

**Ein Beitrag zur Spannungsaufteilung über den
Unterbrechereinheiten von
Hochspannungsleistungsschaltern ohne
Steuerkondensatoren**

Von der Fakultät
für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Henryk Stürmer
geboren am 30.04.1971 in Cottbus

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Christian Heinrich
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Heinz-Helmut Schramm

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Mai 2014

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als IGS-Student am Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Sehr herzlich danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz für die Anregung zu dieser Arbeit und für die Schaffung der Rahmenbedingungen zur Durchführung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Heinz-Helmut Schramm gilt mein lieber Dank für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Heinrich danke ich recht herzlich für die Unterstützung durch die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Weiterhin bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Lehrstuhles Energieverteilung und Hochspannungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus und dem Industriepartner für die ständige Unterstützung bei der Realisierung dieser Arbeit.

Cottbus, im Mai 2014

Henryk Stürmer

Kurzfassung

Ein Beitrag zur Spannungsaufteilung über den Unterbrechereinheiten von Hochspannungsleistungsschaltern ohne Steuerkondensatoren

Hochspannungs-Leistungsschalter mit mehreren Unterbrechereinheiten werden gängigerweise mit parallel geschalteten Steuerkondensatoren größerer Kapazität betrieben. Dadurch erfolgt eine weitgehend gleichmäßige Aufteilung der Spannung über die einzelnen Schaltstrecken.

Der Einsatz von Steuerkondensatoren verursacht zusätzliche Kosten für die Leistungsschalter. Obendrein sind sie potentielle Fehlerquellen. Daher besteht ein Interesse, die Notwendigkeit der Steuerkondensatoren zu untersuchen. Hierzu sind die kleinen Kapazitäten der Unterbrechereinheiten des Hochspannungs-Leistungsschalters zu bestimmen, um die genaue Spannungsaufteilung ohne Steuerkondensatoren zu erhalten.

Nach der Betrachtung verschiedener Verfahren zur relativ schwierigen Messung der kleinen Kapazitäten der Unterbrechereinheiten folgen Messungen sowie Feldsimulationen, um den Einfluss der Umgebung der Leistungsschalter im praktischen Betrieb auf die Spannungsverteilung über den unbeschalteten Unterbrechereinheiten zu ermitteln.

Abstract

Voltage Distribution across the Interrupter Units of a High-Voltage Circuit-Breaker without Grading Capacitors.

High-voltage circuit-breakers are generally equipped with parallel grading capacitors of high capacitance. Thus, the voltage is distributed almost equal across the individual interrupting units.

The use of grading capacitors means additional costs for the circuit-breakers. Moreover, they are potential sources of failures. Therefore, it is of interest to investigate the necessity of grading capacitors. As a precondition the small capacitances of the interrupter units of the circuit-breaker have to be measured to find the exact voltage distribution without grading capacitors.

After considering various methods for the relatively difficult measurement of the small capacitances of the interrupter units measurements have been carried out. They have been complimented by field simulations to determine the influence of the environment on the voltage distribution across the interrupter units without grading capacitors in practical service.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	ZIEL DER UNTERSUCHUNG	3
3	VERGLEICH VERSCHIEDENER MESSVERFAHREN	5
	3.1 SPANNUNGSMESSUNG ÜBER TEILER	6
	3.2 DIREKTE STROMMESSUNG	8
	3.3 AUFBAU EINES SCHWINGKREISES	9
	3.4 KAPAZITÄTSMESSGERÄT	10
	3.5 ABGLEICH MITTELS TRIMMPOTENTIOMETER	11
	3.6 AUSWAHL EINES GEEIGNETEN MESSVERFAHRENS	13
	3.6.1 Strommessung	13
	3.6.2 Spannungsmessung	13
4	MESSUNGEN UND HOCHSPANNUNGSVERSUCHE	14
	4.1 STROMMESSUNGEN AM NORMALKONDENSATOR	15
	4.1.1 Bestimmung der Kapazität des Normalkondensators	15
	4.2 EINGANGSSTROMMESSUNGEN AM LEISTUNGSSCHALTER	17
	4.2.1 Durchführung der Eingangsstrommessungen am Leistungsschalter	19
	4.2.2 Auswertung der Eingangsstrommessungen am Leistungsschalter	28
	4.3 AUSGANGSSTROMMESSUNGEN AM LEISTUNGSSCHALTER	31
	4.3.1 Durchführung der Ausgangsstrommessungen am Leistungsschalter	31
	4.3.2 Auswertung der Ausgangsstrommessungen am Leistungsschalter	35

4.4	BRÜCKENMESSUNGEN AM LEISTUNGSSCHALTER	35
4.4.1	Durchführung der ersten Brückenmessung an einem Standort	38
4.4.2	Durchführung der zweiten Brückenmessung an weiter variieren Standorten	43
4.5	DIREKTE MESSUNG DER SPANNUNGSaufTEILUNG AM LEISTUNGSSCHALTER	46
4.5.1	Durchführung der Spannungsmessungen	47
4.5.2	Auswertung der Spannungsmessungen	49
4.6	BESTIMMUNG DER KAPAZITÄT ZWISCHEN PRÜFLING UND EINSPEISUNG	50
4.7	HOCHSPANNUNGSVERSUCHE	52
4.7.1	Durchführung der Wechselspannungsversuche	52
4.7.2	Auswertung der Wechselspannungsversuche	55
4.7.3	Durchführung der Stoßspannungsversuche	55
4.7.4	Auswertung der Stoßspannungsversuche	62
4.7.5	Zusammenfassung	62
5	SIMULATION	63
5.1	FELDSIMULATION DES LEISTUNGSSCHALTERS	64
5.1.1	Schaltermmodell mit Schirm, Grenzen 100.000 mm	64
5.1.2	Auswertung der Feldsimulation Schaltermmodell	65
6	EFFEKTE FÜR DIE SPANNUNGSaufTEILUNG	69
6.1	POSITIVE EFFEKTE FÜR DIE SPANNUNGSaufTEILUNG	69
6.2	NEGATIVE EFFEKTE FÜR DIE SPANNUNGSaufTEILUNG	70
7	AUSWERTUNG UND ZUSAMMENFASSUNG	71
8	ANHANG	75
8.1	FELDSIMULATION DES SCHALTERS	75
8.1.1	Feldsimulation Schaltermmodell: ohne Erdung, angelegte Spannung 100kV	75
8.1.2	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung	77
8.1.3	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, 1 Wandler, Zuleitung	79

8.1.4	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, 2 Wandler, Zuleitung	81
8.1.5	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, 2 Wandler, 1 Trenner, Zuleitung	83
8.1.6	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, Düse	85
8.1.7	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, Fuß 1m höher	87
8.1.8	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 200mm	89
8.1.9	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 280mm	91
8.1.10	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, Seile	93
8.1.11	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, Bodenplatte	95
8.1.12	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, Teiler, Zuleitung	98
8.1.13	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, Pin	100
8.1.14	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, in der Hochspannungshalle	102
8.1.15	Feldsimulation Schaltermmodell: mit Erdung, 3-polig im Freifeld, mit Schirm	103
9	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	105
10	ABKÜRZUNGEN	106
11	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	108

1 Einleitung

Bei einem Hochspannungs-Leistungsschalter mit mehreren Unterbrechereinheiten in Reihe pro Pol verursachen die Eigenkapazitäten der offenen Schaltstrecken zusammen mit der Eigenkapazität des Schalters gegen Erde im Falle eines Klemmenkurzschlusses (Kurzschluss direkt hinter dem Schalter) eine ungleichmäßige Spannungaufteilung über die Unterbrechereinheiten. Da die transiente Einschwingspannung des erstlöschenden Pols bei Klemmenkurzschluss im Allgemeinen die höchste Spannungsbeanspruchung bei Kurzschlusschaltungen darstellt, sind die Schaltstrecken entsprechend der höheren Beanspruchung bei ungleichmäßiger Spannungaufteilung zu dimensionieren. Da weiterhin der Schalter im Umspannwerk einem Klemmenkurzschluss auf beiden Seiten ausgesetzt sein kann, müssen die Unterbrechereinheiten in beiden Richtungen die höhere Spannung beherrschen [3, 11].

Durch Parallelschalten von Steuerkondensatoren mit wesentlich höherer Kapazität als der Eigenkapazität der offenen Schaltstrecken zu den Unterbrechereinheiten wird eine annähernd gleichmäßige Spannungaufteilung erreicht. Daher ist es gängige Praxis, Hochspannungs-Leistungsschalter mit mehr als einer Schaltstrecke pro Pol mit Steuerkondensatoren zu versehen [8, 11].

Es besteht jedoch aus mehreren Gründen erhebliches Interesse, wenn möglich auf diese Steuerkondensatoren zu verzichten [11]:

- Die Steuerkondensatoren tragen wesentlich zu den Kosten des Leistungsschalters bei;
 - Wegen des Gewichtes der Steuerkondensatoren muss der gesamte Schalter stabiler konstruiert werden;
 - Bei einem Freiluft-Schalter mit in erheblicher Höhe befindlichen Unterbrechereinheiten wird durch die Steuerkondensatoren der Schwerpunkt nach oben verlagert, mit entsprechenden Folgen zum Beispiel auf die Erdbebenfestigkeit;
-

- Die elektrische Feldverteilung über die offene Schaltstrecke wird durch den parallel liegenden Steuerkondensator ungünstig beeinflusst;
- Die Steuerkondensatoren stellen eine zusätzliche potenzielle Fehlerquelle für den gesamten Schalter dar, da an den Kondensatoren Undichtigkeiten, Durchschläge usw. entstehen können;
- Bei offenem Leistungsschalter fließt weiterhin ein kapazitiver Strom über die Steuerkondensatoren und die Erdkapazität der abgeschalteten Seite. Dieser Strom ist durch die Trennschalter zu unterbrechen, wobei ein bis zu $> 0,5\text{s}$ brennender Lichtbogen auftritt. Dabei können die Trennschalter-Kontakte erheblich beschädigt werden;
- Bei großen Kapazitäten der Steuerkondensatoren wird ein wesentlicher Teil des Einspeisepotenzials auf die abgeschaltete Seite übertragen;
- In den Schaltanlagen kann es zu Wechselwirkungen mit induktiven Messwandlern, das heißt zu Resonanzen kommen (Ferroresonanz), die zu erheblichen Überspannungen führen.

