz) verbunden, welche jedoch unmittelbar nach ihrem Entstehen innerhalb weniger Mikrosekunden wieder unterbrochen werden. Dies führt damit nicht zu einem dauerhaften 50-Hz-Stromfluss, sie ist nicht „nachhaltig“ (sustainable). Danach ist die Isolationsfähigkeit der Schaltstrecke erneut gegeben.

1.5.3 Betriebliche Restriktionen

Gemäß den Spezifikationen des eingesetzten Leistungsschalters treten betriebliche Restriktionen im Hinblick auf das Schalten von induktiven und kapazitiven Betriebsmitteln auf.

1.5.3.1 Schalten der Kompensationsdrossel

Das Ausschalten von Kompensationsdrosseln (kleine induktive Ströme) zählt zu den anspruchsvollsten Schaltaufgaben von Leistungsschaltern. Ein möglicher Stromabriss des zu unterbrechenden Stroms vor dem natürlichen Stromnulldurchgang in Kombination mit der in der Kompensationsdrossel gespeicherten magnetischen Energie führt zu hohen Anforderungen an die dielektrischen Wiederverfestigungskennlinie des Leistungsschalters. Der Stromabriss führt im Allgemeinen sowohl zu einer höheren Steilheit als auch zu einer größeren Amplitude der wiederkehrenden Spannung (transient recovery voltage, TRV). Bei einer kurzen Lichtbogenzeit, d.h. wenn die Öffnung der Schalterpole unmittelbar vor dem natürlichen Stromnulldurchgang erfolgt, können diese steilen und hohen TRVs die Wahrscheinlichkeit von (multiplen) Wiederezündungen erhöhen. Diese wiederum stellen eine große Belastung für die Isolierung der Drosseln dar. Dieser Effekte treten sowohl bei Vakuum-LS als auch bei SF₆-Leistungsschaltern auf.

Ein nicht ordnungsgemäßes Schalten von Drosseln kann sowohl das Schaltgerät als auch die zu schaltende Drossel gefährden. Bei gasisolierten Hochspannungs-Leistungsschaltern hat sich das gesteuerte Schalten (point-on-wave) als sichere technische Lösung durchgesetzt, welche jedoch einzeln schaltbare Schalterpole voraussetzt. Für Vakuumleistungsschalter der 145-kV-Ebene und darunter wird üblicherweise die Installation von RC-Filterkreisen räumlich nahe dem Schalter angewandt, um ein sicheres Ausschalten der Drosselbetriebsströme zu gewährleisten.

1.5.3.2 Schalten der C-Batterie

Beim Einschalten von C-Batterien treten besondere Belastungen für Leistungsschalter auf. Es kommt zu transienten Inrush-Strömen, welche sich durch hochfrequente Ströme mit Amplituden im kA-Bereich auszeichnen. Die Frequenz hängt dabei von der Kapazität der C-Batterie, sowie von der Zuleitungsimpedanz und der Verdrosselung der C-Batterie ab. Diese Ströme belasten die in der Einspeisung installierten Betriebsmittel, aber besonders auch die Kontakte des Leistungsschalters.

Die Typprüfung zum Schalten von kapazitiven Lasten beschränkte sich bei der ersten Generation des 3AV1FG auf das Schalten von leerlaufenden Kabeln und Freileitungen, es wird damit eine gewissen Mindestinduktivität im zu schaltenden Kreis vorausgesetzt. Aufgrund der zum Zeitpunkt der Versuche noch nicht erfolgten Prüfung des Einschaltens von Kondensatorbänken durch den Hersteller ist diese Schaltaufgabe für den installierten Schalter formal nicht freigegeben und es besteht daher keine Garantie einer ordnungsgemäßen Funktion. Vom Schalten der C-Batterie durch den Vakuum-LS ist daher abzusehen.

2 Detailbetrachtung: Betriebsschaltungen I (22.10.2024)

Dieses Kapitel behandelt die durchgeführten Betriebsschaltungen I am 22. Oktober 2024. Inkludiert ist dabei die Bespannung der Freileitung 122/8 (Kapitel 2.1) sowie die Schaltung des nahen SS-Trenners bei offenem LS (Kapitel 2.2). Die zugehörigen Einlinienschaltbilder sind dabei in Abbildung 5 dargestellt. Weitere Kurvenverläufe zu ähnlichen Versuchen, welche jedoch für die folgende Bewertung nicht zusätzlich angeführt sind, können dem Anhang entnommen werden (Kapitel 7.4). Die Abschaltung einer leerlaufenden Freileitung durch den Vakuum-LS konnte aufgrund messtechnischer Probleme an diesem Tag nicht aufgezeichnet werden und ist zusammen mit dem Schalten eines leerlaufenden Transformators in Kapitel 3 dokumentiert. Diese Betriebsschaltungen wurden am 13. März 2025 nachträglich durchgeführt.

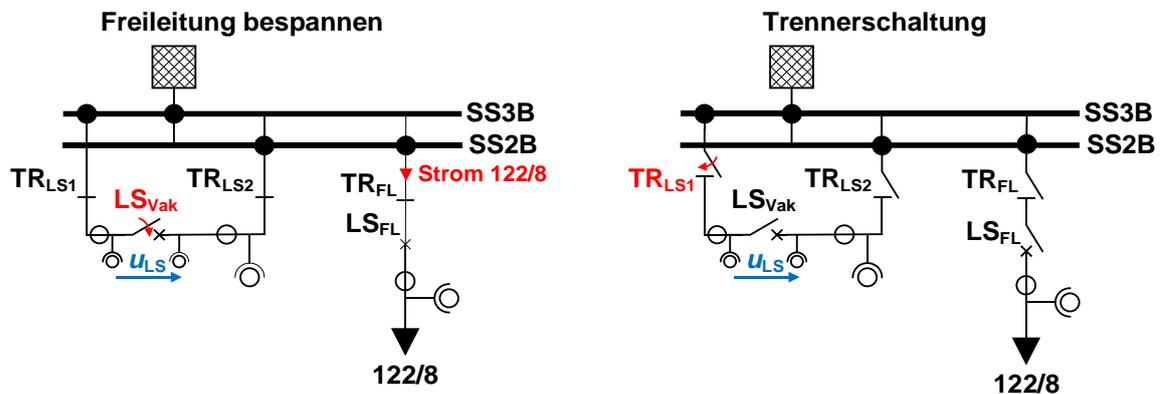


Abbildung 5: Einlinienschaltbild für Bespannung der Freileitung durch Vakuum-LS (links) und Schalten eines nahen Trenners TR_{LS1} bei offenem Vakuum-LS (rechts)

Repräsentative Betriebsschaltungen:

- Freileitung bespannen (Kapitel 2.1)
- Schaltung eines nahen Sammelschientrenners (Kapitel 2.2)

2.1 Freileitung bespannen

Dieses Kapitel behandelt das Zuschalten der Freileitung 122/8 durch den Vakuum-LS. In Abbildung 5, links ist das Einlinienschaltbild dieses Versuchs dargestellt. In Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die hochfrequenten Messergebnisse für die gemessenen Spannungen vor (speiseseitig), über, und nach (abzweigsseitig) dem Vakuum-LS dargestellt. Abbildung 9 stellt den Zeitverlauf der Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler dar. Abbildung 10 zeigt den abzweigsseitigen Spannungsverlauf sowie den zugehörigen kapazitiven Strom der Freileitung (Abzweig 122/8). Der Schaltvorgang beginnt zum Zeitpunkt $t = 0$ s, wobei die Einschalteigenzeit des Vakuum-LS bei 79 ms liegt [3]. Das physikalische Steuersignal wurde demnach bei ca. $t = -79$ ms angelegt.

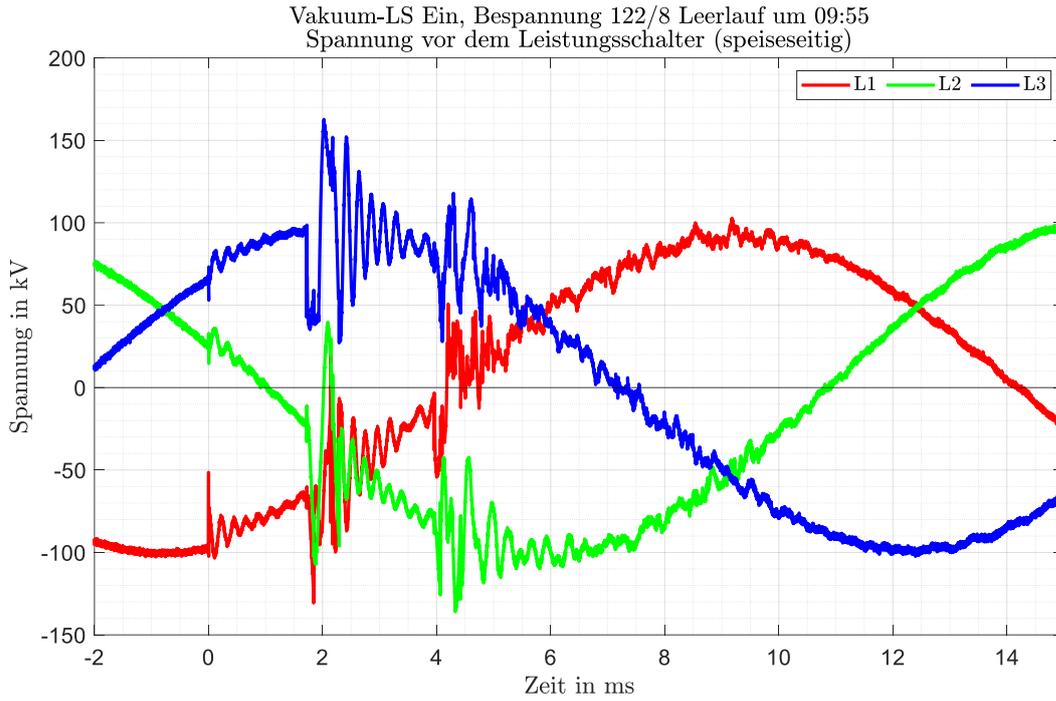


Abbildung 6: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuum-LS (speiseseitig)

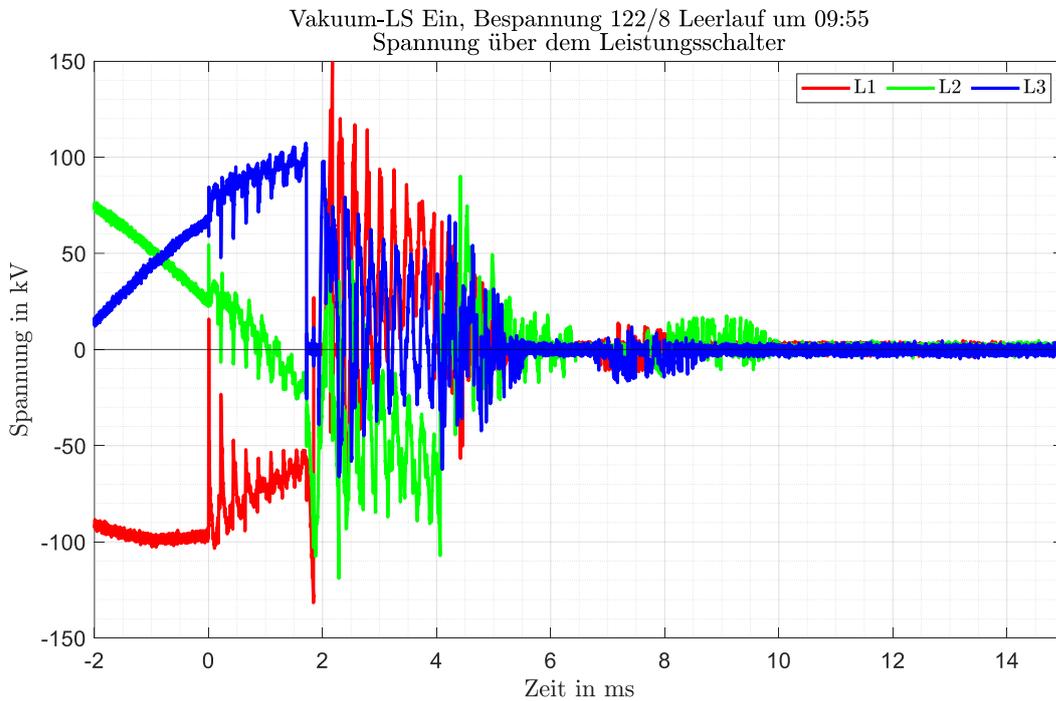


Abbildung 7: Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

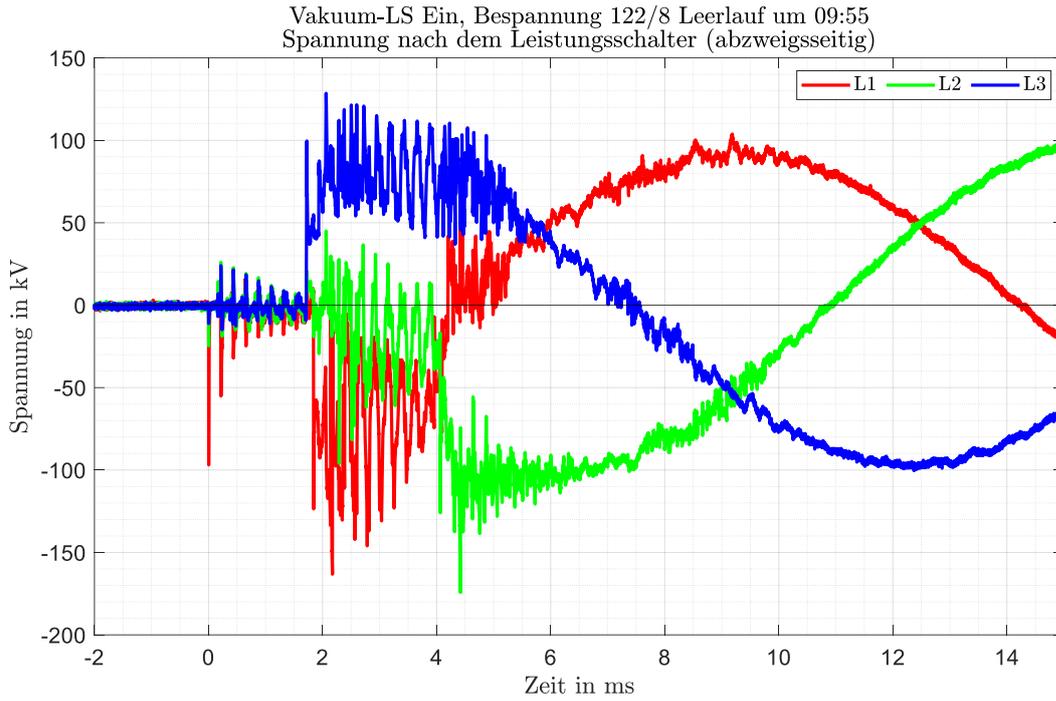


Abbildung 8: Spannungsmessung (CR-Teiler) nach Vakuum-LS (abzweigsseitig)

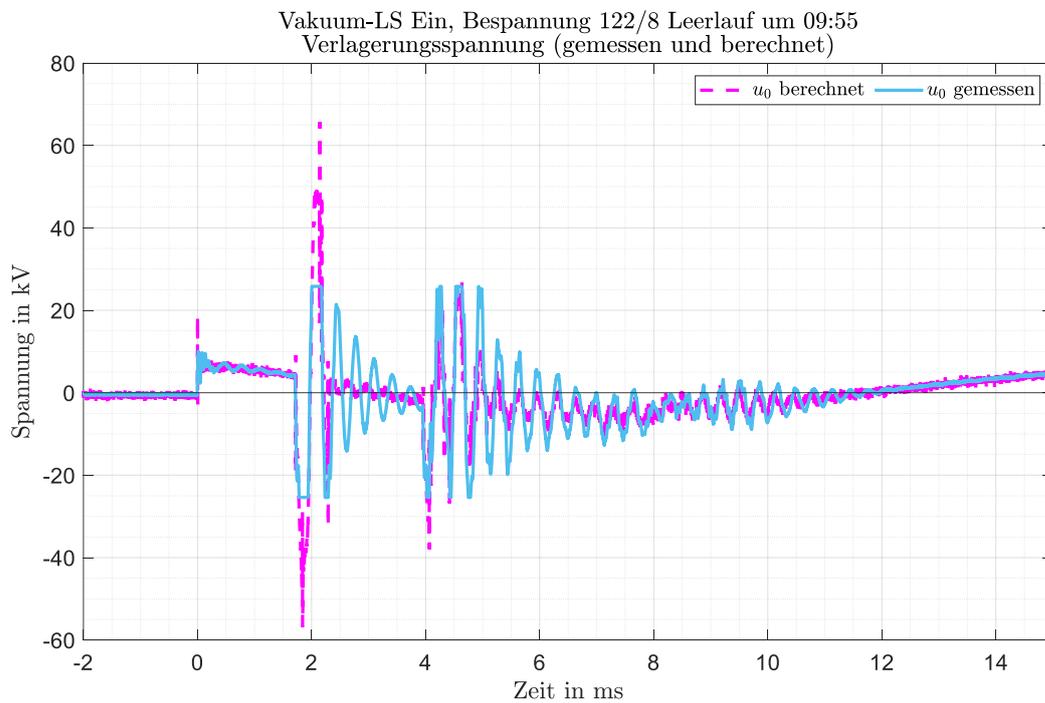


Abbildung 9: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

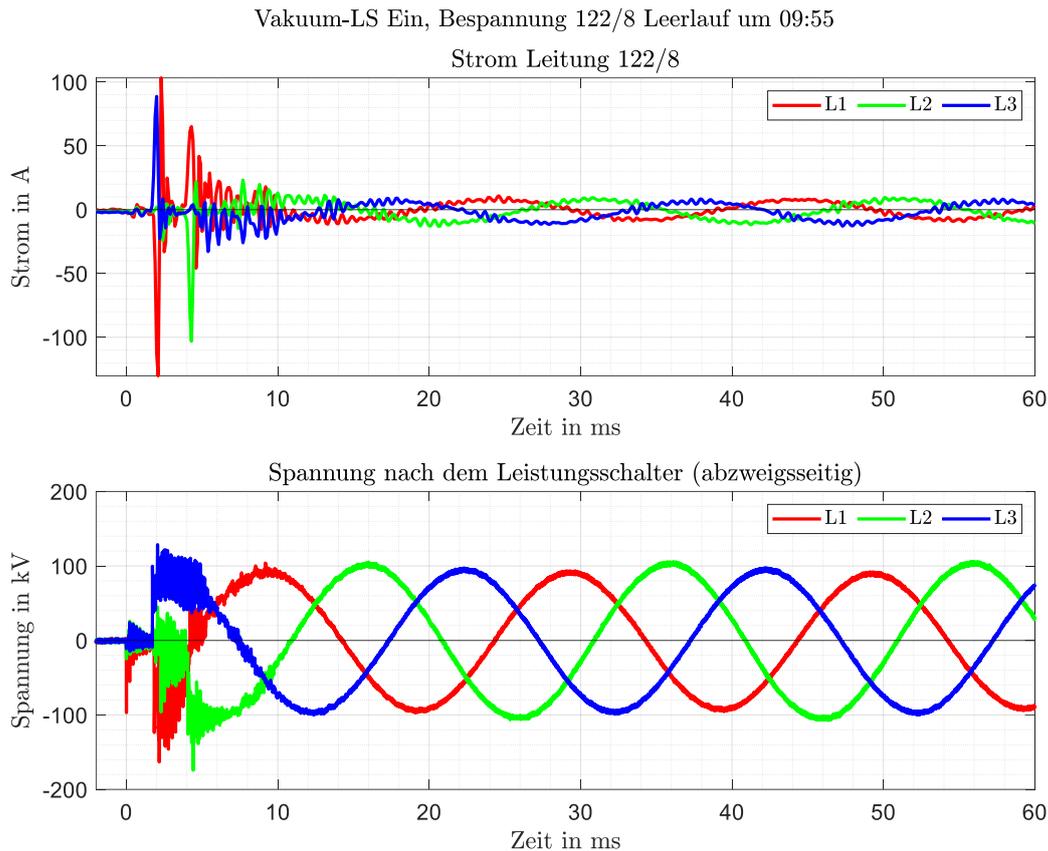


Abbildung 10: Induktive Strommessung Abzweig Leitung 122/8 (oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) abzweigsseitig

2.2 (Zu-) Schaltung naher SS-Trenner

Die folgenden Abbildungen visualisieren den Zeitverlauf der Spannung bei der Zuschaltung des speiseseitigen SS-Trenner TR_{LS1} bei geöffnetem Vakuum-LS und abzweigsseitigen Trenner TR_{LS2} . Ein Einlinienschaltbild dieses Versuchs ist in Abbildung 5 (rechts) dargestellt. Die hochfrequenten Messergebnisse für die gemessenen Spannungen speiseseitig (Abbildung 11), über (Abbildung 12), und abzweigsseitig (Abbildung 13) dem Vakuum-LS sind folgend dargestellt.

Eine Detailbetrachtung der Spannungen über dem Vakuum-LS sowie die abzweigsseitigen Spannungen sind in Abbildung 14 dargestellt. Große Spannungsänderungen über den LS (großes du/dt) übertragen sich kaum auf die abzweigsseitige Seite des Vakuum-LS. Die Spannungskopplung im Nullsystem hat hier einen deutlich stärkeren Einfluss. Die Abschaltung des nahen SS-Trenner ist im Anhang in Kapitel 7.7.1 dargestellt.

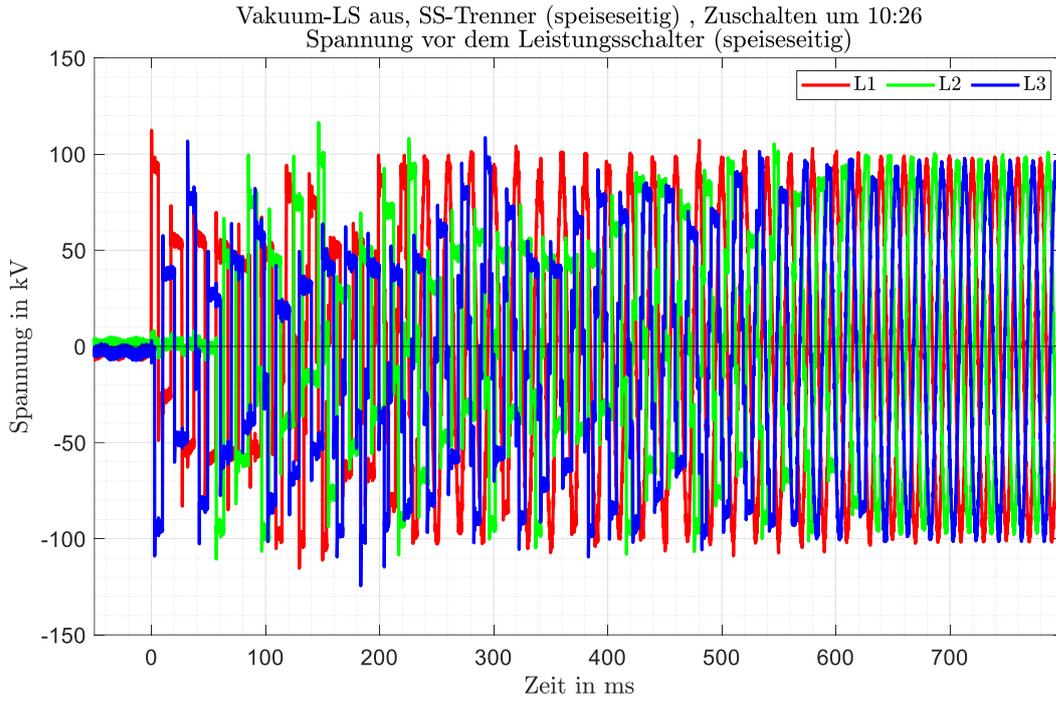


Abbildung 11: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuum-LS (speiseseitig)

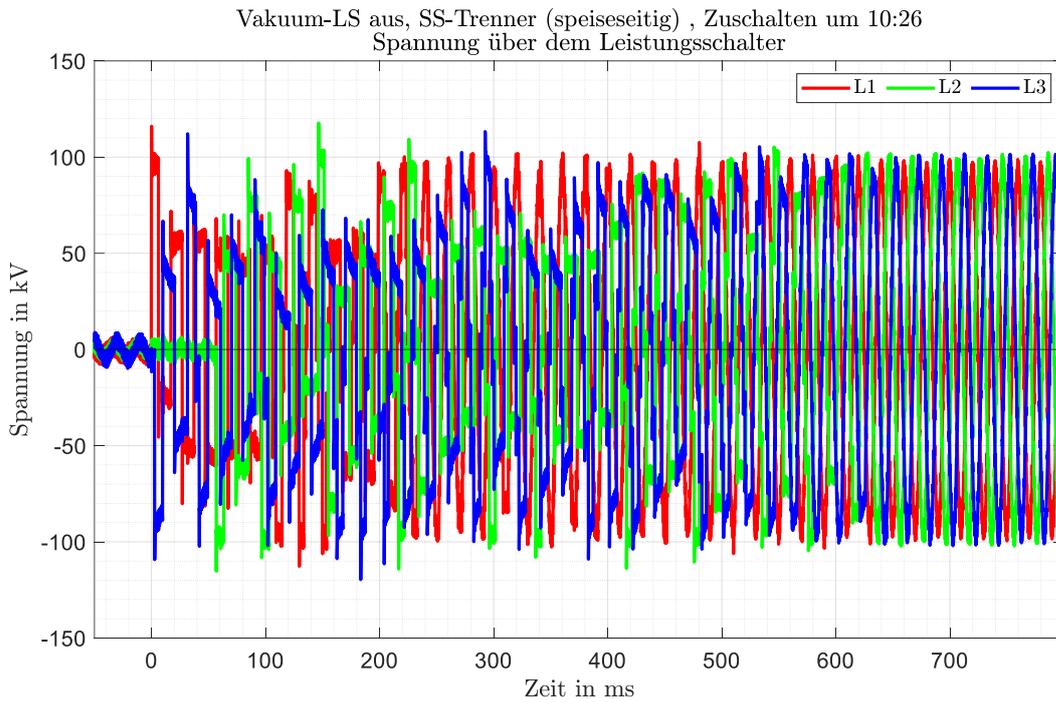


Abbildung 12: Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

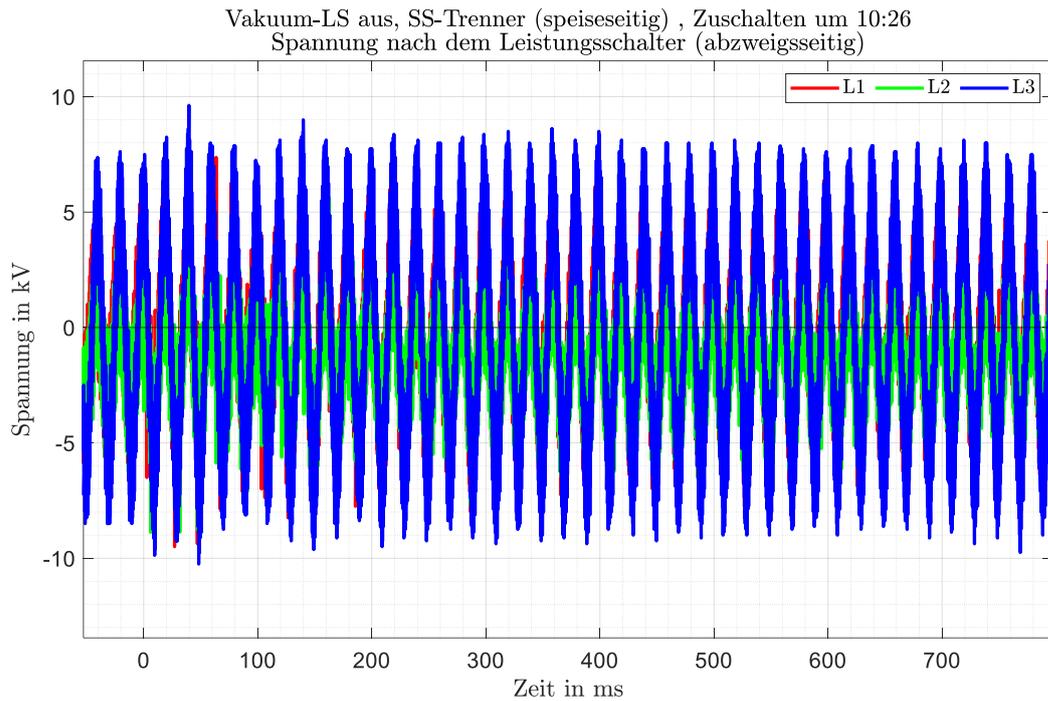


Abbildung 13: Spannungsmessung (CR-Teiler) nach Vakuum-LS (abzweigsseitig)

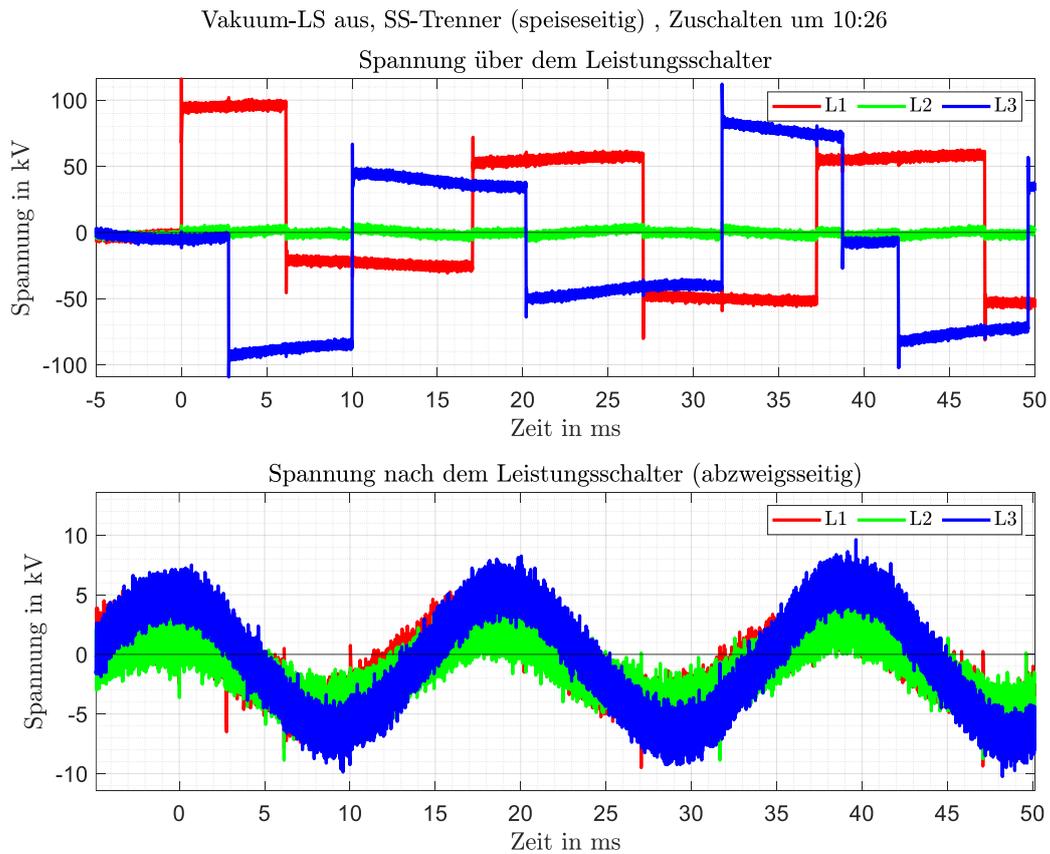


Abbildung 14: Detailbetrachtung der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (oben) und nach Vakuum-LS (abzweigsseitig, unten)

3 Detailbetrachtung: Betriebsschaltungen III

Dieses Kapitel behandelt die nachträglich durchgeführten Betriebsschaltungen III am 13. März 2025. Bei diesen Messungen war das faseroptische Strommesssystem (FOCS) nicht im Einsatz. Die Strommessung erfolgte über die Schutzkerne der installierten Kombiwandler. Die Abtastrate lag dabei bei 10 kHz. Die hochfrequente Spannungsmessung über dem Vakuum-LS erfolgte erneut über CR-Teiler und per Oszilloskop. Die Abtastrate lag dabei zwischen 625 kHz und 1,25 MHz.

Bei diesem Schaltversuch wurde zusätzlich das Einschaltsteuersignal des Vakuum-LS gemessen. Der Zeitpunkt des Einschaltsteuersignals ist bei Einschaltversuchen mit $t = 0$ ms definiert. Da das Ausschaltensignal nicht gemessen wurde und keine Störschriebe zur Verfügung standen, kann bei dieser Versuchsserie keine Aussage über die Position der Leistungsschalterpole bei den Ausschaltversuchen getroffen werden.

Eine vollständige Auflistung aller Versuche ist in Tabelle 11 hinterlegt. Die Abschaltung der leerlaufenden Freileitung 122 / 8 durch den Vakuum-LS ist in Kapitel 3.1 dokumentiert. Kapitel 3.2 und 3.3 behandeln die Zu- und Abschaltung des leerlaufenden Transformators RHU3. Die Bespannung erfolgt dabei ausschließlich über die 110-kV-Seite. Die Abschaltung des Inrushstromes von RHU3 ist in Kapitel 3.4 dokumentiert. Die zu den Versuchen zugehörigen Einlinienschaltbilder sind in Abbildung 15 dargestellt.

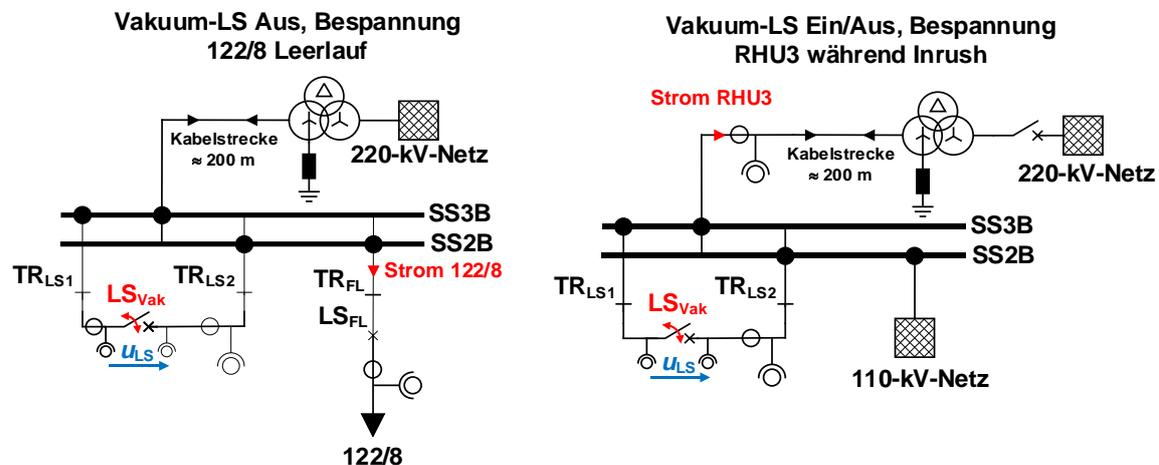


Abbildung 15: Einlinienschaltbild für Bespannung der Freileitung (links) und Leerlauf-Schalten des Transformators durch den Vakuum-LS

Repräsentative Betriebsschaltungen:

- Ausschalten des Vakuum-LS bei leerlaufender Freileitung 122 / 8 (Kapitel 3.1)
- Bespannen des leerlaufenden Transformators RHU3 durch den Vakuum-LS (Kapitel 3.2)
- Ausschalten des leerlaufenden Transformators RHU3 durch den Vakuum-LS (Kapitel 3.3) nach Abklingen der Inrushströme
- Ausschalten des leerlaufenden Transformators RHU3 mit Inrushstrom durch den Vakuum-LS (Kapitel 3.4)

3.1 Vakuum-LS Aus, Bespannung 122/8 Leerlauf

Dieses Kapitel dokumentiert die Ausschaltung der leerlaufenden Freileitung 122 / 8 durch den Vakuum-LS. Das zugehörige Einlinienersatzschaltbild ist dabei in Abbildung 15 (links) dargestellt. Analog zu diesem Versuch ist in Kapitel 2.1 die Bespannung der Freileitung 122 / 8 durch den Vakuum-LS dokumentiert.

Abbildung 16 stellt den Strom durch den Vakuum-LS (oben) sowie die Spannung über den Vakuum-LS (unten) dar. Die wiederkehrende Spannung erscheint bei $t = 0$ ms. Dabei handelt es sich bei Phase L2 um den erstlöschenden Pol. Die höchste Spannung über die Schalterpole tritt in Phase L2 mit einem Wert von 214 kV auf. Die hochfrequenten Messergebnisse für die gemessenen Spannungen speiseseitig, über und abwärtsseitig dem Vakuum-LS sind in Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt. Abbildung 20 zeigt den berechneten Zeitverlauf der Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler.

In Abbildung 18 ist die Auswirkung des Stromabrisses in Phase L2 deutlich erkennbar. Die Spannung hat bei $t = 0$ ms einen negativen Ausschlag, bevor die Spannung über den Schalterpolen ihr positives Maximum zum Zeitpunkt $t = 10,4$ ms erreicht.