Wegen der beiden letztgenannten Punkte dürfen Steuerkondensatoren nur eine Kapazität von wenigen hundert pF pro Schalterpol haben.

Seit längerer Zeit bestehen Bemühungen, dass die Hochspannungs-Leistungsschalter die Funktion des Abgangs-Trennschalters mit übernehmen („Combined Function“). Dies wird bis jetzt nur mit einfach unterbrechenden Leistungsschaltern realisiert. Da die offene Schaltstrecke eines Trennschalters nicht durch elektrisch leitfähige Elemente überbrückt werden darf, ist die Erweiterung der „Combined Function“ auf höhere Spannungsebenen, in denen zum Beispiel Leistungsschalter mit zwei Schaltstrecken pro Pol erforderlich sind, nur mit Leistungsschaltern ohne Steuerkondensatoren zu realisieren.

Um Leistungsschalter mit mehr als einer Schaltstrecke pro Pol einsetzen zu können, muss die Spannungsaufteilung über die offenen Schaltstrecken, besonders unter Klemmenkurzschluss-Bedingungen, bekannt sein.

2 Ziel der Untersuchung

Für im Aufbau und Konstruktion gleiche Schalter mit zwei Unterbrechereinheiten in Reihe pro Pol variieren die Angaben zur Spannungsaufteilung über den Schaltstrecken von >80% / <20% bis ca. 70% / 30%. Diese Angaben beziehen sich auf Feldrechnungen sowie auf Ergebnisse von Schaltleistungsprüfungen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Ursache für diese Diskrepanzen zu ermitteln und, unter Berücksichtigung der relevanten Einflussgrößen, Angaben zur tatsächlichen Spannungsaufteilung zu machen, da sie Voraussetzungen sind für realistische, belastbare und aussagekräftige Prüfungen des Schaltvermögens von Hochspannungs-Leistungsschaltern mit mehreren Schaltstrecken in Reihe ohne Steuerkondensatoren.

Realistische und belastbare Prüfbedingungen setzen voraus, dass die Beanspruchungen der Schalter im praktischen Betrieb sowie die Umgebungseinflüsse bekannt sind und bei der Prüfung berücksichtigt werden.

Zur Ermittlung der Spannungsaufteilung ist die Kenntnis der Kapazität der einzelnen offenen Schaltstrecken sowie der Kapazität gegen Erde erforderlich. Für die Hochspannungs-Messtechnik bieten Hochspannungs-Leistungsschalter damit das Problem, dass extrem geringe Eigenkapazitäten (im Bereich von ca. 20pF) am großen Objekt unter eventuell hohen Spannungen gemessen werden sollen, das heißt ohne dass sie direkt zugänglich sind. Dazu kommt, dass die Messung der Kapazitäten durch den Messaufbau in nicht vertretbarer Größenordnung verfälscht werden kann.

Im Einzelnen ergibt sich damit folgende Aufgabenstellung:

- Ermitteln, welches Messverfahren besonders geeignet ist, um die Eigenkapazitäten an Hochspannungs-Leistungsschaltern zu bestimmen. Dazu gehört das Bewerten der verschiedenen Methoden zur direkten und indirekten Messung von kleinen Kapazitäten an räumlich ausgedehnten Objekten.
 - Theoretische Bestimmung (Simulation) der Spannungsverteilung zwischen den Unterbrechereinheiten eines Schalters mit mehreren Schaltstrecken pro Pol in Reihe ohne Steuerkondensatoren unter verschiedenen Umfeld- bzw. Randbedingungen. Grundsätzlich ist von der Anordnung eines Leistungsschalter-Pols in einer Freiluft-Schaltanlage auszugehen, in dessen unmittelbarer Nachbarschaft sich die beiden anderen Schalterpole sowie Trennschalter, Messwandler, Verbindungen etc. befinden.
 - Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit denen der Simulation sowie ihre Bewertung.
-

3 Vergleich verschiedener Messverfahren

Das messtechnische Problem bei der Bestimmung der Spannungsaufteilung über Leistungsschaltern besteht in den sehr geringen Kapazitäten und den relativ großen Abmessungen der Schalter. Durch den Messaufbau mit Verwendung von Messleitungen kommt es schnell zum Entstehen von Streukapazitäten, welche Fehler bei den Messungen verursachen. Bei ersten Überlegungen zur Ermittlung der Spannungsaufteilung wurden verschiedene Ansätze für mögliche Messverfahren betrachtet. Hierbei wurden die Möglichkeiten der Messungen, Messaufbauten, Fehler bzw. Genauigkeit berücksichtigt. Die Fehlerbetrachtung hatte eine entscheidende Rolle, da bei der Messung solch kleiner Kapazitäten auch schon geringe äußere Einflüsse einen erheblichen Fehler in den Messergebnissen erzeugen können.

Aus den verschiedenen Ansätzen wurden folgende näher untersucht [6, 14, 15, 16]:

- Spannungsmessung über Teiler
- direkte Strommessung
- Aufbau eines Schwingkreises
- Verwendung von Sonden
- Kapazitätsmessgerät

Im Folgenden sind die einzelnen Möglichkeiten dargestellt.

Für die dabei verwendete Schalternachbildung wird folgendes Modell gewählt [11]:

Der Schalter wird durch Kapazitäten nachgebildet: Die Kapazitäten der Unterbrechereinheiten, die Kapazitäten vom Eingang und vom Ausgang zur Erde, die Kapazität vom Getriebe zur Erde [Abbildung 3-1].

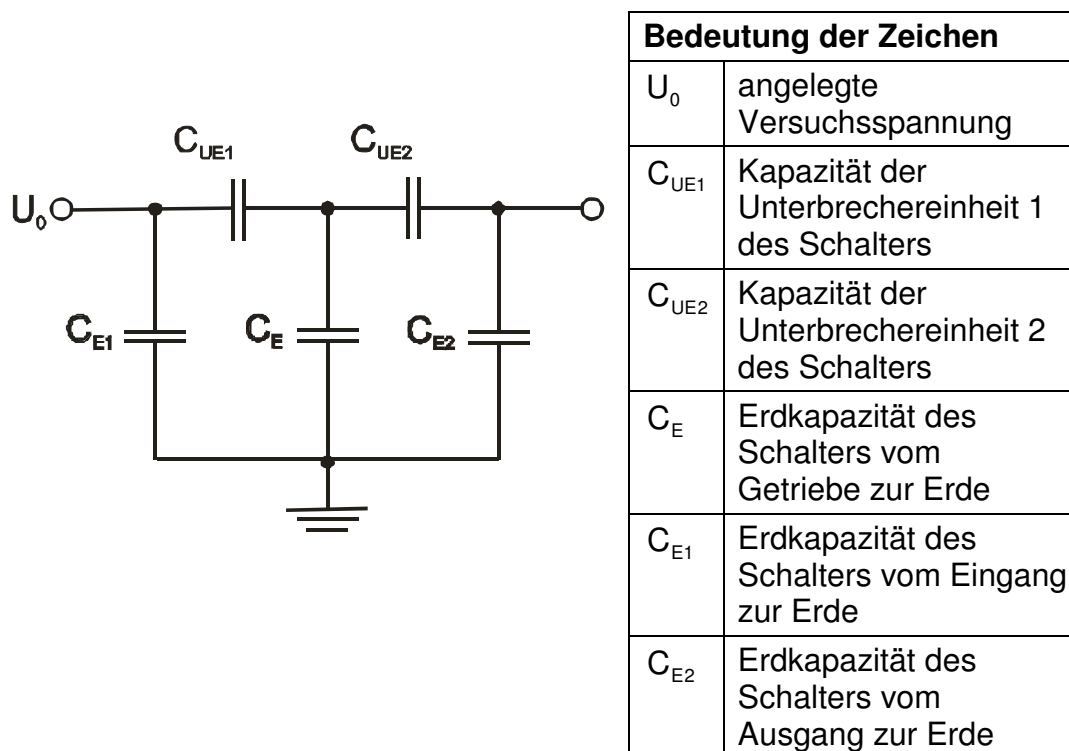


Abbildung 3-1: Nachbildung eines Hochspannungs-Leistungsschalters

3.1 Spannungsmessung über Teiler

Die Spannungsmessung erfolgt als Messung mit kapazitiver Spannungsteilung [6]. Die Spannung wird mittels mehrerer Teilerkapazitäten aufgeteilt und mit einem Multimeter gemessen. Die Messung erfolgt über den Unterbrechereinheiten sowie auch gegen Erde. Es können also die Spannungen über den Unterbrechereinheiten gemessen werden, die Spannung vom Getriebe gegen Erde oder auch zusätzlich die eingespeiste Spannung.

Fehler entstehen bei dieser Messung durch die zwangsläufige Verwendung von Messleitungen. Je nach Querschnitt und Lage der Messleitungen entstehen Streukapazitäten, welche das Messergebnis beeinflussen. Durch eine Abschätzung der Größe der Streukapazitäten kann der Fehler korrigiert werden. Die Ermittlung der Streukapazitäten stellt jedoch ein weiteres, schwer zu lösendes Problem dar.