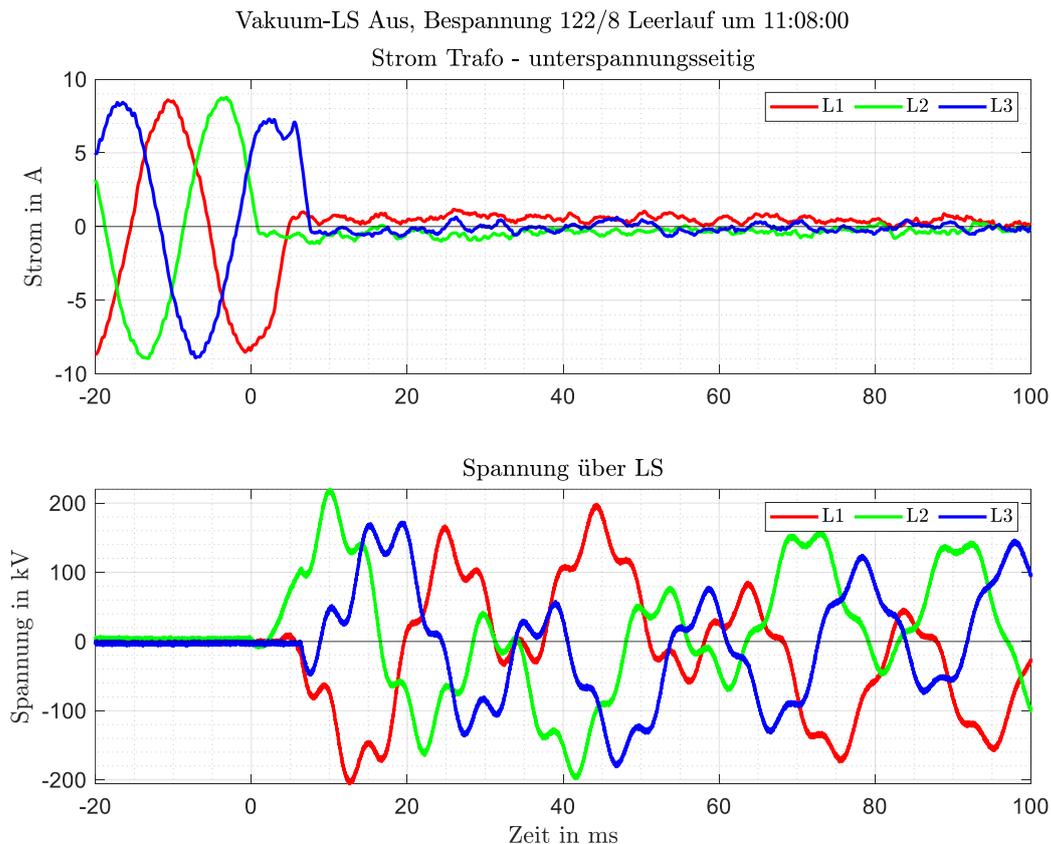


Abbildung 16: Strom auf der Unterspannungsseite des Transformators und Spannung über Vakuum-LS

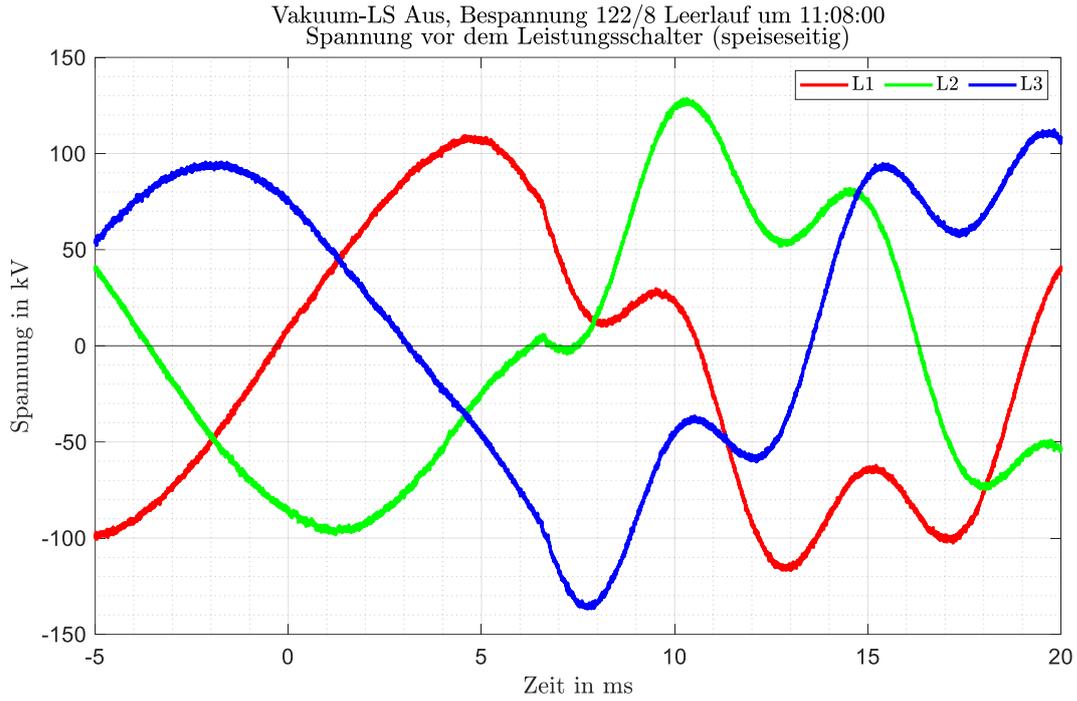


Abbildung 17: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuum-LS (speiseseitig)

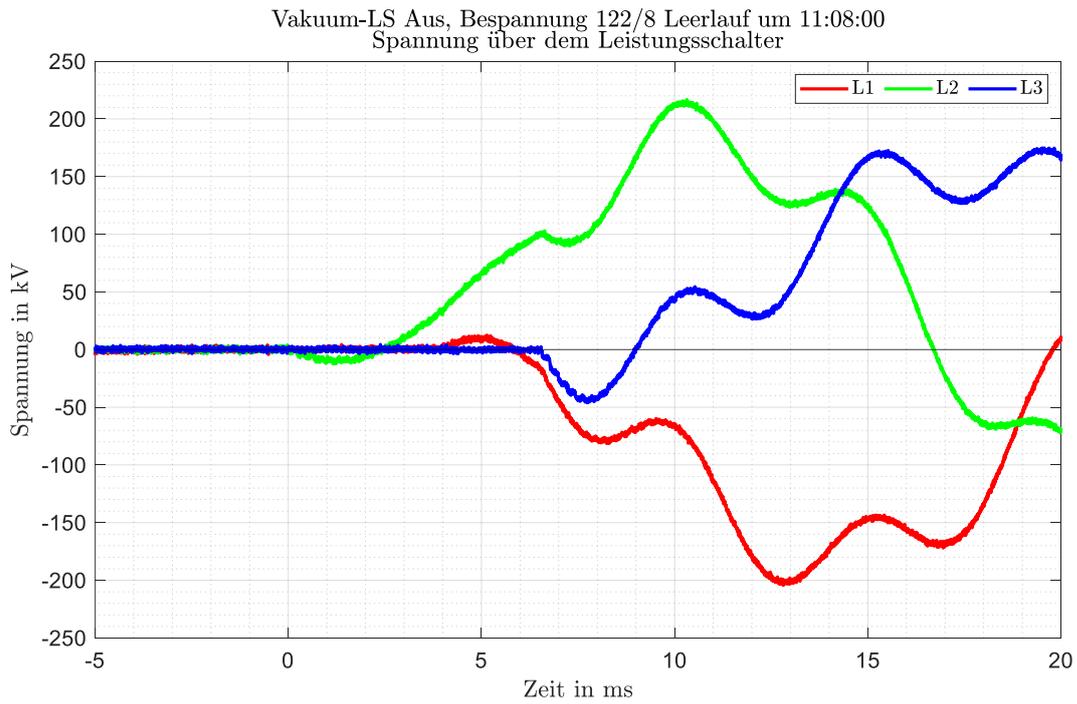


Abbildung 18: Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

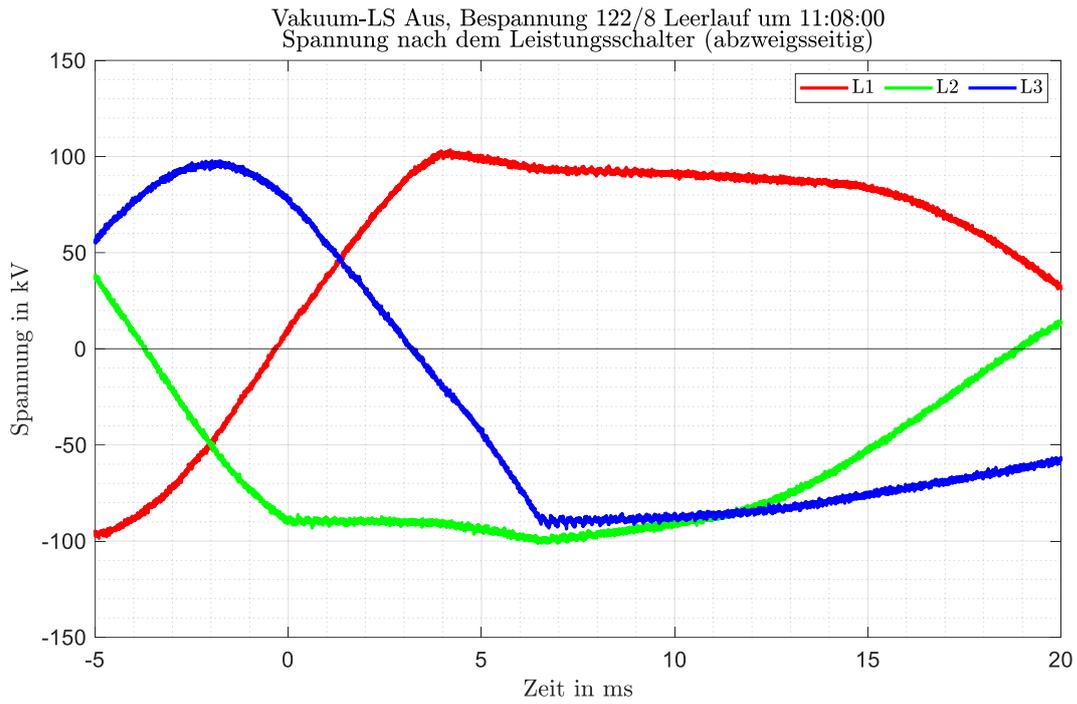


Abbildung 19: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuum-LS (abzweigsseitig)

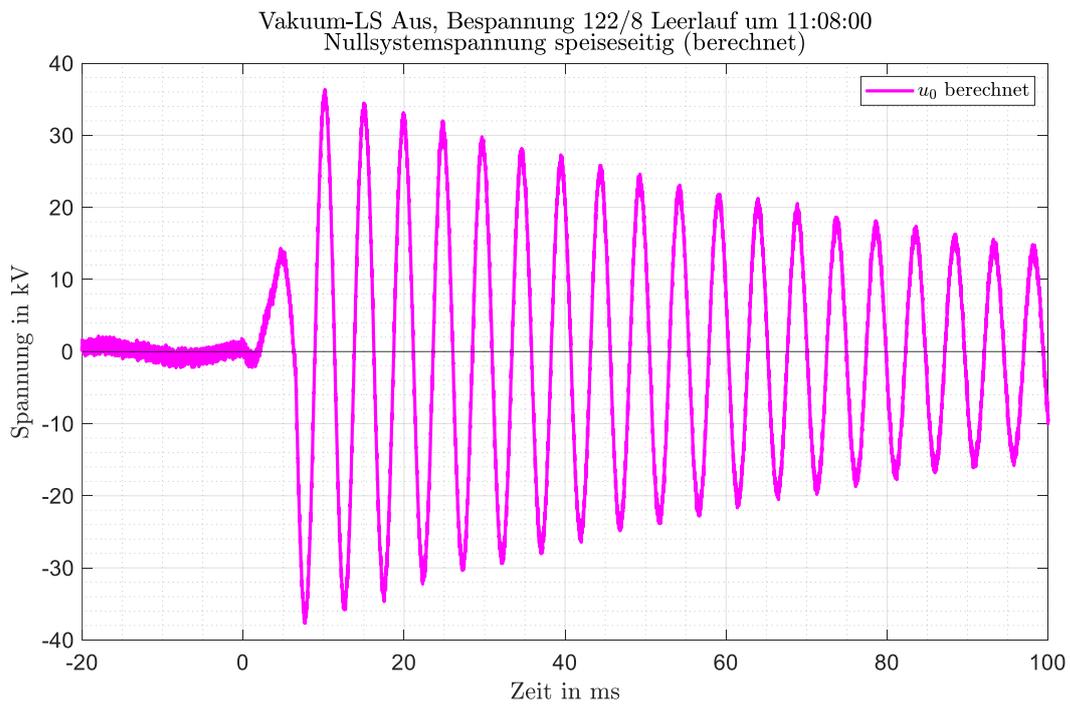


Abbildung 20: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler

3.2 Vakuum-LS Ein, Bespannung RHU3

Dieses Kapitel dokumentiert das Bespannen des Transformators RHU3 durch den Vakuum-LS. Das zugehörige Einlinienersatzschaltbild ist in Abbildung 15 (rechts) dargestellt.

Abbildung 21 stellt den unterspannungsseitigen Stromverlauf des Transformators (oben) sowie die Spannung über den Leistungsschalter (unten) dar. Der Zeitpunkt $t = 0$ ms entspricht jenem Zeitpunkt, bei dem das Steuersignal für den Leistungsschalter anliegt. Der Inrushstrom ist bei diesem Versuch in den Phasen L2 und L3 ausgeprägt mit einer Spitze von bis zu 2,3 kA.

Abbildung 22 stellt den detaillierten Zeitverlauf des unterspannungsseitigen Stromverlaufs sowie der Spannung über den Leistungsschalter dar. Erste Vorzündungen erscheinen bei ca. $t = 76$ ms. Der Schaltvorgang ist bei $t = 82$ ms abgeschlossen, woraufhin der Inrushstrom des Transformators zu fließen beginnt.

Die hochfrequenten Messergebnisse für die gemessenen Spannungen speiseseitig, über und abweigseitig dem Vakuum-LS sind in Abbildung 23, Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt. Abbildung 26 zeigt den berechneten Zeitverlauf der Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler.

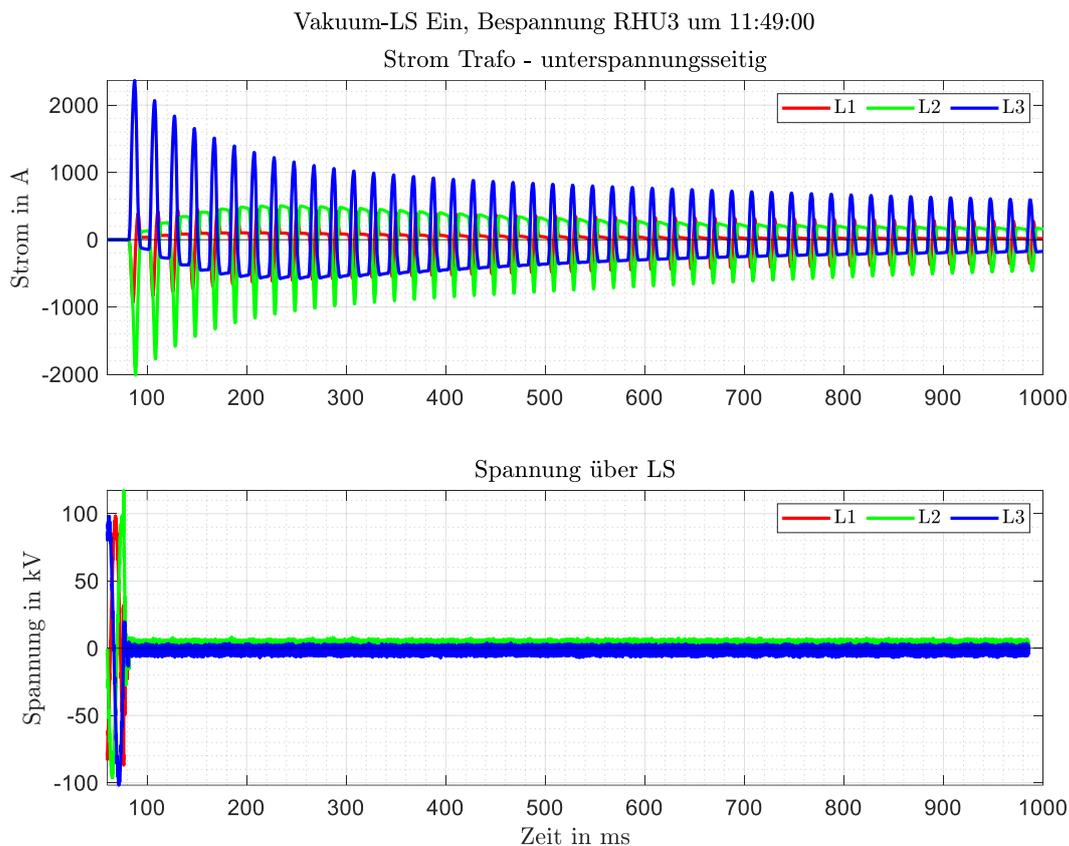


Abbildung 21: Strom auf der Unterspannungsseite des Transformators und Spannung über Vakuum-LS

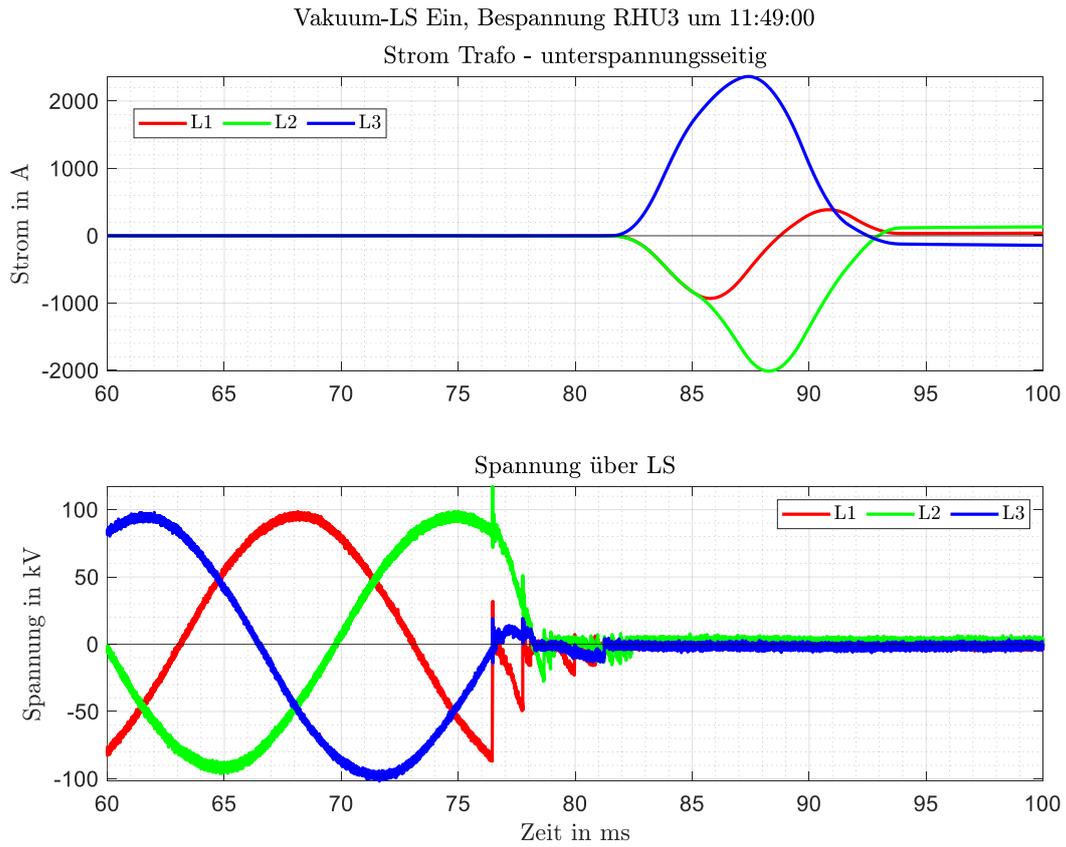


Abbildung 22: Strom auf der Unterspannungsseite des Transformators und Spannung über Vakuum-LS

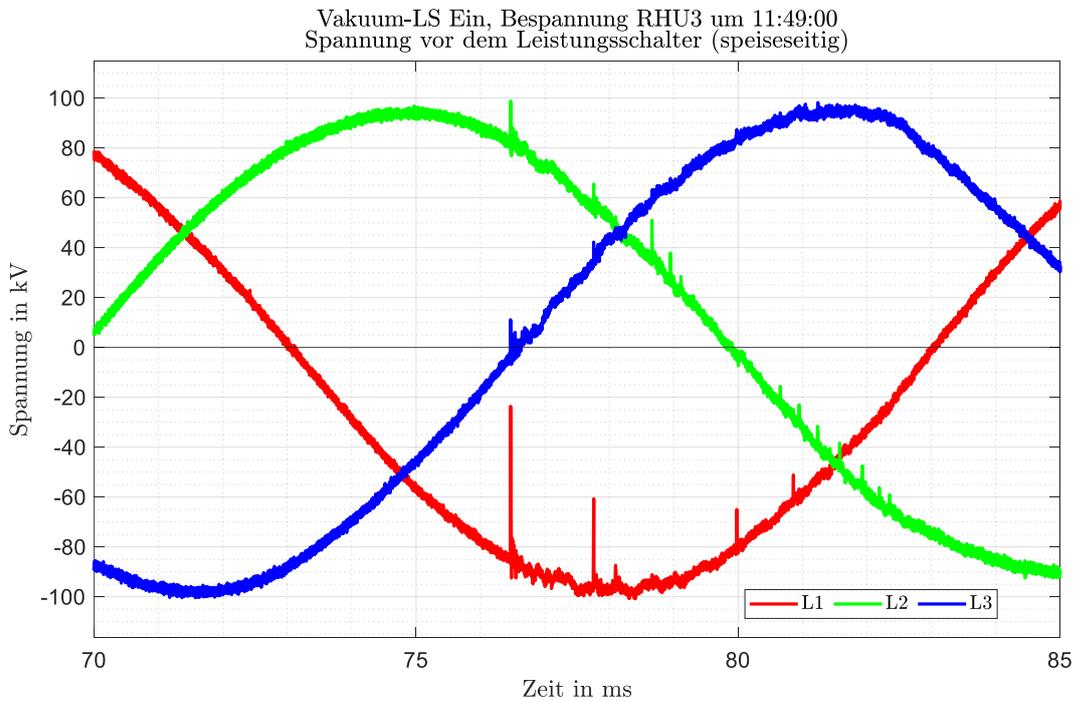


Abbildung 23: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuum-LS (speiseseitig)

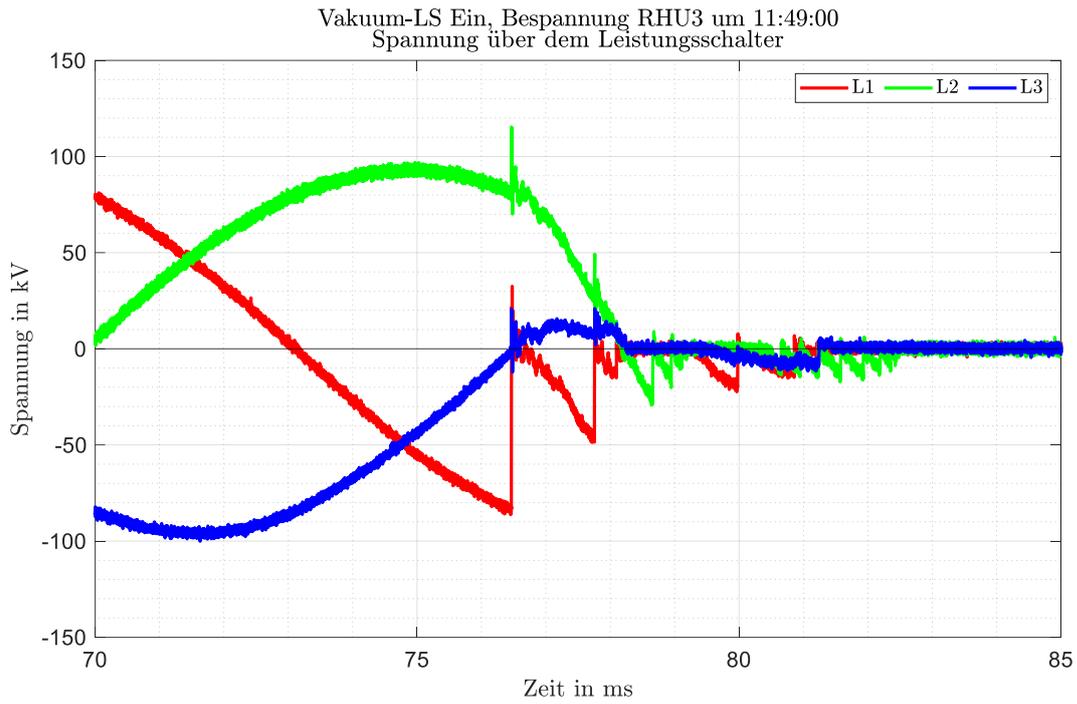


Abbildung 24: Spannungsmessung (CR-Teiler) über Vakuum-LS

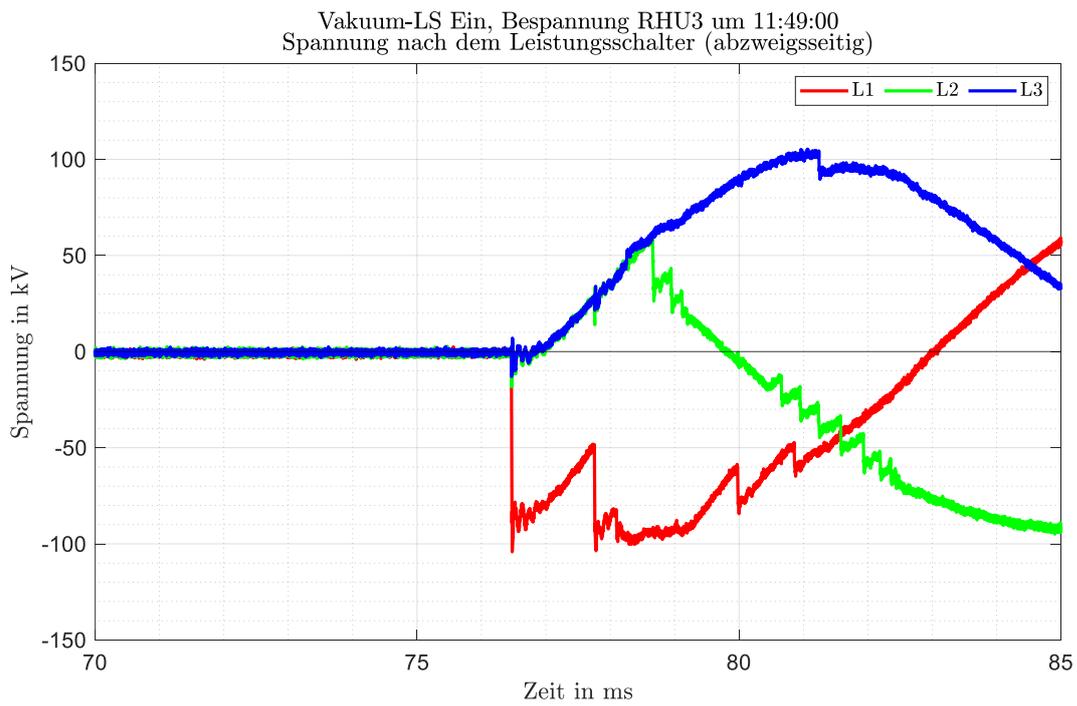


Abbildung 25: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuum-LS (abzweigsseitig)

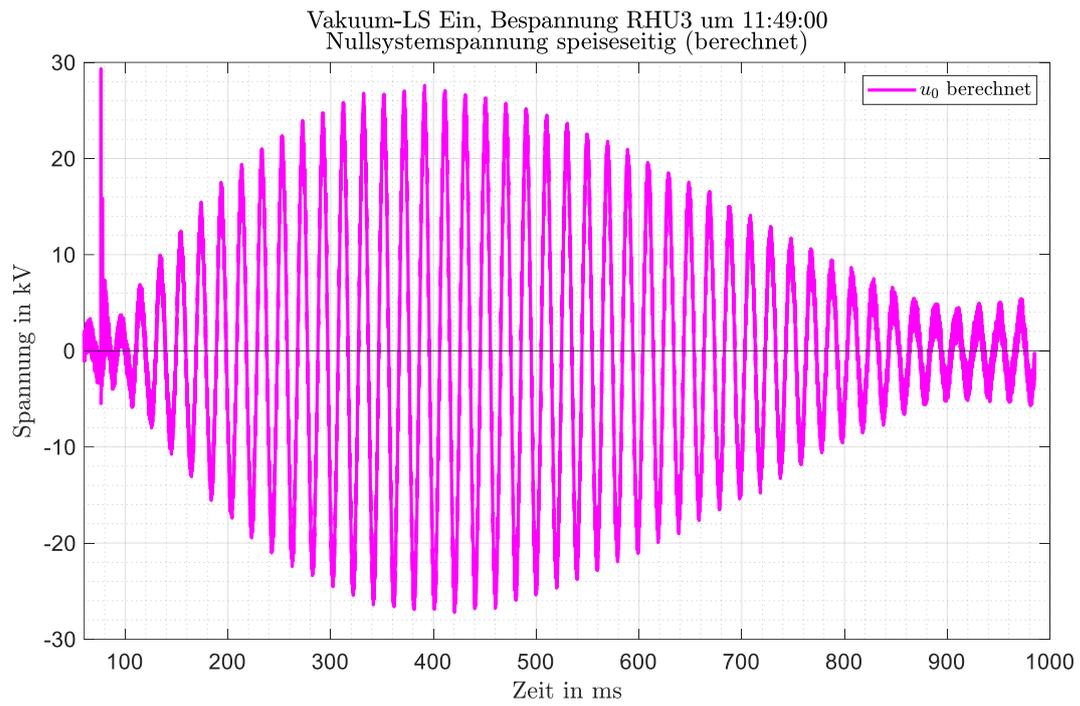


Abbildung 26: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler

3.3 Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3

Dieses Kapitel dokumentiert das Abschalten des Transformators RHU3 durch den Vakuum-LS im quasi-eingeschwungenen Zustand (Inrush nahezu abgeklungen). Das zugehörige Einlinienersatzschaltbild ist dabei in Abbildung 15 (rechts) dargestellt.

Abbildung 27 stellt den unterspannungsseitigen Stromverlauf des Transformators (oben) sowie die Spannung über den Leistungsschalterpolen (unten) dar. Der Zeitpunkt $t = 0$ ms entspricht dem Zeitpunkt des Erscheinens der wiederkehrenden Spannung, welche gleichzeitig in allen drei Phasen auftritt. Die wiederkehrende Spannung steigt dabei nur sehr langsam an und erreicht Spitzenwerte im Bereich der Betriebsspannung.

Die hochfrequenten Messergebnisse für die gemessenen Spannungen speiseseitig, über und abweigseitig dem Vakuum-LS sind in Abbildung 28, Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt. Abbildung 31 zeigt den berechneten Verlauf der Verlagerungsspannung anhand des speiseseitigen CR-Teilers. Bei dem Ausschaltvorgang tritt in Phase L1 eine Wiederzündung und in Phase L3 zwei Wiederzündungen auf. Da der Zeitpunkt des Ausschaltsignals des Leistungsschalters nicht bekannt ist, kann keine Aussage über die Position der Schalterpole getroffen werden. Bei vier vergleichbaren Versuchen sind keine Wiederzündungen aufgetreten (siehe 7.8.1). Ein ungünstiger Schaltwinkel ist daher als Ursache der Wiederzündungen anzunehmen.

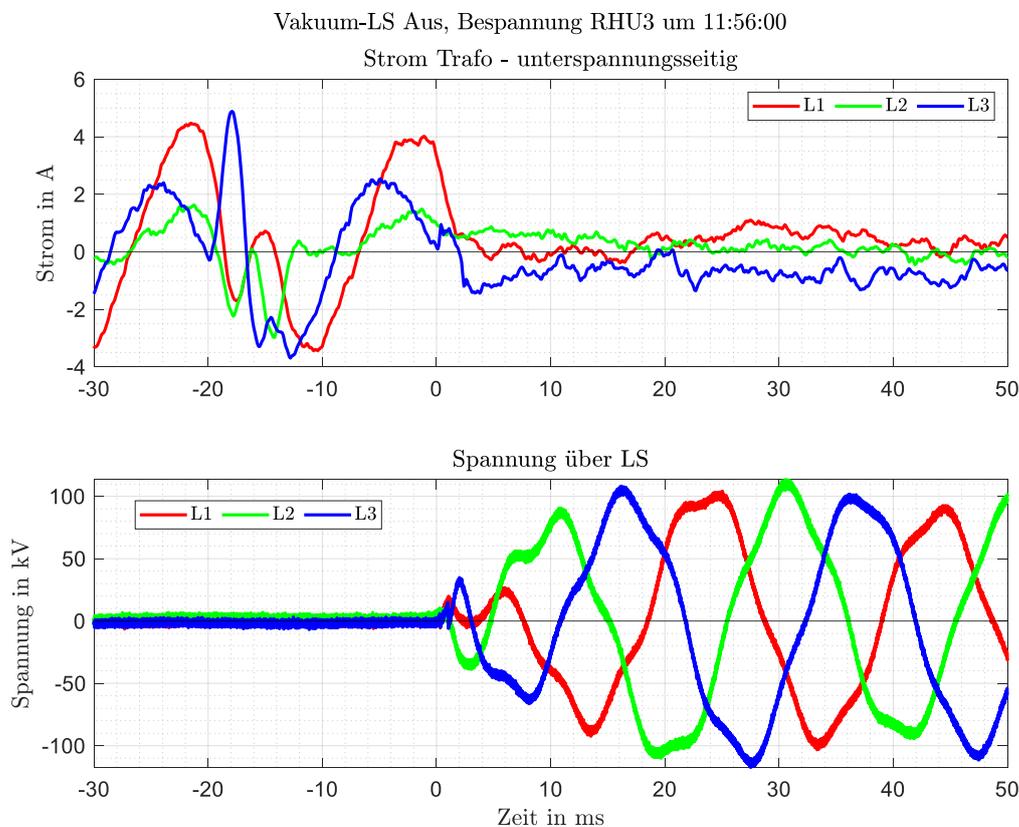


Abbildung 27: Strom auf der Unterspannungsseite des Transformators und Spannung über Vakuum-LS

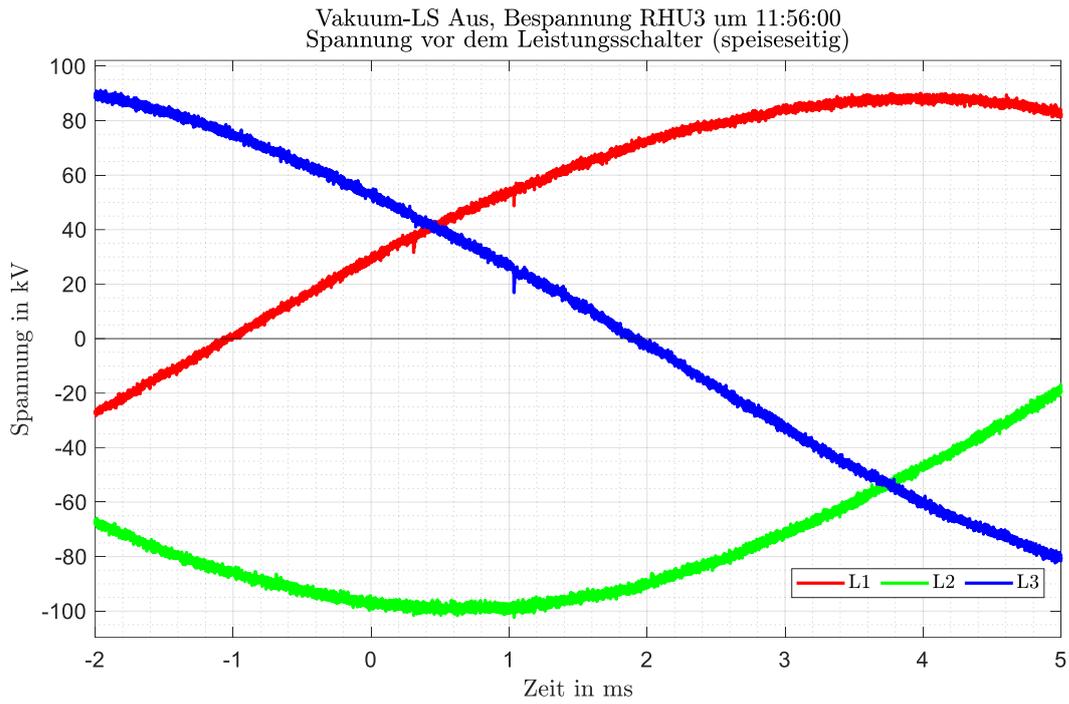


Abbildung 28: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuum-LS (speiseseitig)

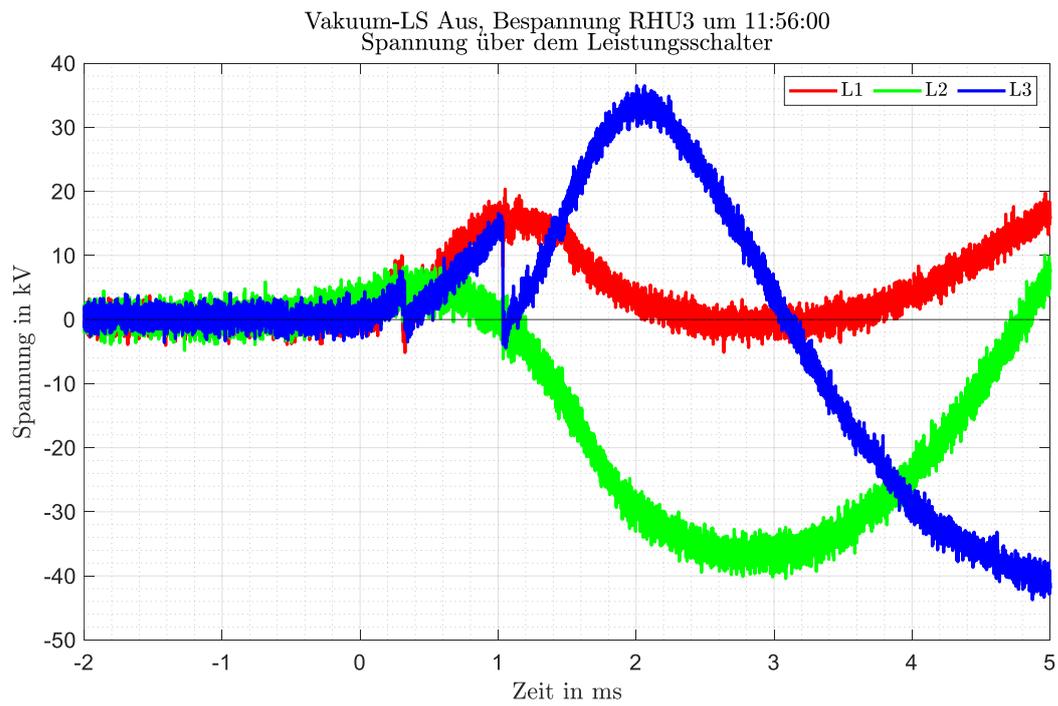


Abbildung 29: Spannungsmessung (CR-Teiler) über Vakuum-LS

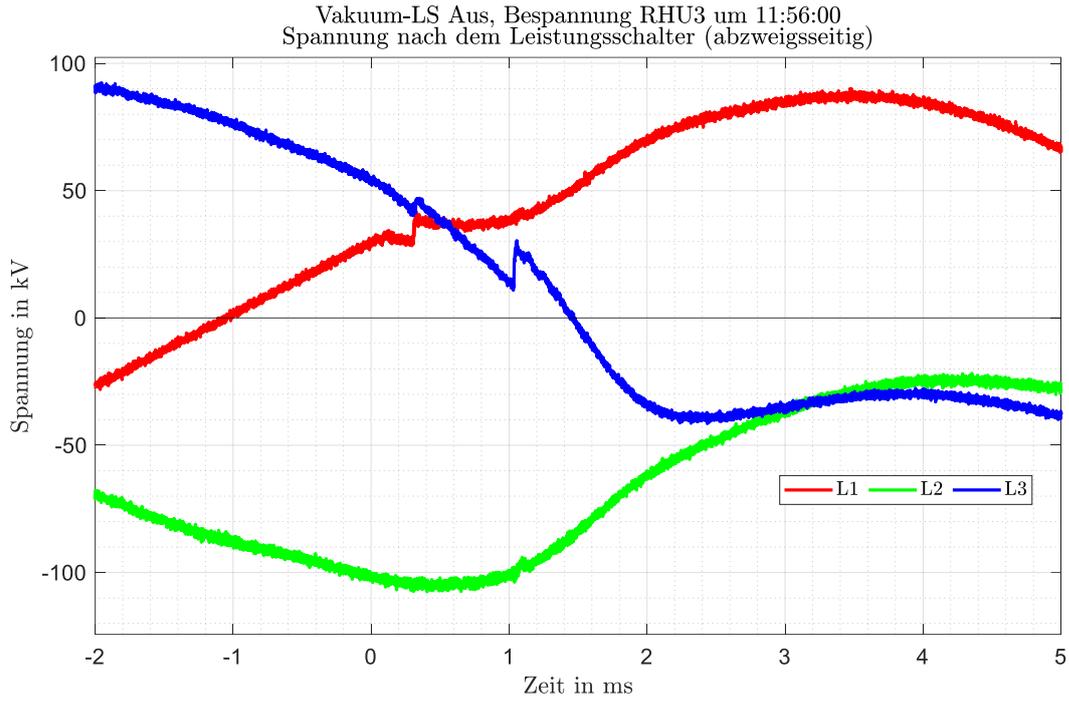


Abbildung 30: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuum-LS (abzweigsseitig)

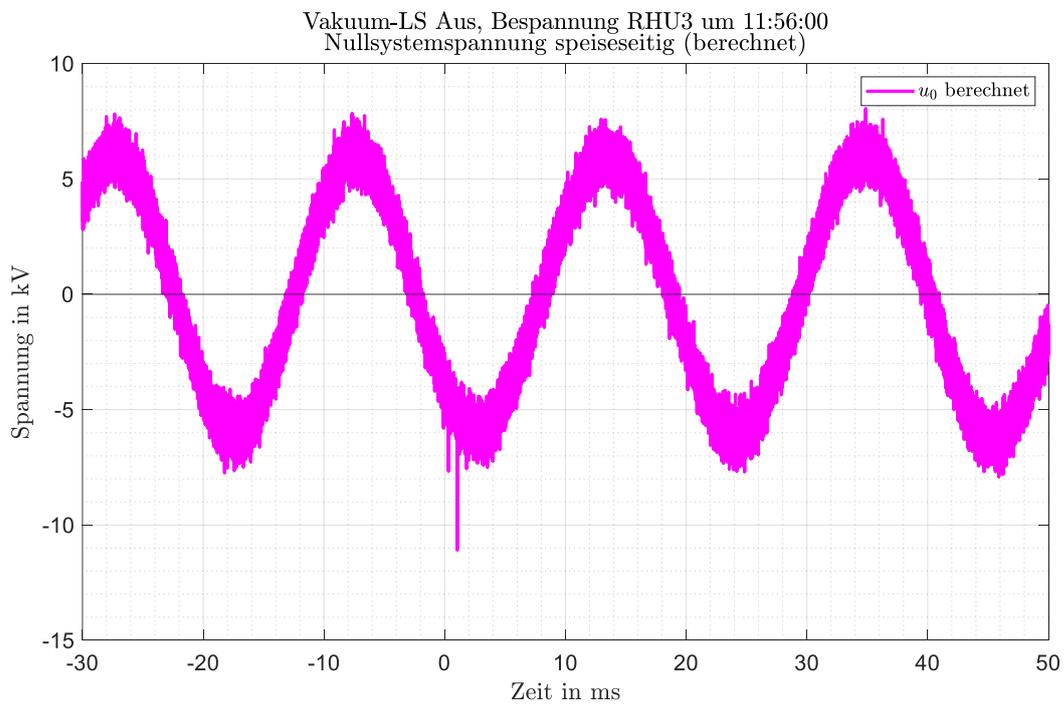


Abbildung 31: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler

3.4 Vakuum-LS Ein / Aus, Bespannung RHU3 während Inrush

Dieses Kapitel dokumentiert das Ein- und Ausschalten des Transformators RHU3 über die 110-kV-Seite durch den Vakuum-LS, wobei der Fokus auf dem Ausschalten des Inrushstromes durch den Vakuum-LS liegt. Das zugehörige Einlinienersatzschaltbild ist dabei in Abbildung 15 (rechts) dargestellt.

Abbildung 32 stellt den unterspannungsseitigen Stromverlauf des Transformators (oben) sowie die Spannung über den Leistungsschalter (unten) dar. Der Zeitpunkt $t = 0$ ms entspricht jenem Zeitpunkt, bei dem das Steuersignal für den Leistungsschalter erscheint. Der Inrushstrom ist bei diesem Versuch in den Phasen L2 und L3 ausgeprägt mit einer Spitze von bis zu 1,6 kA.

Der detaillierte Einschaltvorgang wird nicht extra angeführt, da dieser einen vergleichbaren Verlauf wie in Abbildung 24 dargestellt zeigt. Abbildung 33 stellt den unterspannungsseitigen Stromverlauf des Transformators (oben) sowie die Spannung über den Leistungsschalter (unten) zum Zeitpunkt der Schalteröffnung dar. Die wiederkehrende Spannung erscheint bei $t = 270$ ms. Dabei ist eine ausgeprägte Schaltüberspannung in Phase L3 ersichtlich, deren Spitzenwert bei ca. 245kV liegt. Eine vergleichbare Überspannung tritt bei einem identen Versuchsablauf (siehe Kapitel 7.8.2) nicht auf.

Die hochfrequenten Messergebnisse für die gemessenen Spannungen speiseseitig, über und abweiseseitig dem Vakuum-LS sind in Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36 dargestellt.

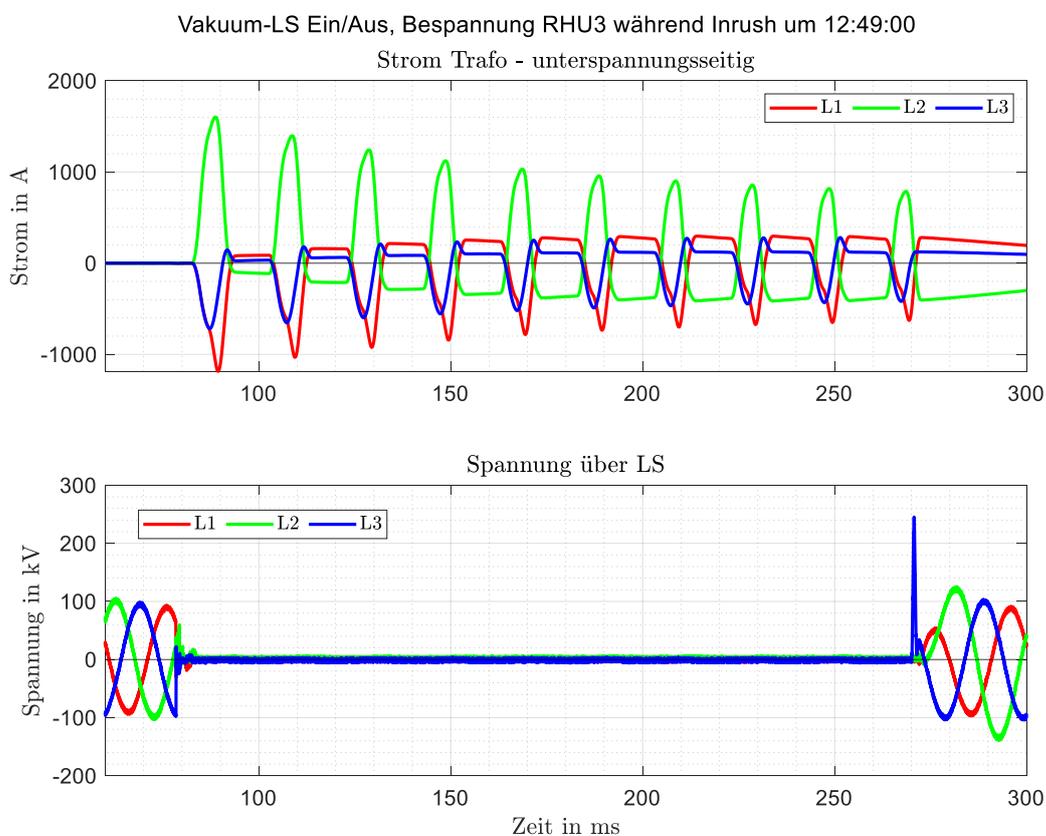


Abbildung 32: Strom auf der Unterspannungsseite des Transformators und Spannung über Vakuum-LS

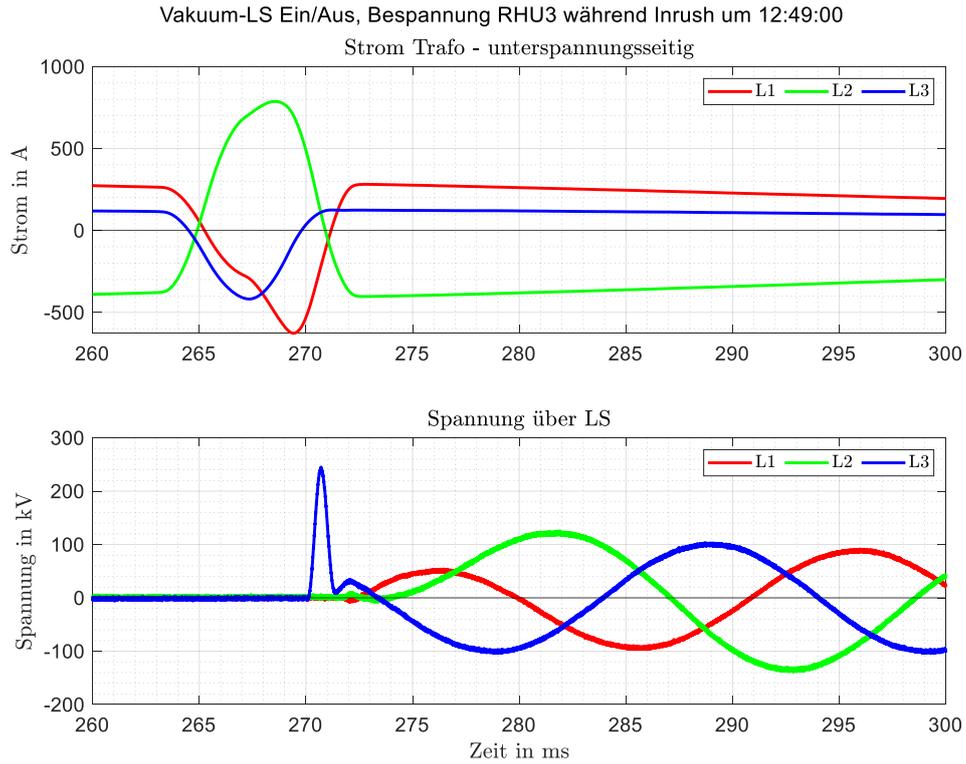


Abbildung 33: Strom auf der Unterspannungsseite des Transformators und Spannung über Vakuu-LS

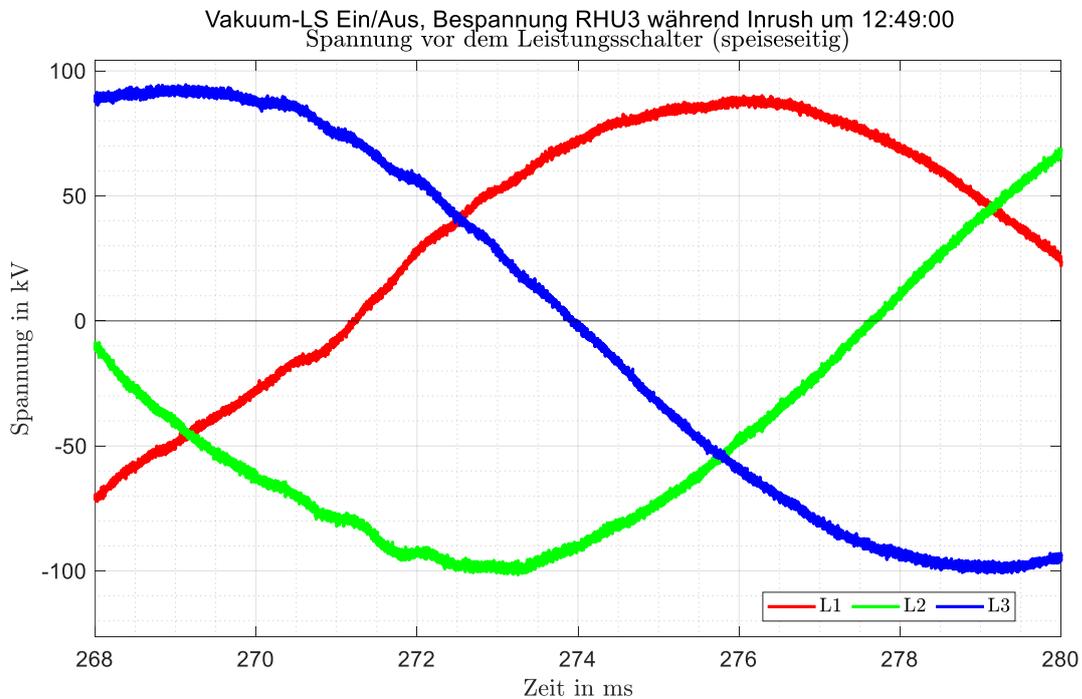


Abbildung 34: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuu-LS (speiseseitig)

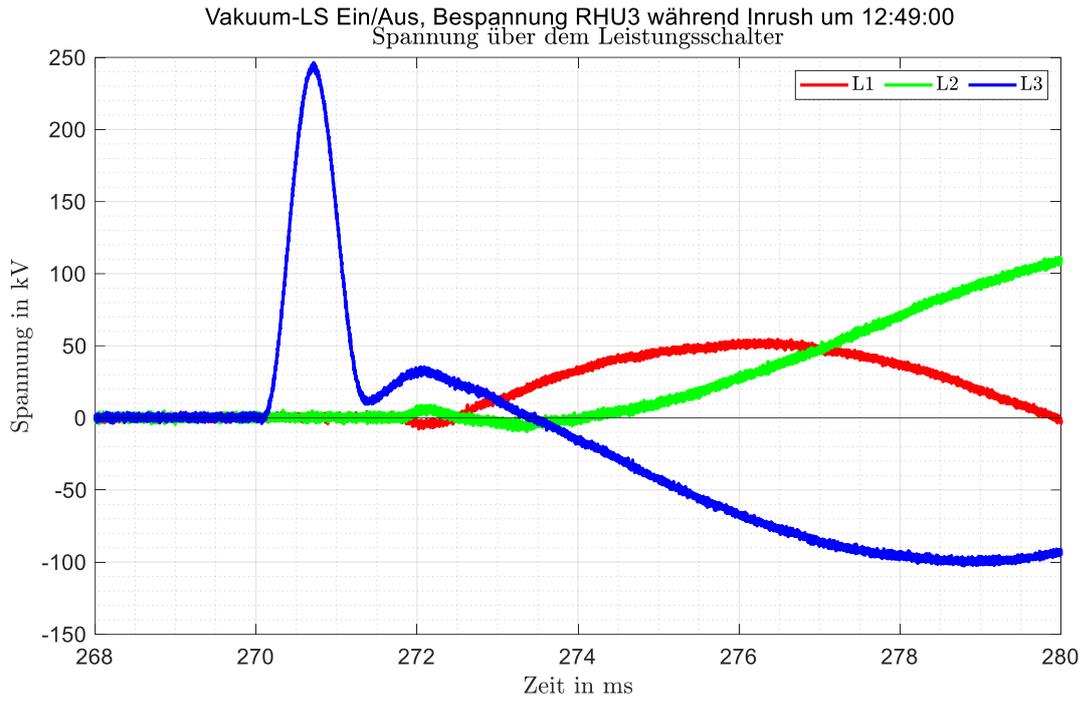


Abbildung 35: Spannungsmessung (CR-Teiler) über Vakuu-LS

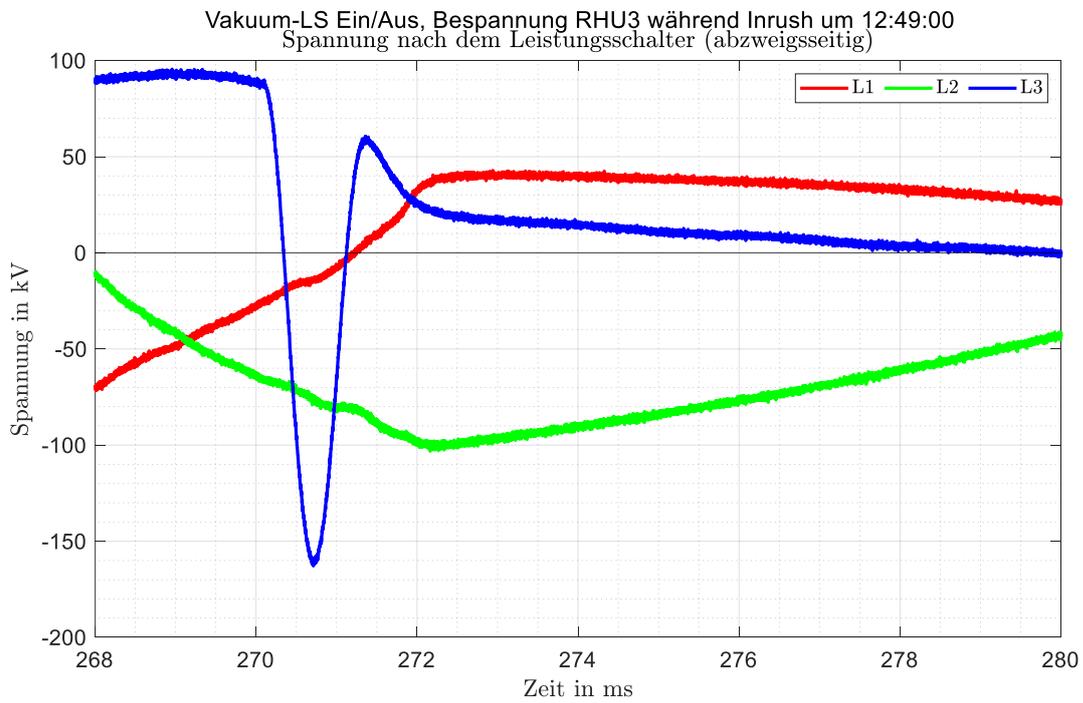


Abbildung 36: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuu-LS (abzweigsseitig)

Die Steilheit der wiederkehrenden Spannung stellt eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Belastung von Leistungsschaltern bei Ausschaltvorgängen dar. Abbildung 37 stellt die Berechnung Rate of Rise of Recovery Voltage (RRRV) grafisch dar. Für alle Betriebsschaltungen III wurde die die RRRV auf Basis der maximal auftretenden Änderung $RRRV_{max}$ bestimmt (siehe *Maximale RRRV*). Zusätzlich ist auch der Spitzenwert der Spannung u_c für alle Ausschaltungen dokumentiert. Die RRRV mit Spitzenwert wurde für die Versuche vom 13. März 2025 nur für das Abschalten der leerlaufenden Freileitung bestimmt ($RRRV_{peak}$). Eine ausführlichere Erklärung für die Ermittlung der RRRVs ist in Kapitel 4.1.4 ausgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

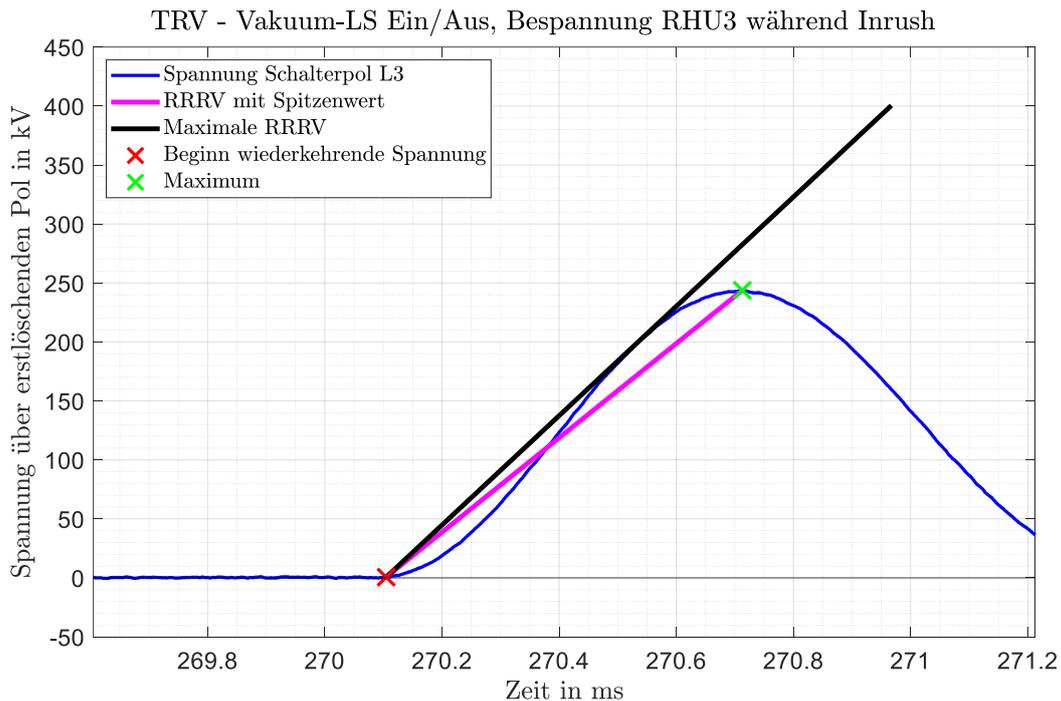


Abbildung 37: Exemplarische Ermittlung der RRRV

3.5 Zusammenfassende Bewertung der Betriebsschaltungen III

Tabelle 2 fasst die Ergebnisse der Betriebsschaltungen III im Hinblick auf die wiederkehrende Spannung bei den Versuchen zusammen. Die Ergebnisse dieser Betriebsschaltungen zeigen Besonderheiten wie Wiederzündungen bei der Abschaltung des Transformators im quasi-eingeschwungenen Zustand oder eine Schaltüberspannung bei der Abschaltung während des Inrush. Sowohl die gemessenen Spannungsgradienten RRRV als auch die Spannungsspitzenwerte u_c sind bei allen Messungen im zulässigen Bereich.

Allgemeine Daten			erstlöschender Pol			
Versuch	Uhrzeit	Art	Phase	$RRRV_{peak}$	u_c	$RRRV_{max}$
				in $kV/\mu s$	in kV	in $kV/\mu s$
8b	11:08	Vakuum-LS Aus, Bespannung 122/8 Leerlauf	L2	0,021	214	0,045
8b	11:15		L3	0,019	203	0,139
8b	11:23		L3	0,024	208	0,041
8b	11:27		L2	0,024	213	0,174
Abschaltung des Transformators mit gleichzeitiger Löschung aller Schalterpole → Angabe von Maximalwerten alle Phasen						
9b	11:48	Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3	-	-	122	0,144
9b	11:56		-	-	107	0,336
9b	12:07		-	-	123	0,059
9b	12:37		-	-	114	0,086
9b	12:44		-	-	113	0,083
10ab	12:46	Vakuum-LS Aus, während Inrush RHU3	-	-	117	0,054
10ab	12:49		-	-	245	0,458

Tabelle 2: Zusammenfassung der Betriebsschaltungen III mit den aufgetretenen RRRVs sowie dem maximalen Spannungsbetrag u_c

4 Detailbetrachtung: Fehlerschaltungen

Dieses Kapitel analysiert ausgewählte Fehlerschaltungen. Dabei wird zwischen Fehler mit Zünddraht (ZD) und mit Erdungsgarnitur (EG) unterschieden. Zusätzlich wurden Fehlerschaltungen mit / ohne Erdberührung (EB) und mit / ohne automatischer Wiedereinschaltung (AWE) durchgeführt. Eine genaue Auflistung der Versuche inklusive der genauen Versuchs-Zeitpunkte und zugehörigen Versuchs-Abkürzung ist im Anhang in Kapitel 7.3 dargestellt. Folgende Versuche sind in diesem Kapitel behandelt.

- Kapitel 4.1: 3-poliger Klemmen-KS mit ZD (ohne EB, ohne AWE, Versuch 4e)
- Kapitel:4.2: 2-poliger Klemmen-KS mit EG (mit EB, ohne AWE, Versuch 4a)
- Kapitel 4.3: 1-poliger Klemmen-ES mit EG (ohne AWE, Versuch 4d)
- Kapitel 4.4: 3-poliger Klemmen-KS mit EG (mit EB, mit AWE, 1. Auslösung, Versuch 4c)
- Kapitel 4.5: 3-poliger Abstands-KS mit EG (mit EB, mit AWE, 1. Auslösung, Versuch 5b)

Kapitel 4.6 fasst anschließend an die exemplarische Darstellung der ausgewählten Versuche alle Ergebnisse der Fehlerschaltungen tabellarisch zusammen. Alle in diesem Kapitel nicht dargestellten Versuche sind im Anhang visualisiert (Kapitel 7.9 für Klemmenfehler und Kapitel 7.10 für Abstandsfehler).

Für die Durchführung der Fehlerversuche wurde eine besondere Netzkonfiguration hergestellt, diese ist in Kapitel 1.1 dokumentiert. Abbildung 38 (links) stellt das Einlinienschaltbild für die Durchführung der Klemmenfehler und Abbildung 38 (rechts) das Einlinienschaltbild für Abstandsfehler dar. Der Zeitpunkt $t = 0$ s entspricht jenem Zeitpunkt, bei welchem der Schutz im Kupplungsabzweig (Steuerung des Vakuum-LS) auslöst. Mehr hierzu siehe Kapitel 7.6. Aufgrund der limitierten Schaltfolge des Vakuum-LS (0-0,3s-CO-3min-CO) wird bei Verwendung der AWE der Fehler durch den LS im Trafoabzweig LS_{Tr} beim Klemmenfehler, und durch den LS im Leitungsabzweig LS_{FL} beim Abstandsfehler zugeschalten.

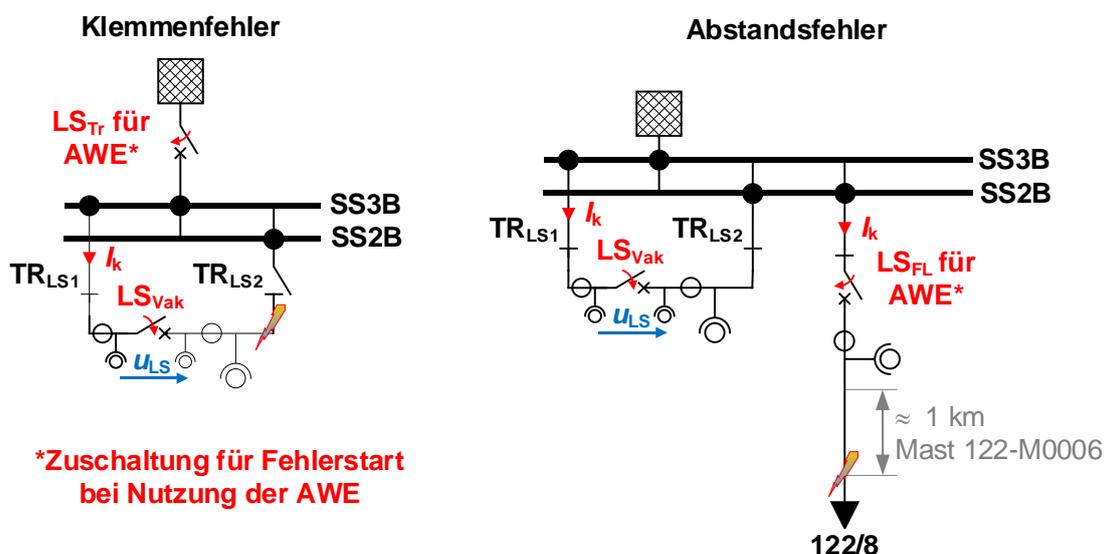


Abbildung 38: Einlinienschaltbild für Klemmenkurzschluss (links) und Abstandskurzschluss (rechts)

4.1 3-poliger Klemmenkurzschluss mit Zünddraht (ohne Erdberührung, ohne AWE, Versuch 4e um 15:23)

Dieses Kapitel dokumentiert die Kurvenverläufe zum Versuch 4e: 3-poliger Klemmenkurzschluss mit ZD ohne EB und ohne AWE. Die Ersatzschaltung dieses Kurzschlusses ist in Abbildung 38 (links) dargestellt. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind unauffällig.

4.1.1 Übersicht des Versuchs

Abbildung 39 stellt eine Übersicht zum durchgeführten Kurzschlussversuch dar. Der KS-Strom I_k lag bei 2,4 kA und damit unterhalb des Bemessungs-Betriebsstromes des Vakuum-LS von $I_r = 3150$ A. Der Fehler startet bei $t = -25$ ms per Zuschaltung durch den Vakuum-LS, der Schutz in der Kupplung löst dann dreipolig zum Zeitpunkt $t = 0$ s aus. Der erstlöschende Pol tritt in Phase L1 bei $t = 39.5$ ms auf.

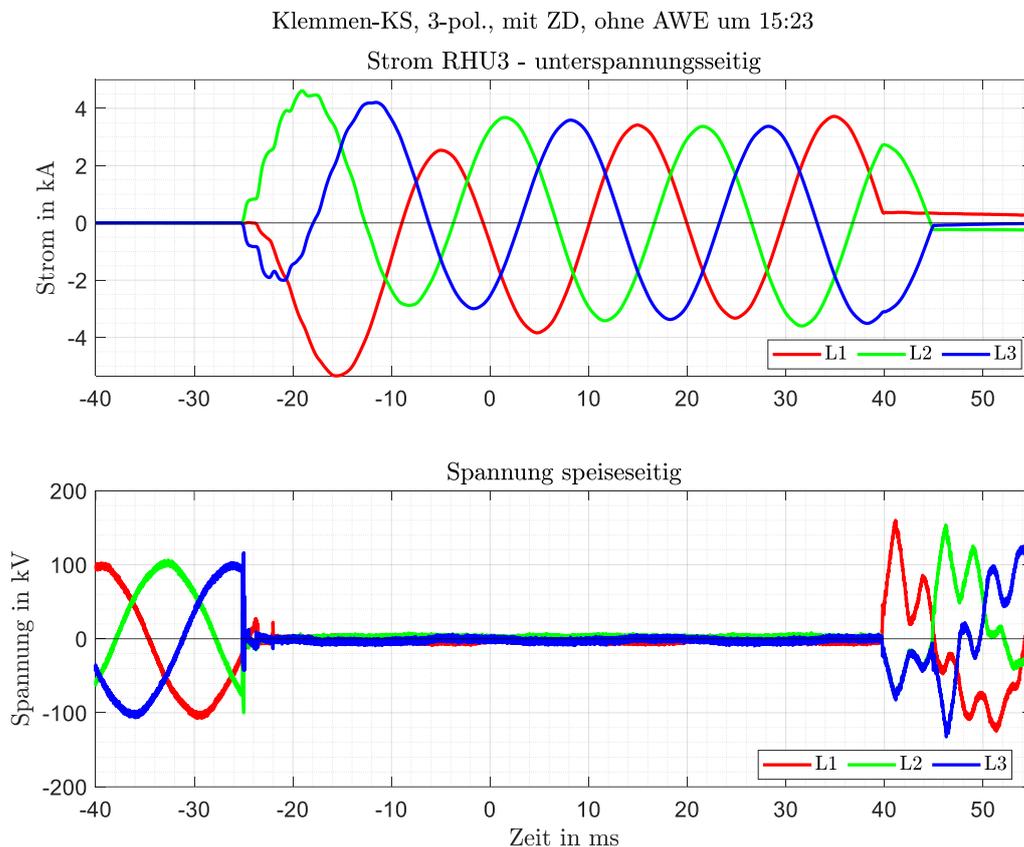


Abbildung 39: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

4.1.2 Spannung über LS

Abbildung 40 zeigt die Spannung über den Vakuum-LS, sowie die Schalterstellung¹ der Pole des Vakuum-LS. Unter Berücksichtigung der Ausschaltzeit des LS (≈ 29 ms) öffnen die Schalterpole des Vakuum-LS nach 29 ms. Der Schalter ist nach der Bewegungszeit von 24,4 ms bei $t = 53,4$ ms vollständig geöffnet².

Die wiederkehrende Spannung des erstlöschenden Poles erscheint bei $t = 39,5$ ms bei einer Schalteröffnung von 45 % (siehe Fußnote 2). Die strichlierten Kurvenverläufe in Abbildung 40 (oben) entsprechen den Grundschwingungen der eingeschwingenen wiederkehrenden Spannungen.

Die wiederkehrende Spannung des erstlöschenden Pols erscheint kurz vor dem Maximum dieser Spannung, entsprechendem dem nahezu reaktiven Kurzschlussstrom.

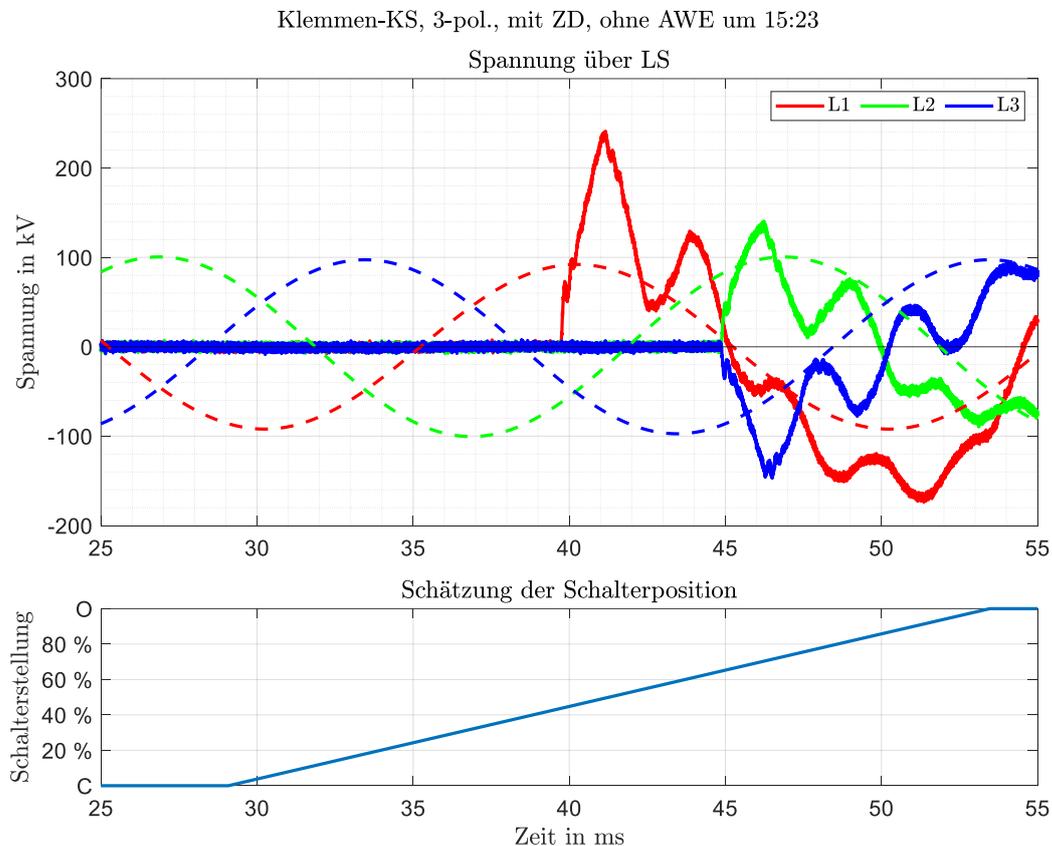


Abbildung 40: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s

¹ 0 % entspricht Schalter geschlossen (C), 100 % entsprechen Schalter offen (O)

² Gemäß des verwendeten Modells. der reale Verlauf ist streng linear in der Zeit, dies hat jedoch für die durchgeführten Versuche keine Relevanz.

Abbildung 41 stellt zusätzlich zur Spannung über den Vakuum-LS auch den gemessenen Strom im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) dar. Der Zeitpunkt der ersten wiederkehrenden Spannung bei $t = 39,54$ ms entspricht dem Zeitpunkt des Nulldurchganges des Stromes in Phase L1.

Die wiederkehrenden Spannungen in den Phasen L2 und L3 treten mit dem nächsten Nulldurchgang der Ströme bei $t = 45$ ms auf.

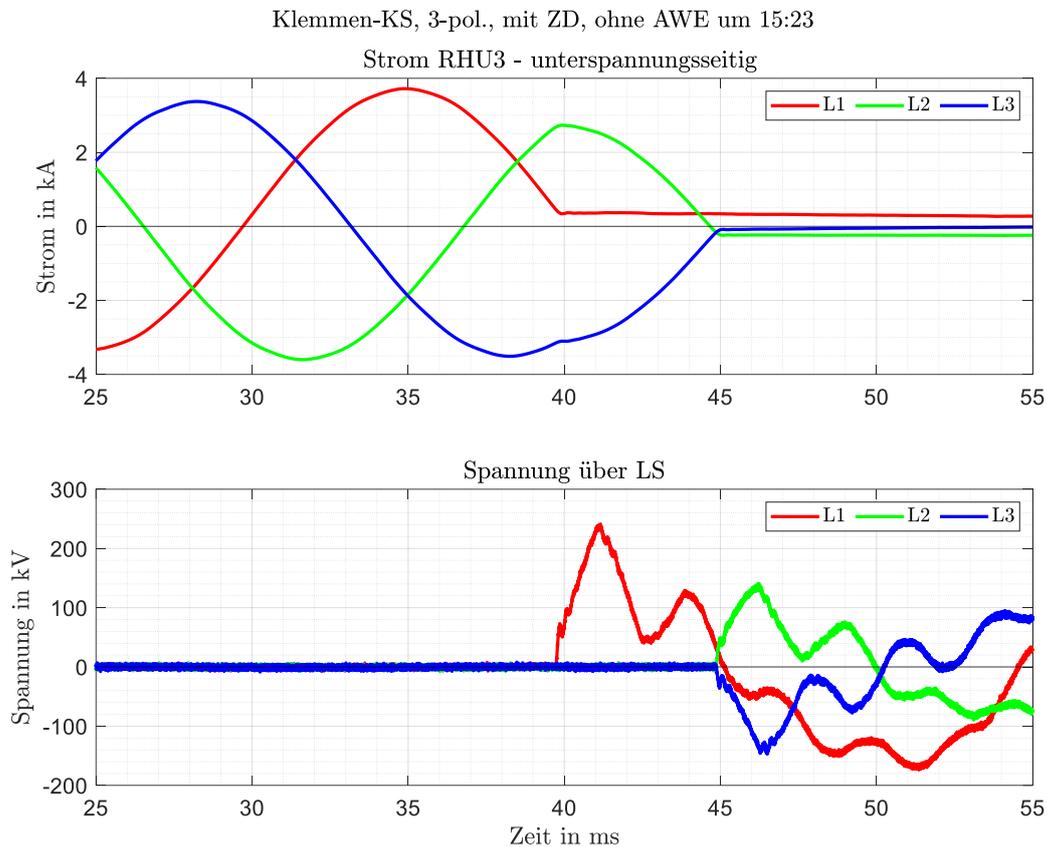


Abbildung 41: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler, unten)

4.1.3 Verlagerungsspannung

Die Verlagerungsspannungen während dieses Versuchs sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 dargestellt. Die gemessene Verlagerungsspannung (blau durchgezogen) wurde an der E-Spule im unterspannungsseitigen Sternpunkt des Transformators RHU3 gemessen. Da der Messbereich zu gering gewählt wurde, ist diese Kurve abgeschnitten. Die berechnete Verlagerungsspannung (pink strichliert) wurde auf Basis der speiseseitigen Spannung (CR-Teiler) berechnet. Diese Kurven stimmen gut überein.

Mit der Klärung des Fehlers durch Öffnung der Schalterpole werden Schwingungen im Nullsystem angeregt. Die maximale Amplitude der Verlagerungsspannung nach der Fehlerklärung liegt bei ca. 70 kV (Abbildung 43).

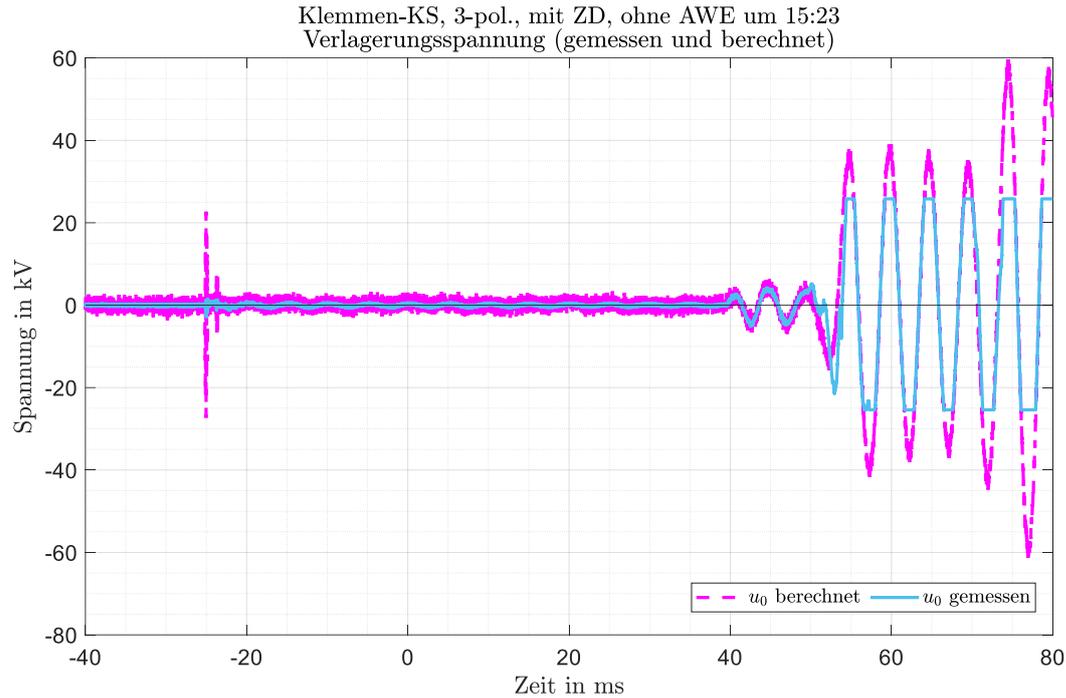


Abbildung 42: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule; Schalten auf Fehler bei $t = -25$ ms

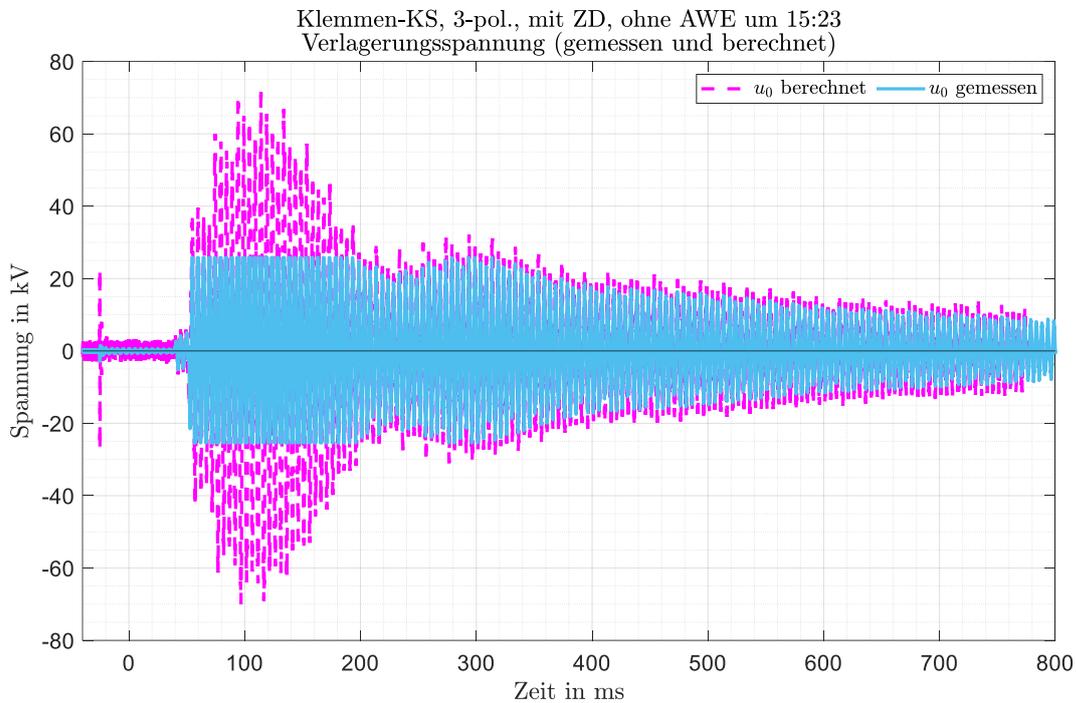


Abbildung 43: Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule; Schalten auf Fehler bei $t = -25$ ms

4.1.4 Ermittlung der Steilheit der TRV

Folgend in Abbildung 44 wird die transiente, wiederkehrende Spannung (TRV) des erlöschenden Poles exemplarisch näher untersucht. Die Herangehensweise für die Ermittlung der Kennwerte ist dabei für alle Versuche ident.

Es werden für alle Versuche zwei Kennwerte für die Rate of Rise of Recovery Voltage (RRRV), sowie der maximale Betrag der TRV, ermittelt. Der Startpunkt bei $t = 39,5$ ms ist grün markiert. Das Maximum mit $u_C = 235,8$ kV tritt bei $t = 41,2$ ms auf und ist blau markiert.

Jener Wert für die RRRV, welcher mit dem Start der wiederkehrenden Spannung $t = 39,54$ ms bis zum maximalen Betrag der wiederkehrenden Spannung auftritt ($RRRV_{max} = 0,117$ kV/ μ s), ist violett gekennzeichnet. Jener Wert, welcher vom Start $t = 39,54$ ms generell die maximale Änderung aufweist ($RRRV_{peak} = 0,365$ kV/ μ s), ist schwarz gekennzeichnet. Alle Ergebnisse dieser Analyse der wiederkehrenden Spannungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

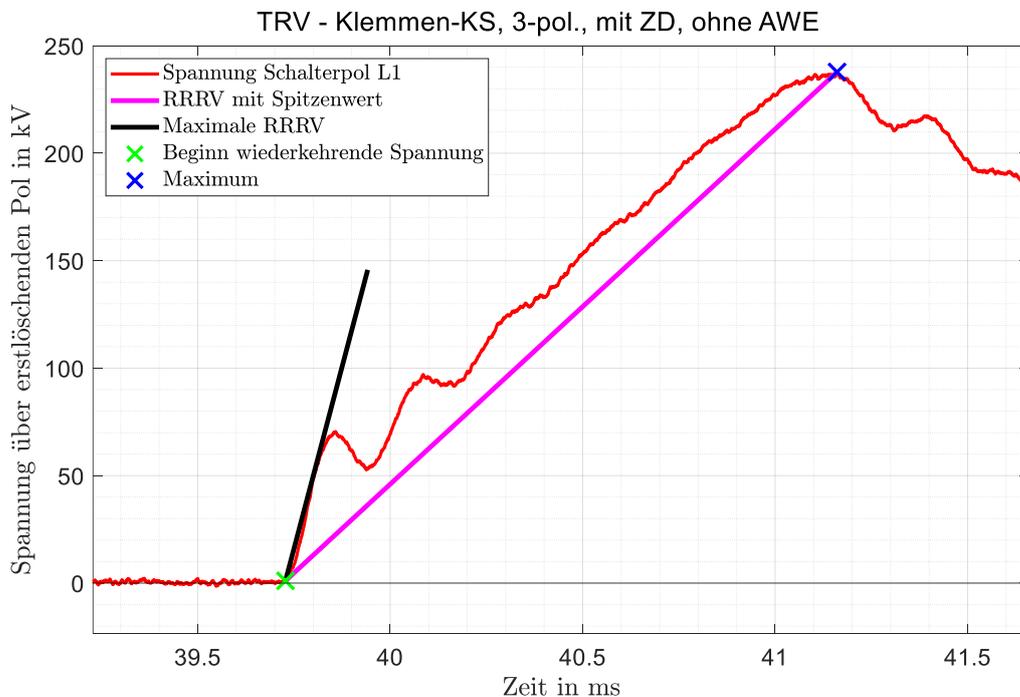


Abbildung 44: Exemplarische Ermittlung der RRRV

4.2 2-poliger Klemmenkurzschluss mit Erdungsgarnitur (mit Erdberührung, ohne AWE, Versuch 4a um 12:33)

Dieses Kapitel dokumentiert die Kurvenverläufe zum Versuch 4a: 2-poliger Klemmenkurzschluss mit EG mit EB und ohne AWE. Die Ersatzschaltung für diesen Kurzschluss ist in Abbildung 38 (links) dargestellt. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind unauffällig.

4.2.1 Übersicht des Versuchs

Abbildung 45 stellt eine Übersicht zum durchgeführten Kurzschlussversuch dar. Der KS-Strom I_k lag bei $I_k = 2 \text{ kA}$ und damit unterhalb des Bemessungs-Betriebsstromes des Vakuum-LS von $I_r = 3150 \text{ A}$. Der Fehler startet bei $t = -30,5 \text{ ms}$ per Zuschaltung durch den Vakuum-LS, der Schutz löst dreipolig bei $t = 0 \text{ s}$ aus. Der erstlöschende Pol tritt in Phase L1 bei $t = 34,5 \text{ ms}$ auf. Die fehlerbehafteten Pole von L2 und L3 löschen bei $t = 42 \text{ ms}$.

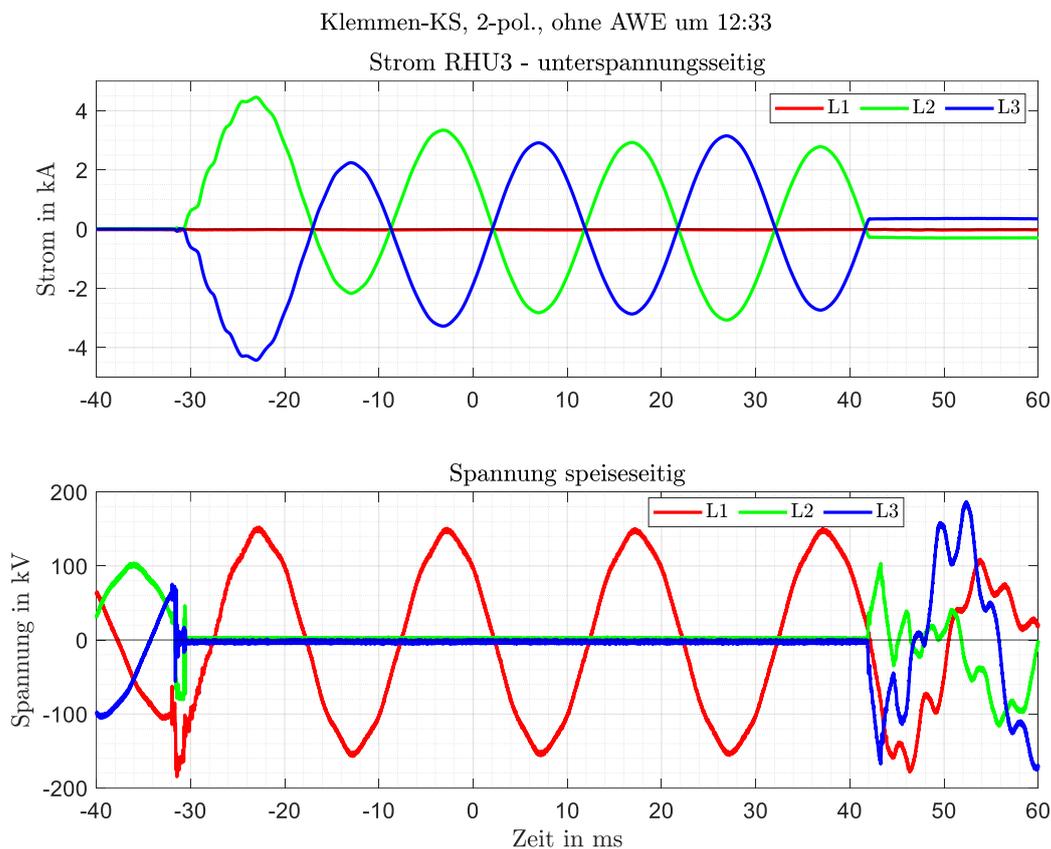


Abbildung 45: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

4.2.2 Spannung über LS

Abbildung 46 zeigt die Spannung über den Vakuum-LS, sowie die Schalterstellung³ der Pole des Vakuum-LS. Eine ausführlichere Erklärung dieses Diagramms kann Kapitel 4.1.2 entnommen werden.