Nachfolgend ist ein Beispiel für eine Spannungsmessung zu sehen [Abbildung 3-2]. Hier wird die Spannung mittels zweier Messgeräte mit Teilerkapazität über den zwei Unterbrechereinheiten gemessen. Die Teilerkapazitäten C_{M1} und C_{M2} bestehen aus mehreren Kondensatoren. Das Teilungsverhältnis wird bestimmt.

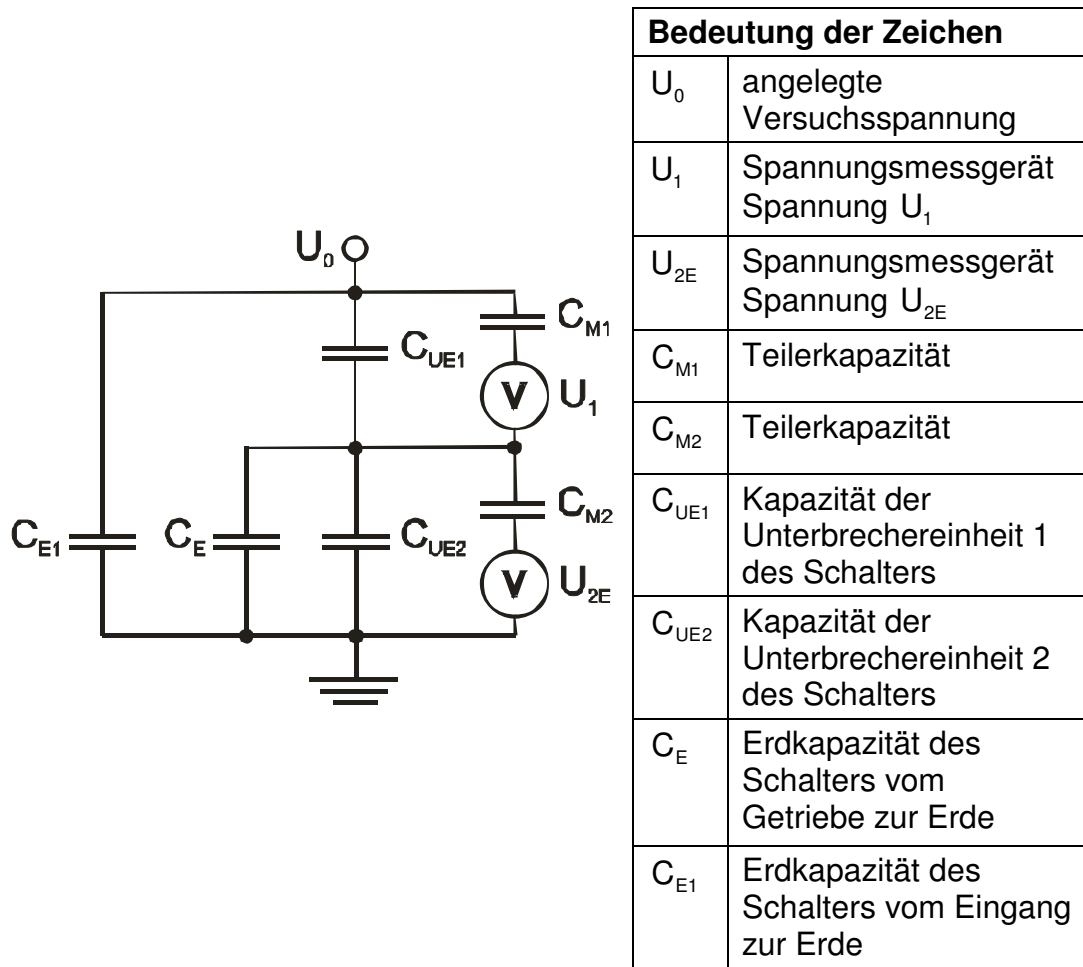


Abbildung 3-2: Spannungsmessung der Spannungen von Unterbrechereinheit 1 und 2

Am Schaltereingang wird die Versuchsspannung U_0 angelegt. Der Schalter ist ausgangsseitig geerdet. Die Kapazitäten C_{UE1} und C_{UE2} bilden die Kapazitäten der Unterbrechereinheiten nach, die Kapazität C_E die Erdkapazität des Schalters vom Getriebe aus. Mittels des Spannungsmessgerätes U_1 und der Teilerkapazität C_{M1} wird die Spannung

U_1 über der Unterbrechereinheit 1 (eingangsseitig, C_{UE1}) bestimmt. Die Spannung U_{2E} über der Summe aus der Schaltererdkapazität C_E und der Kapazität der Unterbrechereinheit 2 (ausgangsseitig, $C_{UE2} + C_E$) erhält man aus dem Spannungsmessgerät U_{2E} und der Teilerkapazität C_{M2} . Die Bestimmung der einzelnen Spannungen erfolgt über das ermittelte Teilverhältnis.

3.2 Direkte Strommessung

Die Strommessung erfolgt mittels Strommessgerät, mit welchem die relativ kleinen Ströme im μA -Bereich gemessen werden können. Es sind beim Leistungsschalter verschiedene Konstellationen nötig, um mittels eines Gleichungssystems die gesuchten Parameter zu ermitteln. Dazu werden die verschiedenen Eingangsströme aufgenommen. Die jeweilige Kapazität wird aus Strom und Spannung nach [14] bestimmt.

Vorteilhaft ist, dass der Einfluss der Leitungen quasi auf Null reduziert werden kann, zum einen durch die geringe Länge der Leitungen und weiterhin dadurch, dass die Leitungen im Feldschatten verlegt werden. Der Anschluss von Eingangs- und Abgangsleitungen bildet die Realität nach.

Im Beispiel ist die Messung von Ein- und Ausgangstrom zu sehen. Der Schalter ist ausgangsseitig geerdet.

Am Schaltereingang wird die Versuchsspannung U_0 angelegt. An den Schalteranschlüssen eingangs- und ausgangsseitig werden die Strommessgeräte i_1 und i_2 angeschlossen.

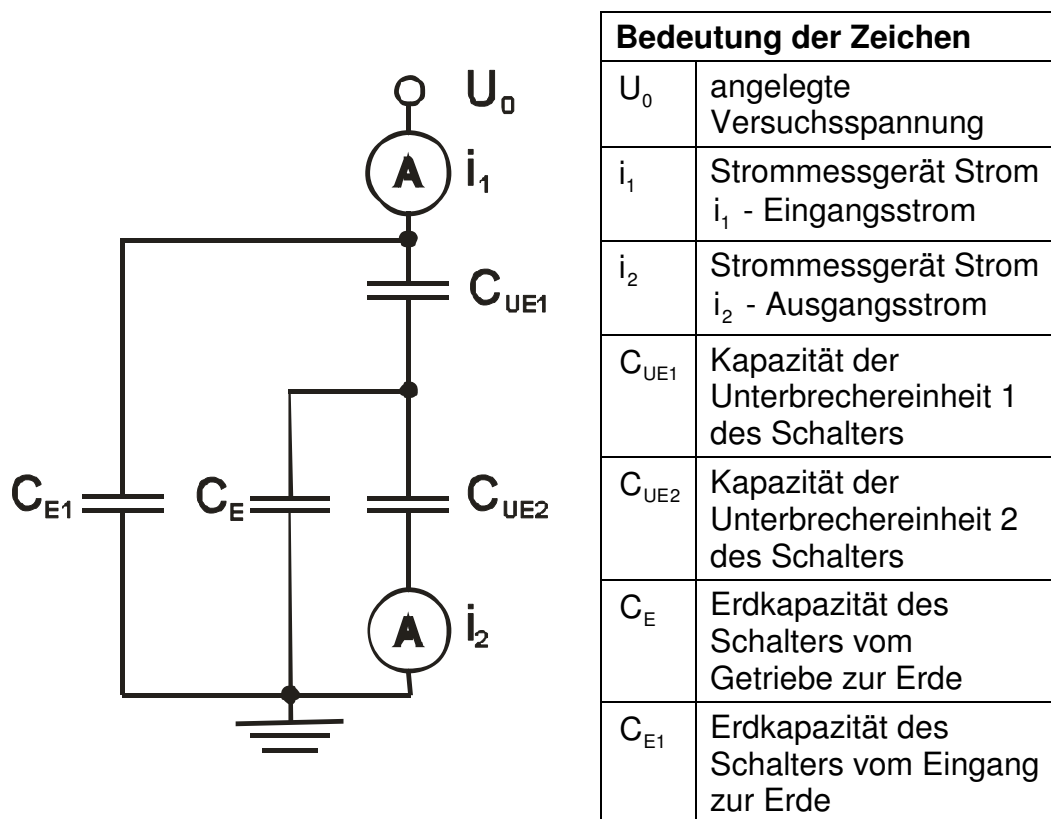
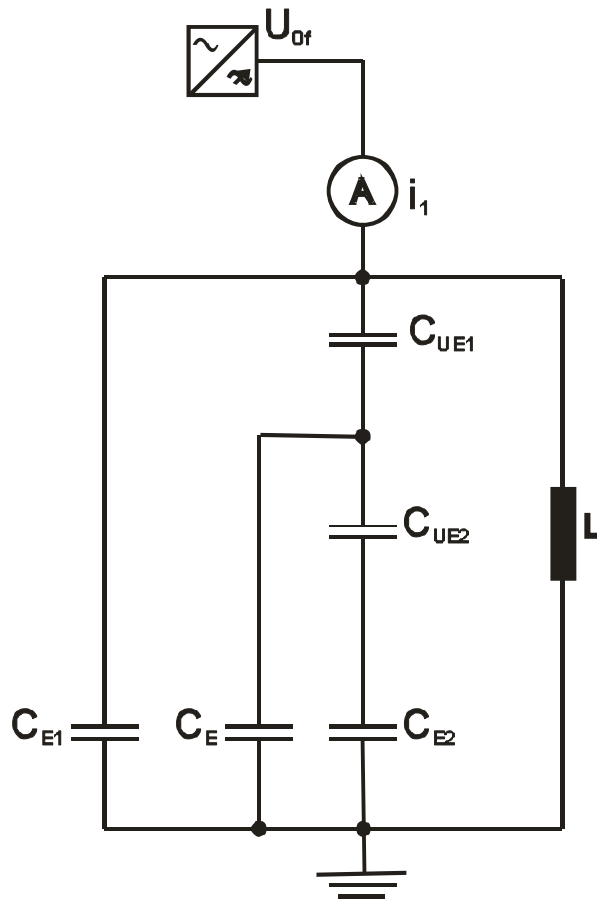


Abbildung 3-3: Strommessung von Ein- und Ausgangsstrom

3.3 Aufbau eines Schwingkreises

Beim Aufbau eines Schwingkreises [16] wird zum Schalter in Reihe oder parallel eine Induktivität mit bekanntem Wert zugeschaltet. Durch Bestimmung der Resonanzfrequenz in unterschiedlichen Konstellationen können über ein Gleichungssystem verschiedene Kapazitäten des Schalters bestimmt werden.

Problematisch ist hier analog der Spannungsmessung das Auftreten von Streukapazitäten durch die verwendeten Leitungen.



Bedeutung der Zeichen	
U_{of}	frequenzveränderliche Versuchsspannung vom Funktionsgenerator
i_1	Strommessgerät Strom i_1
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde
C_{E2}	Erdkapazität des Schalters vom Ausgang zur Erde
L	Induktivität L

Abbildung 3-4: Aufbau eines Schwingkreises

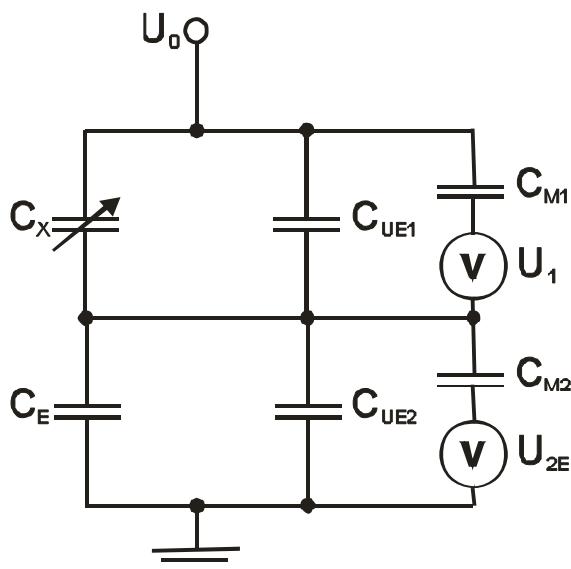
3.4 Kapazitätsmessgerät

Bei der direkten Kapazitätsmessung mittels RLC-Meter wird dieses direkt an eine Unterbrechereinheit angeschlossen und die Kapazität ermittelt [15]. Die Messleitungen ergeben jedoch auch hier einen Messfehler, welcher schwer zu bestimmen ist.



Abbildung 3-5: RLC-Meter

3.5 Abgleich mittels Trimpotentiometer



Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_X	Kapazität des Trimpotentiometers
C_{M1}	Teilerkapazität zu U_1
C_{M2}	Teilerkapazität zu U_{2E}
U_1	Spannungsmessgerät Spannung U_1
U_{2E}	Spannungsmessgerät Spannung U_{2E}

Abbildung 3-6: Trimpotentiometer

Die Messung wird mit Niederspannung durchgeführt. Mit Hilfe von Trimpotentiometern werden die gesuchten Kapazitäten kompensiert, sodass symmetrische Spannungen auftreten. Die gesuchte Kapazität wird durch Messung der eingestellten Trimmkapazität ermittelt.

Das Problem besteht in dem Messfehler durch die Anschlussleitungen zum Trimpotentiometer.

3.6 Auswahl eines geeigneten Messverfahrens

Es wurden verschiedene Messverfahren angewendet, Messungen mittels Kapazitätsmessgerät, mittels Trimpotentiometer, die Strommessung und die Spannungsmessung. Jedoch erfolgten die Messungen mittels Kapazitätsmessgerät sowie Trimpotentiometern nur versuchsweise und zum Vergleich. Die entscheidenden Messungen waren hier die Strommessung sowie die Spannungsmessung.

3.6.1 Strommessung

Als am besten geeignetes Messverfahren wurde die Strommessung genutzt. Der entscheidende Vorteil liegt in der Eliminierung des Einflusses der Messleitungen. Da die Messleitungen sehr kurz sind und im Feldschatten liegen, sind ihre Einflüsse gegen null und damit auch der Fehler durch Streukapazitäten. Das grundsätzliche Problem bei der Messung dieser geringen Kapazitäten ist damit gelöst.

3.6.2 Spannungsmessung

Neben der Strommessung wurde auch die Spannungsmessung durchgeführt. Bei der Spannungsmessung ist der Einfluss der Messleitungen größer als bei der Strommessung, wobei hier auch der Durchmesser der Messleitung eine Rolle spielt. Daher wurden verschiedene Messleitungsquerschnitte verwendet. Bei kleinerem Messleitungsquerschnitt wurde der Fehler geringer.

4 Messungen und Hochspannungsversuche

Für die Messungen und Prüfungen in der Hochspannungshalle der BTU Cottbus wurde ein 550kV-Leistungsschalter ohne Steuerkondensatoren in die Hochspannungshalle transportiert.

Es wurden Strom- und Spannungsmessungen durchgeführt sowie Kapazitätsmessungen mittels Brücke.

Die Messungen am Leistungsschalter erfolgten an drei verschiedenen Standorten in der Hochspannungshalle.

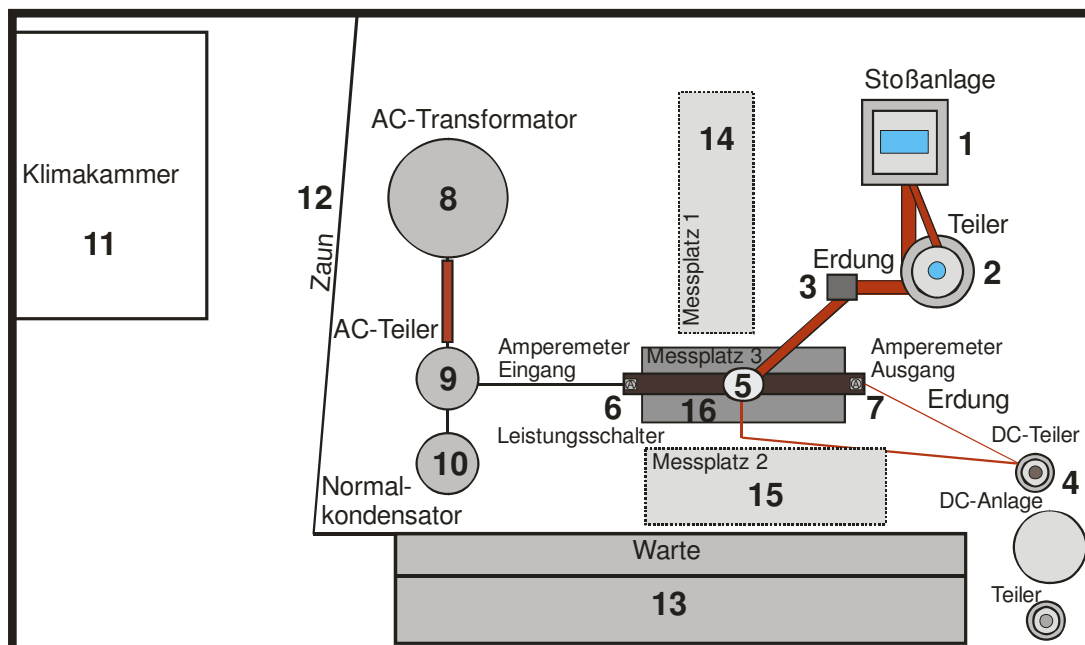


Abbildung 4-1: 550kV-Schalter in der Hochspannungshalle

Bedeutung der Zeichen			
1	Stoßanlage	9	AC-Anlagenteiler
2	Stoßanlagenteiler	10	Normalkondensator
3	Erdungspunkt	11	Klimakammer
4	DC-Anlage	12	Zaun
5	Leistungsschalter	13	Warte
6	Amperemeter Schaltereingang	14	Messplatz 1
7	Amperemeter Schalterausgang	15	Messplatz 2
8	AC-Anlage	16	Messplatz 3

Weiterhin wurde für die Versuche ein Normalkondensator, welcher in der Hochspannung der BTU Cottbus vorhanden war, genutzt.