Die wiederkehrende Spannung des erstlöschenden Poles (Phase L1) erscheint bei $t = 34,5$ ms bei einer Schalterstellung von ca. 20 %. Phase L1 ist dabei die nicht-fehlerbehaftete Phase. Die wiederkehrenden Spannungen der fehlerbehafteten Phasen L2 und L3 erscheinen bei $t = 42$ ms.

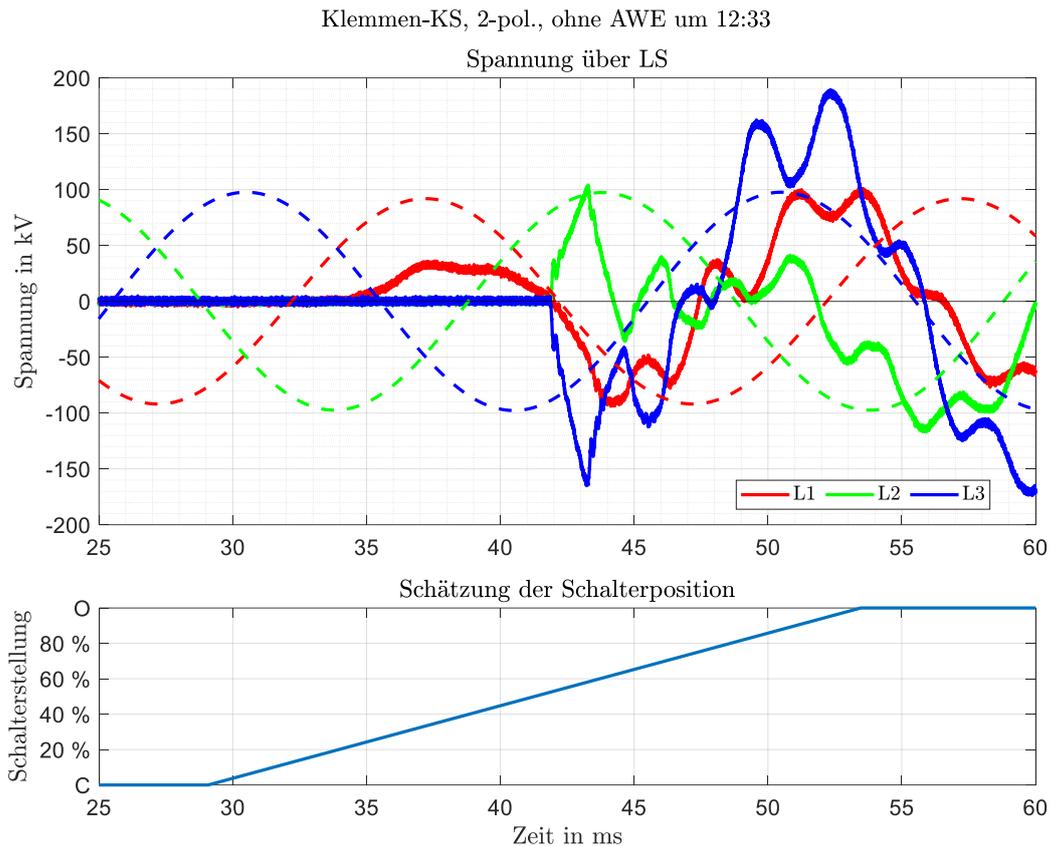


Abbildung 46: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s

³ 0 % entspricht Schalter geschlossen (C), 100 % entsprechen Schalter offen (O)

Abbildung 47 stellt zusätzlich zur Spannung über den Vakuum-LS auch den gemessenen Strom im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) dar. Der Zeitpunkt der fehlerbehafteten, wiederkehrenden Spannung der Phasen L2 und L3 erscheinen bei den korrespondierenden Stromnulldurchgängen bei $t = 42$ ms. Bei Phase L1 ist aufgrund keines anstehenden Fehlers kein expliziter Nulldurchgang erkennbar. Der abklingende Offset in der Strommessung nach der Fehlerklärung lässt sich durch das Betriebsverhalten („Gedächtnis“) von den Messkernen der Stromwandler erklären.

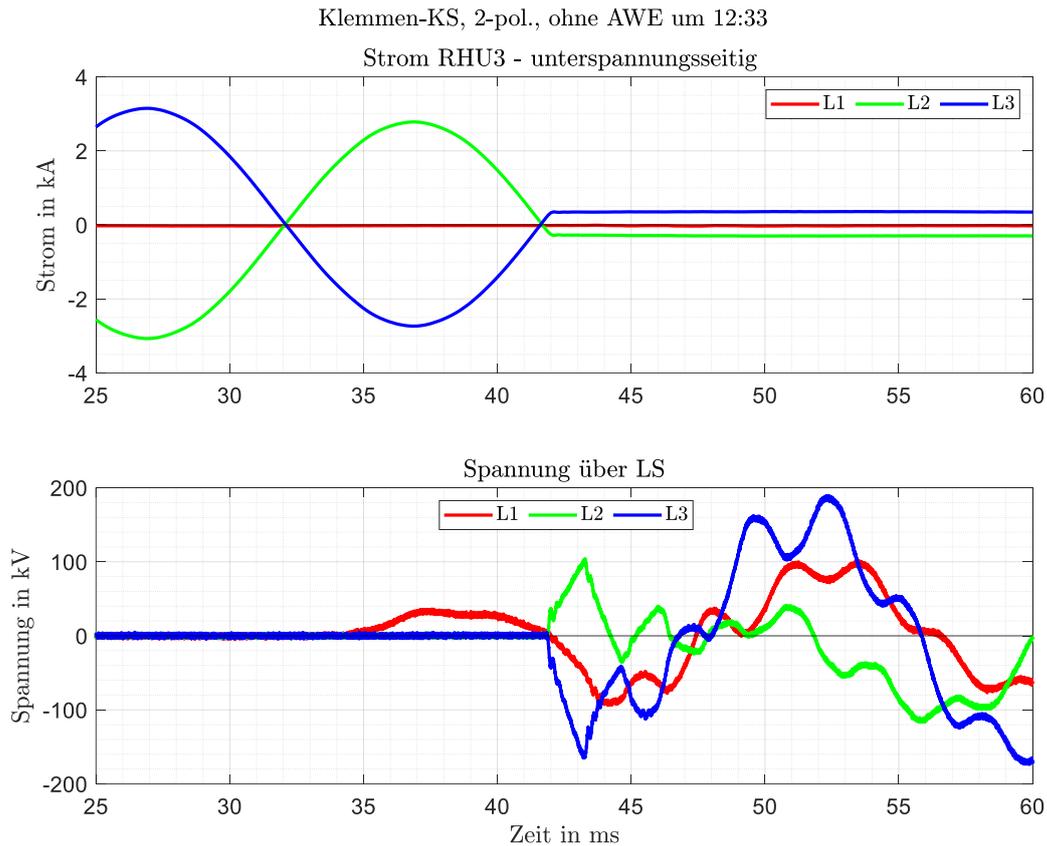


Abbildung 47: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler, unten)

4.2.3 Verlagerungsspannung

Die Verlagerungsspannungen während dieses Versuchs sind in Abbildung 48 und Abbildung 49 dargestellt. Die gemessene Verlagerungsspannung (blau durchgezogen) wurde an der E-Spule im unterspannungsseitigen Sternpunkt des Transformators RHU3 gemessen. Da der Messbereich zu gering gewählt wurde, ist diese Kurve abgeschnitten. Die berechnete Verlagerungsspannung (pink strichliert) wurde auf Basis der speiseseitigen Spannung (CR-Teiler) berechnet. Diese Kurven stimmen in guter Näherung überein.

Mit der Klärung des Fehlers in der zugehörigen Öffnung der Schalterpole werden Schwingungen im Nullsystem angeregt. Die maximale Amplitude der Verlagerungsspannung nach der Fehlerklärung liegt bei ca. 80 kV (Abbildung 49).

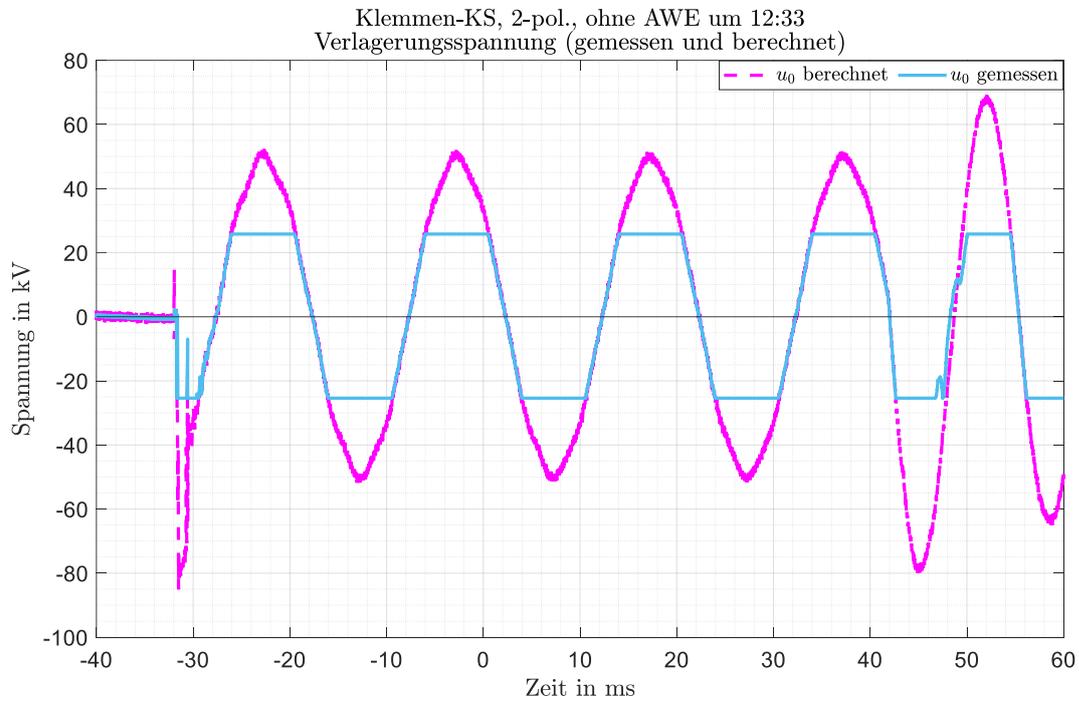


Abbildung 48: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule; Schalten auf Fehler bei $t = -30,5$ ms

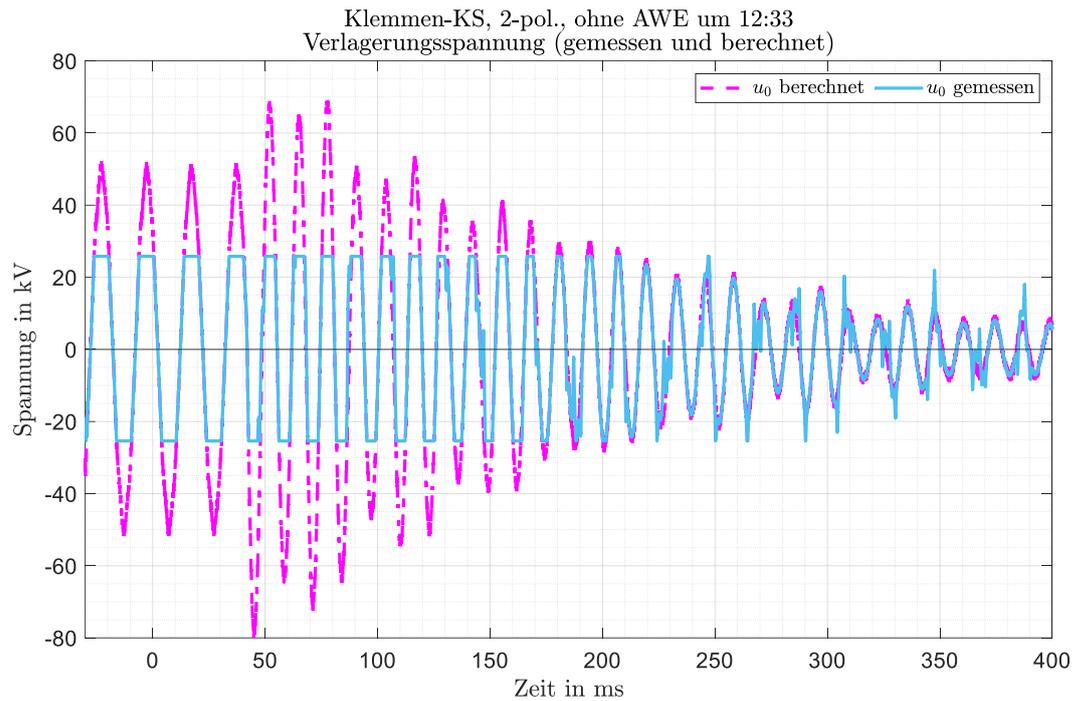


Abbildung 49: Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule; Schalten auf Fehler bei $t = -30,5$ ms

4.3 1-poliger Klemmenerdschluss mit Erdungsgarnitur (ohne AWE, Versuch 4d um 14:50)

Dieses Kapitel dokumentiert die Kurvenverläufe zum Versuch 4d: 1-poliger Klemmen-ES mit EG und ohne AWE. Die Ersatzschaltung dieses Fehlers ist in Abbildung 38 (links) dargestellt. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind unauffällig.

4.3.1 Übersicht des Versuchs

Abbildung 50 stellt eine Übersicht zum durchgeführten Erdschlussversuch dar. Der ES-Strom lag bei ca. $I_k = 77 \text{ A}$ und damit unterhalb des Bemessungs-Betriebsstromes des Vakuum-LS von $I_r = 3150 \text{ A}$. Der Fehler startet bei $t = -73,15 \text{ ms}$ per Zuschaltung durch den Vakuum-LS, der Schutz löst dreipolig bei $t = 0 \text{ s}$ aus. Die wiederkehrende Spannung der fehlerbehafteten Phase L3 erscheint bei $t = 36,5 \text{ ms}$, womit der Fehler geklärt ist.

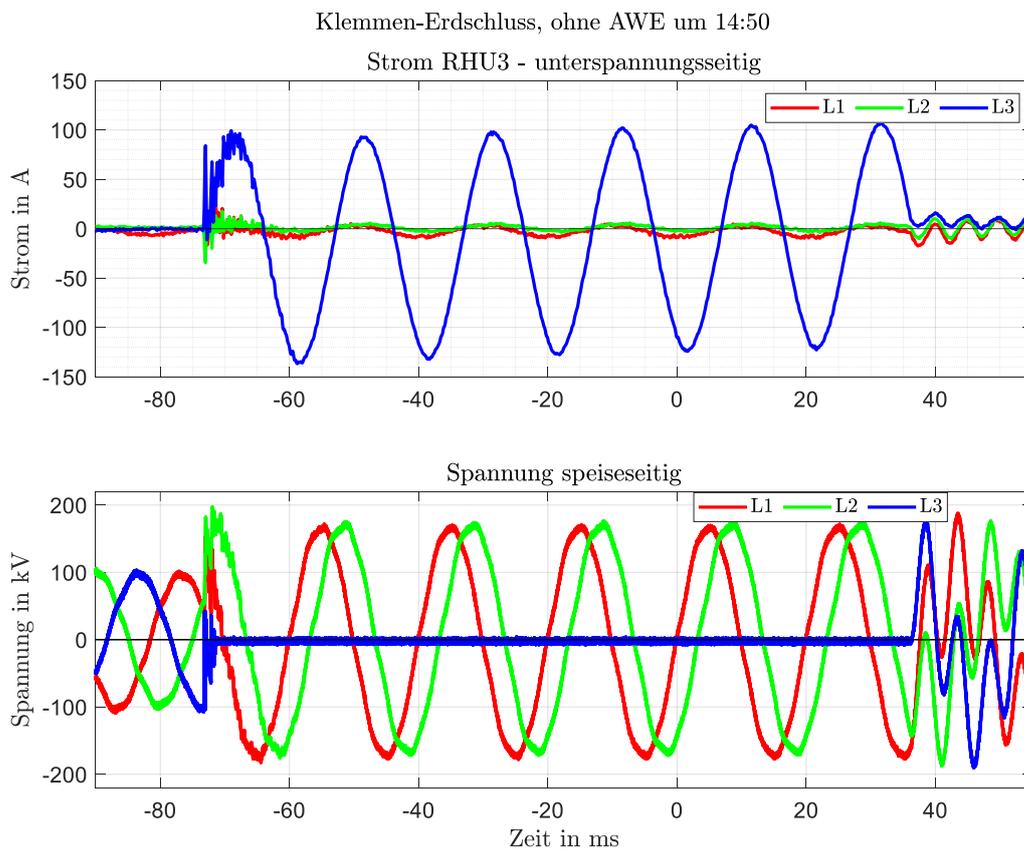


Abbildung 50: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

4.3.2 Spannung über LS

Abbildung 51 zeigt die Spannung über den Vakuum-LS, sowie die Schalterstellung⁴ der Pole des Vakuum-LS. Eine ausführlichere Erklärung dieses Diagramms kann Kapitel 4.1.2 entnommen werden.

Die wiederkehrenden Spannungen der beiden, nicht fehlerbehafteten Phasen L1 und L2 erscheinen bei $t = 29$ ms (unmittelbar nach Schalteröffnung). Der fehlerbehaftete Pol (L3) löscht bei $t = 36,5$ ms, womit der Fehler geklärt ist. Der Schalterpol ist dabei zu ca. 30 % geöffnet.

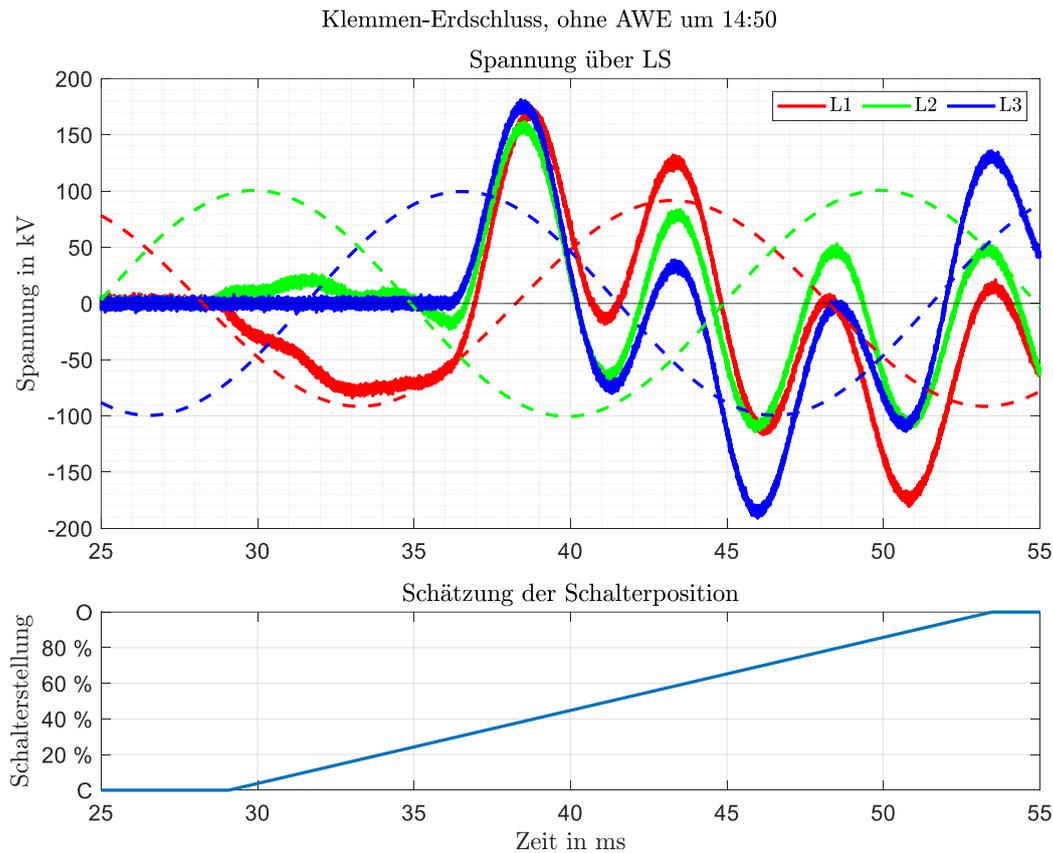


Abbildung 51: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s

⁴ 0 % entspricht Schalter geschlossen (C), 100 % entsprechen Schalter offen (O)

Abbildung 52 stellt zusätzlich zur Spannung über den Vakuum-LS auch den gemessenen Strom im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) dar. Der Zeitpunkt der fehlerbehafteten, wiederkehrenden Spannung der Phase L3 erscheint beim korrespondierenden Stromnulldurchgang bei $t = 36,5$ ms. Bei den Phase L1 und L2 sind aufgrund keines anstehenden Fehlers keine expliziter Nulldurchgänge erkennbar.

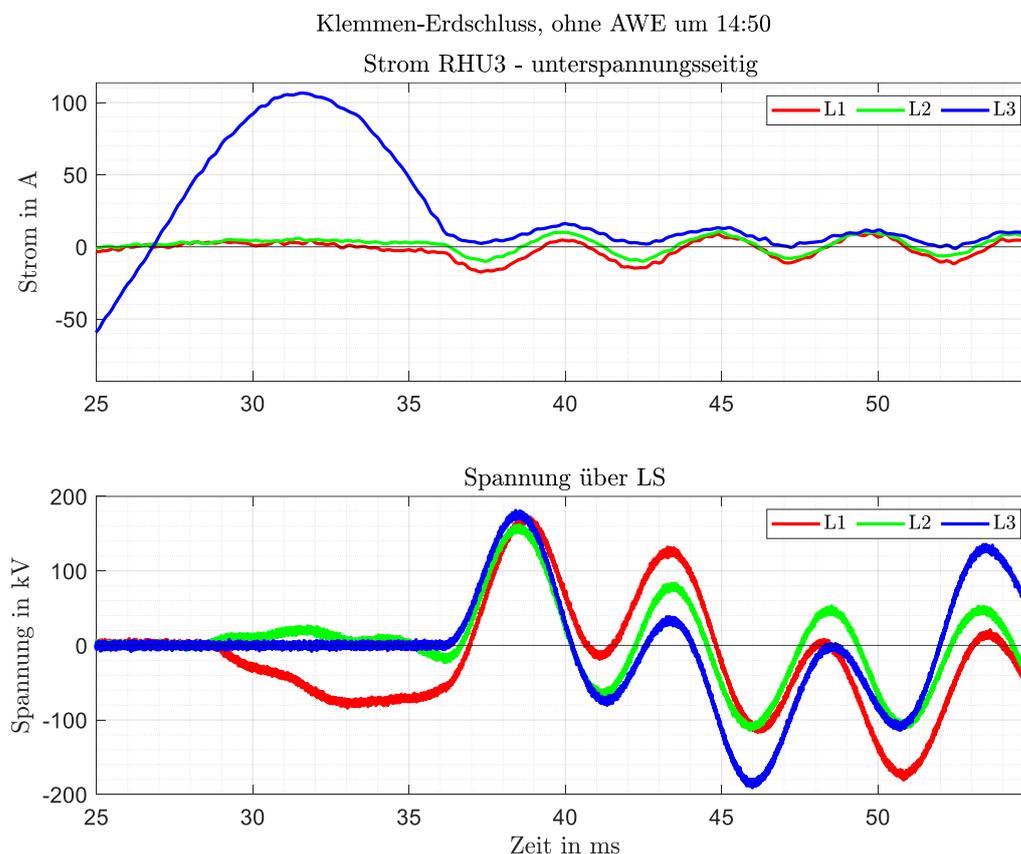


Abbildung 52: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler, unten)

4.3.3 Verlagerungsspannung

Die Verlagerungsspannungen während dieses Versuchs sind in Abbildung 53 und Abbildung 54 dargestellt. Die gemessene Verlagerungsspannung (blau durchgezogen) wurde an der E-Spule im unterspannungsseitigen Sternpunkt des Transformators RH3 gemessen. Da der Messbereich zu gering gewählt wurde, ist diese Kurve abgeschnitten. Die berechnete Verlagerungsspannung (pink strichliert) wurde auf Basis der speiseseitigen Spannung (CR-Teiler) berechnet. Diese Kurven stimmen in guter Näherung überein.

Während des Fehlers steigt die Verlagerungsspannung auf die Leiter-Erde-Phasenspannung der fehlerbehafteten Phase L3 an.

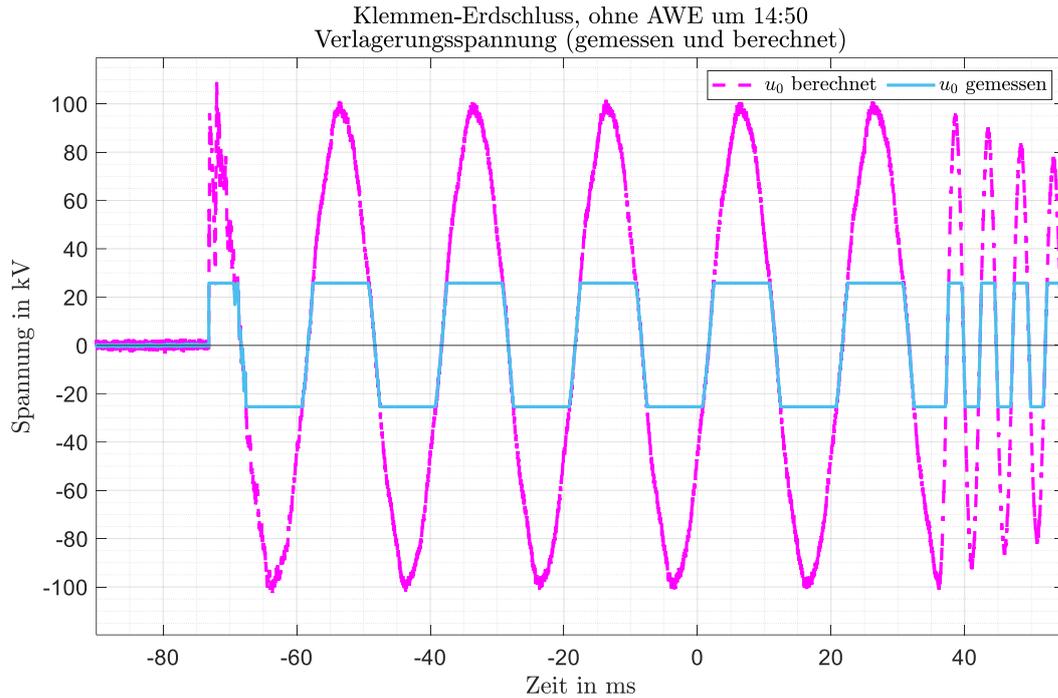


Abbildung 53: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule; Schalten auf Fehler bei $t = -73,15 \text{ ms}$

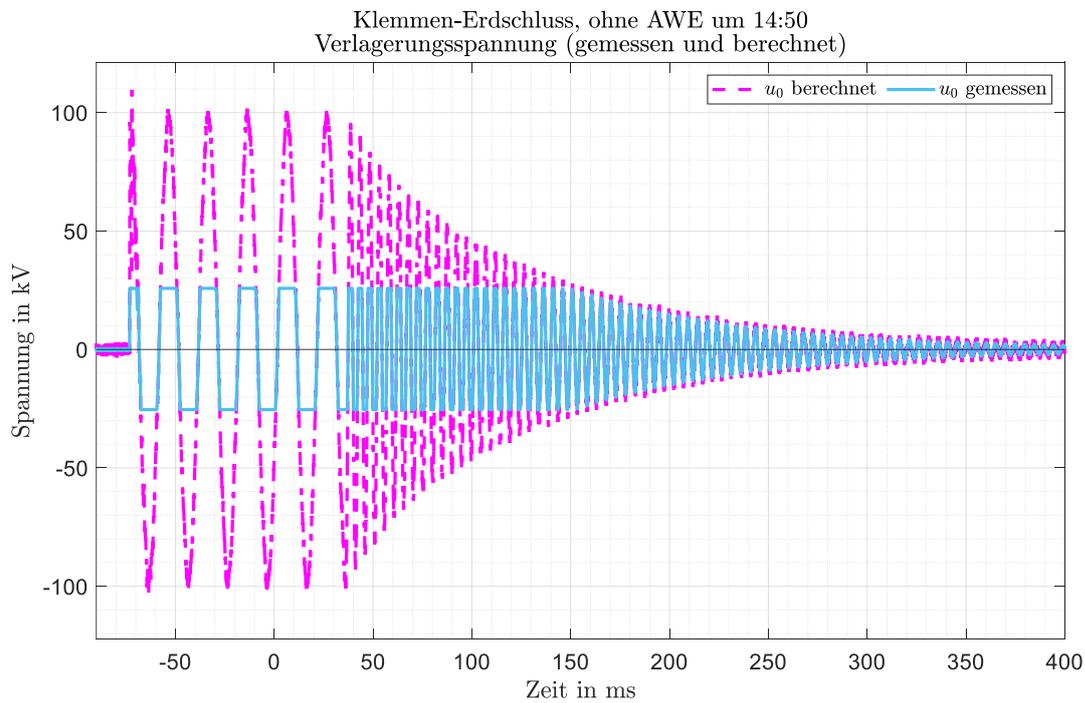


Abbildung 54. Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule; Schalten auf Fehler bei $t = -73,15 \text{ ms}$

4.4 3-poliger Klemmen-KS mit EG (mit Erdberührung, mit AWE, 1. Auslösung, Versuch 4c um 13:49)

Dieses Kapitel dokumentiert die Kurvenverläufe zum Versuch 4c: 3-poliger Klemmen-KS mit EG und mit AWE. Dieser Versuch beinhaltet dabei die 1. Auslösung des Versuchs mit AWE und nicht die Wiedereinschaltung der AWE. Die Ersatzschaltung dieses Fehlers ist in Abbildung 38 (links) dargestellt. Bei diesem Versuch treten multiple Wiederzündungen in Phase L1 auf.

4.4.1 Übersicht des Versuchs

Abbildung 55 stellt eine Übersicht zum durchgeführten Kurzschlussversuch dar. Der KS-Strom lag bei ca. $I_k = 2,3 \text{ kA}$ und damit unterhalb des Bemessungs-Betriebsstromes des Vakuum-LS $I_r = 3150 \text{ A}$. Der Fehler startet bei $t = -28,1 \text{ ms}$ per Zuschaltung des SF6-LS im Trafo-Abzweig (unterspannungsseitig), der Schutz in der Kupplung löst dreipolig bei $t = 0 \text{ s}$ aus. Erstlöschender Pol ist Phase L3 bei $t = 33,2 \text{ ms}$. Der Fehler ist vollständig bei $t = 38,2 \text{ ms}$ geklärt. Multiple Wiederzündungen treten in Phase L1 nach dem Stromnulldurchgang bei $t = 30,1 \text{ ms}$ auf.

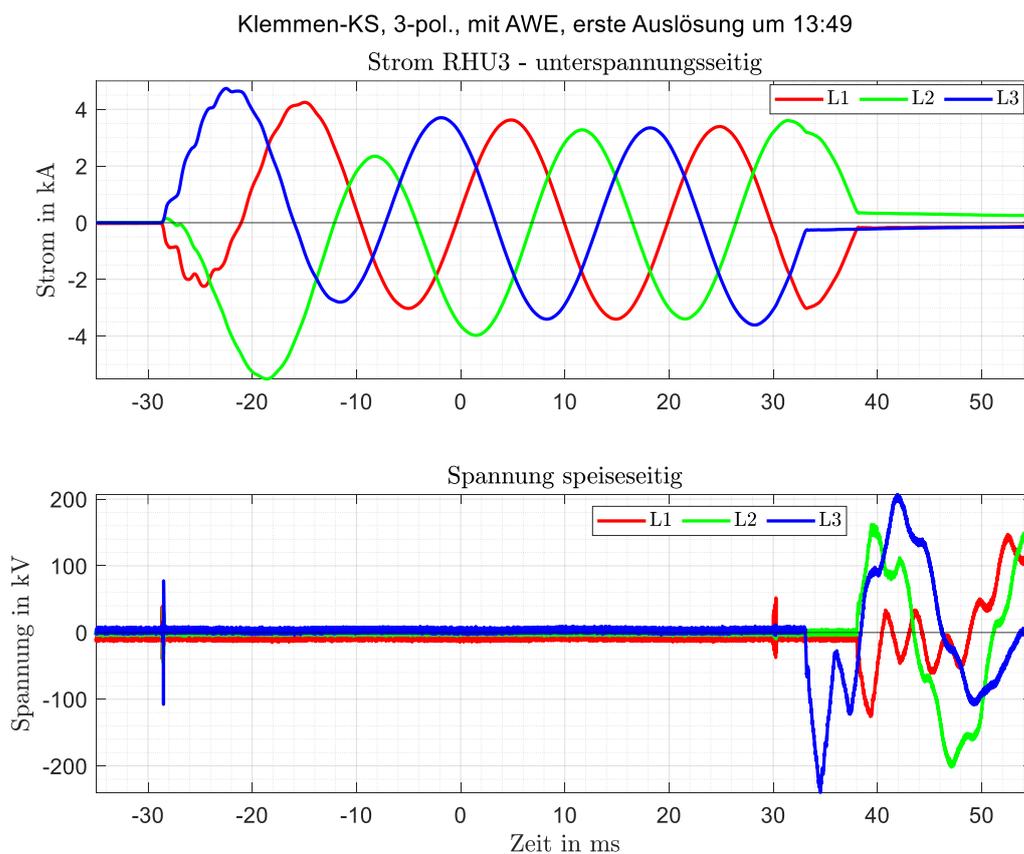


Abbildung 55. Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

4.4.2 Spannung über LS

Abbildung 56 zeigt die Spannung über den Vakuum-LS, sowie die Schalterstellung⁵ der Pole des Vakuum-LS dar. Eine ausführlichere Erklärung dieses Diagramms kann Kapitel 4.1.2 entnommen werden.

Die wiederkehrende Spannung des erstlöschenden Poles erscheint bei $t = 33,2$ ms bei einer Schalteröffnung von ca. 20 %. Die multiplen Wiederzündungen in Phase L1 entstehen bei $t = 30,1$ ms mit einer Schalteröffnung von ca. 5 %.

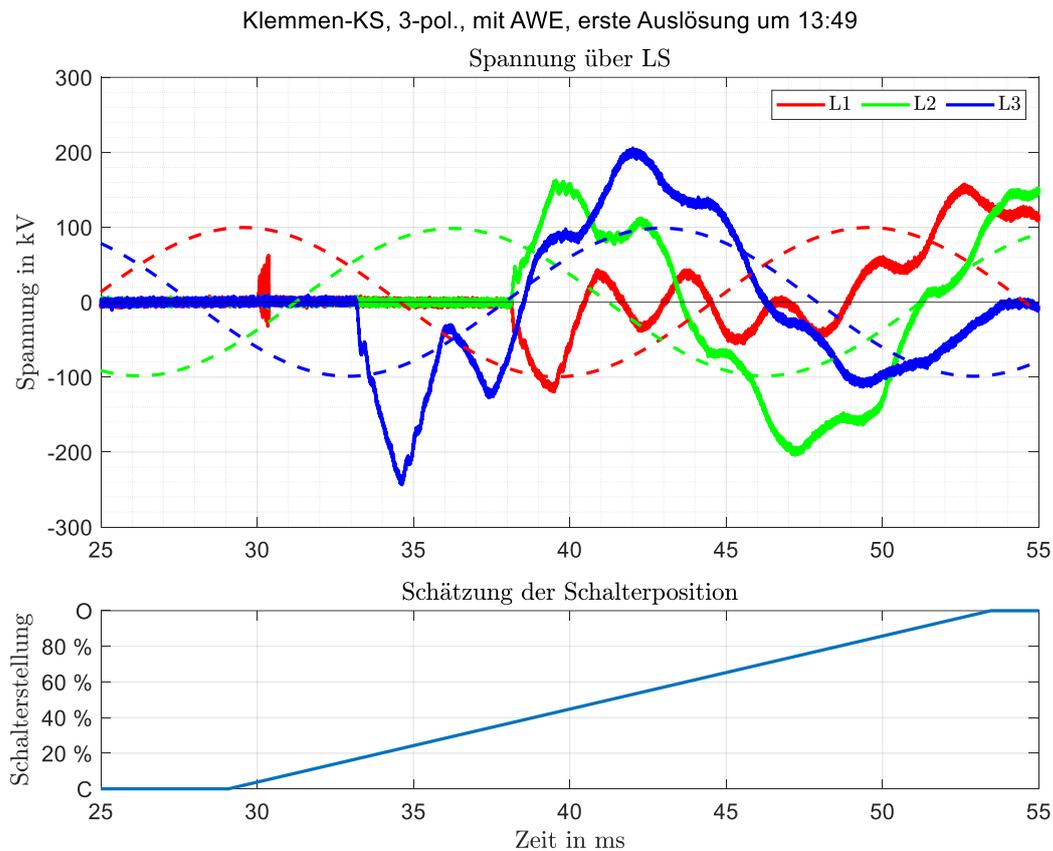


Abbildung 56: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s

⁵ 0 % entspricht Schalter geschlossen (C), 100 % entsprechen Schalter offen (O)

Abbildung 57 stellt zusätzlich zur Spannung über den Vakuum-LS auch den gemessenen Strom im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) dar. Die multiplen Wiederzündung treten unmittelbar beim Stromnulldurchgang bei $t = 30,1$ ms auf. Aufgrund der Wiederzündung kann der Strom in Phase L1 weiterhin bis zum nächsten Stromnulldurchgang bei $t = 38,2$ ms fließen. Der abklingende Offset in der Strommessung nach der Fehlerklärung lässt sich durch das Betriebsverhalten („Gedächtnis“) von den Messkernen der Stromwandler erklären.

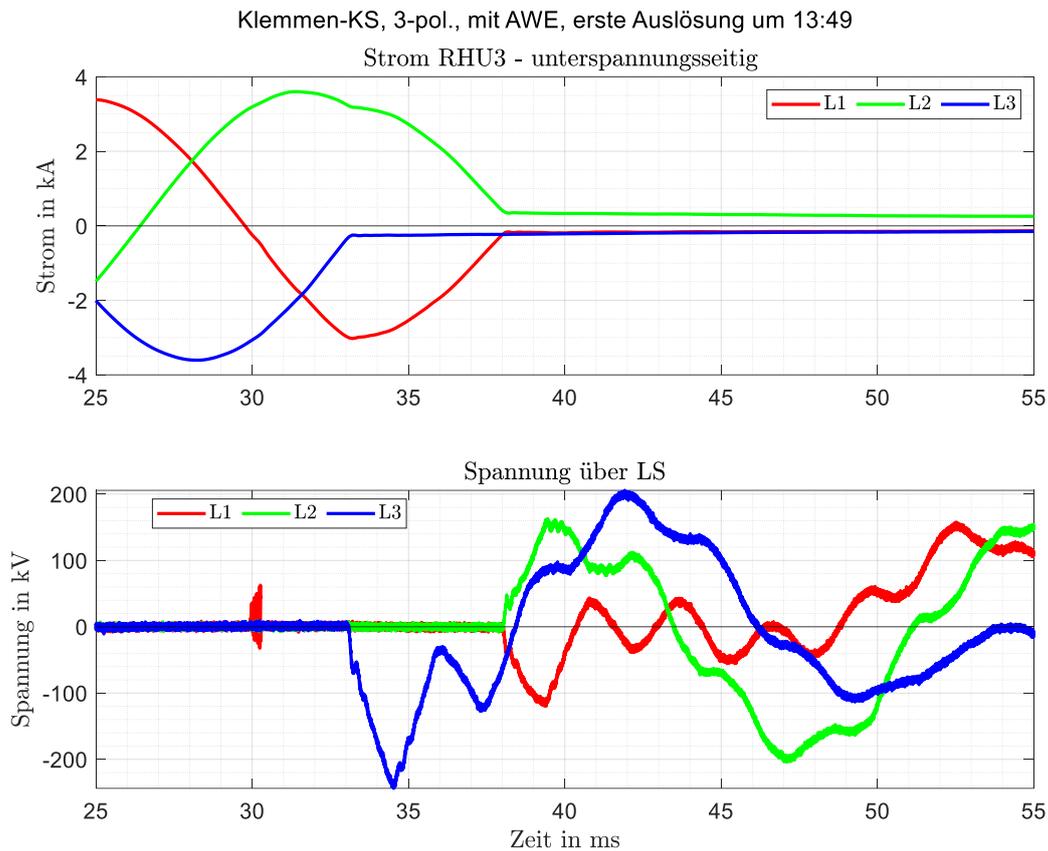


Abbildung 57: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler, unten)

4.4.3 Spannung über LS und faseroptische Strommessung

Abbildung 58 stellt zusätzlich zur Spannung über den Vakuum-LS auch den Stromverlauf der faseroptischen Strommessung dar. Es sind zum Zeitpunkt der multiplen Wiederzündungen transiente Stromspitzen erkennbar.

Eine detaillierte Betrachtung der Wiederzündung für Phase L1 folgt in Abbildung 59.