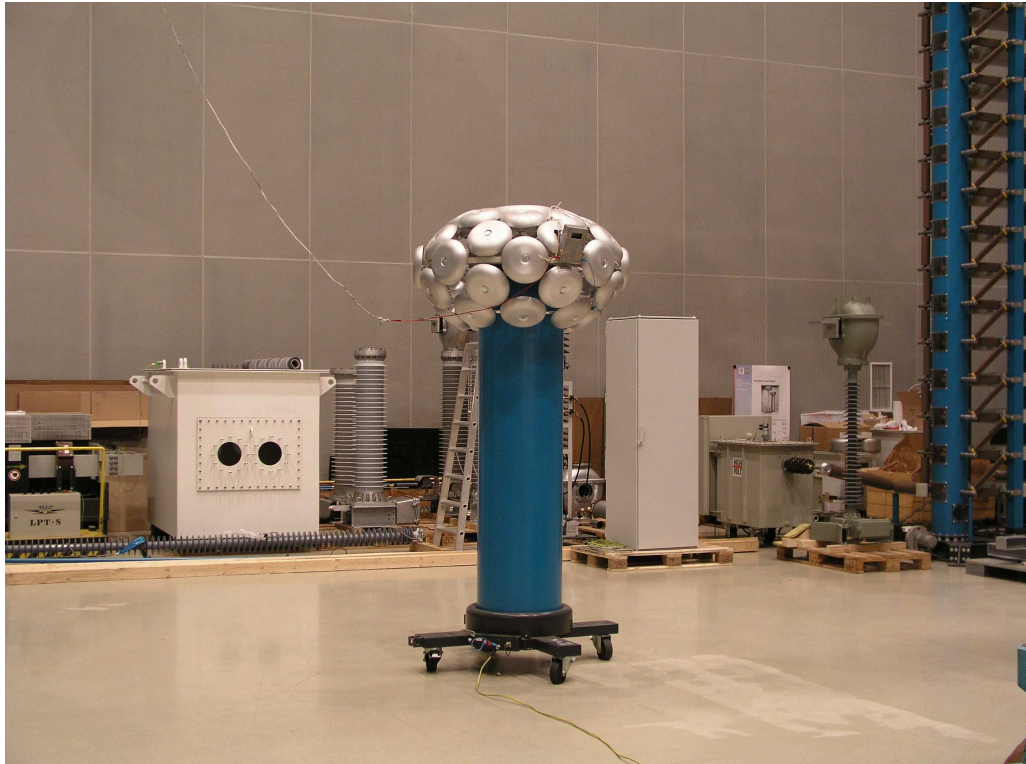
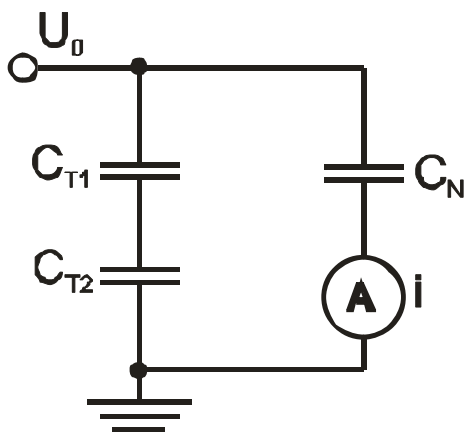


Abbildung 4-2: Strommessung am Normalkondensator

4.1 Strommessungen am Normalkondensator

4.1.1 Bestimmung der Kapazität des Normalkondensators

Zum Nachweis der Funktionalität der Strommessung wurde an einem Normalkondensator die Kapazität über den Strom und die angelegte Spannung bestimmt [14]. Der Normalkondensator war kalibriert. Das Messgerät (Multimeter) wurde auf dem Kondensator platziert. Der Messaufbau ist nachfolgend zu sehen:



Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
i	Strommessgerät Strom i
C_N	Kapazität des Normalkondensators
C_{T1}	Kapazität 1 Spannungsteilers
C_{T2}	Kapazität 2 Spannungsteilers

Abbildung 4-3: Strommessung am Normalkondensator C_N

Der Testkreis besteht aus der Spannungsquelle Spannung U_0 , dem Teiler C_{T1}/C_{T2} , der Normalkapazität C_N und dem Strommessgerät Strom i . Die Spannungsquelle ist ein Hochspannungstransformator, und der Teiler ist ein kapazitiver Teiler, das Testobjekt ist der Referenzkondensator. Zur Messung des Stromes wurde ein Digitalmultimeter genutzt. Der ohmsche Widerstand und die Induktivität sind nahe null. Somit kann die Kapazität des Normalkondensators C_{NE} nach [14] ermittelt werden zu:

$$X_{NE} \approx \frac{U_0}{i} \quad (1); \quad C_{NE} \approx \frac{1}{2\pi f \cdot X_{NE}} \quad (2)$$

X_{NE} - ermittelter Kondensatorblindwiderstand

C_{NE} - ermittelte Kondensatorkapazität

Die Kapazität wurde bei zwei festen Spannungen ermittelt.

Es wurde eine sehr hohe Genauigkeit erreicht. Damit ist die Funktion der Messung nachgewiesen.

U_0 [kV]	i [μ A]	ermittelter Kondensator- blindwider- stand X_{NE} [M Ω]	ermittelte Kondensator- kapazität C_{NE} [pF]	Kapazität C_N des Normalkondensators [pF] – laut Kalibrier- protokoll
10,08	328	30,7	103,58	103,63
50,05	1.634	30,6	103,92	103,63

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Strommessung am Normalkondensator

4.2 Eingangstrommessungen am Leistungsschalter

In der Hochspannungshalle der BTU Cottbus wurden an dem zu untersuchenden 550kV-Leistungsschalter in verschiedenen Konfigurationen die Gesamtkapazitäten aus angelegter Spannung und gemessenem Eingangsstrom nach [14] bestimmt. Mittels eines aufgestellten Gleichungssystems wurde die Spannungsverteilung über dem Schalter bestimmt. Die Eingangsströme wurden mit einem Multimeter gemessen. Der SF₆-Druck betrug 0,4bar.

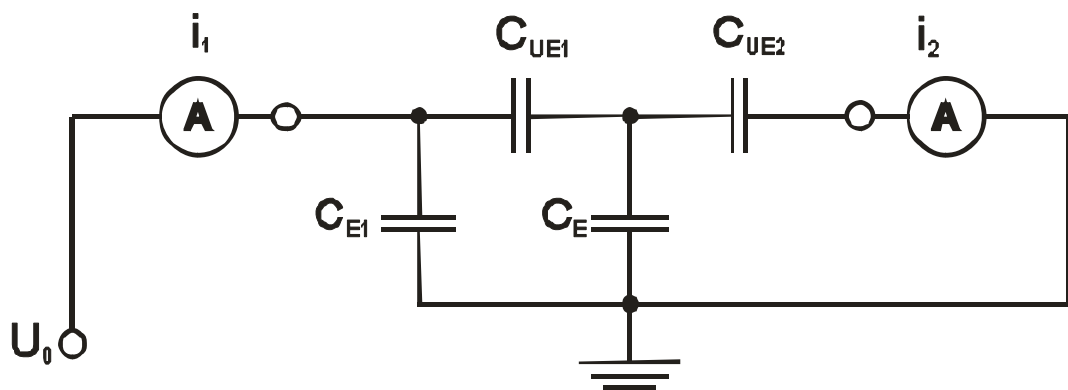


Abbildung 4-4: Strommessung am Leistungsschalter

Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
i_1	Strommessgerät Strom i_1 - Eingangsstrom
i_2	Strommessgerät Strom i_2 - Ausgangsstrom
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde

Das Strommessgerät wurde in einem geschirmten Gehäuse verbaut und an den metallischen Anschlusselektroden des Schalters angebracht.



Abbildung 4-5: Multimeter am Leistungsschalter – Strommessung

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- *Der Ausgang des Schalters ist kurzgeschlossen:*
 - Unterbrechereinheit 1 und 2 geöffnet
 - Unterbrechereinheit 1 geschlossen, Unterbrechereinheit 2 geöffnet
 - Unterbrechereinheit 1 geöffnet, Unterbrechereinheit 2 geschlossen
- *Der Ausgang des Schalters ist geöffnet:*
 - Unterbrechereinheit 1 und 2 geöffnet
 - Unterbrechereinheit 1 und 2 geschlossen
 - Unterbrechereinheit 1 geschlossen, Unterbrechereinheit 2 geöffnet
 - Unterbrechereinheit 1 geöffnet, Unterbrechereinheit 2 geschlossen

4.2.1 Durchführung der Eingangstrommessungen am Leistungsschalter

Es wurden Strommessungen an drei verschiedenen Schalterstandorten durchgeführt.