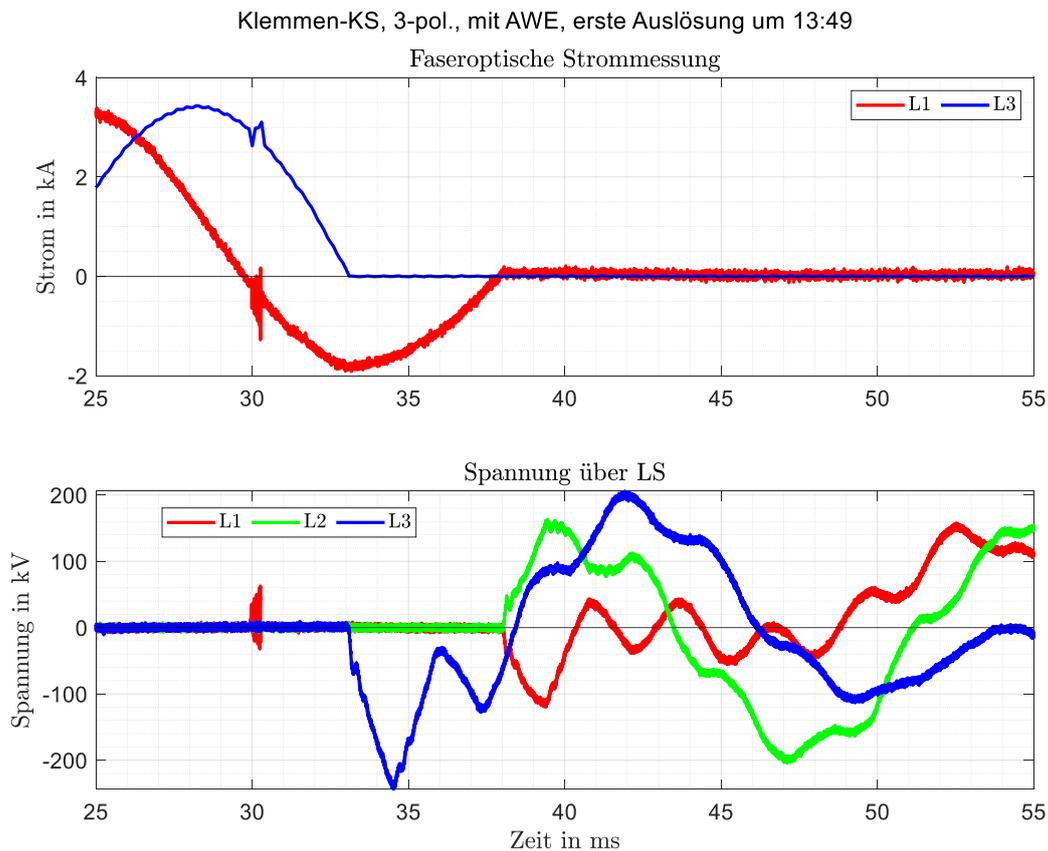


Abbildung 58: Detailbetrachtung der faseroptischen Strommessung sowie der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

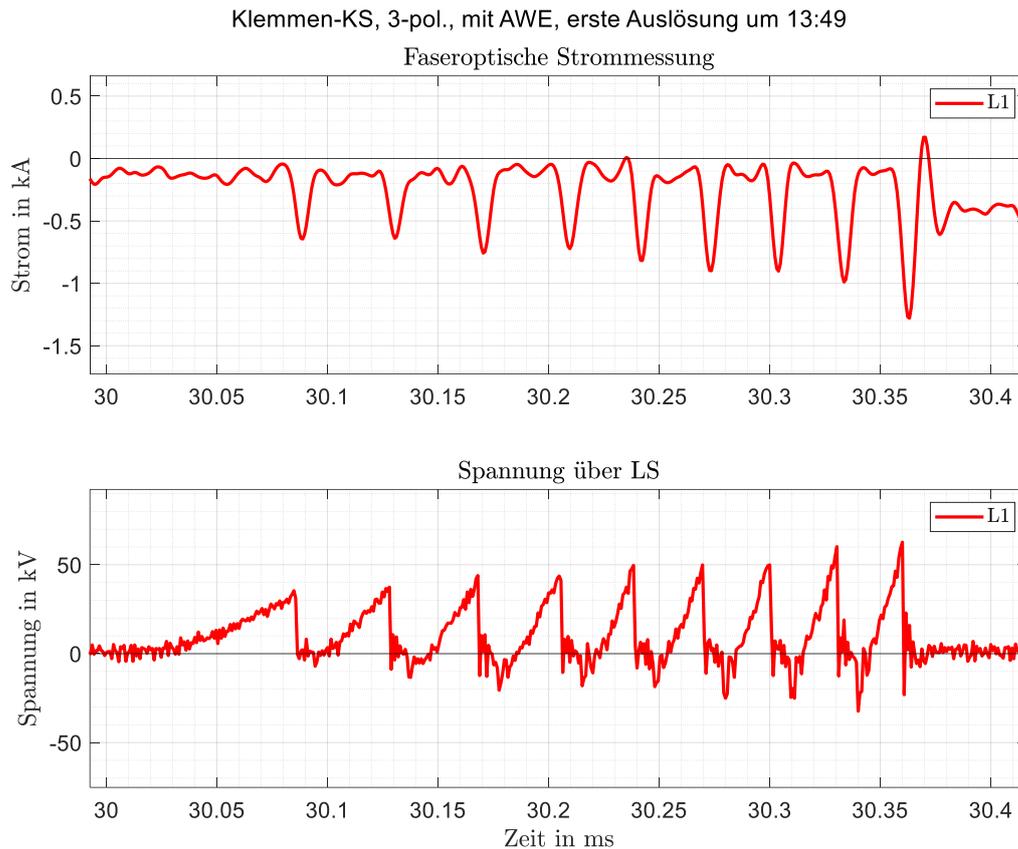


Abbildung 59: Detailbetrachtung der faseroptischen Strommessung sowie der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS für die Wiederzündungen

4.4.4 Verlagerungsspannung

Die Verlagerungsspannungen während dieses Versuchs sind in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargestellt. Die gemessene Verlagerungsspannung (blau durchgezogen) wurde an der E-Spule im unterspannungsseitigen Sternpunkt des Transformators RHU3 gemessen. Da der Messbereich zu gering gewählt wurde, ist diese Kurve abgeschnitten. Die berechnete Verlagerungsspannung (pink strichliert) wurde auf Basis der speiseseitigen Spannung (CR-Teiler) berechnet.

Mit der Klärung des Fehlers in der zugehörigen Öffnung der Schalterpole werden Schwingungen im Nullsystem angeregt. Die maximale Amplitude der Verlagerungsspannung nach der Fehlerklärung liegt bei ca. 95 kV (Abbildung 61).

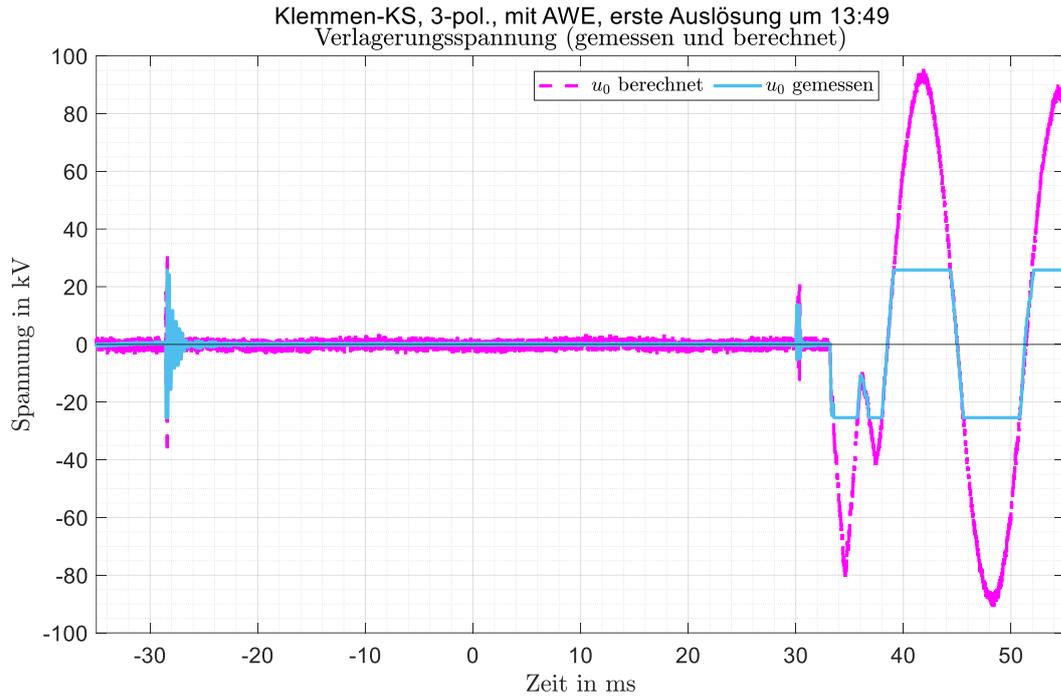


Abbildung 60: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule; Schalten auf Fehler durch SF6-LS bei $t = -28,1$ ms

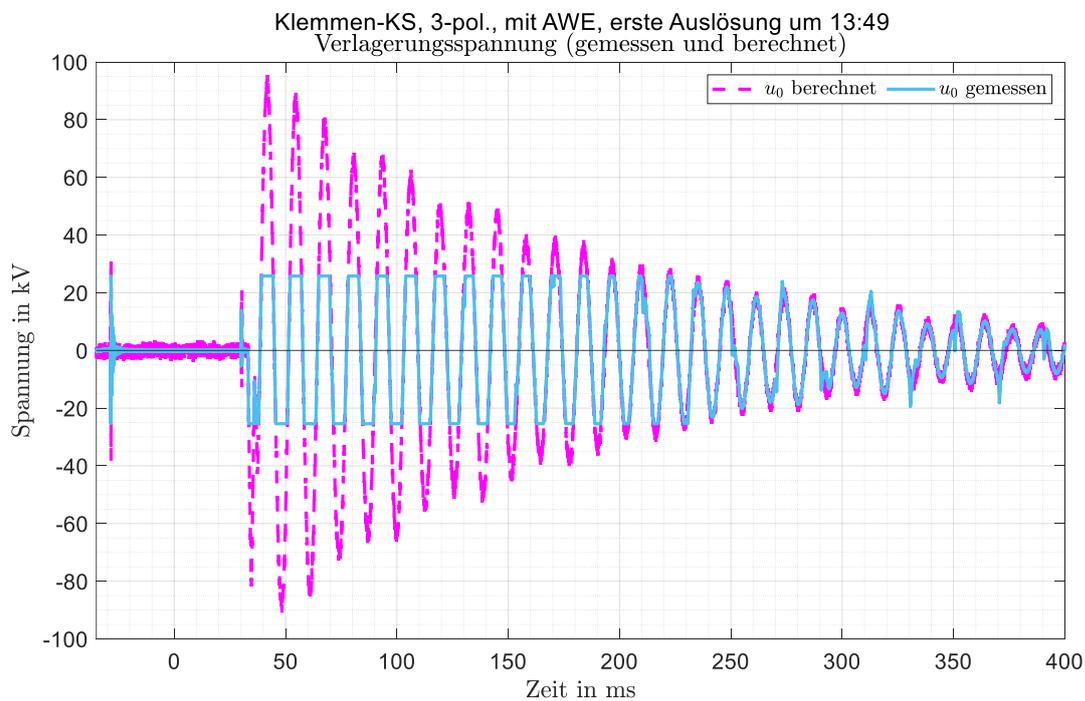


Abbildung 61: Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule; Schalten auf Fehler durch SF6-LS bei $t = -28,1$ ms

4.5 3-poliger Abstands-KS mit EG (mit Erdberührung, mit AWE, 1. Auslösung, Versuch 5b um 16:06)

Dieses Kapitel dokumentiert die Kurvenverläufe zum Versuch 5b: 3-poliger Abstands-KS mit EG und mit AWE. Dieser Versuch beinhaltet dabei die 1. Auslösung des Versuchs und nicht die Wiedereinschaltung der AWE. Die Ersatzschaltung dieses Fehlers ist in Abbildung 38 (rechts) dargestellt. Bei diesem Versuch treten beim erstlöschenden Pol (L2) zwei NSDDs auf (mehr hierzu siehe Kapitel 1.5.2). Dabei kommt es jedoch zu keinen Wiederezündungen.

4.5.1 Übersicht des Versuchs

Abbildung 62 stellt eine Übersicht zum durchgeführten Kurzschlussversuch dar. Der KS-Strom lag bei ca. $I_k = 2,4 \text{ kA}$ und damit unterhalb des Bemessungs-Betriebsstromes des Vakuum-LS $I_r = 3150 \text{ A}$. Der Fehler startet bei $t = -13 \text{ ms}$ per Zuschaltung des SF6-LS im Leitungsabzweig, der Schutz des Vakuum-LS in der Kupplung löst dreipolig bei $t = 0 \text{ s}$ aus. Erstlöschender Pol ist Phase L2 bei $t = 36,1 \text{ ms}$. Der Fehler ist vollständig bei $t = 41,5 \text{ ms}$ geklärt. Nach dem Auftreten der wiederkehrenden Spannung im erstlöschenden Pol treten zwei NSDDs bei $t = 37,5 \text{ ms}$ und $t = 42,5 \text{ ms}$ auf.

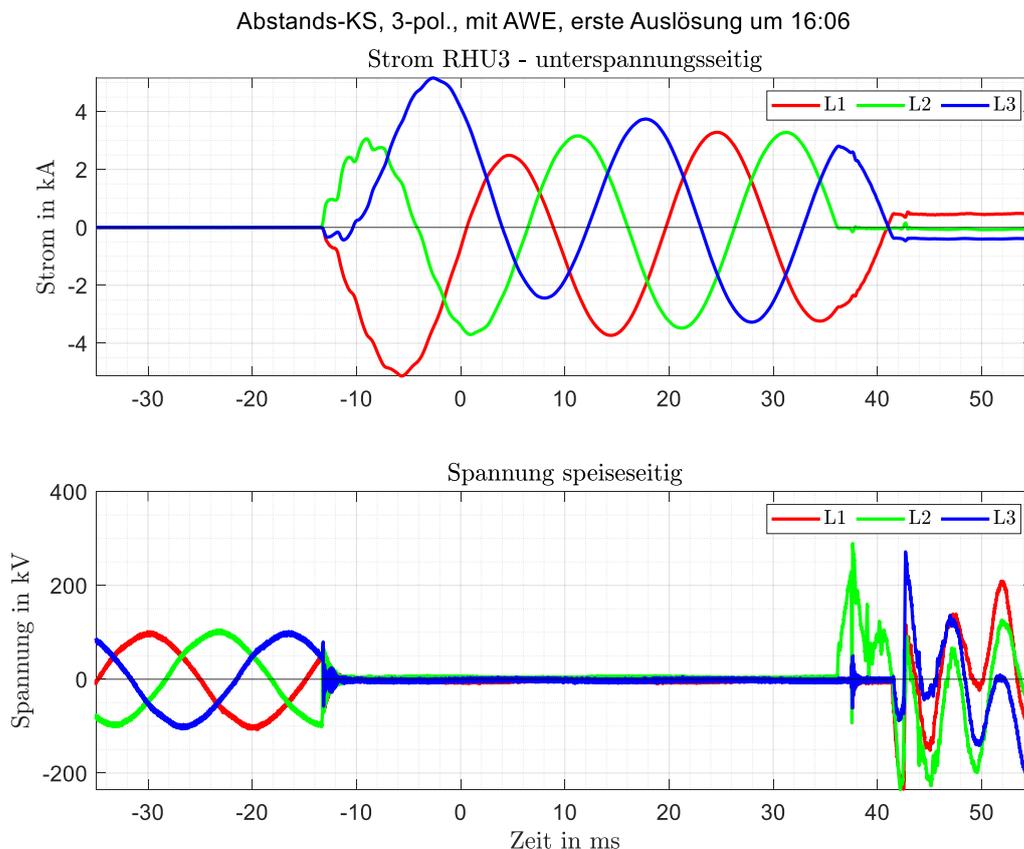


Abbildung 62: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

4.5.2 Spannung über LS

Abbildung 63 zeigt die Spannung über den Vakuum-LS, sowie die Schalterstellung⁶ der Pole des Vakuum-LS dar. Eine nähere Erklärung des Phänomens kann Kapitel 4.1.4 entnommen werden.

Die wiederkehrende Spannung des erstlöschenden Poles (L2) erscheint bei $t = 36,1$ ms bei einer Schalteröffnung von ca. 30 %. Die NSDDs bei $t = 37,5$ ms und $t = 42,5$ ms treten bei Schalteröffnungen von ca. 35 % und 55 % auf.

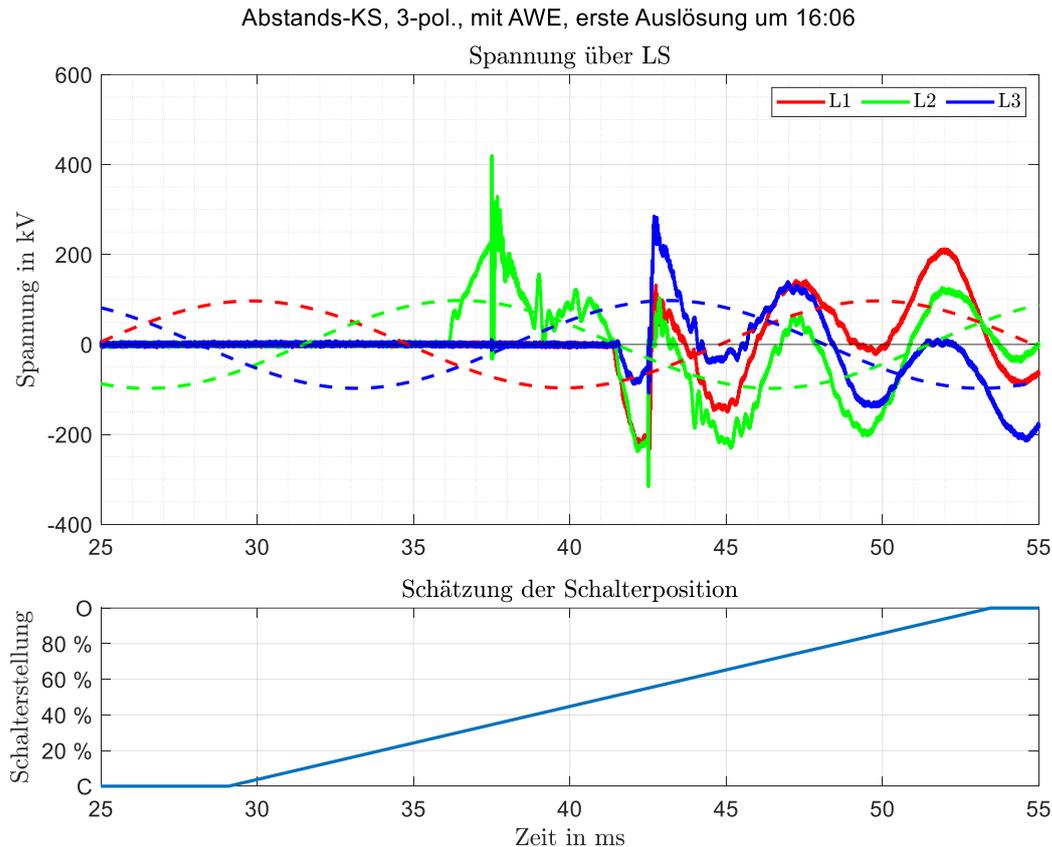


Abbildung 63: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s

Abbildung 64 stellt zusätzlich zur Spannung über den Vakuum-LS auch den gemessenen Strom im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) dar. Es ist deutlich bei $t = 36,1$ ms zu erkennen, dass der Schaltvorgang in Phase L2 zunächst erfolgreich ist. Auch die NSDDs führen nicht dazu, dass der Schalter in L2 wiederzündet. Dies zeigt sich daran, dass kein 50-Hz-Strom in Phase L2 zu fließen beginnt. Bei dieser Messung stehen keine Messergebnisse einer hochfrequenten faseroptischen Strommessung zur Verfügung. Der abklingende Offset in der Strommessung nach der Fehlerklärung lässt sich durch das Betriebsverhalten („Gedächtnis“) von den Messkernen der Stromwandler erklären.

⁶ 0 % entspricht Schalter geschlossen (C), 100 % entsprechen Schalter offen (O)

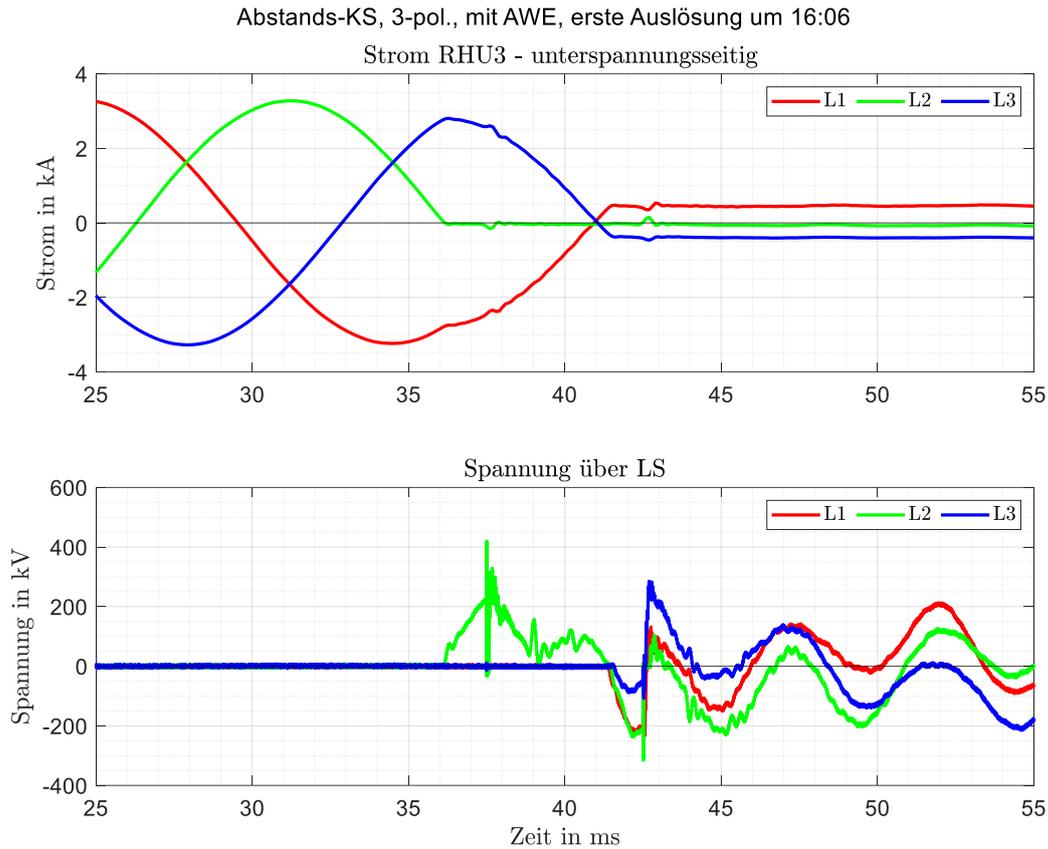


Abbildung 64: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler, unten)

4.5.3 Spannung über LS bei Betrachtung der NSDDs

Abbildung 65 visualisiert eine Detailbetrachtung der NSDD zum Zeitpunkt $t = 37,5$ ms und Abbildung 66 stellt die NSDD zum Zeitpunkt $t = 42,5$ ms detailliert dar. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Spannungen in dieser Abbildung die Spannungen über den Vakuum-LS darstellen, welche durch die Subtraktion von zwei Messsignalen (CR-Messung speiseseitig und CR-Messung abzweigseitig) berechnet sind.

Die in den Abbildungen auftretenden Spannungsspitzen treten daher weder speise- oder abzweigseitig auf, womit auch keine Betriebsmittel (Transformator, Kabel, Kombiwandler) dieser Spannungsbelastung ausgesetzt sind. Der Leistungsschalter beherrscht aufgrund seiner Auslegung diese Spitzen.

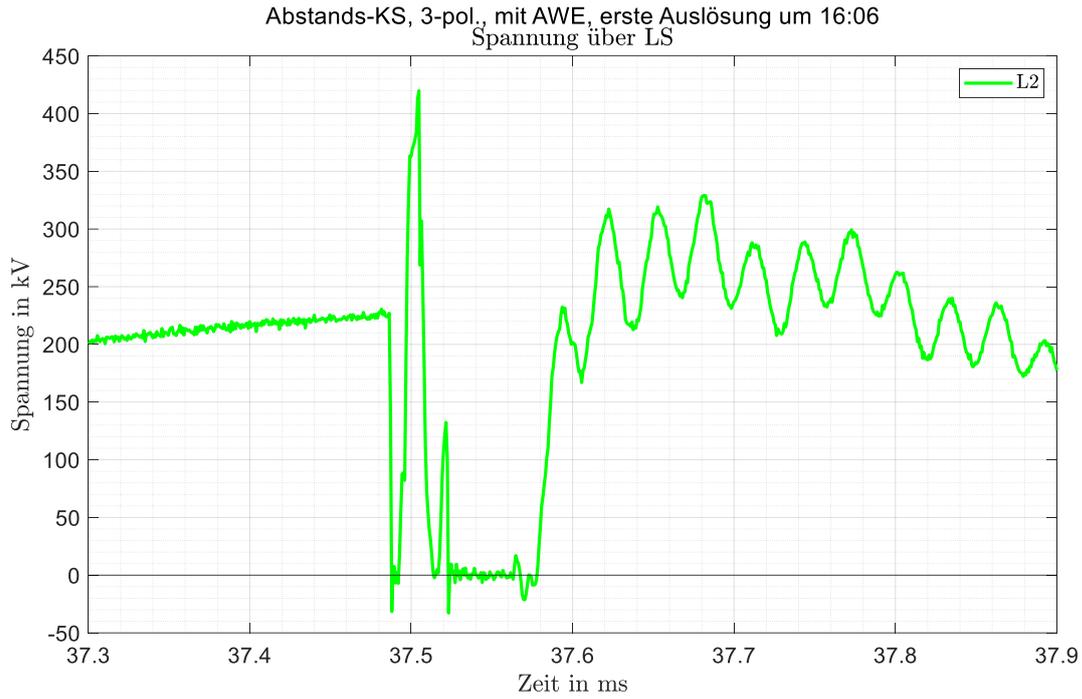


Abbildung 65: Detailbetrachtung der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS für die 1. NSDD

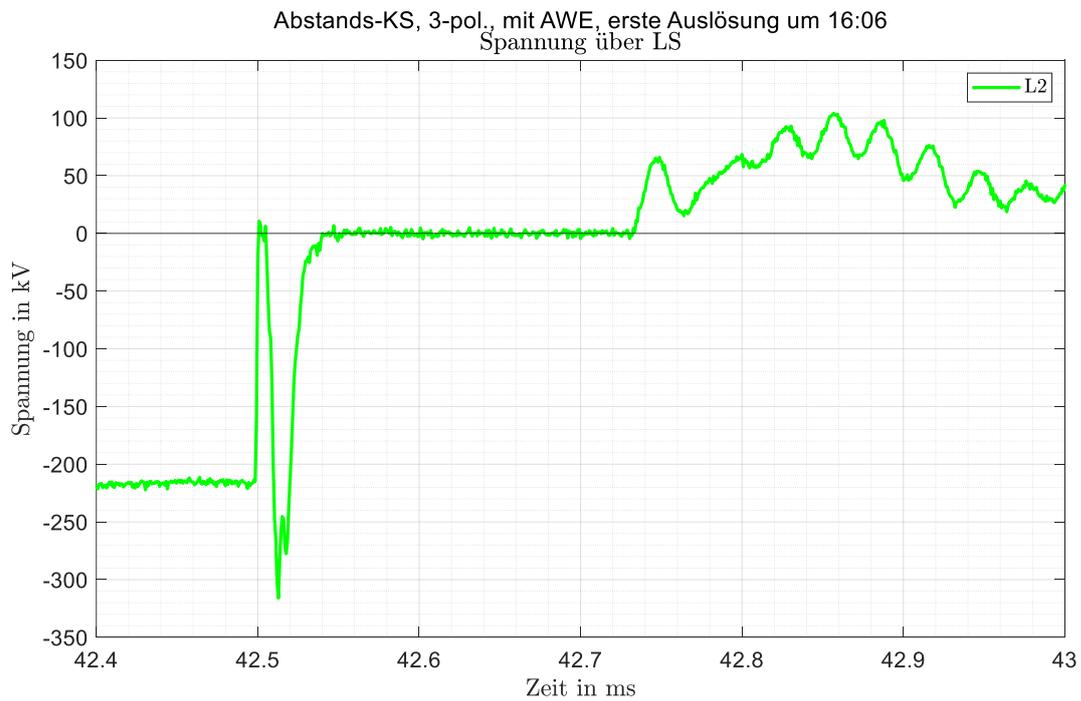


Abbildung 66: Detailbetrachtung der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS für die 2. NSDD

4.5.4 Verlagerungsspannung

Die Verlagerungsspannungen während dieses Versuchs sind in Abbildung 67 und Abbildung 68 dargestellt. Die gemessene Verlagerungsspannung (blau durchgezogen) wurde an der E-Spule im unterspannungsseitigen Sternpunkt des Transformators RHU3 gemessen. Da der Messbereich zu gering gewählt wurde, ist diese Kurve abgeschnitten. Die berechnete Verlagerungsspannung (pink strichliert) wurde auf Basis der speiseseitigen Spannung (CR-Teiler) berechnet. Diese Kurven stimmen in guter Näherung überein.

Mit der Klärung des Fehlers in der zugehörigen Öffnung der Schalterpole werden Schwingungen im Nullsystem angeregt. Die maximale Amplitude der Verlagerungsspannung nach der Fehlerklärung liegt bei ca. 170 kV (Abbildung 68).

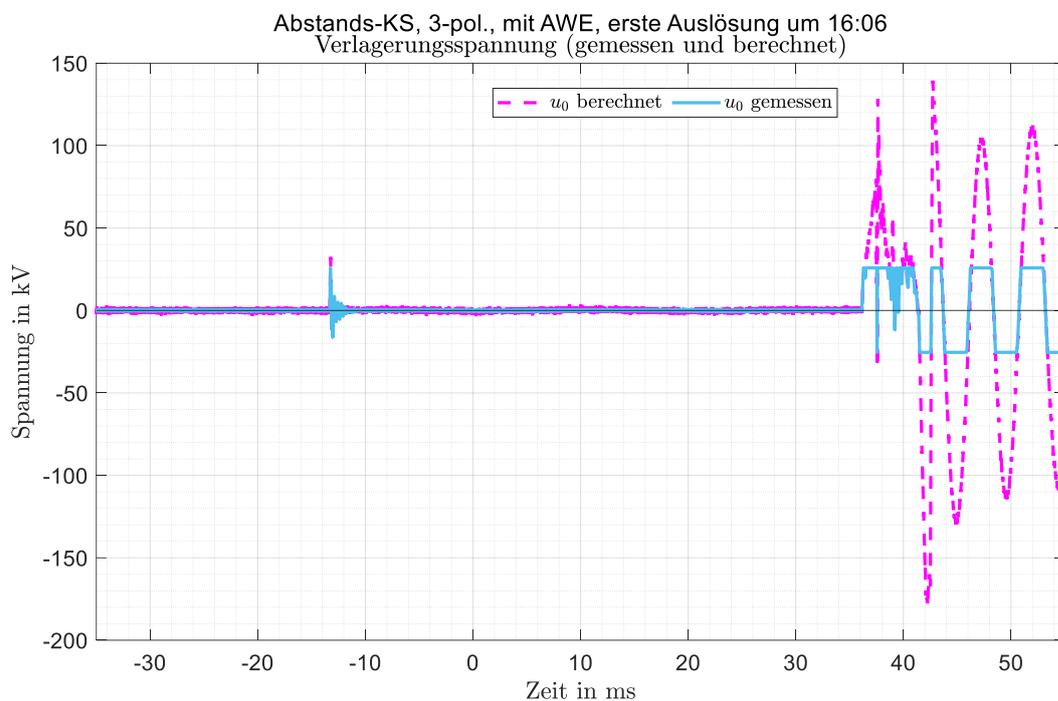


Abbildung 67: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule; Schalten auf Fehler durch SF6-LS bei $t = -13$ ms

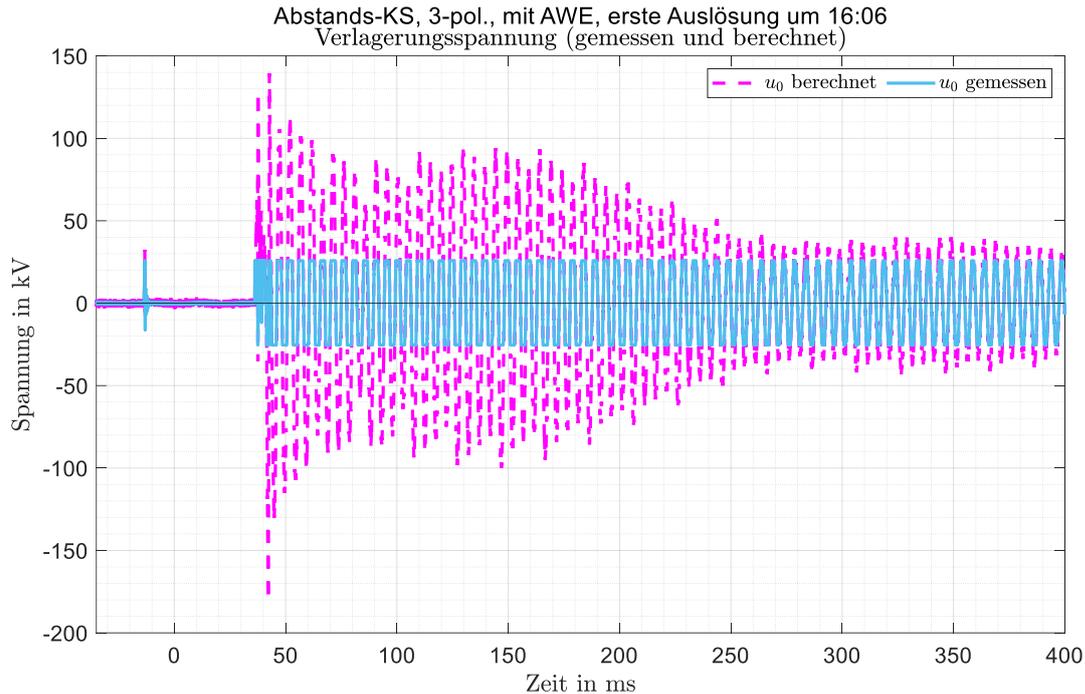


Abbildung 68: Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

4.6 Zusammenfassung der Fehlerschaltungen

Folgende Tabelle 3 fasst alle durchgeführten Fehlerschaltungen zusammen. Dabei sind aufgetretene Kurzschlussströme sowie die gemessenen RRRVs der erstlöschenden Pole des Vakuum-LS aufgelistet.

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse der Fehlerschaltungen im Hinblick auf multiple Wiederzündungen und NSDDs zusammen. Dabei ist unter anderem die Phase der Wiederzündung/NSDD, sowie die Anzahl und die geschätzte Schalterposition in % zum Zeitpunkt der Phänomene angeführt. Der Zeitpunkt $t = 0$ s entspricht dem Zeitpunkt des ersten Aus-Kommandos der beiden Schutzgeräte im Kupplungsabzweig.

Aufgrund der geringen Amplitude der Kurzschlussströme konnten keine typischen sägezahnförmigen Schwingungen unmittelbar nach Klärung des Abstandskurzschluss beobachtet werden.

Allgemeine Daten					Erstlöschender Pol			
Versuch	Uhrzeit	Art	Entfernung	I_k in kA	Phase	$RRRV_{peak}$	U_C	$RRRV_{max}$
						in kV/ μ s	in kV	in kV/ μ s
4a	12:33	2-pol. mit Erde	Klemmen	2	L3	0,117	163	0,365
4b	13:05	3-pol. mit Erde		2,3	L2	0,167	239	0,505
4c	13:49	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	L3	0,165	238	0,537
4c	14:12	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	L3	0,169	242	0,377
4c	14:12	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	L1	0,164	237	0,514
4d	14:50	1-pol.		0,07	L3	0,076	176	0,086
4e	15:23	3-pol. mit ZD		2,4	L1	0,165	236	0,612
5a	15:59	3-pol. mit Erde	Abstand	2,4	L2	0,165	239	0,504
5b	16:06	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	L2	0,171	230	0,488
5b	16:06	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	L2	0,162	234	0,505
5c	16:42	1-pol.		0,07	L3	0,028	154	0,028
ES	17:08	1-pol. mit ZD	Klemmen	0,02	L3	0,032	137	0,094

Tabelle 3: Zusammenfassung der Fehlerschaltungen inkl. Fehlerbeschreibung und auftretender Fehlerströme und RRRVs sowie maximalem Spannungsbetrag U_C

Allgemeine Daten		Wiederzündungen			Non-Sustained Disruptive Discharge (NSDD)		
Versuch	Uhrzeit	Phase	Anzahl ⁷	Schalterstellung ⁸	Phase	Anzahl ⁹	Schalterstellung
4a	12:33	-	-	-	-	-	-
4b	13:05	L3	10	= 30 %	-	-	-
4c	13:49	L1	9	= 5 %	-	-	-
4c	14:12	L1	6	= 20 %	-	-	-
4c	14:12	L1	6	= 20 %	-	-	-
4d	14:50	-	-	-	-	-	-
4e	15:23	-	-	-	-	-	-
5a	15:59	-	-	-	-	-	-
5b	16:06	-	-	-	L2	2	= 35 und 55 %
5b	16:06	-	-	-	-	-	-
5c	16:42	-	-	-	-	-	-
ES	17:08	-	-	-	-	-	-

Tabelle 4: Zusammenfassung der Fehlerschaltungen im Hinblick auf Wiederzündungen und NSDDs

⁷ Anzahl der Wiederzündungen

⁸ Schalterstellung: Position der Schalterpole ist auf Basis des Zeitpunktes der Schutz-Auslösung ($t = 0$ s) geschätzt. 0 % entspricht geschlossenem LS, 100 % entspricht offenem LS

⁹ Anzahl der NSDDs

5 Zusammenfassung und Fazit

Während Vakuum-Leistungsschalter für das Schalten in der Mittelspannung das Standard-Betriebsmittel darstellen, waren SF₆-Leistungsschalter für Hochspannungsschaltanlagen bisher das Mittel der Wahl. Das Verbot des Einsatzes des Treibhausgases SF₆ als Isolier- und Löschgas in Betriebsmitteln und Schaltanlagen bedingt den Einsatz alternativer Technologien. Für diese müssen jedoch zum Teil erst Betriebserfahrungen gesammelt werden, besonders trifft dies auf den Einsatz von Vakuum-Leistungsschaltern im Hs- und HöS-Bereich zu.

Das Ziel der Schaltversuche im Oktober 2024 sowie im März 2025 war, Felderfahrung mit Vakuum-Leistungsschaltern zu sammeln. Dabei wurde der Leistungsschalter 3AV1FG der Firma Siemens Energy AG im Umspannwerk Ternitz (VTE) der Austrian Power Grid installiert. Im Zuge der Schaltversuche wurden Betriebs- und Fehlerschaltungen durchgeführt, um die Auswirkungen der Vakuum-Schaltertechnologie auf das Schaltverhalten zu untersuchen. In diesem Bericht sind dabei nur jene Messergebnisse angeführt, welche interessante Phänomene aufzeigen. Die hier nicht beschriebenen Versuche zeigten keine Auffälligkeiten. Um die Missverständnisse zu vermeiden, wird erwähnt, dass auch die hier analysierten Fälle für die jeweils auszuführenden Schaltaufgaben zu keinen Problemen führten.

Im Hinblick auf die durchführbaren Betriebsschaltungen mit dem Vakuum-LS gelten Restriktionen für Schalten der C-Batterie und der Kompensationsdrossel im Umspannwerk, weshalb diese Betriebsmittel nicht in die Schaltversuche aufgenommen sind.

Die Typprüfung zum Schalten von kapazitiven Lasten beschränkte sich bei der ersten Generation des 3AV1FG auf das Schalten von leerlaufenden Kabeln und Freileitungen. Dementsprechend ist das Schalten von Kondensatorbänken formal nicht freigegeben. Die zweite Generation des 3AV1 wird laut Siemens Energy AG ein definiertes Schaltvermögen für Einzelkondensatorbänke mitbringen.

Das Schalten von Drosseln zählt zu den anspruchsvollsten Aufgaben eines Leistungsschalters. Das ist unabhängig vom Schaltprinzip und dem verwendeten Lösch- und Isoliermedium. Ein leichtfertiger Umgang mit dieser Anwendung gefährdet das Schaltgerät und die zu schaltende Drossel. Bei SF₆-Hochspannungs-Leistungsschaltern mit einzeln ansteuerbaren Polen hat sich gesteuertes Schalten (point-on-wave) als sichere technische Lösung durchgesetzt. Für Vakuumleistungsschalter der 145-kV-Ebene ist die Installation von RC-Filterkreisen zur Schwingungsdämpfung und zur Mitigation der auftretenden steilen Spannungsgradient empfohlen und Stand der Technik.

Im Zuge der Schaltversuche wurden unterschiedliche Messsysteme wie faseroptische Strommessungen, hochfrequente Spannungsmessungen durch CR-Teiler, induktive Messsysteme (durch externe Messgeräte und Schutzgeräte), spezielle Prüfsysteme für Leistungsschalter (Omicron), Geräte zur Messung von Stromwandler-Remanenz (VUM) und Messungen zur Ortsdosisleistung (AGES) installiert.

Die Messungen der Ortsdosisleistung von etwaiger Röntgenstrahlung und der Leistungsschalter erfüllten die Erwartungshaltung und lieferten die erwarteten Ergebnisse. Während der Versuche konnte keine außergewöhnliche Ortsdosisleistung festgestellt werden. Im Hinblick auf die Vermessung des Leistungsschalters konnten keine signifikanten, messtechnischen Unterschiede blickend auf die Messergebnisse vor und nach der Schaltversuche festgestellt werden.

Die Messung der Stromwandler-Remanenz erlaubte aufgrund einer unzureichenden Anzahl von Messpunkten keine spezifischen Aussagen. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die Leistungsschalterprüfung (Omicron) mit DC-Strömen (Entladung einer Kapazität im Prüfgerät) die Messung der Stromwandler-Remanenz beeinflusst. In diesem Zusammenhang sollte die Stromschleife für die Einprägung des DC-Stromes bei der LS-Prüfung so gewählt werden, dass kein Prüfstrom über die Stromwandler fließt.

Die Ergebnisse der Strom- und Spannungsmessungen sind folgendermaßen zusammengefasst:

- Faseroptische Strommessung (FOCS): Bei den AC-Messsystemen (L1, L2, L3) traten Komplikationen bei der Arbeitspunktstabilität auf, daher sind Messergebnisse ausschließlich für Phase L1 verfügbar. Das DC-Messsystem in Phase L3 lieferte durchwegs plausible Ergebnisse.
- Einschalten einer leerlaufenden Freileitung: Im Hinblick auf die Einschaltung einer leerlaufenden Freileitung konnten keine außergewöhnlichen Effekte festgestellt werden. Bei der Zuschaltung durch den Vakuum-LS sind Vorzündungen beim Testobjekt messtechnisch erfasst worden, welche jedoch als unkritisch erachtet werden können.
- Abschalten einer leerlaufenden Freileitung: Bei dem Abschalten der leerlaufenden Freileitung war das Ziel, die Beanspruchung des LS durch die kapazitiv-wirkende Freileitung zu untersuchen. Es zeigt sich, dass die wiederkehrende Spannung hohe Spannungen erreichen kann. Diese sind jedoch als unproblematisch zu betrachten.
- Schalten eines nahen Sammelschienen-Trenners: Bei der Ein- und Ausschaltung des nahen Sammelschienen-Trenners bei offenem Vakuum-LS war das Ziel festzustellen, wie groß die Kopplung über den Vakuum-LS ist. In diesem Zusammenhang konnte keine signifikante Kopplung über den Vakuum-LS festgestellt werden.
- Schalten eines leerlaufenden Transformators: Das Einschalten / Bespannen und das Ausschalten des leerlaufenden Transformators (nach abgeklungenem Inrushstrom) stellt – im Vergleich zu dem Schalten von Induktivitäten – kein Problem für den Leistungsschalter dar. Die wiederkehrende Spannung steigt nur sehr langsam an. Bei einem Versuch wurden Wiederezündungen dokumentiert, welche jedoch als unproblematisch zu bewerten sind. Aufgrund mangelnder Messung des Ausschaltsignals des Vakuum-LS kann keine Aussage über die Schalterposition während der Wiederezündungen getroffen werden.
- Abschalten des Inrushstromes eines Transformators: Bei dem Ausschalten des Inrushstromes durch den Leistungsschalter handelt es sich um eine selten angewendete Betriebschaltung. Dieser Versuch wurde zweimal durchgeführt, wobei bei einem Versuch eine deutliche Schaltüberspannung gemessen wurde. Bei den Versuchen sind keine Wiederezündungen aufgetreten.

- Abstands- und Klemmenkurzschluss: Es traten keine das Schaltverhalten beeinträchtigenden Phänomene auf. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die zu klärenden Kurzschlussströme weit unter dem Schaltvermögen des Leistungsschalter lagen.
- Wiederzündungen und NSDDs: Im Zuge der Klemmenkurzschlüsse treten bei vier dreipoligen Klemmenkurzschlüssen multiple Wiederzündungen im erstlöschenden Pol auf. Diese entstehen, wenn der natürliche Stromnulldurchgang, zu dem die Fehlerklärung stattfindet, innerhalb eines zu kurzen Zeitfensters nach der Öffnung der Schalterpole auftritt. Die Wiederfestigung der Schaltstrecke ist dann noch nicht weit genug gediehen um der wiederkehrenden Spannung endgültig zu widerstehen. Der nächstlöschende Pol (nach weiteren 7 ms) konnte danach erwartungsgemäß erfolgreich und ohne Wiederzündungen den Fehler klären.

Bei einem 3-poligen Abstandskurzschluss traten zwei NSDDs auf. Dabei kollabiert die Spannung über den Leistungsschalter aufgrund von Entladungen im Inneren des Schalters vorübergehend. Im Zuge einer NSDD kommt es jedoch zu keinem wiederkehrenden 50-Hz-Stromfluss. Die NSDDs dauerten maximal 200 μ s an und sind als unproblematisch zu bewerten.

Zusammenfassung aller Schaltversuche: Folgende Tabelle 5 fasst die Ergebnisse aller durchgeführten Schaltversuche gemäß dem Prüfplan (Kapitel 1.3) zusammen. Im Zusammenhang mit den Betriebsschaltungen konnten keine problematischen Besonderheiten festgestellt werden.

		Beschreibung der Versuche	Besonderheiten	Bemerkung
Betriebsschaltungen	Schalten von leerlaufender Leitung (Einschalten, am 22.10.2025)		Nein	-
	Schalten von leerlaufender Leitung (Ausschalten, am 13.03.2025)		Nein	-
	Schalten von entferntem Trenner (Vakuum-LS geschlossen)		Nein	-
	Schalten von nahem SS-Trenner (Vakuum-LS offen)		Nein	-
	Schalten von FL-Trenner bei offenem Vakuum-LS		Nein	-
	Schalten von FL-Trenner bei geschlossenem Vakuum-LS		Nein	-
	Schalten von nahem SS-Trenner bei beidseitiger Besspannung (Vakuum-LS offen)		Nein	-
	Schalten von leerlaufendem Trafo		Ja	Wiederzündungen
	Schalten von leerlaufendem Trafo mit Inrush-Strom		Nein	Schaltüberspannung
Fehlerschaltungen	Klemmen- Fehler	1-poliger Klemmenerdschluss	Nein	-
		1-poliger Erdschluss mit Zünddraht (anstehend)	Nein	-
		2-poliger Kurzschluss ohne AWE (mit Erdberührung)	Nein	-
		3-poliger Kurzschluss ohne AWE (mit Erdberührung)	Ja	Wiederzündungen
		3-poliger Kurzschluss mit AWE (mit Erdberührung)	Ja	Wiederzündungen
		3-poliger Kurzschluss mit Zünddraht (ohne Erdberührung)	Nein	-
	Abstands - Fehler	1-poliger Abstandserdschluss	Nein	-
		3-poliger Kurzschluss ohne AWE (mit Erdberührung)	Nein	-
		3-poliger Kurzschluss mit AWE (mit Erdberührung)	Ja	NSDDs

Tabelle 5: Zusammenfassende Bewertung aller Versuche

6 Referenzen

- [1] Robert Schürhuber, Vorlesungsunterlagen zu *Switching in Electrical Power Systems*, 2024
- [2] Robert Schürhuber, Philipp Hackl, *Prüfplan für 22/23.10.2024*, Institut für Elektrische Anlagen und Netze
- [3] Ari Tirroniemi, 2024-10-21 – Prüfprotokoll (35160132), 21.10.2024, Omicron
- [4] René Smeets et. al., *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*, 2015, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 978-1-118-38135-9
- [5] Robert Schürhuber, Philipp Hackl, *Prüfplan für 13.03.2025*, Institut für Elektrische Anlagen und Netze
- [6] Alexander Pirker, *KS-Versuche VTE Remanenzmessung der Stromwandler im UW-Ternitz*, 02.12.2024, VUM
- [7] Franz Kabrt, *Prüfbericht bezüglich Ortsdosisleistungsmessung etwaiger Röntgenstrahlung eines 100 kV Vakuum-Leistungsschalters*, 30.10.2024, AGES

7 Anhang

7.1 Ansprechpersonen

- Technische Universität Graz, Institut für Elektrische Anlagen und Netze: Robert Schürhuber, robert.schuerhuber@tugraz.at, +43 316 873-7551
- Technische Universität Graz, Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik: reinhard.klambauer@tugraz.at, +43 316 873-30578
- Austrian Power Grid:
 - Fredi Belavic, fredi.belavic@apg.at, +43 664 8834 2913
 - Lukas Schwalt, Lukas.schwalt@apg.at, +43 664 7835 7443
- Omicron: Ari Tirroniemi, ari.tirroniemi@omicronenergy.com, +43 664 80507 2468
- VUM: Alexander Pirker, umwelttechnik@vum.co.at, +43 50 20-32 521
- AGES: Franz Kabrt, franz.kabrt@ages.at, +43 50555-32 922

7.2 Betriebsmitteldaten

7.2.1 Leitungsdaten

Folgende Tabelle 6 dokumentiert die Leitungsdaten jener Leitungen, welche für die Fehlerversuche in Betrieb waren.

Leitung	Länge	L'	C_B'	Z_w	R_1'	X_1'	R_0'	X_0'	C_0'
	in km	in mH/km	in nF/km	in Ω	in Ω /km	in Ω /km	in Ω /km	in Ω /km	in nF/km
286	99,4	1,32	8,95	384	0,084	0,414	0,23	1,073	5,55
225a	95,6	1,31	8,93	383	0,085	0,411	0,222	1,056	5,498
122/8	31,3	1,26	9,42	365	0,156	0,395	0,333	1,042	5,62

Tabelle 6: Leitungsparameter der eingesetzten Freileitungen

7.2.2 Bemessungsdaten des Vakuum-Leistungsschalters 3AV1FG

Abbildung 69 zeigt ein Bild des eingesetzten Vakuum-LS (3AV1FG) der Firma Siemens Energy.



Abbildung 69: Foto des Versuchsobjektes (DUT), Siemens Energy 3AV1FG

Folgende Tabelle 7 fasst die Kenndaten des Vakuum-LS zusammen.

Typ: 3AV1FG	Baujahr / Fabriknummer: 23/35160132
Bemessungsspannung U_r :	123 kV
Bemessungs-Stehblitzstoßspannung U_p :	550 kV
Bemessungs-Kurzzeit-Stehwechselfspannung U_d :	230 kV
Bemessungsfrequenz f_r :	50 Hz
Bemessungs-Betriebsstrom I_r :	3150 A
Bemessungs-Kurzschluss-Ausschaltstrom I_{sc} :	40 kA
Bemessungs-Kurzschlussdauer t_k :	1 s
DC-Komponente des Kurzschlussausschaltstromes:	45 %
Polfaktor k_{pp} :	1,5
Bemessungs-Freileitungsausschaltstrom:	50 A
Bemessungs-Kabelausschaltstrom:	160 A
Bemessungsschaltfolge:	0-0,3s-CO-3min-CO

Tabelle 7: Bemessungsdaten des Vakuum-LS

7.2.3 CONDIS CR-Teiler

Abbildung 70 zeigt das Typenschild des CONDIS CR-Teilers.

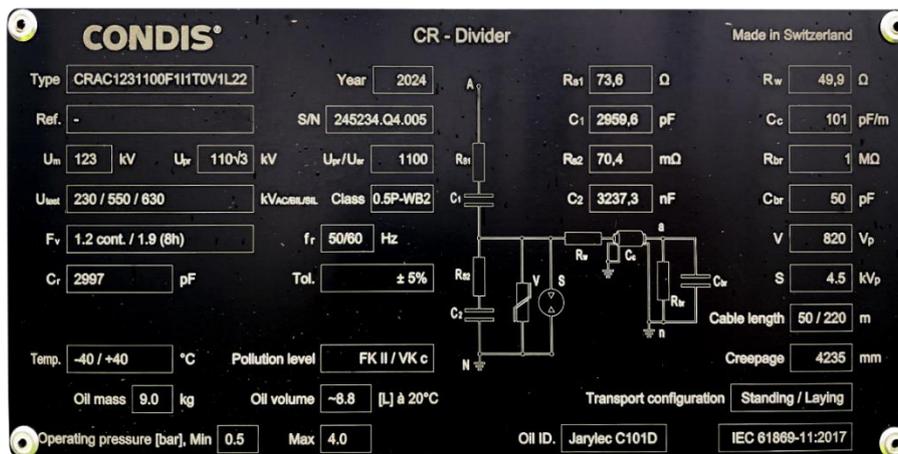


Abbildung 70: Typenschild CR-Teiler von Firma CONDIS

Dabei waren die CR-Teiler gemäß der Seriennummern wie folgt im Umspannwerk Ternitz platziert:

Seriennummer	Installierte Position
mps-245234-q4.004	Abzweigsseitig L1
mps-245234-q4.005	Abzweigsseitig L2
mps-245234-q4.006	Abzweigsseitig L3
mps-245234-q4.001	Speiseseitig L1
mps-245234-q4.002	Speiseseitig L2
mps-245234-q4.003	Speiseseitig L3

Tabelle 8: Seriennummer und installierte Position CR-Teiler von der APG AG

7.3 Dokumentation der Versuchs-Zeitpunkte und -Beschreibungen

Dienstag, 22.10.2024		
Zeitpunkt	Bezeichnung	Beschreibung des Versuchs
09:55	1a	Vakuum-LS Ein, Bespannung 122/8 Leerlauf
10:03	1a	Vakuum-LS Ein, Bespannung 122/8 Leerlauf
10:13	1a	Vakuum-LS Ein, Bespannung 122/8 Leerlauf
10:17	1a	Vakuum-LS Ein, Bespannung 122/8 Leerlauf
10:21	2a	Vakuum-LS Ein, LS 1228 Aus, SS-Trenner 122/8, Zuschalten
10:23	2a	Vakuum-LS Ein, LS 1228 Aus, SS-Trenner 122/8, Zuschalten
10:18	2b	Vakuum-LS Ein, LS 1228 Aus, SS-Trenner 122/8, Abschalten
10:23	2b	Vakuum-LS Ein, LS 1228 Aus, SS-Trenner 122/8, Abschalten
10:26	3a	Vakuum-LS aus, SS-Trenner (speiseseitig), Zuschalten
10:28	3a	Vakuum-LS aus, SS-Trenner (speiseseitig), Zuschalten
10:25	3b	Vakuum-LS aus, SS-Trenner (speiseseitig), Abschalten
10:27	3b	Vakuum-LS aus, SS-Trenner (speiseseitig), Abschalten
10:28	3b	Vakuum-LS aus, SS-Trenner (speiseseitig), Abschalten
12:33	4a	Klemmen-KS, 2-pol. ohne AWE
13:05	4b	Klemmen-KS, 3-pol., ohne AWE
13:49	4c	Klemmen-KS, 3-pol. mit AWE, 1. Auslösung
13:49	4c	Klemmen-KS, 3-pol. mit AWE, Wiedereinschaltung
14:12	4c	Klemmen-KS, 3-pol. mit AWE, 1. Auslösung
14:12	4c	Klemmen-KS, 3-pol. mit AWE, Wiedereinschaltung
14:50	4d	Klemmen-Erdschluss, ohne AWE
15:23	4e	Klemmen-KS, 3-pol., mit ZD, ohne AWE
15:59	5a	Abstands-KS, 3-pol., ohne AWE
16:06	5b	Abstands-KS, 3-pol., mit AWE, 1. Auslösung
16:06	5b	Abstands-KS, 3-pol., mit AWE, Wiedereinschaltung
16:34	5c	Schaltvorgang nicht aufgezeichnet, keine Auswertung
16:42	5c	Abstandserdschluss, 1-pol., ohne AWE
17:08	ES	Klemmenerdschluss mit ZD, anstehend

Tabelle 9: Übersicht der Versuchsdurchführung, 22.10.2024

Mittwoch, 23.10.2024		
Zeitpunkt	Bezeichnung	Beschreibung des Versuchs
09:46	6a	FL-Trenner, Zuschalten, SF6-LS & Vakuum-LS offen
09:45	6b	FL-Trenner, Abschalten, SF6-LS & Vakuum-LS offen
09:47	6b	FL-Trenner, Abschalten, SF6-LS & Vakuum-LS offen
09:50	6c	FL-Trenner, Zuschalten, SF6-LS offen & Vakuum-LS geschlossen
09:51	6c	FL-Trenner, Zuschalten, SF6-LS offen & Vakuum-LS geschlossen
09:50	6d	FL-Trenner, Abschalten, SF6-LS offen & Vakuum-LS geschlossen
09:51	6d	FL-Trenner, Abschalten, SF6-LS offen & Vakuum-LS geschlossen
09:55	7a	SS-TR (abzweigsseitig), Zuschalten, Vakuum LS offen
09:58	7a	SS-TR (abzweigsseitig), Zuschalten, Vakuum LS offen
09:55	7b	SS-TR (abzweigsseitig), Abschalten, Vakuum LS offen
09:57	7b	SS-TR (abzweigsseitig), Abschalten, Vakuum LS offen
09:59	7b	SS-TR (abzweigsseitig), Abschalten, Vakuum LS offen

Tabelle 10: Übersicht der Versuchsdurchführung, 23.10.2024

Mittwoch, 23.10.2024		
Zeitpunkt	Bezeichnung	Beschreibung des Versuchs
10:58	8a	Vakuum-LS Ein, Bespannung 122/8 Leerlauf
11:05	8a	Vakuum-LS Ein, Bespannung 122/8 Leerlauf
11:08	8b	Vakuum-LS Aus, Bespannung 122/8 Leerlauf
11:15	8b	Vakuum-LS Aus, Bespannung 122/8 Leerlauf
11:21	8a	Vakuum-LS Ein, Bespannung 122/8 Leerlauf
11:23:45	8b	Vakuum-LS Aus, Bespannung 122/8 Leerlauf
11:26	8a	Vakuum-LS Ein, Bespannung 122/8 Leerlauf
11:27	8b	Vakuum-LS Aus, Bespannung 122/8 Leerlauf
11:48	9b	Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3
11:49	9a	Vakuum-LS Ein, Bespannung RHU3
11:56	9b	Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3
11:56:55	9a	Vakuum-LS Ein, Bespannung RHU3
12:07:30	9b	Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3
12:12:30	9a	Vakuum-LS Ein, Bespannung RHU3
12:37	9b	Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3
12:38	9a	Vakuum-LS Ein, Bespannung RHU3
12:44:30	9b	Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3
12:46	10	Vakuum-LS Ein/Aus, Bespannung RHU3 während Inrush
12:49	10	Vakuum-LS Ein/Aus, Bespannung RHU3 während Inrush

Tabelle 11: Übersicht der Versuchsdurchführung, 13.03.2025

7.4 Übersicht RRRV: zweit- und drittlöschende Pole

Allgemeine Daten		Zweitlöschender Pol			Drittlöschender Pol		
Versuch	Uhrzeit	Phase	RRRVpeak	RRRVmax	Phase	RRRVpeak	RRRVmax
			in kV/ μ s	in kV/ μ s		in kV/ μ s	in kV/ μ s
4a	12:33	L2	0,0721	0,335	-	-	-
4b	13:05	L1	0,109	0,354	L3	0,080	0,414
4c	13:49	L2	0,112	0,385	L1	0,084	0,384
4c	14:12	L1	0,091	0,437	L2	0,107	0,405
4c	14:12	L2	0,082	0,428	L3	0,085	0,351
4d	14:50	-	-	-	-	-	-
4e	15:23	L2	0,101	0,412	L3	0,087	0,326
5a	15:59	L1	0,237	0,432	L3	0,070	0,070
5b	16:06	L3	0,142	0,182	L1	0,243	0,422
5b	16:06	L3	0,131	0,131	L1	0,280	0,463
5c	16:42	-	-	-	-	-	-
ES	17:08	-	-	-	-	-	-

Tabelle 12: RRRV von zweit- und drittlöschendem Pol

7.5 Messtabelle: Fehlerströme (110-kV-Seite) und Spannungen vor Transformator (220-kV-Seite)

Für Versuch 4a gibt es eine zusätzliche Spannungsmessung im VOS aus dem Störschrieb. Dabei ist die Spannung der fehlerbehafteten Phasen auf ca. 96 % der Vorfehlerspannung eingebrochen.

Versuch	Uhrzeit	Art	Entfernung	I_k in kA	U_{L1} in kV	U_{L2} in kV	U_{L3} in kV
4a	12:33	2-pol. mit Erde	Klemmen	2	138	69	79
4b	13:05	3-pol. mit Erde		2,3	30	29	30
4c	13:49	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	30	30	30
4c	14:12	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	30	30	30
4c	14:12	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	30	30	30
4d	14:50	1-pol.		0,07	140	140	138
4e	15:23	3-pol. mit ZD		2,4	29	30	31
5a	15:59	3-pol. mit Erde	Abstand	2,4	32	31	32
5b	16:06	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	31	31	31
5b	16:06	3-pol. mit Erde, AWE		2,3	31	31	31
5c	16:42	1-pol.		0,07	135	135	133
ES	17:08	1-pol. mit ZD	Klemmen	0,02	130	130	130

Tabelle 13: Übersicht der Fehlerversuche mit den Fehlerströmen auf der 110-kV-Seite und den gemessenen Spannungen auf der 220-kV-Seite von Transformator RHU3

7.6 Anmerkung: Auslösekommando von Schutzgeräten

Die Störschriebe der Schutzgeräte wurden im Zuge der Auswertungen genutzt, um die Position der Leistungsschalter-Pole näherungsweise zu ermitteln. Hierfür wurde der Zeitpunkt des Kommando-Signal im Störschrieb als $t = 0$ s für die Auswertung berücksichtigt. In diesem Zusammenhang ist es für zukünftige Messungen sinnvoll, zusätzlich das physikalische Steuerungssignal (z.B. im Steuerschrank des LS) mitzumessen. Dadurch kann die tatsächliche Verzögerung zwischen Kommando im Störschrieb und dem physikalischen Anliegen des Signals an der Steuerung ermittelt werden (Verzögerung z.B. durch mechanische Eigenzeiten der Relais-Kontakte etc.). Dabei sollte sowohl das Einschalt- als auch das Ausschaltsignal gemessen werden.

7.7 Zusätzliche Kurvenverläufe: Betriebsschaltungen 22.10.2024

7.7.1 Versuch 3b um 10:27

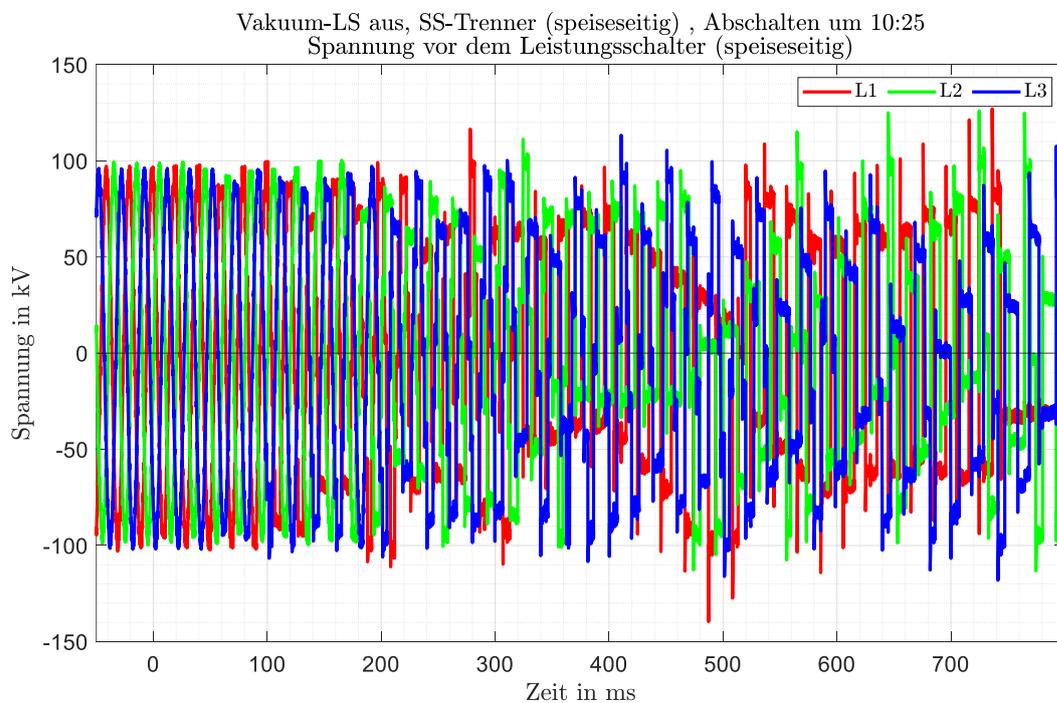


Abbildung 71: Spannungsmessung (CR-Teiler) vor Vakuum-LS (speiseseitig)

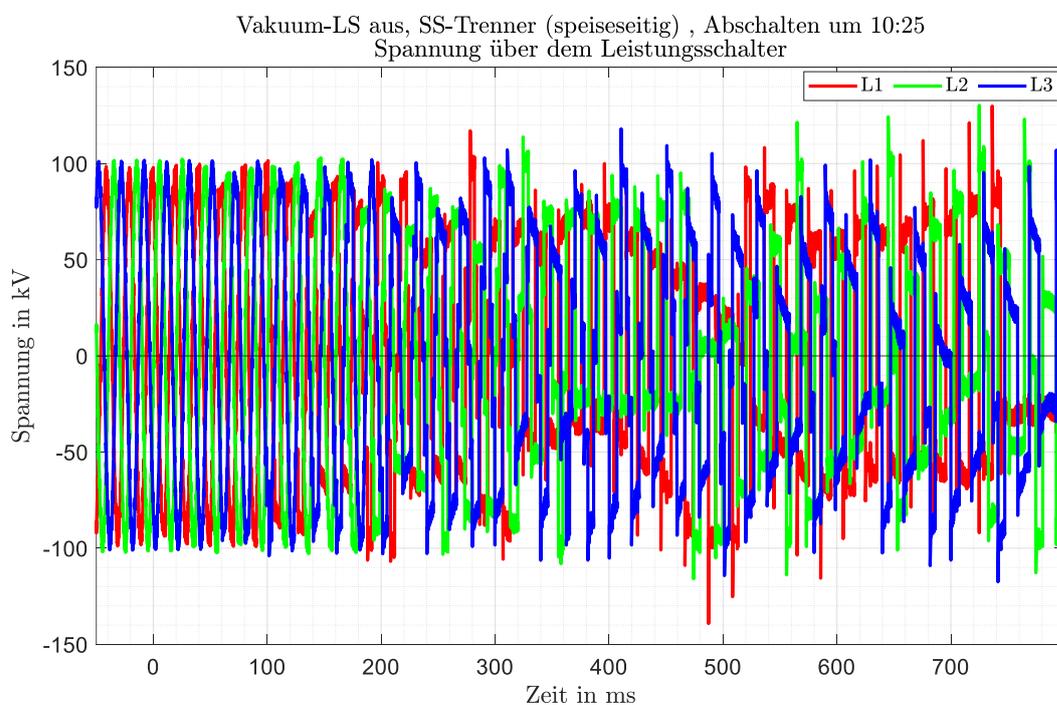


Abbildung 72: Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

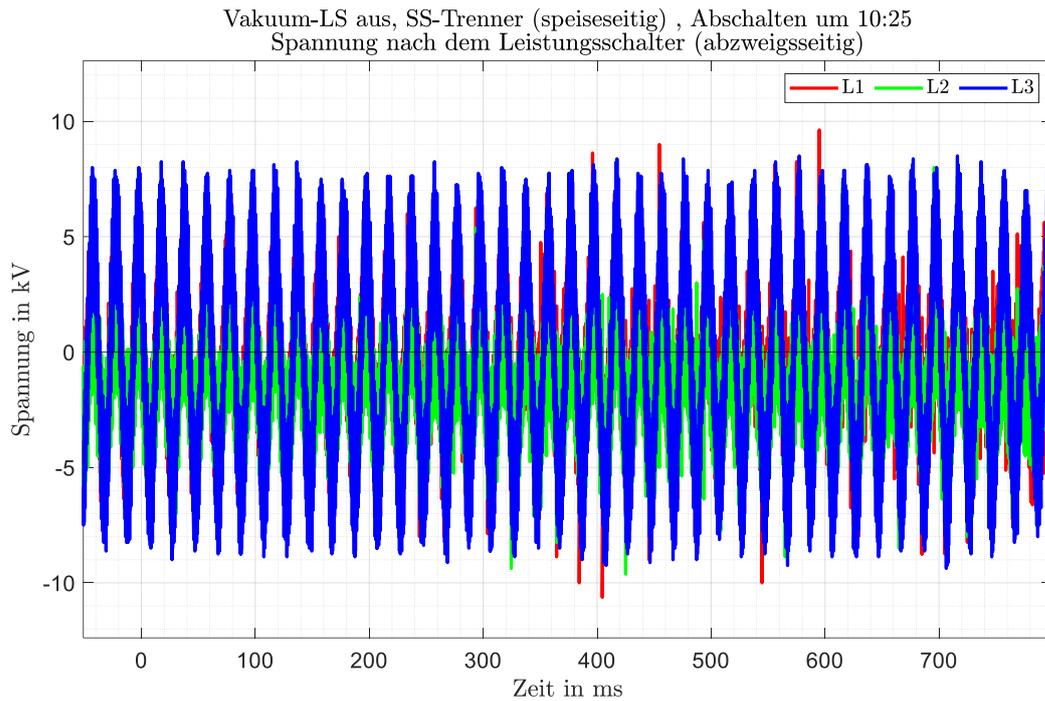


Abbildung 73: Spannungsmessung (CR-Teiler) nach Vakuump-LS (abzweigsseitig)

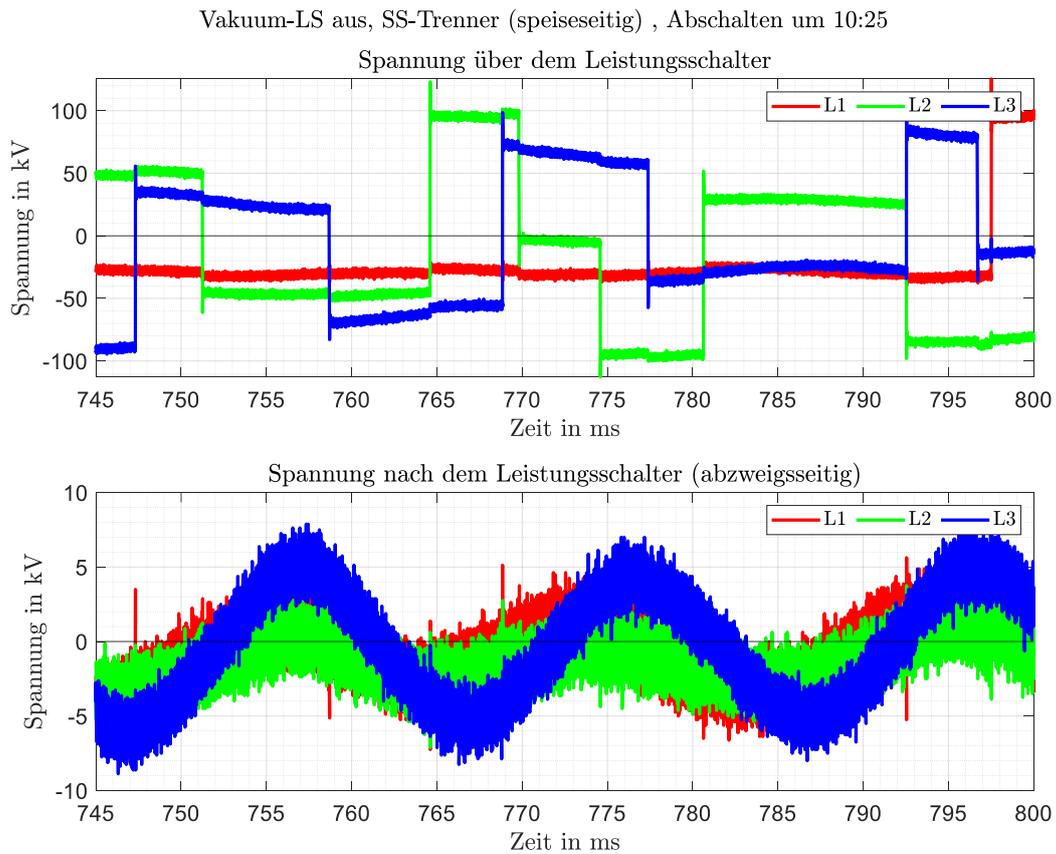


Abbildung 74: Detailbetrachtung der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuump-LS (oben) und nach Vakuump-LS (abzweigsseitig, unten)

7.8 Zusätzliche Kurvenverläufe: Betriebsschaltungen 13.03.2025

7.8.1 Vakuum-LS Aus, Bespannung RHU3

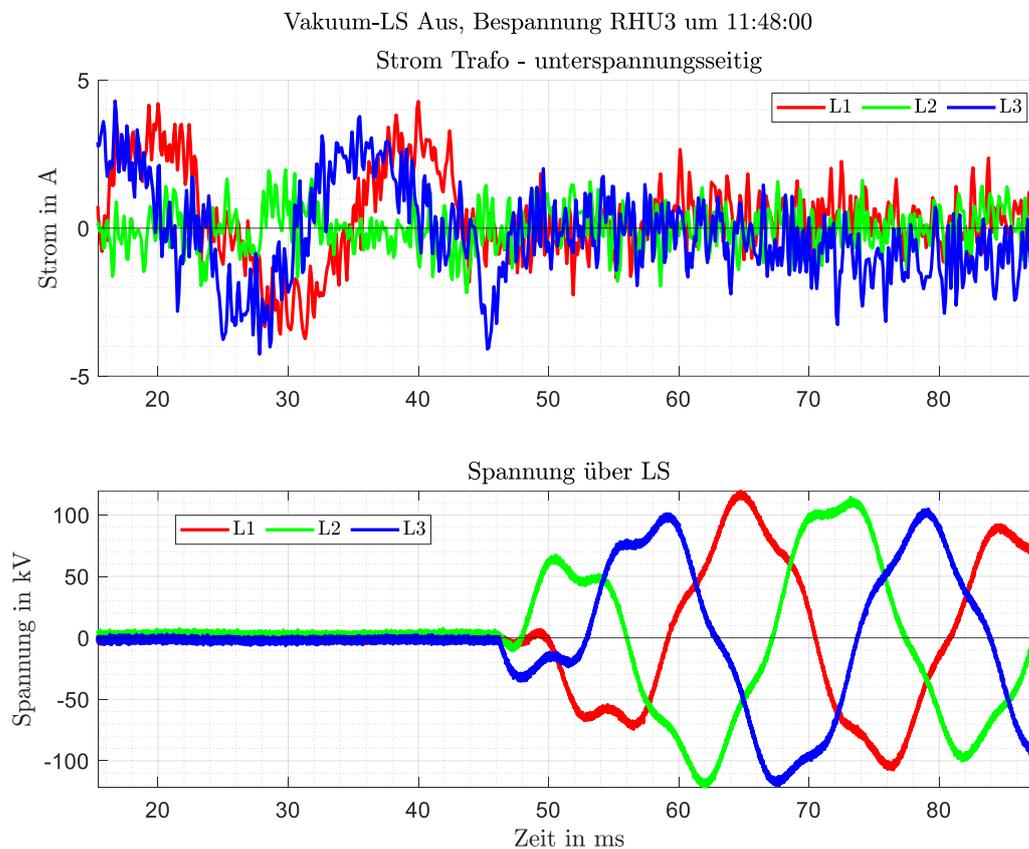


Abbildung 75: Strom auf der Unterspannungsseite des Transformators und die Spannung über den Leistungsschalter

7.8.2 Vakuum-LS Ein / Aus, Bespannung RHU3 während Inrush

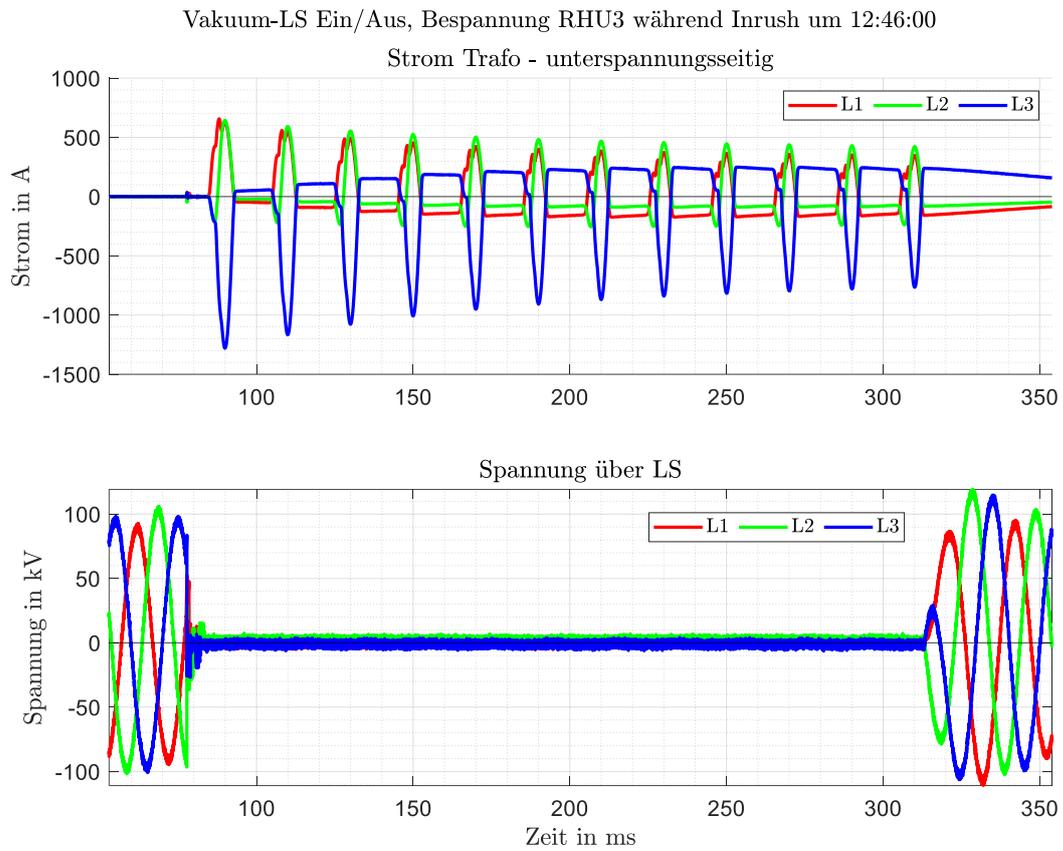


Abbildung 76: Strom auf der Unterspannungsseite des Transformators und die Spannung über den Leistungsschalter

7.9 Zusätzliche Kurvenverläufe: Klemmenfehler 22.10.2024

7.9.1 Versuch 4b um 13:05

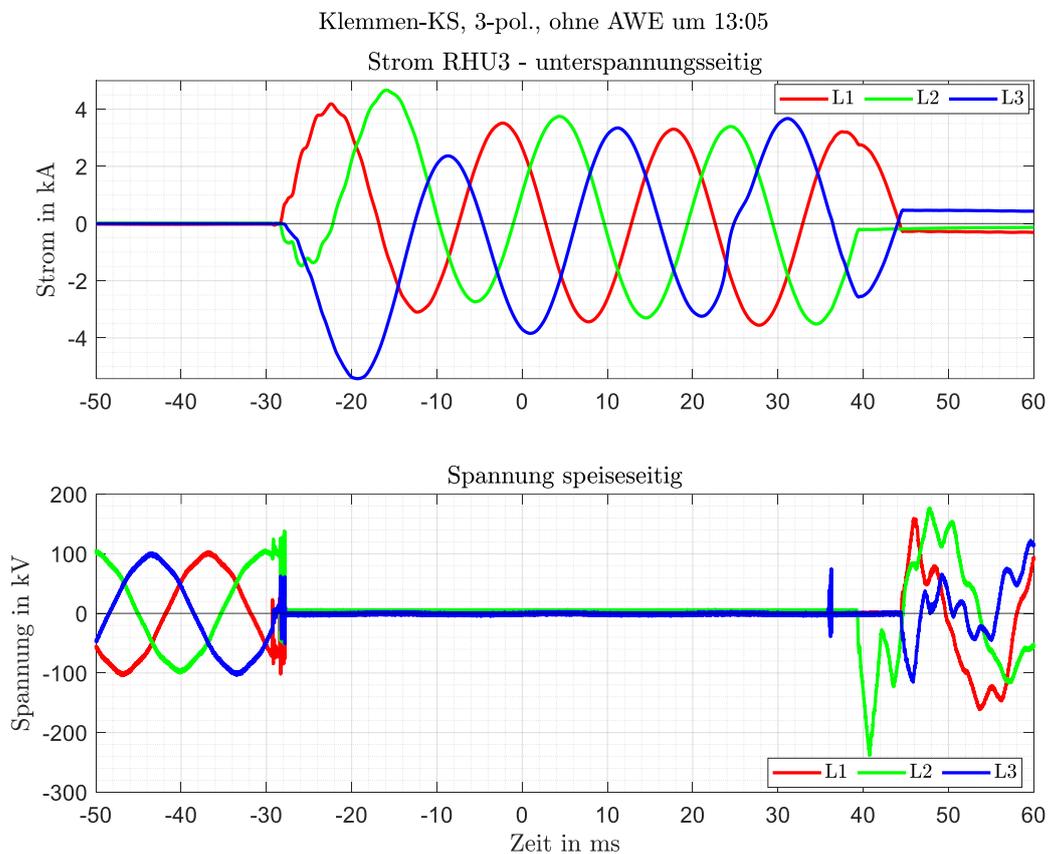


Abbildung 77: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

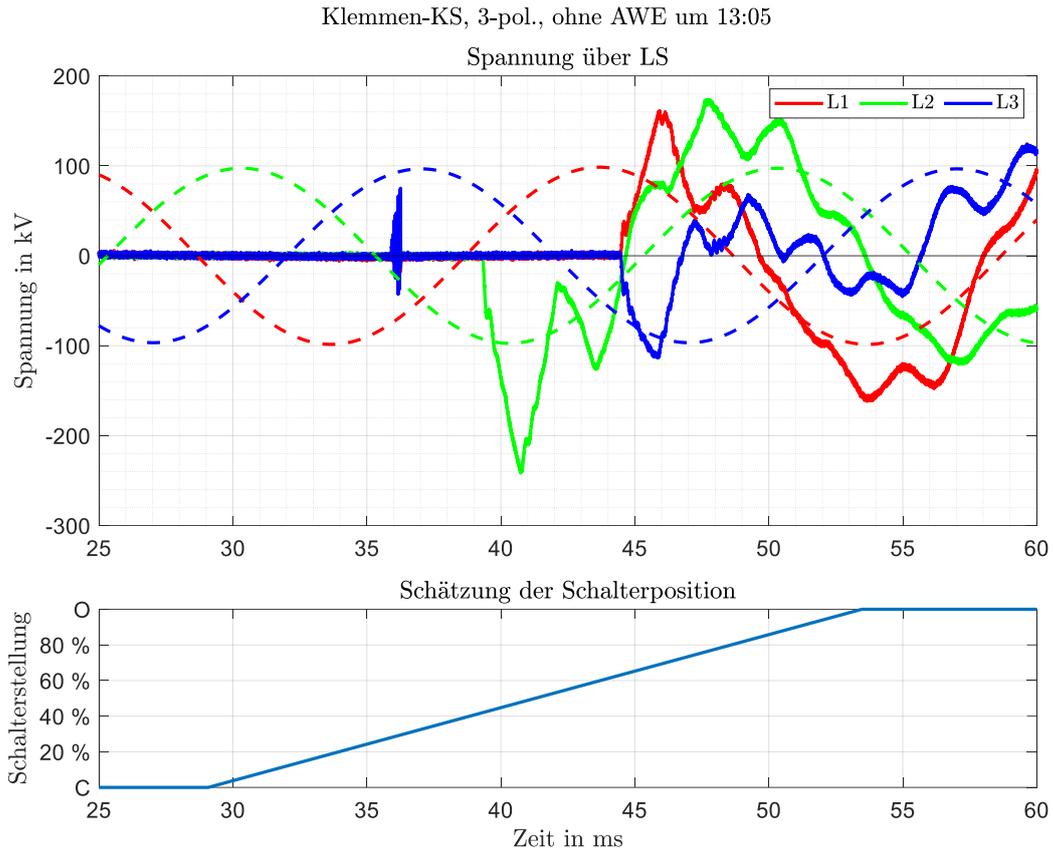


Abbildung 78: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s

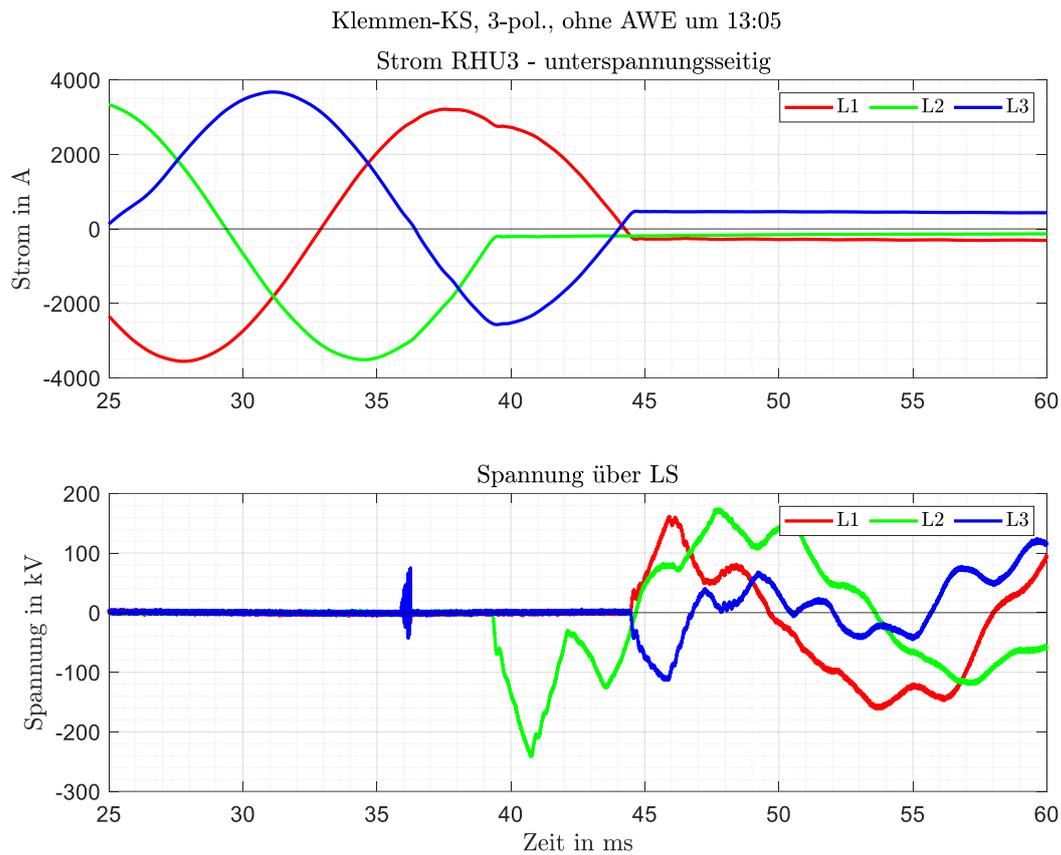


Abbildung 79: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) sowie Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum LS (unten)