1) Schalter zwischen Stoß- und AC-Anlage



Abbildung 4-6: Strommessungen – Schalter zwischen Stoß- und AC-Anlage

2) Schalter an der Warte



Abbildung 4-7: Strommessungen – Schalter an der Warte

3) Schalter neben der Stoßanlage

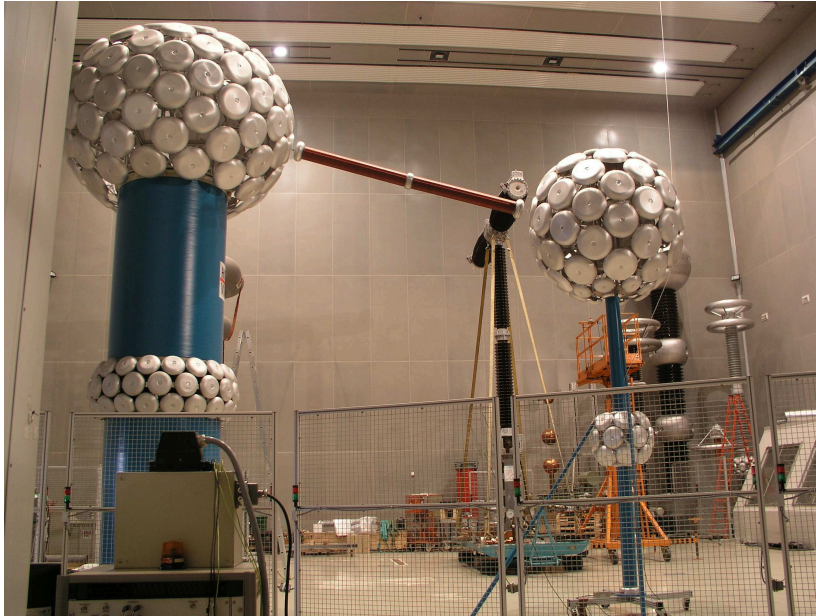
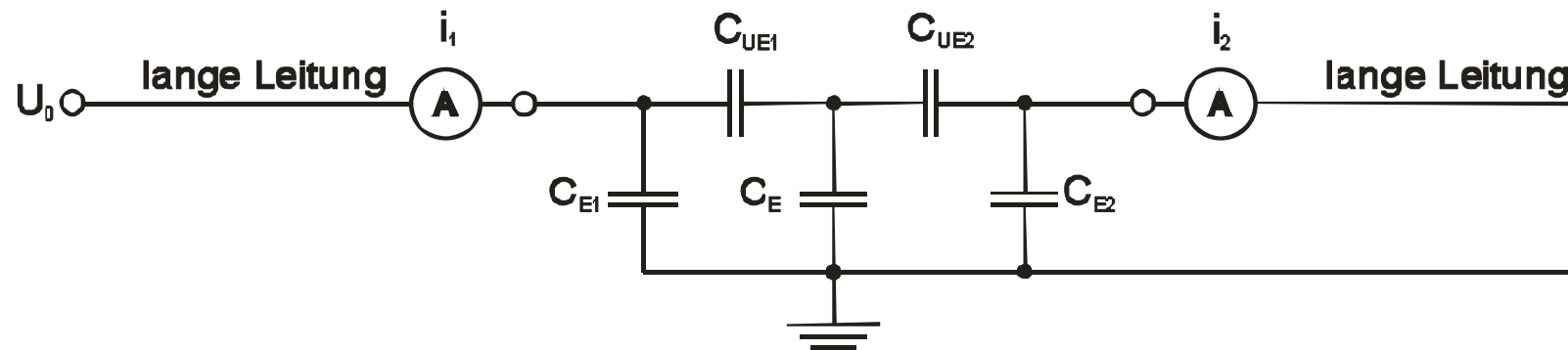


Abbildung 4-8: Strommessungen – Schalter neben der Stoßanlage

Abbildungen 4-9 bis 4-11

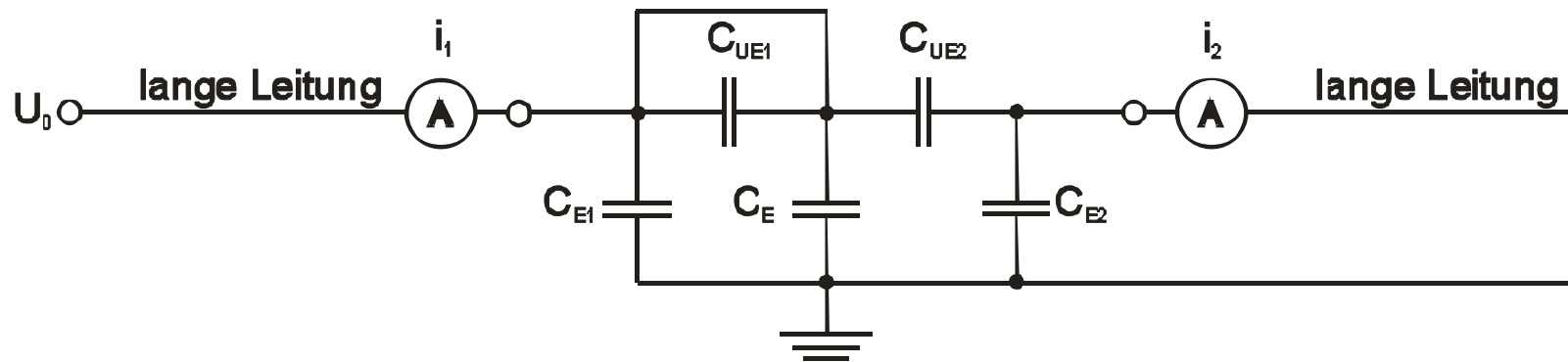
Abbildung 4-9: Eingangstrommessung am Leistungsschalter – Ausgang geerdet, Unterbrechereinheiten offen



Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
i_1	Strommessgerät Strom i_1 - Eingangsstrom
i_2	Strommessgerät Strom i_2 - Ausgangsstrom
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde
C_{E2}	Erdkapazität des Schalters vom Ausgang zur Erde

Schalter zwischen Stoß- und AC-Anlage	Schalter an der Warte	Schalter neben der Stoßanlage
<p>U = 50kV i₁ = 540μA</p> <p>X = 92,6MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 34,4pF</p>	<p>U = 50,2kV i₁ = 585μA</p> <p>X = 85,8MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 37,1pF</p> <p>p=1.017bar T=21,8°C relative Luftfeuchte=33%</p>	<p>U = 1,06kV i₁ = 11,8μA</p> <p>X = 89,8MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 35,4pF</p> <p>U = 10,09kV i₁ = 112,9μA</p> <p>X = 89,4MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 35,6pF</p>

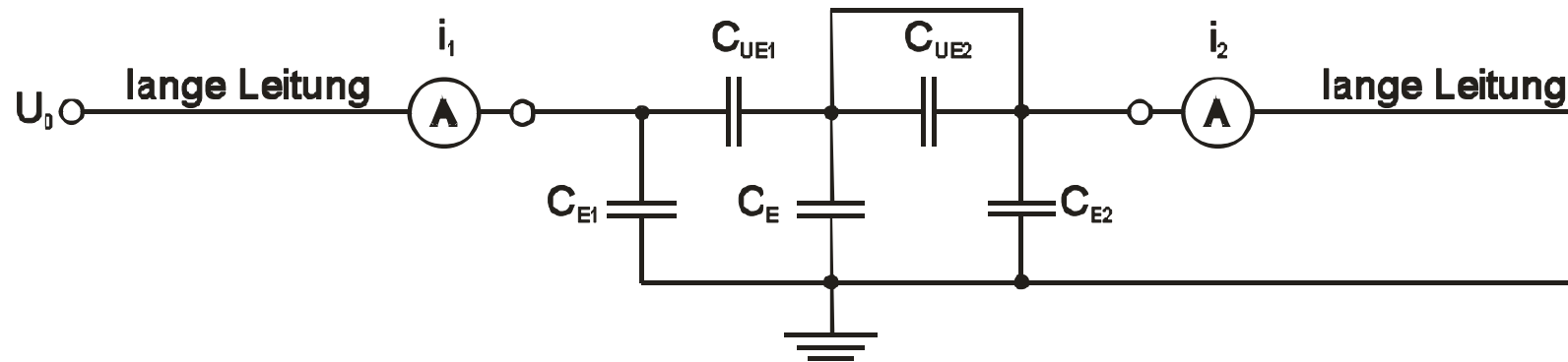
Abbildung 4-10: Eingangsstrommessung am Leistungsschalter – Ausgang geerdet, erste Unterbrechereinheit gebrückt



Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
i_1	Strommessgerät Strom i_1 - Eingangsstrom
i_2	Strommessgerät Strom i_2 - Ausgangsstrom
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde
C_{E2}	Erdkapazität des Schalters vom Ausgang zur Erde

Schalter zwischen Stoß- und AC-Anlage	Schalter an der Warte	Schalter neben der Stoßanlage
<p>U = 50kV i₁ = 1.272μA</p> <p>X = 39,3MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 81pF</p>	<p>U = 49,96kV i₁ = 1.391μA</p> <p>X = 35,9MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 88,6pF</p> <p>p=1.017bar T=21,8°C relative Luftfeuchte=33%</p>	<p>U = 1,07kV i₁ = 28,9μA</p> <p>X = 37MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 86pF</p> <p>p=1.014bar T=19,5°C relative Luftfeuchte=30,3%</p>

Abbildung 4-11: Eingangstrommessung am Leistungsschalter – Ausgang geerdet, zweite Unterbrechereinheit gebrückt



Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
i_1	Strommessgerät Strom i_1 - Eingangsstrom
i_2	Strommessgerät Strom i_2 - Ausgangsstrom
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde
C_{E2}	Erdkapazität des Schalters vom Ausgang zur Erde

Schalter zwischen Stoß- und AC-Anlage	Schalter an der Warte	Schalter neben der Stoßanlage
<p>U = 50kV i₁ = 612,6μA</p> <p>X = 81,6MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 39pF</p>	<p>U = 0,93kV i₁ = 11,9μA</p> <p>X = 78,2MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 40,7pF</p> <p>p=1.017bar T=21,8°C relative Luftfeuchte=33%</p>	<p>U = 0,98kV i₁ = 12,1μA</p> <p>X = 81MΩ</p> <p>Gesamtkapazität: C = 39,3pF</p> <p>p=1.014bar T=19,5°C relative Luftfeuchte=30,3%</p>

4.2.2 Auswertung der Eingangsstrommessungen am Leistungsschalter

$C_{UE} = C_{UE1} = C_{UE2}$ (Die Unterbrechereinheiten haben die gleiche Kapazität!)

Schalterposition nach Abbildung 4-6 (zwischen Stoß- und AC-Anlage):

Es ergibt sich eine Spannungsverteilung von ca. 24% zu 76%.

1) Messung Abbildung 4-9: $[(C_E \parallel C_{UE}) + C_{UE}] \parallel C_{E1} = 34,4\text{pF}$

2) Messung Abbildung 4-10: $C_E \parallel C_{UE} \parallel C_{E1} = 81\text{pF}$

3) Messung Abbildung 4-11: $C_{UE} \parallel C_{E1} = 39\text{pF}$

Mit $C_{E1} = 39\text{pF} - C_{UE}$ aus Gleichung 3) ergibt sich in Gleichung 2) für

$$C_E = 81\text{pF} - 39\text{pF} = \underline{\underline{42\text{pF}}}$$

Gleichung 1) ist erfüllt für $C_{UE} = \underline{\underline{19\text{pF}}}$ und $C_{E1} = \underline{\underline{20\text{pF}}}$.

Schalterposition nach Abbildung 4-7 (an der Warte):

Es ergibt sich eine Spannungsverteilung von ca. 22% zu 78%.

$$C_E = \underline{\underline{48\text{pF}}}; C_{UE} = \underline{\underline{18,5\text{pF}}}; C_{E1} = \underline{\underline{22,5\text{pF}}}$$

Schalterposition nach Abbildung 4-8 (neben der Stoßanlage):

Es ergibt sich eine Spannungsverteilung von ca. 23% zu 77%.

$$C_E = \underline{\underline{46,7\text{pF}}}; C_{UE} = \underline{\underline{18,8\text{pF}}}; C_{E1} = \underline{\underline{20,5\text{pF}}}$$

Hierbei ist u. a. der Fehler durch die Hallenmessung vorhanden. Durch geringe Abstände zu Geräten und Hallenwänden/Warte entstehen sowohl einspeisungs- als auch erdseitig Fehler durch Parallelkapazitäten, die hier

durch Einspeisung-Getriebe-Parallelkapazität C_{S1} (C_{S11} , C_{S12}) und Getriebe-Erde-Parallelkapazität C_{GE} (C_{GE11} , C_{GE12}) dargestellt sind. Es entstehen unterschiedliche Spannungsaufteilungen.

Weiterhin war bei den Messungen kein Schirm am Schalter vorhanden und es entstanden zufällige Fehler im Versuchsaufbau. Rundungsabweichungen sind ebenso enthalten.

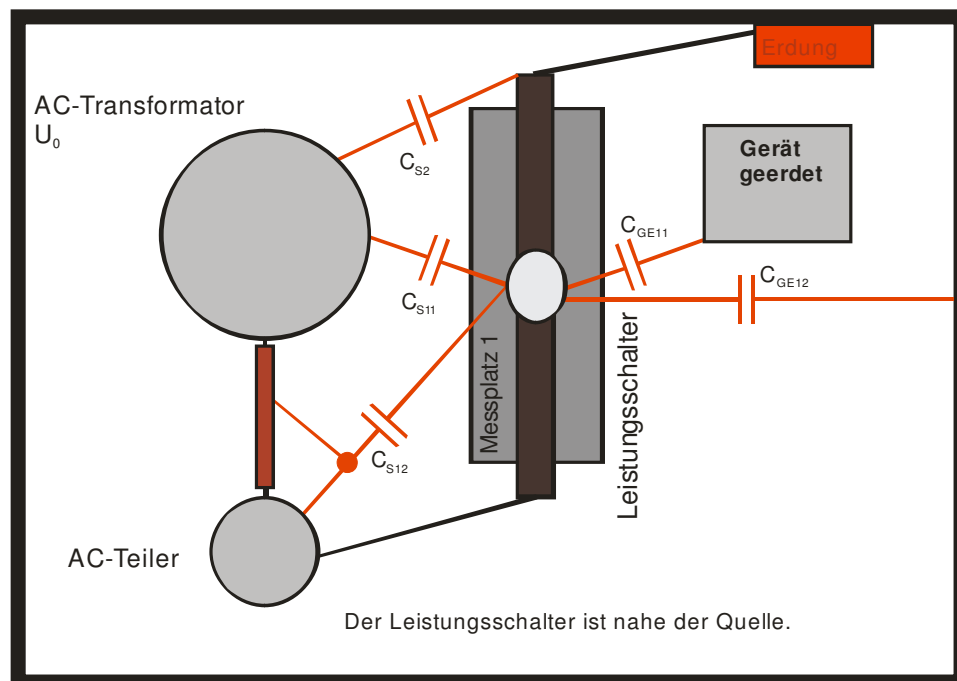


Abbildung 4-12: Beispiele für Streukapazitäten bei Messungen in der Hochspannungshalle

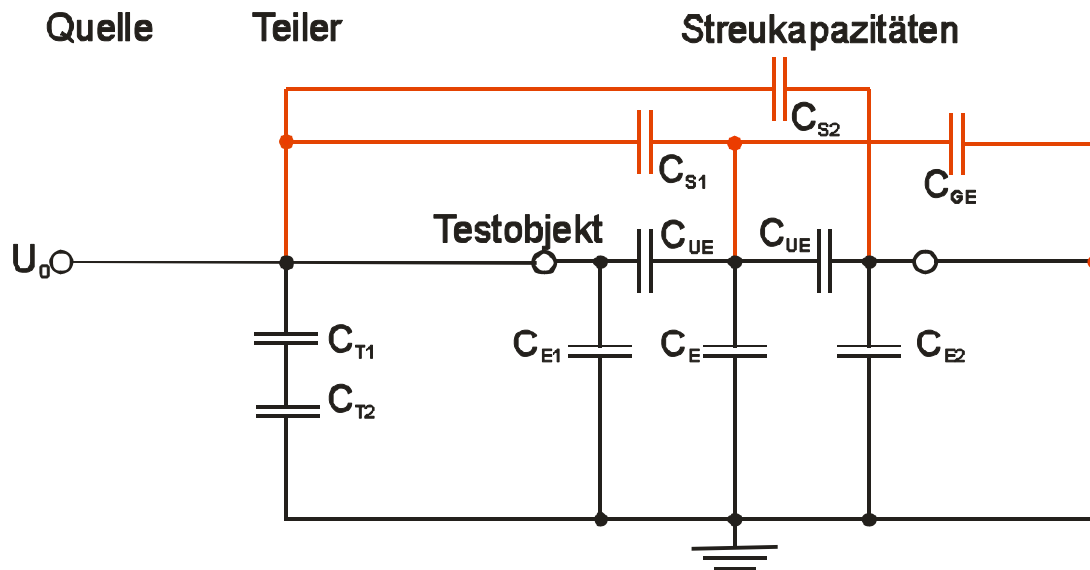


Abbildung 4-13: Stromlaufplan Streukapazitäten

Durch die Nähe zur Quelle (Transformator, Teiler) wird die gemessene Kapazität der Unterbrechereinheit 1 erhöht und damit das Spannungsverhältnis des Schalters verändert, was jedoch nicht der Realität entspricht. Umgekehrt kommt es durch die Erdkapazitäten der geerdeten Geräte und Hallenteile (Stoßanlage, Teiler, Warte, Wände, Decke) zu einer Beeinflussung des Spannungsverhältnisses.

In der untersuchten Konstellation überwiegt die parallele Erdkapazität. Dies bedeutet, dass das Spannungsverhältnis des Schalters im Freifeld gleichmäßiger ist.

Durch die Simulation (siehe Kapitel 5. Simulation) wurde gezeigt, dass der Schalter im Freifeld ein günstigeres Spannungsaufteilungsverhältnis hat. Bei Verwendung von Schirmringen verbessert sich das Verhältnis weiter.

4.3 Ausgangstrommessungen am Leistungsschalter

Aus der über Brückenschaltung [6, 17] ermittelten Kapazität der Unterbrechereinheiten wurde die Spannungsaufteilung über dem Schalter ermittelt. Dazu wurden an dem untersuchten 550kV-Hochspannungs-Leistungsschalter der Ausgangsstrom sowie die speisende Spannung gemessen (U_2 bestimmt nach [14]).

In einem weiteren Versuch wurde die Kapazität einer Unterbrechereinheit durch Strommessung bestimmt [nach 14].

4.3.1 Durchführung der Ausgangstrommessungen am Leistungsschalter

Der Versuchsaufbau bestand aus Wechselfspannungsanlage mit Teiler und Steuerung, Prüfling, Multimeter und Zuführungen.

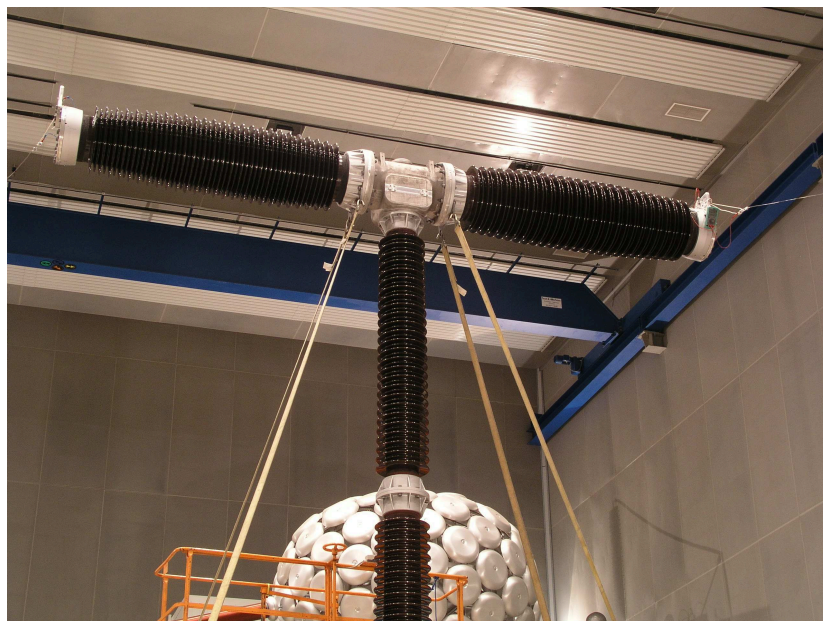


Abbildung 4-14: Allgemeiner Versuchsaufbau

Es wurden zwei verschiedene Versuche durchgeführt und jeweils der Ausgangsstrom gemessen.