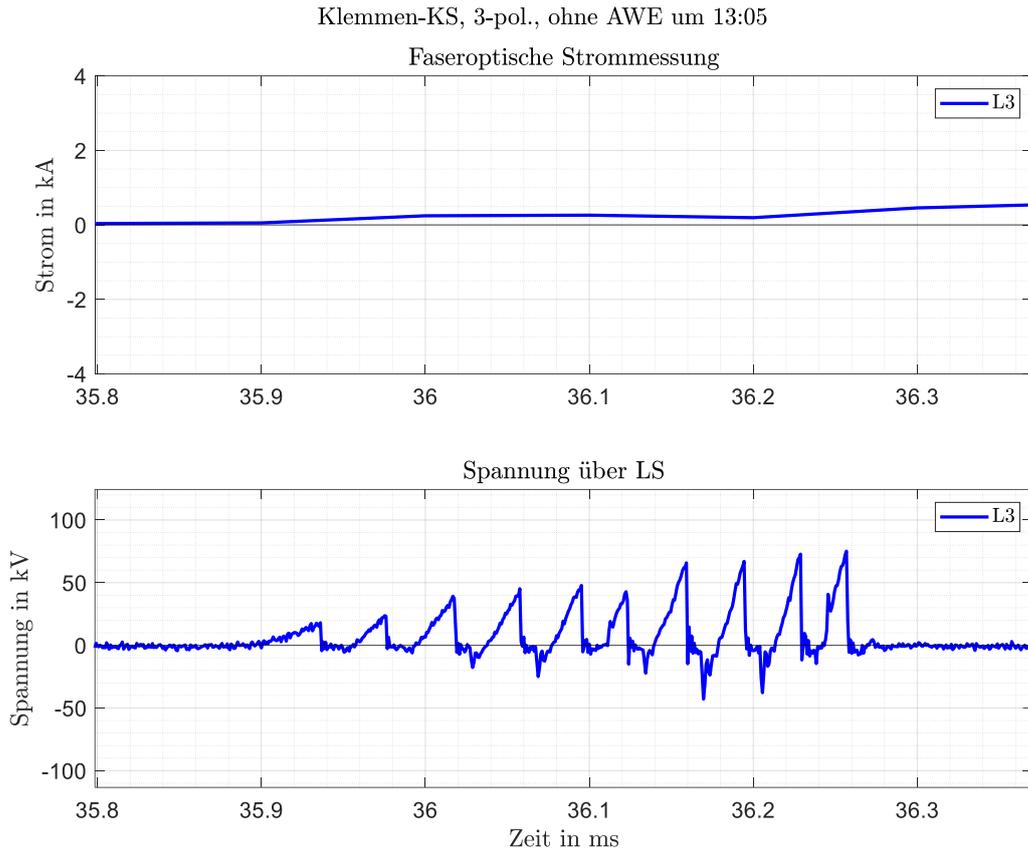


Abbildung 80: Detailbetrachtung der faseroptischen Strommessung (oben) sowie der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum LS (unten) für die Wiederzündung

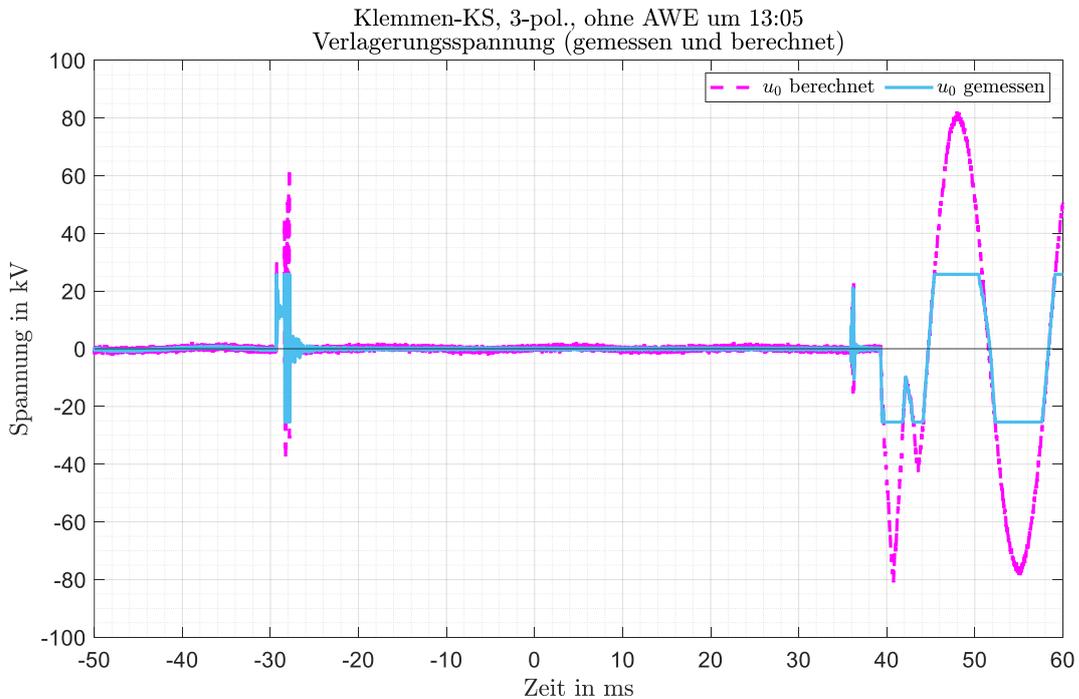


Abbildung 81: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

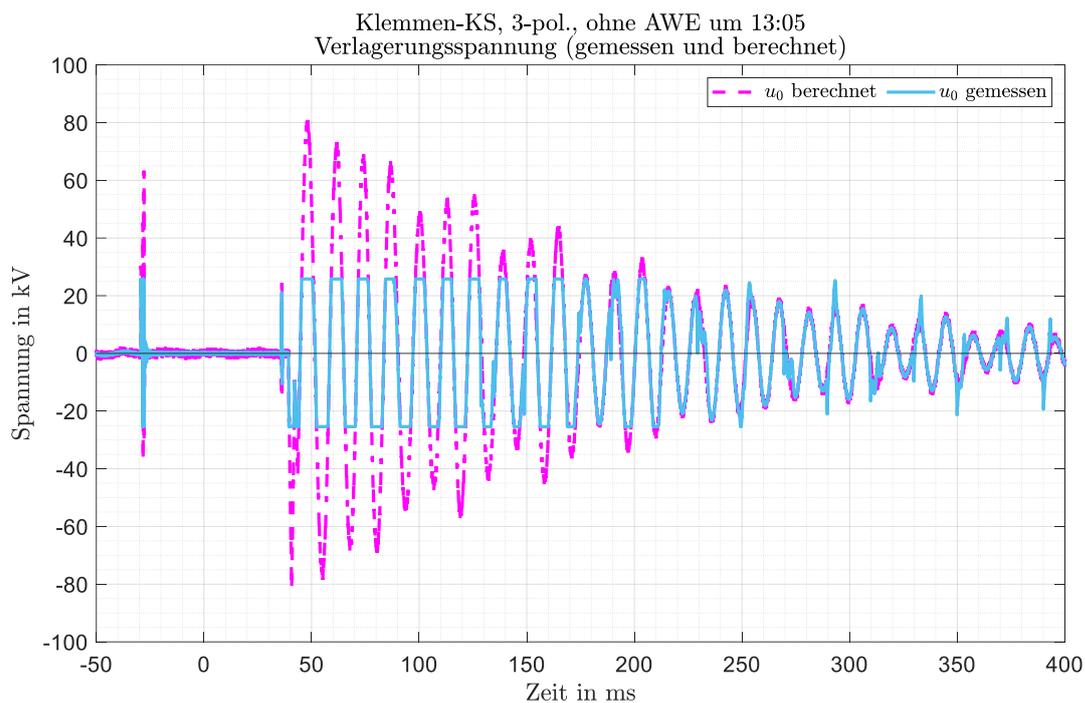


Abbildung 82: Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

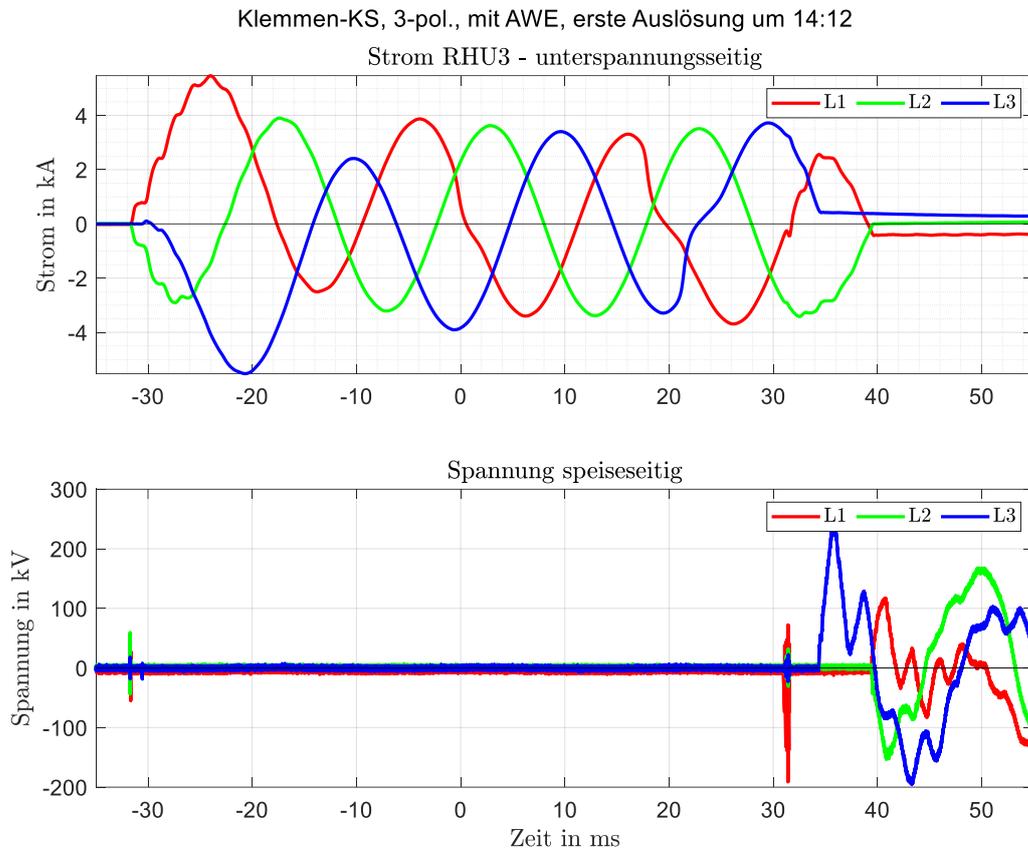
7.9.2 Versuch 4c um 14:12 (1. Auslösung)

Abbildung 83: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS

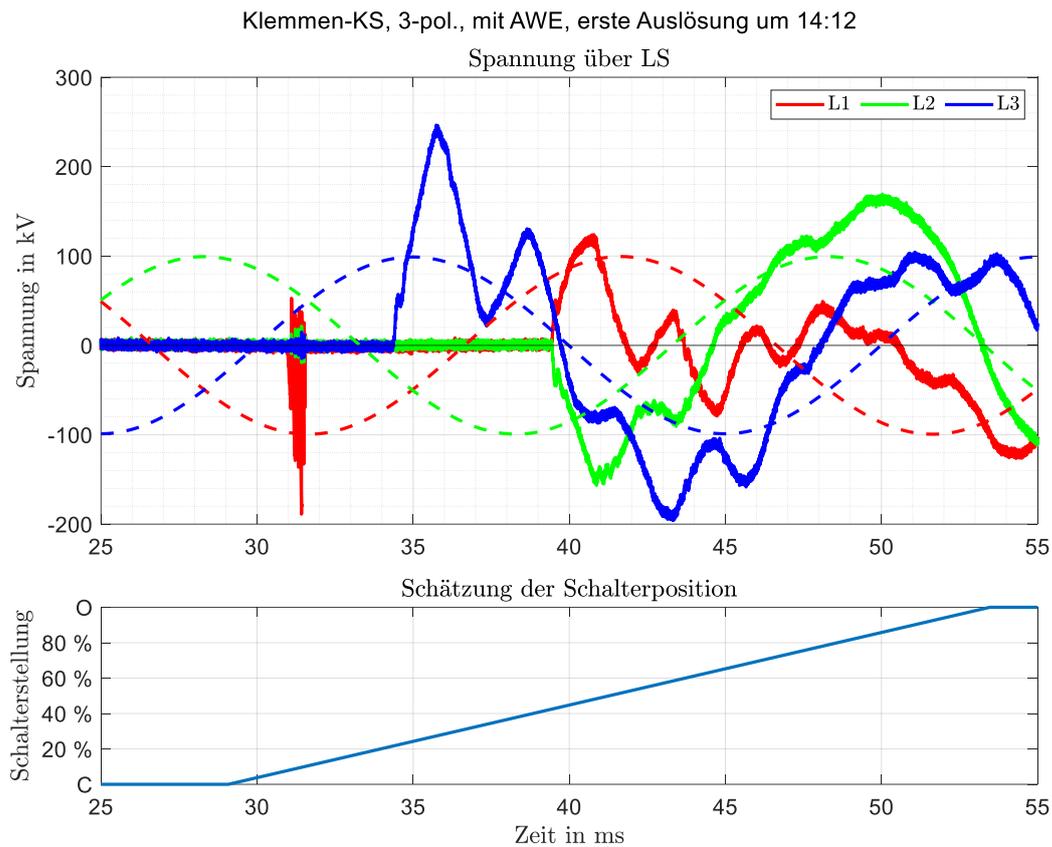


Abbildung 84: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s

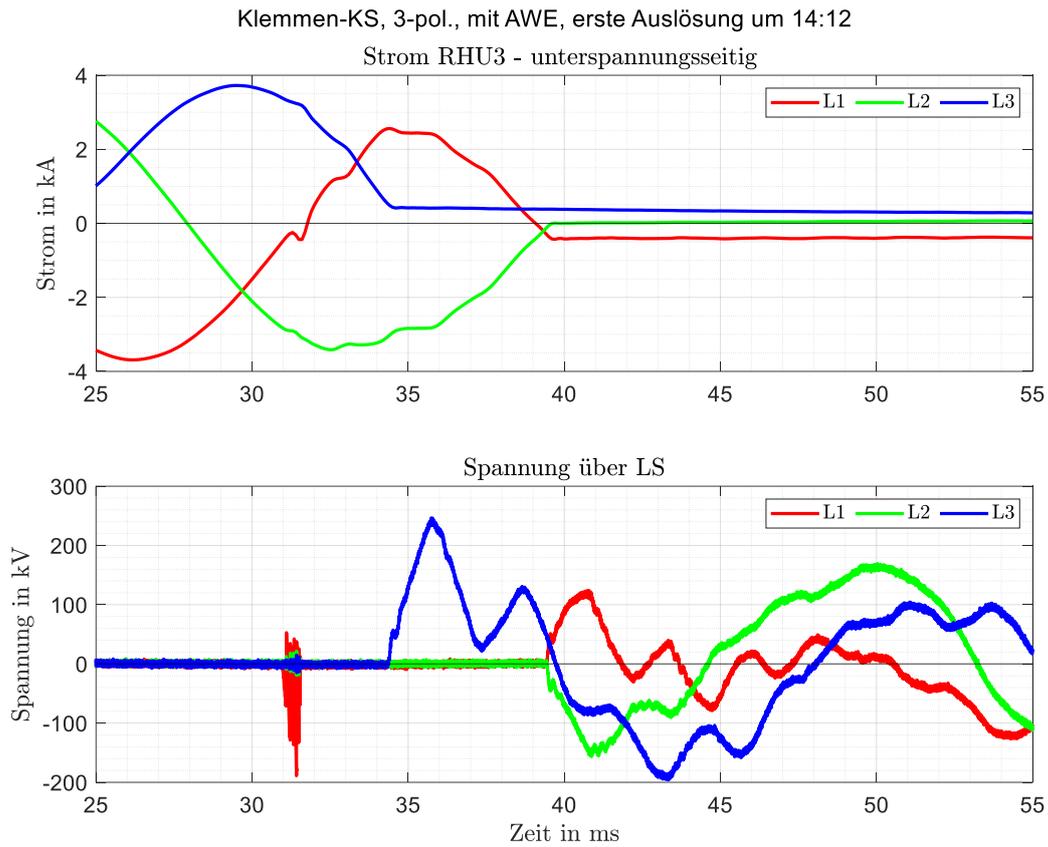


Abbildung 85: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) sowie Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum LS (unten)

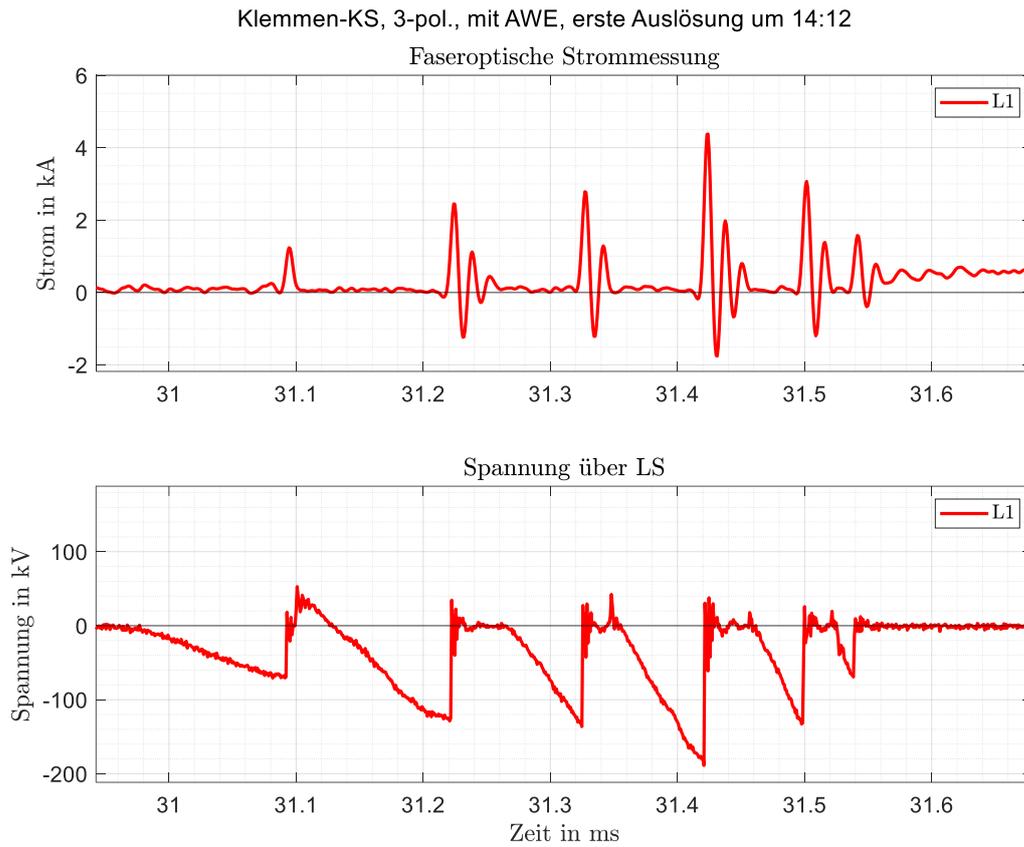


Abbildung 86: Detailbetrachtung der faseroptischen Strommessung (oben) sowie der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum LS (unten) für die Wiederezündungen

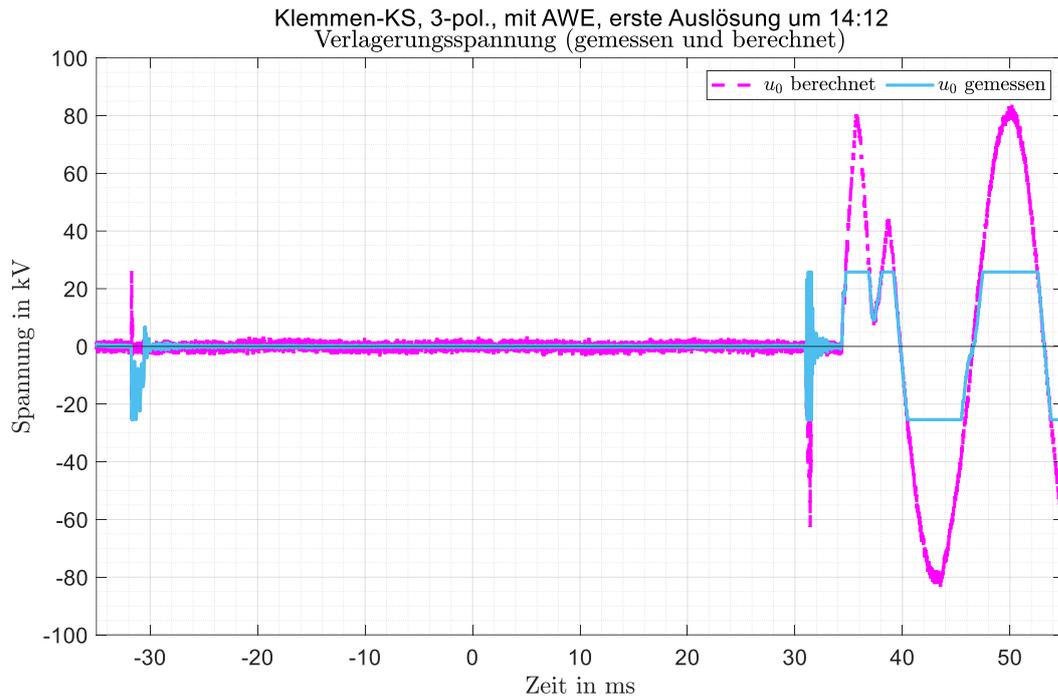


Abbildung 87: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

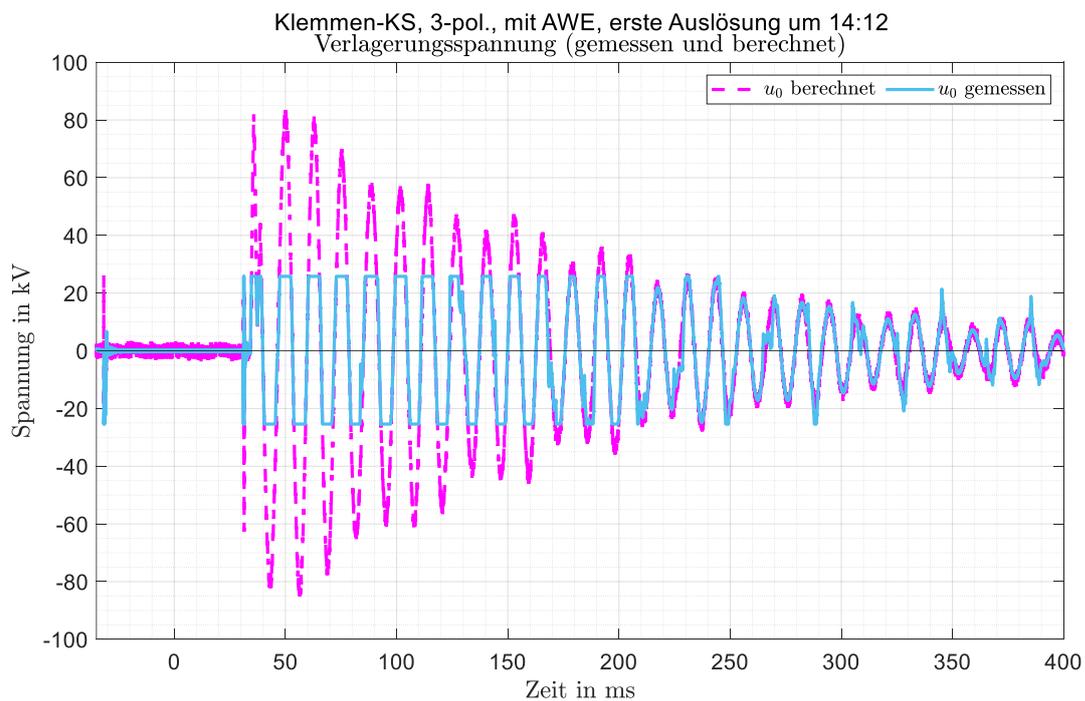


Abbildung 88: Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

7.9.3 Versuch 4c um 14:12 (Wiedereinschaltung)

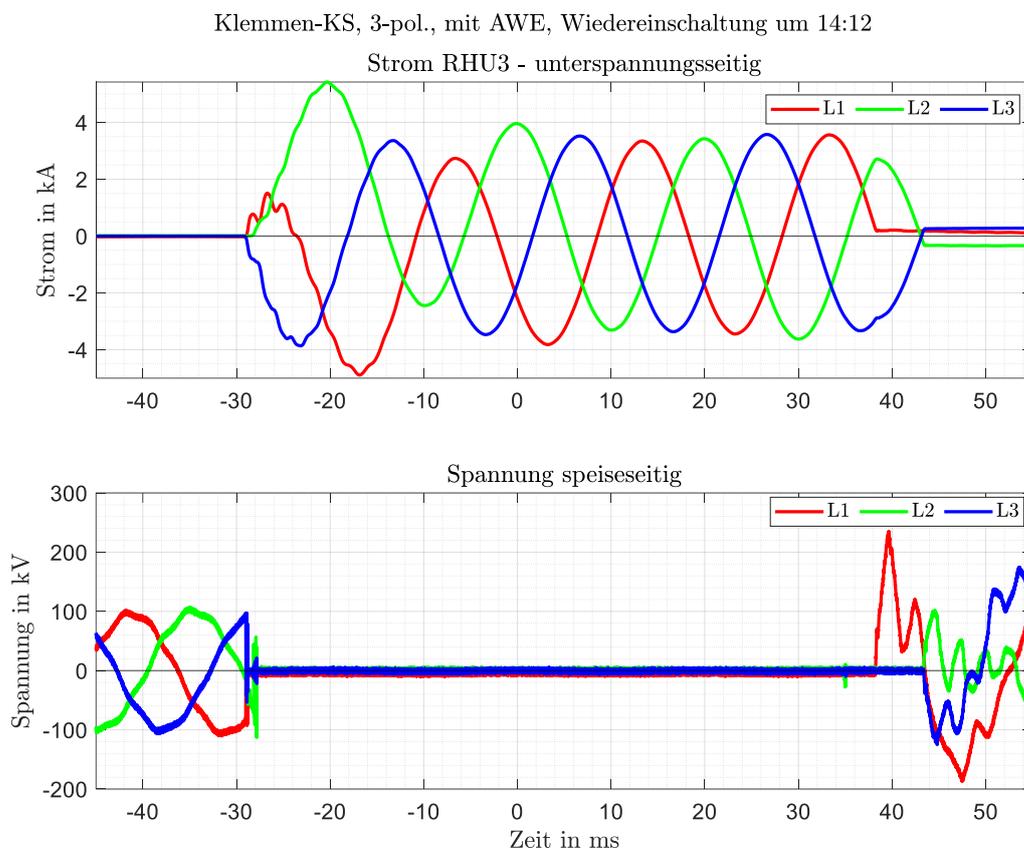


Abbildung 89: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

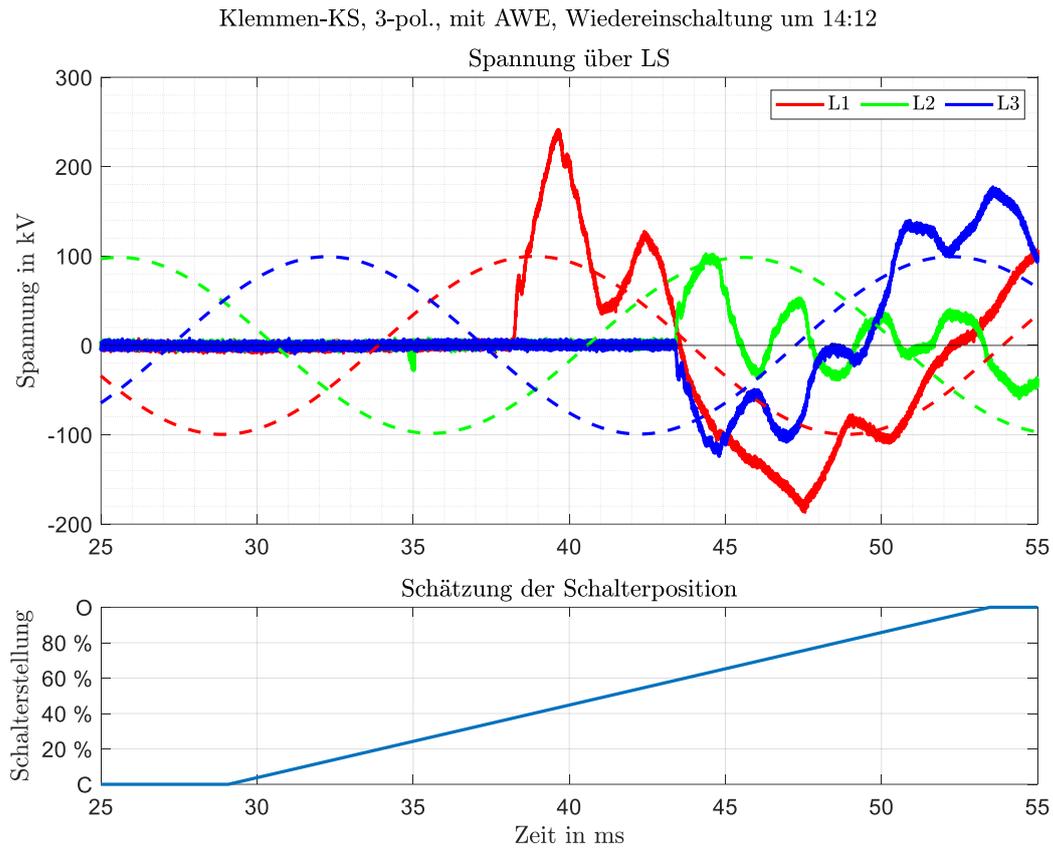


Abbildung 90: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (oben) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s (unten)

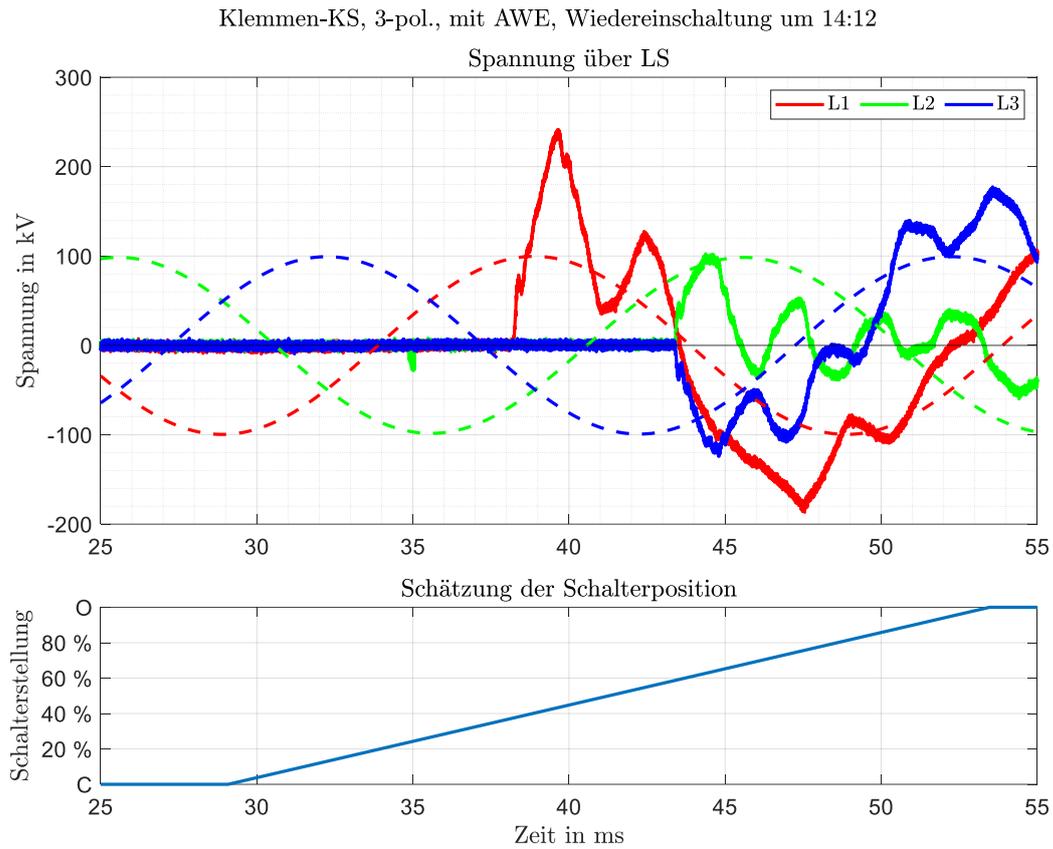


Abbildung 91: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

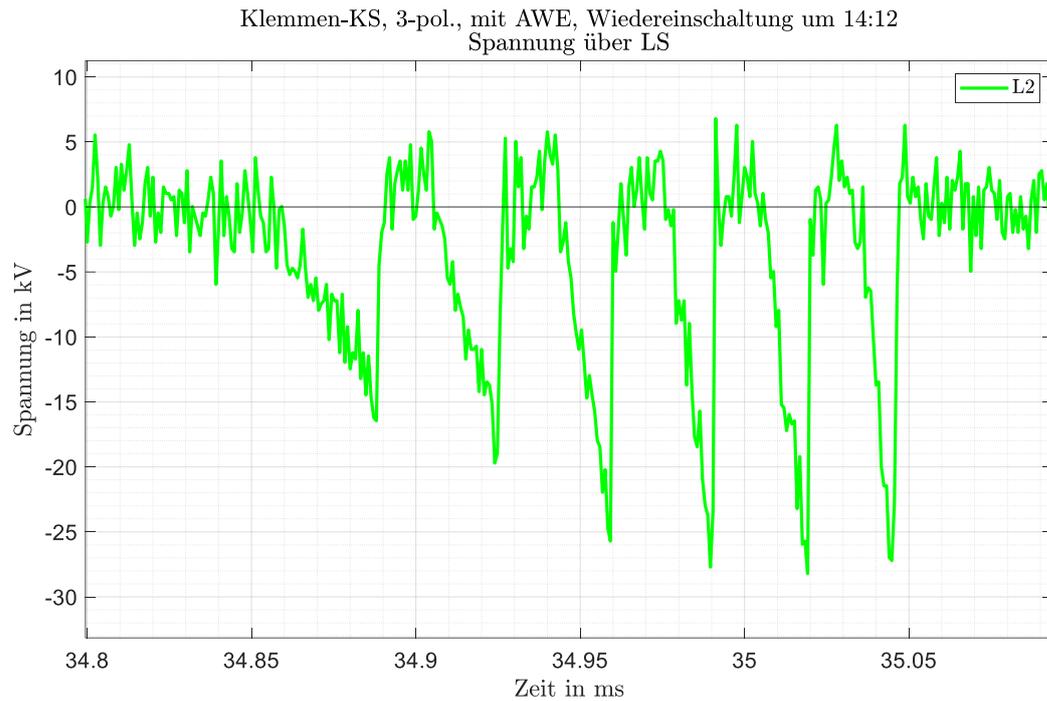


Abbildung 92: Detailbetrachtung der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum LS für die Wiedereinschaltungen (keine hochfrequente Strommessung)

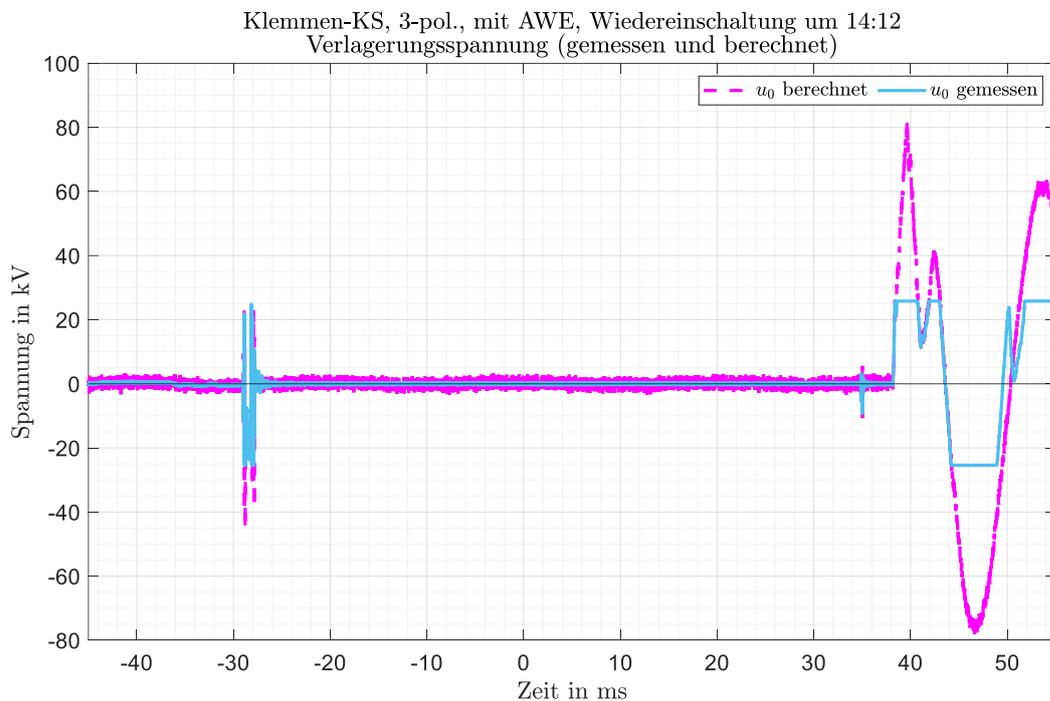


Abbildung 93: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

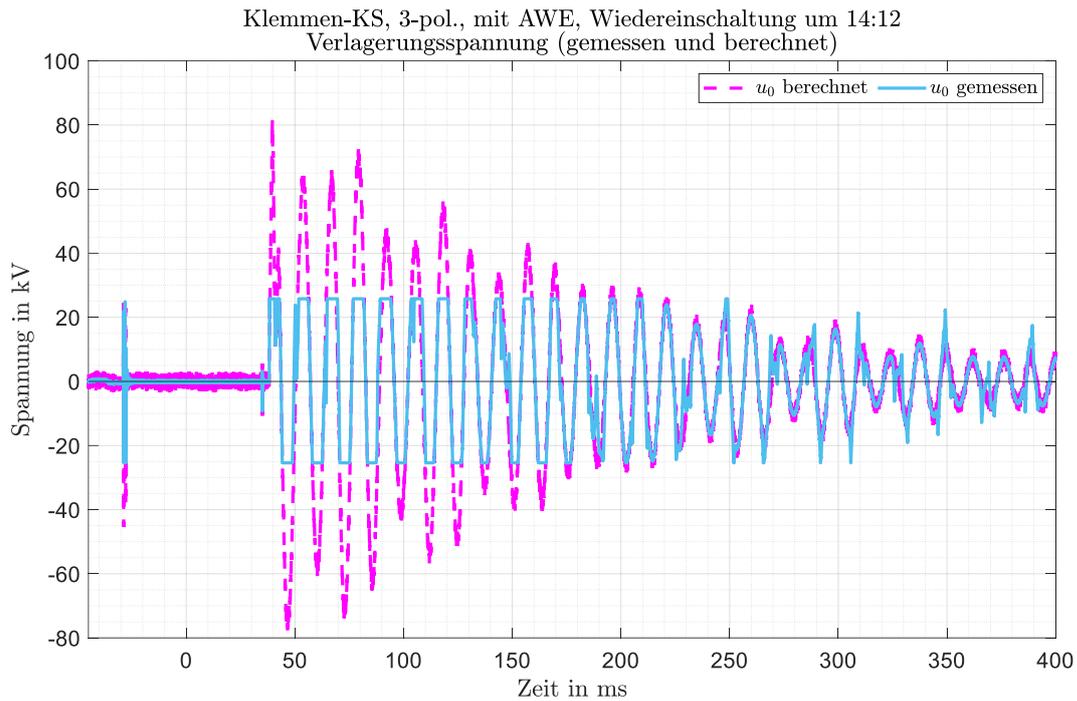


Abbildung 94: Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

7.9.4 Versuch ES um 17:08

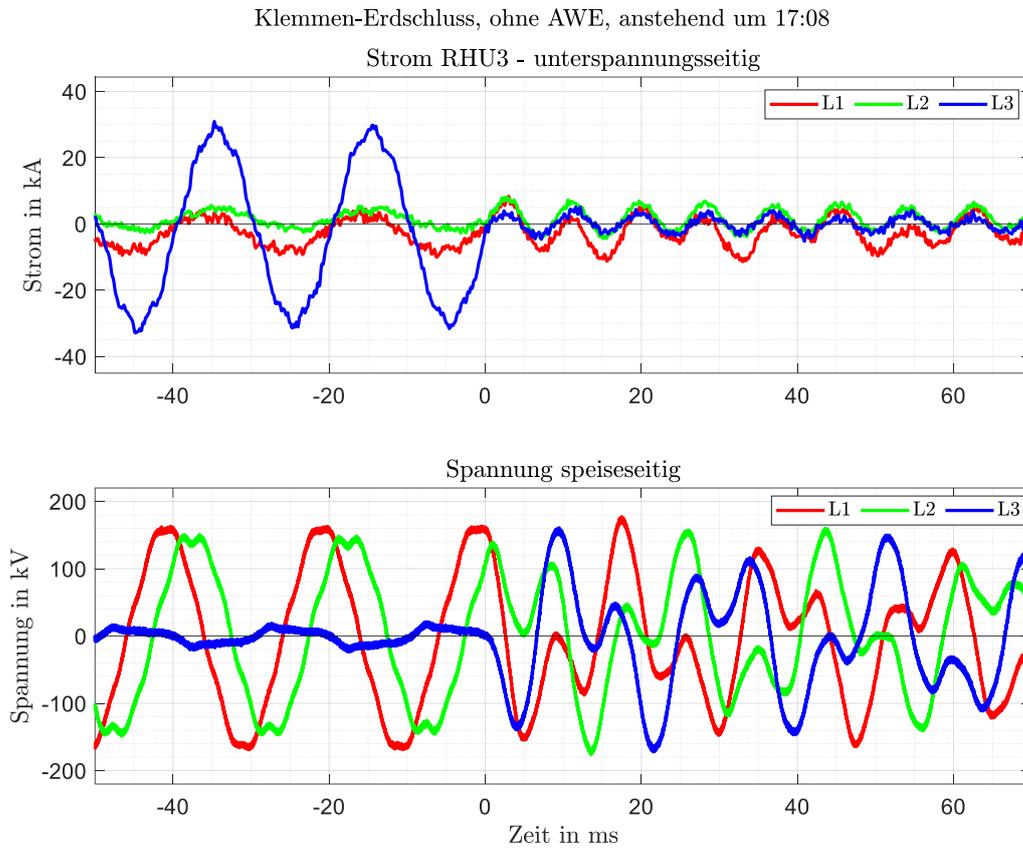


Abbildung 95: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

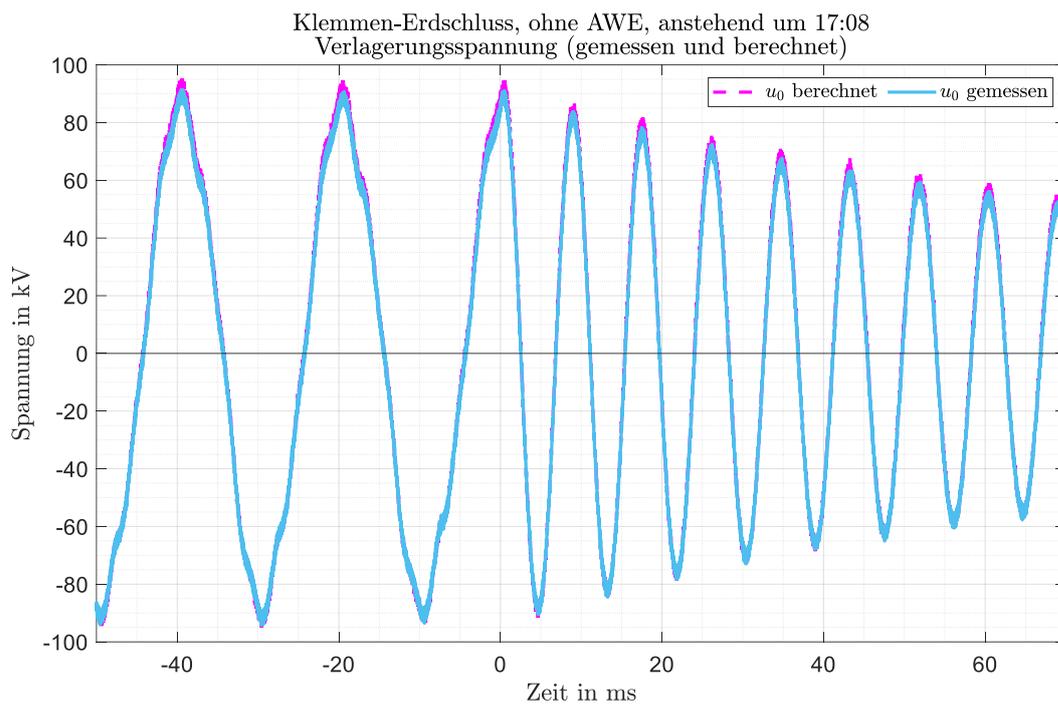


Abbildung 96: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

7.10 Zusätzliche Kurvenverläufe: Abstandsfehler 22.10.2024

7.10.1 Versuch 5a um 15:59

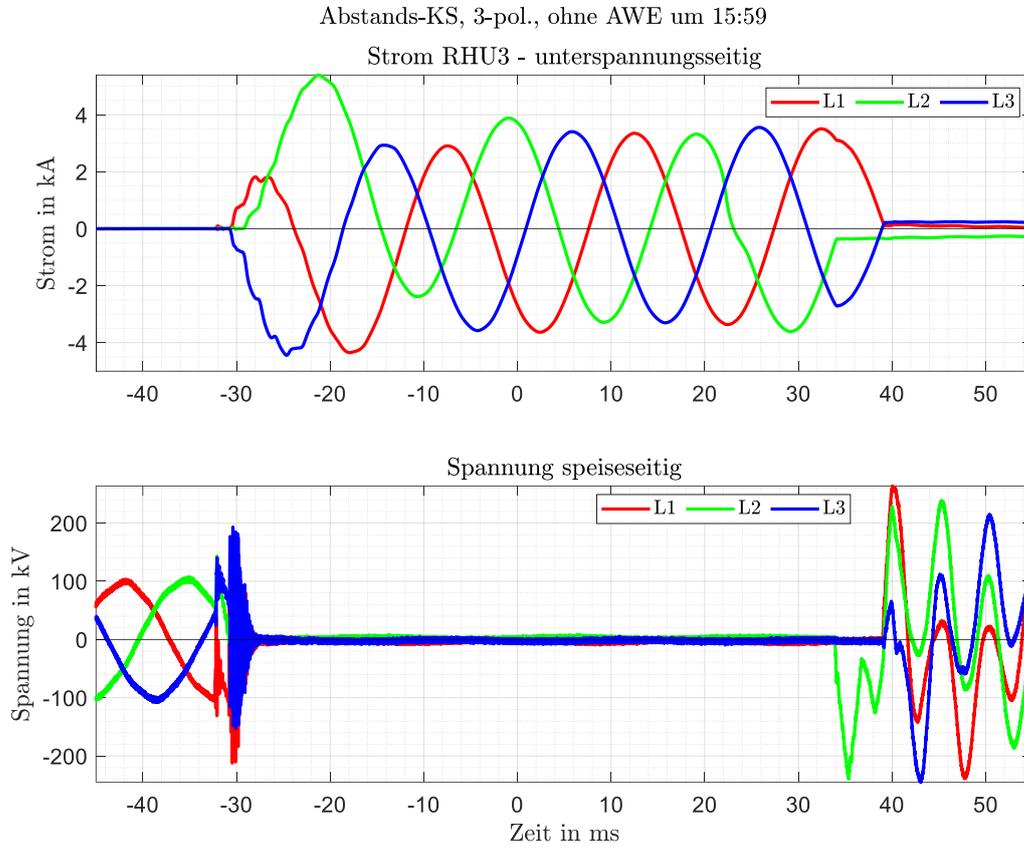


Abbildung 97: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

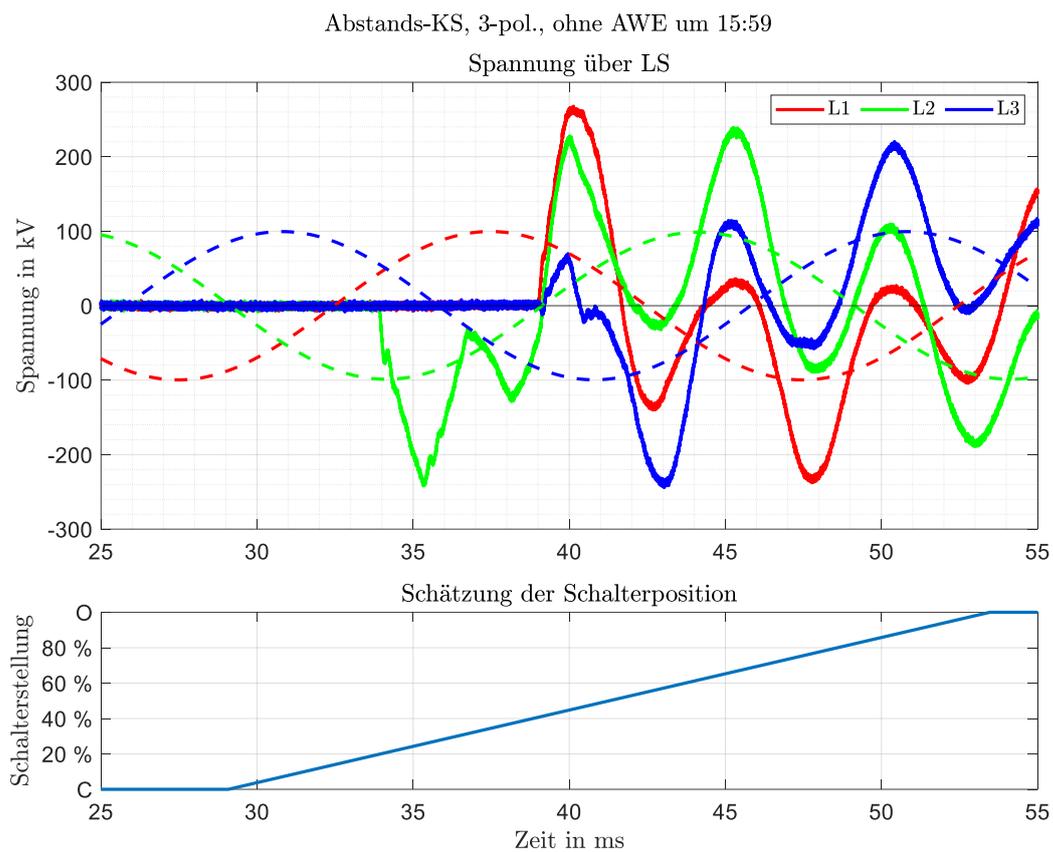


Abbildung 98: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler, oben) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s (unten)

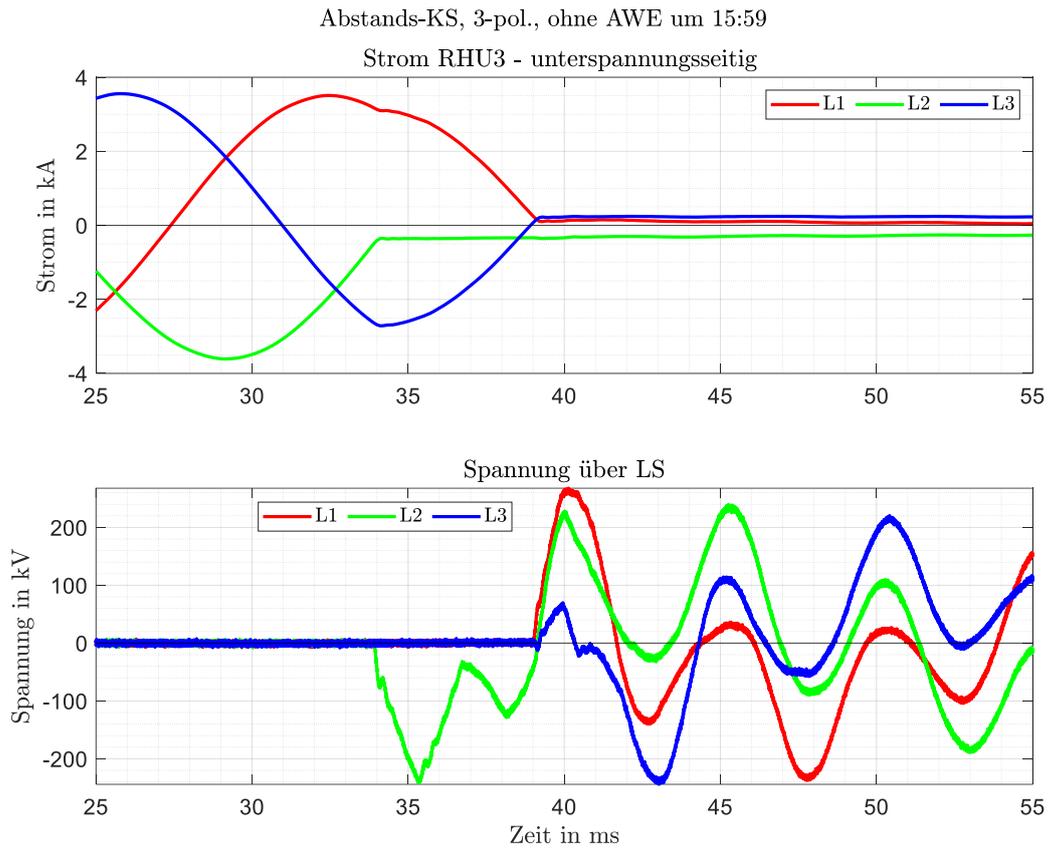


Abbildung 99: Detailbetrachtung der Strommessung (induktiv, oben) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig) sowie der Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum LS (unten)

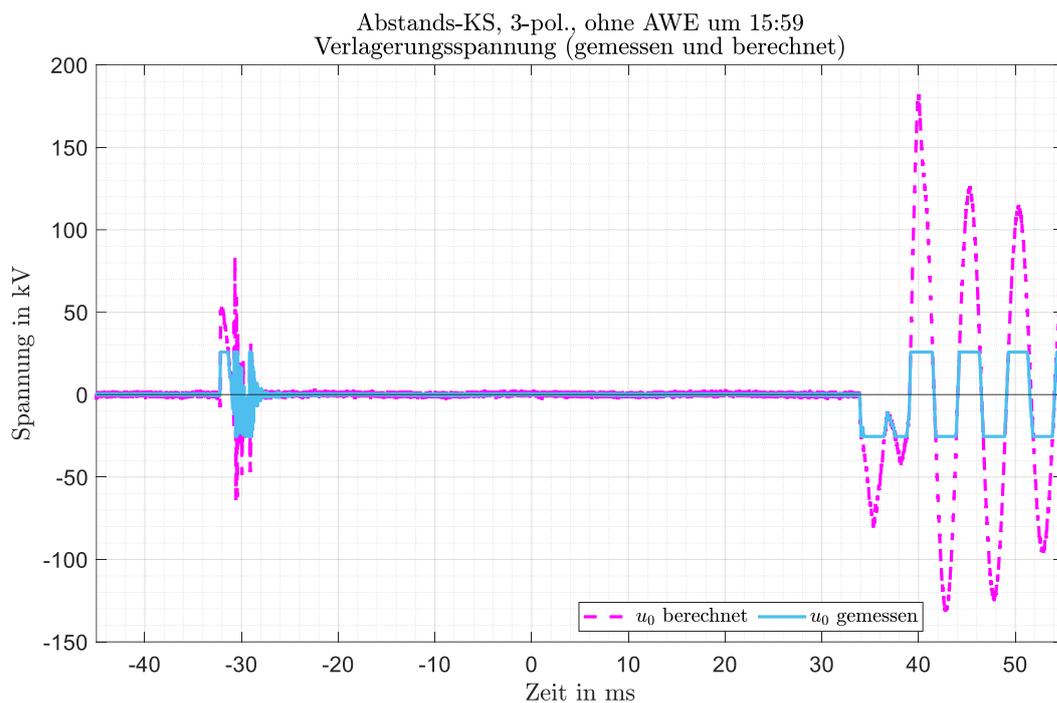


Abbildung 100: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

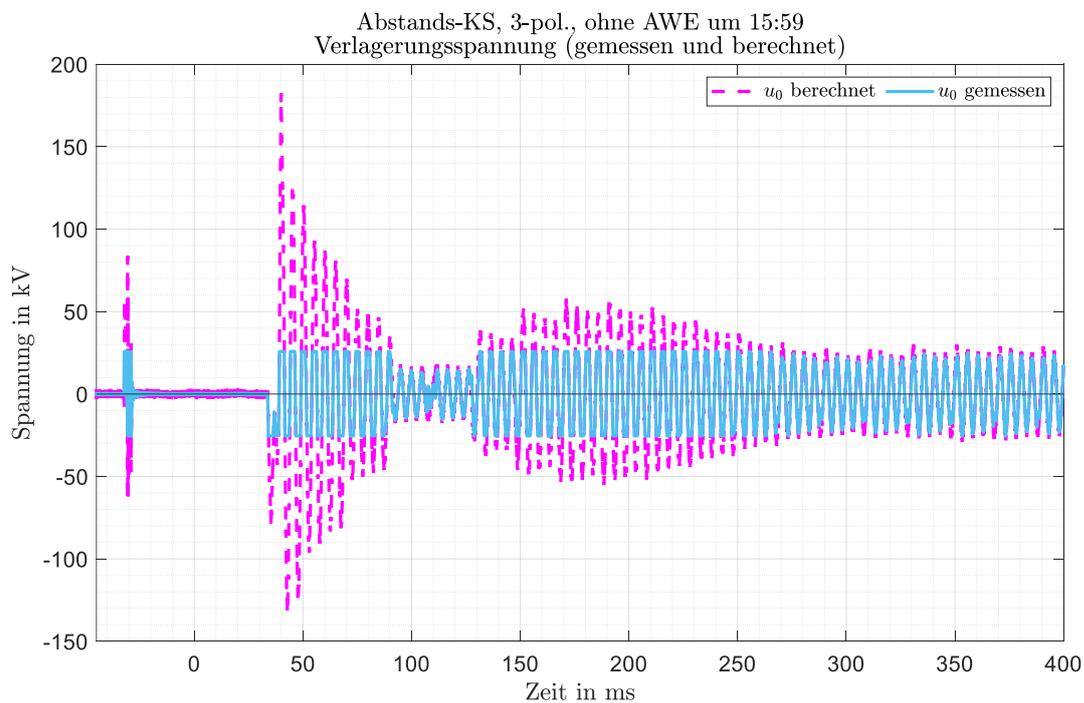


Abbildung 101: Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

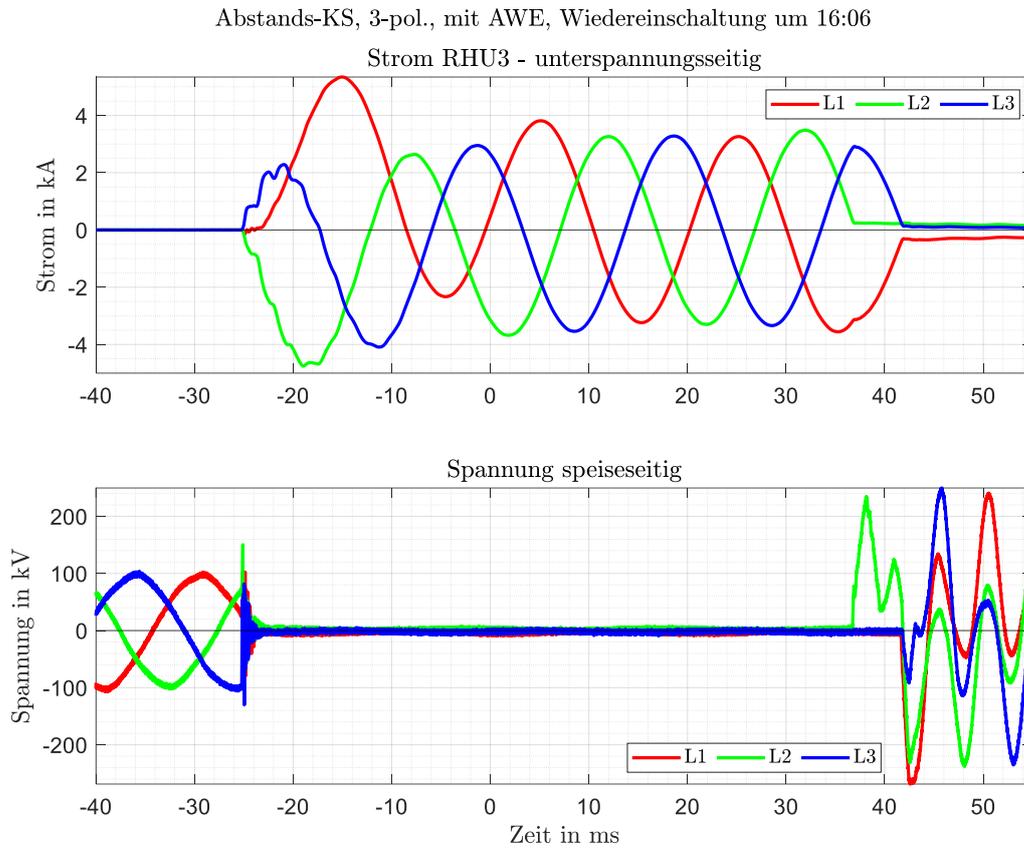
7.10.2 Versuch 5b um 16:06 (Wiedereinschaltung)

Abbildung 102: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

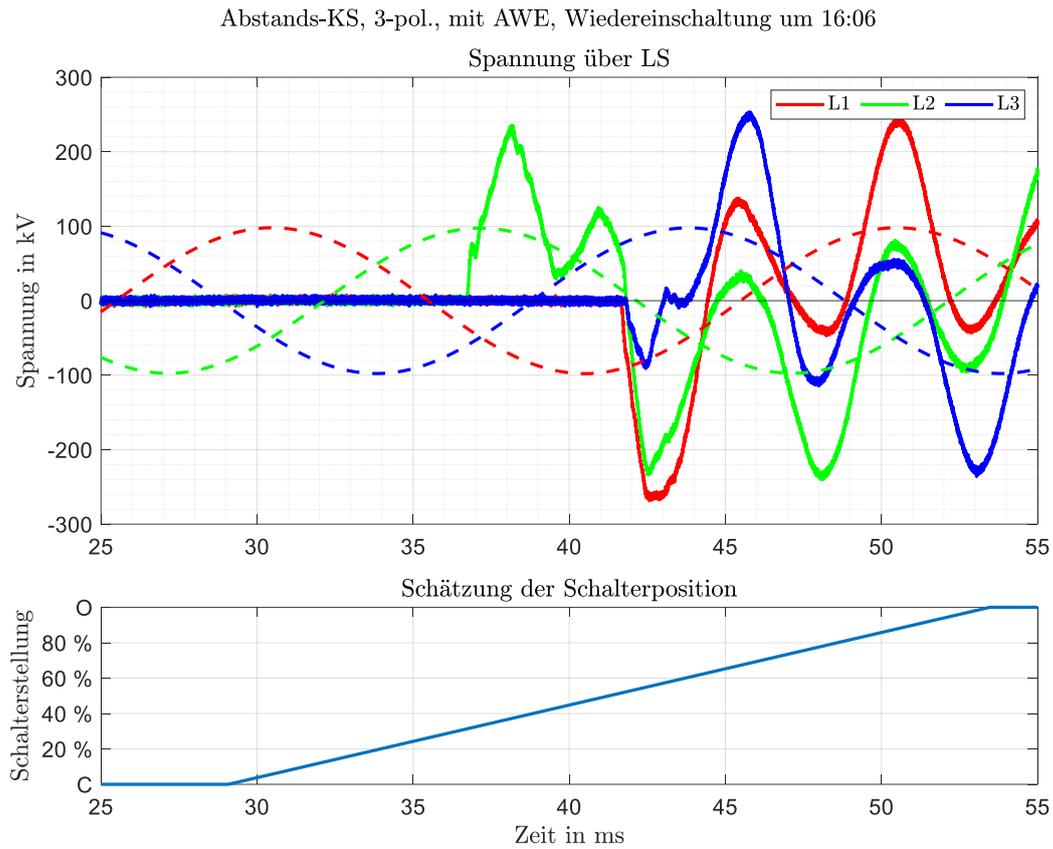


Abbildung 103: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler, oben) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s (unten)

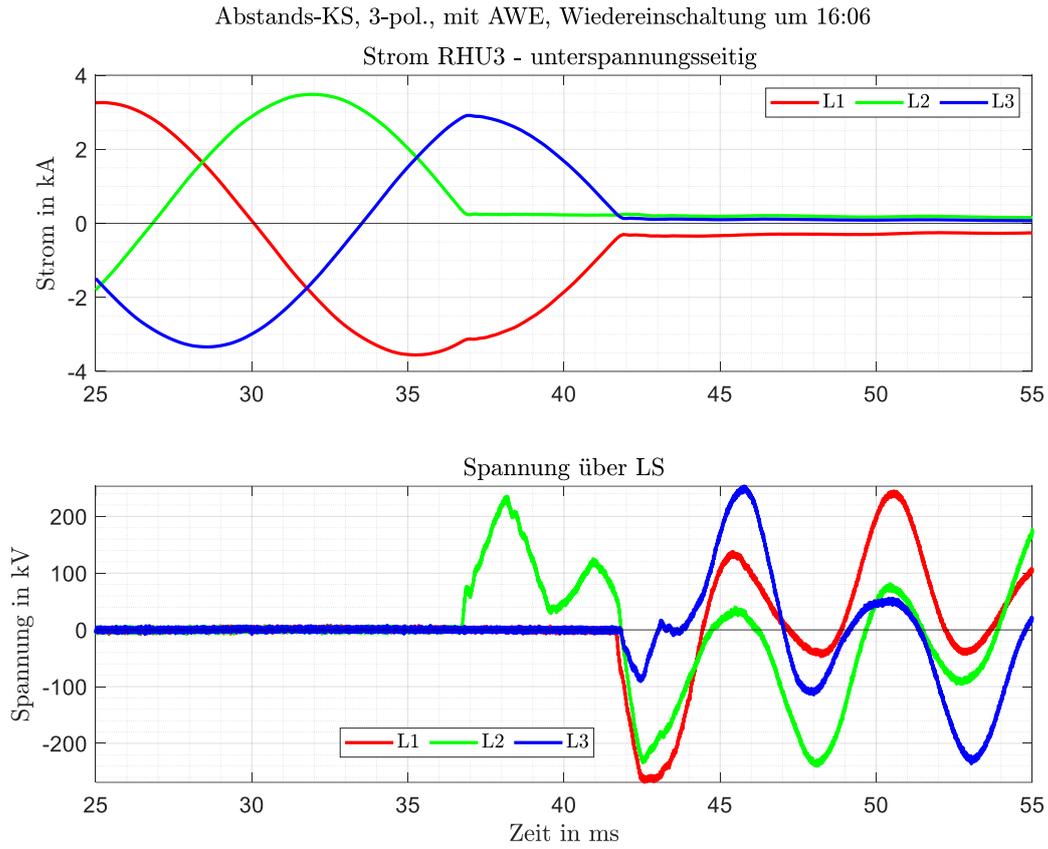


Abbildung 104: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

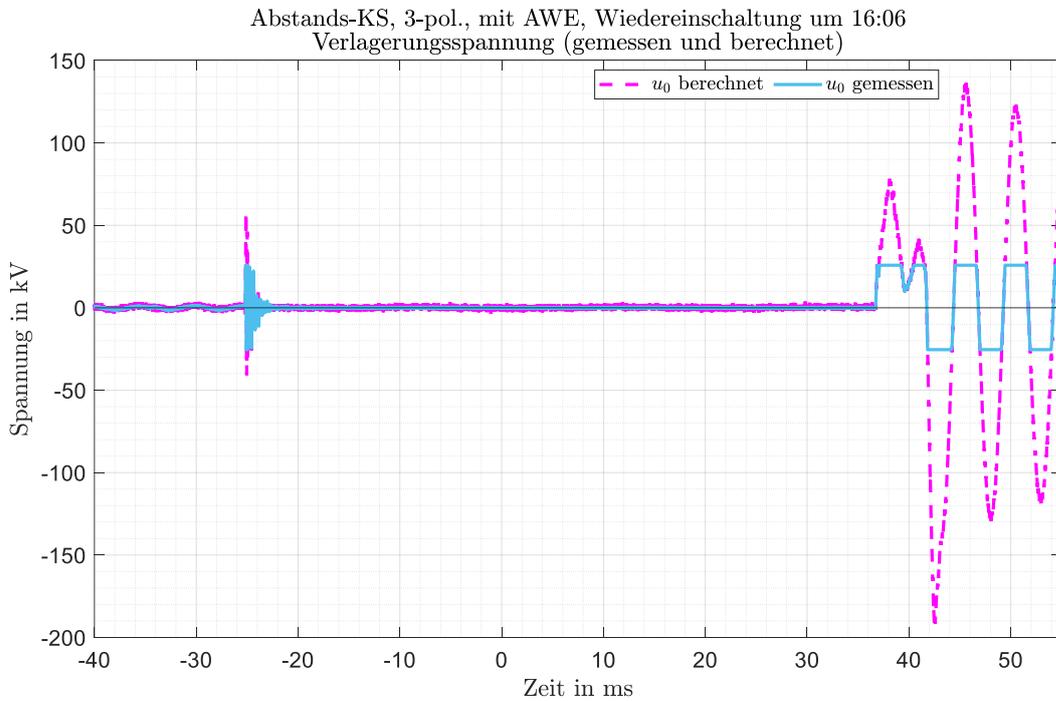


Abbildung 105: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

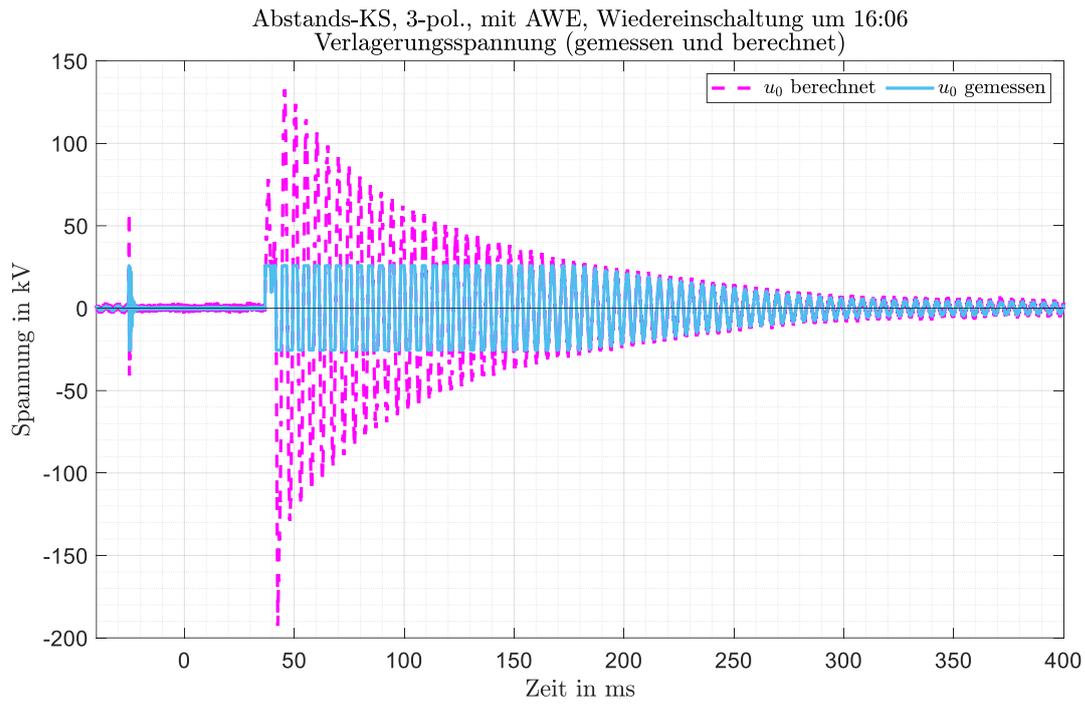


Abbildung 106: Fortsetzung: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

7.10.3 Versuch 5c um 16:42

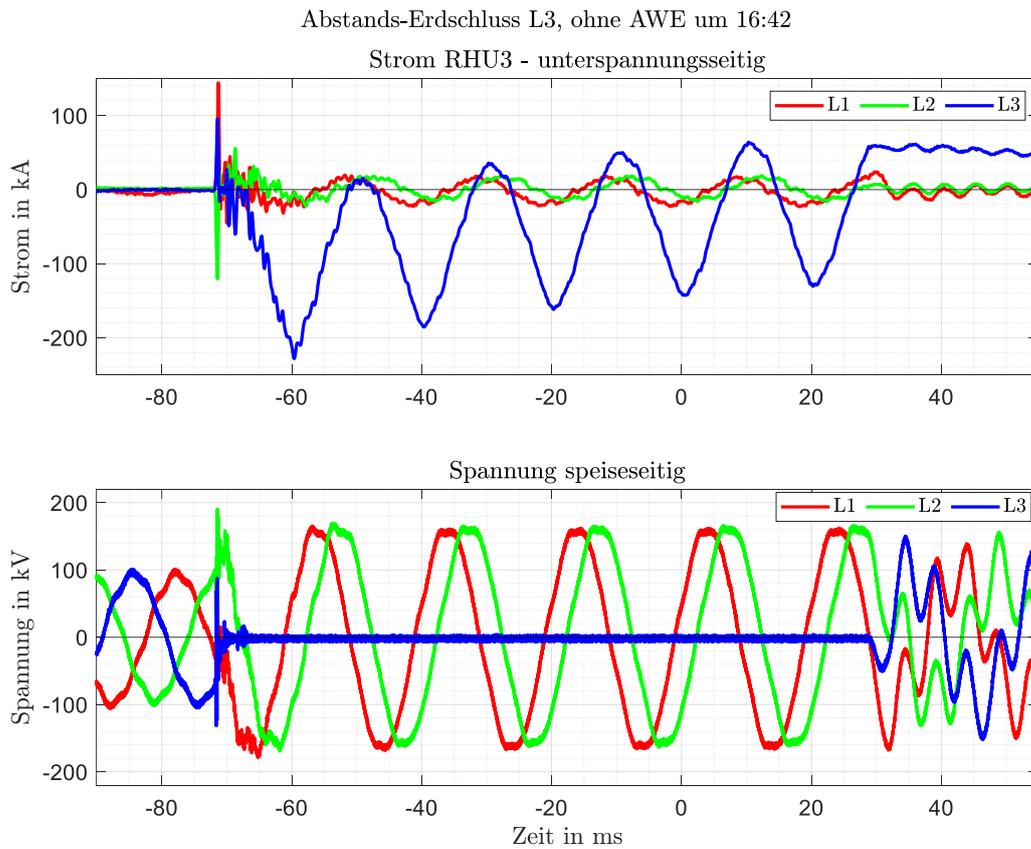


Abbildung 107: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

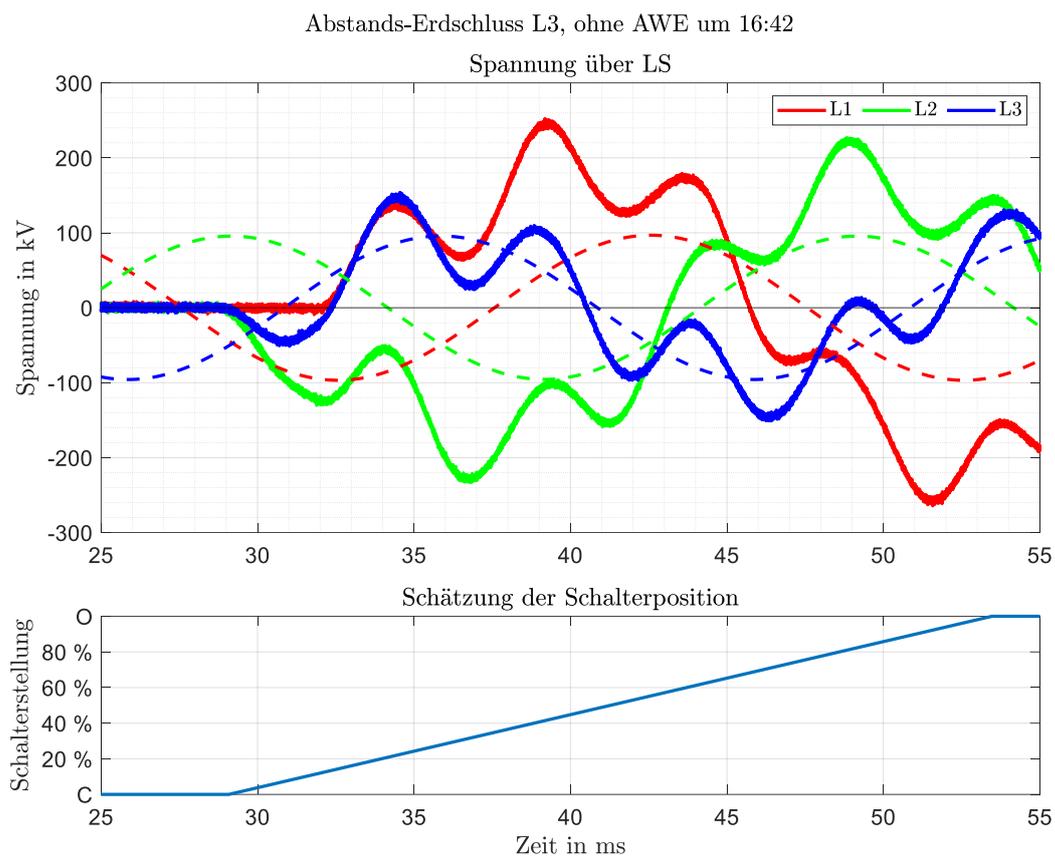


Abbildung 108: Verlauf der Spannung über den Vakuum-LS (CR-Teiler, oben) sowie Schätzung der Schalterposition für Schutz-Auslösung bei $t = 0$ s (unten)

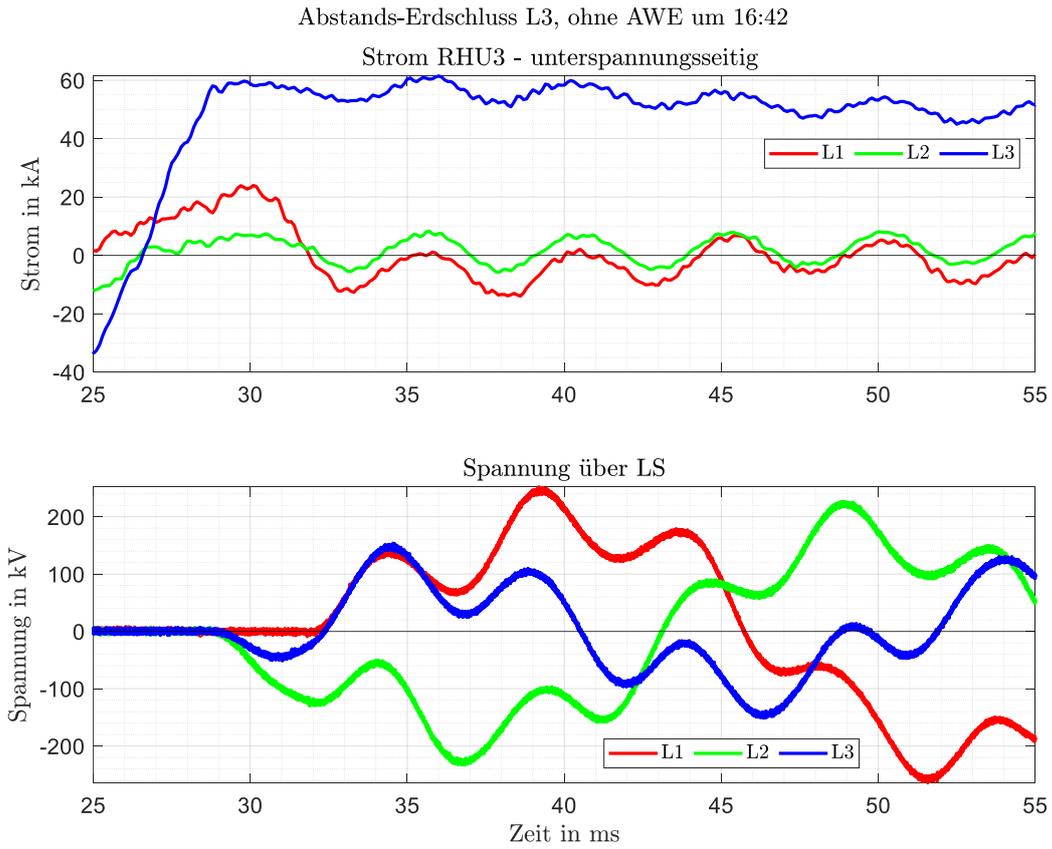


Abbildung 109: Strommessung (induktiv) im Transformatorabzweig (unterspannungsseitig, oben) und Spannungsmessung (CR-Teiler) über den Vakuum-LS (unten)

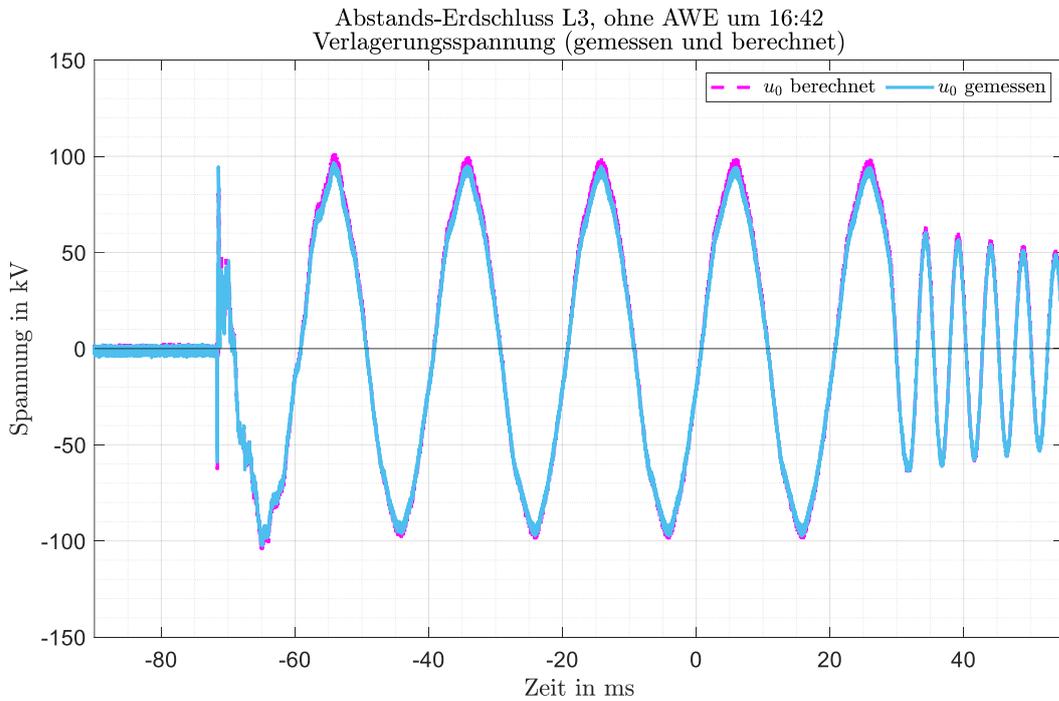


Abbildung 110: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule

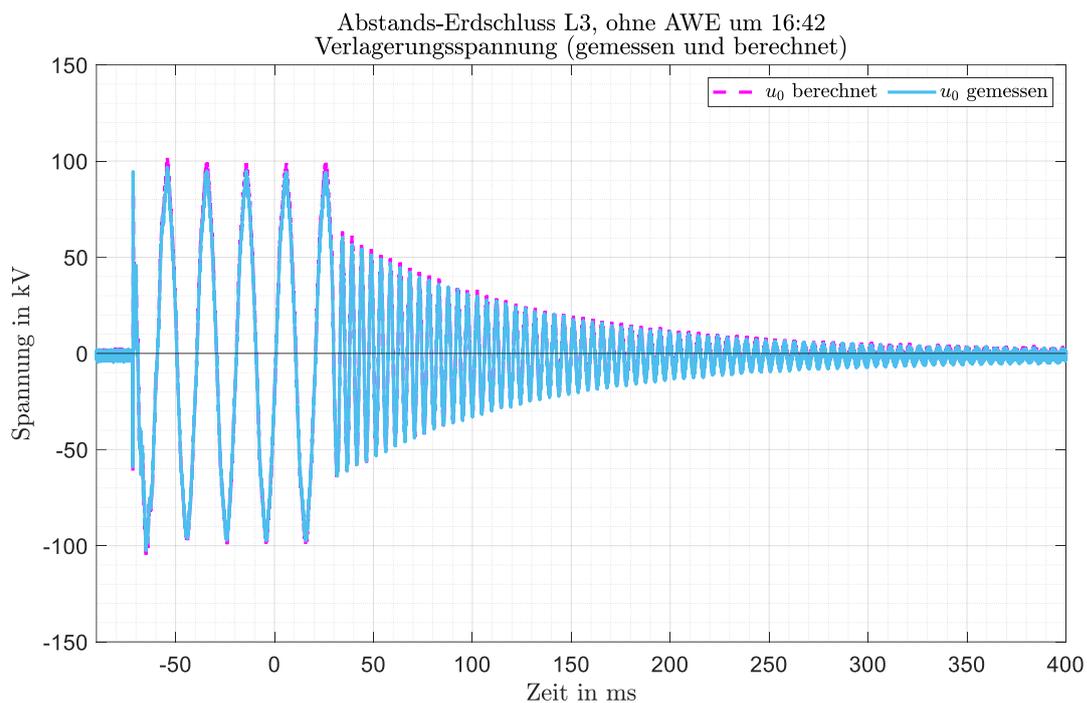


Abbildung 111: Zeitverläufe der berechneten Verlagerungsspannung am speiseseitigen CR-Teiler sowie gemessene Verlagerungsspannung an E-Spule