4.3.1.1 1. Versuch: Ermittlung der Spannungsverteilung

Die primäre Unterbrechereinheit war nicht gebrückt [Abbildung 4-4, Abbildung 4-15]. Aus dem Ausgangsstrom und der Kapazität der Unterbrechereinheit wurde die Spannung über der sekundären Schaltkammer ermittelt. Der Strom wurde direkt oben am Schalter gemessen.

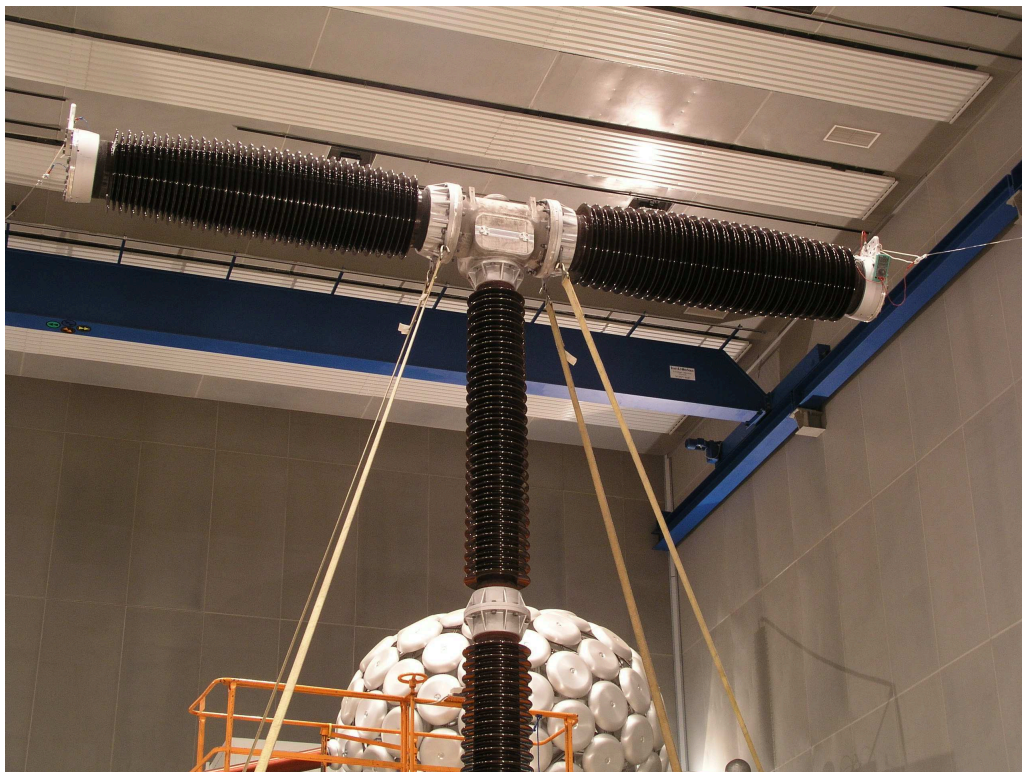


Abbildung 4-15: Versuchsaufbau zur Spannungsermittlung aus Strom und Kapazität

Versuchsergebnisse

Spannung U	50kV
Strom i_2	130 μ A

Aus der Brückenmessung: $C_{UE2} = 23\text{pF}$, $X_2 = 138,4\text{M}\Omega$

$U_2 = X_2 \cdot i_2 = 138,4\text{M}\Omega \cdot 130\mu\text{A} = \underline{18\text{kV}}$; $U_1 = U - U_2 = \underline{32\text{kV}}$

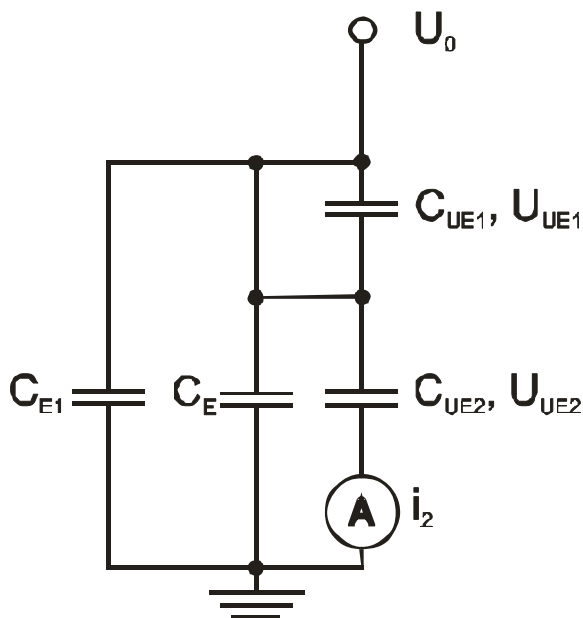
Spannung U_1	32kV
Spannung U_2	18kV
Spannungsverhältnis	64% / 36%

Die Kapazität zwischen Wechselspannungsanlage und Unterbrechereinheit 2 beeinflusst die Versuchsergebnisse in der Art, dass ein zu großer Strom i_2 gemessen wird. Daraus folgt eine zu große berechnete Spannung U_2 .

4.3.1.2 2. Versuch: Ermittlung der Kapazität

Die primäre Unterbrechereinheit wurde gebrückt [Abbildung 4-16].

Der Strom wurde auf der Erde gemessen. Die Kapazität der Unterbrechereinheit wurde aus den Messwerten berechnet.



Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
U_{UE1}	Spannung Unterbrechereinheit 1
U_{UE2}	Spannung Unterbrechereinheit 2
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde
i_2	Ausgangsstrom

Abbildung 4-16: Stromlaufplan zur Kapazitätsermittlung aus der Strommessung

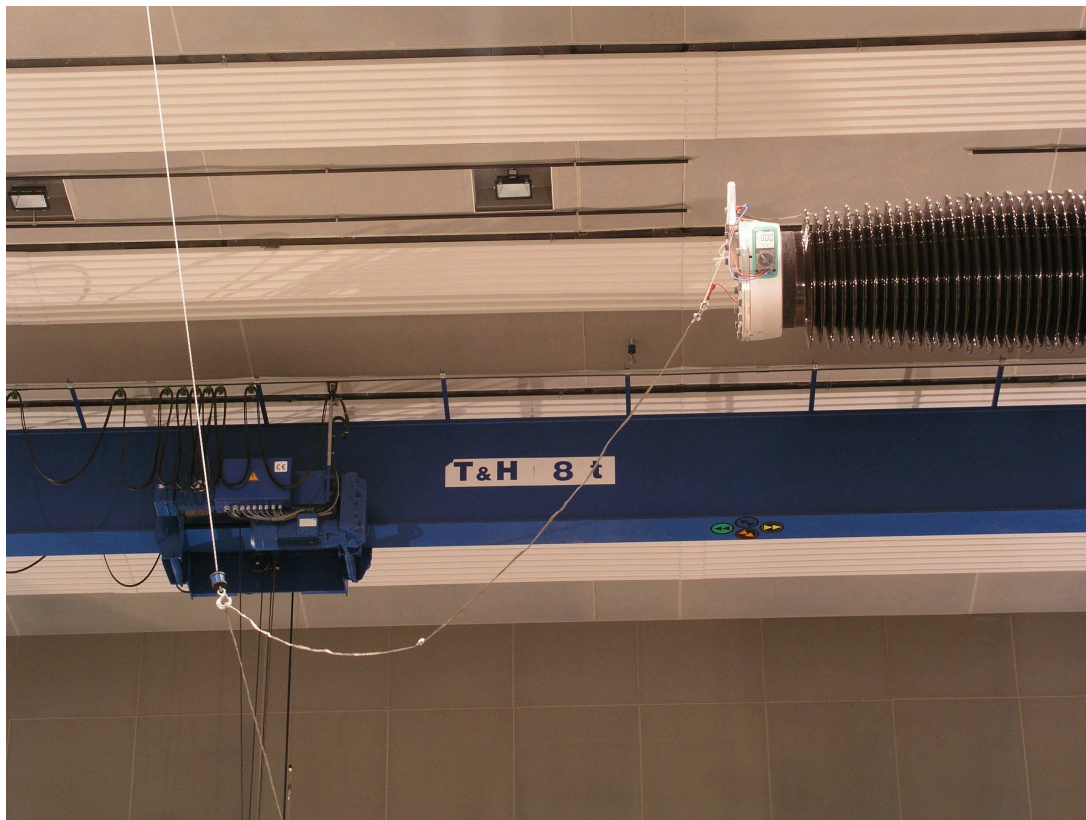


Abbildung 4-17: Versuchsaufbau zur Kapazitätsermittlung aus der Strommessung

Versuchsergebnisse

Spannung U	50,1kV
Strom i_2	351 μ A

$$X_2 = \frac{U}{i_2} = 142,735\text{M}\Omega$$

$$C_{\text{UE2}} = \underline{\underline{22,3\text{pF}}}$$

4.3.2 Auswertung der Ausgangstrommessungen am Leistungsschalter

Es wurde das Spannungsverhältnis der Unterbrechereinheiten bestimmt. Dazu wurde der kapazitive Strom durch die sekundäre Unterbrechereinheit gemessen, und mittels der durch die Brückenmessung ermittelten Kapazität der Unterbrechereinheit wurde die Spannung über der sekundären Unterbrechereinheit bestimmt. Das Spannungsverhältnis zeigt einen Wert von 64% / 36%. Dies würde das im Leistungsprüffeld beobachtete gute Schalterverhalten erklären, erscheint jedoch sehr optimistisch. Fehler entstehen durch die örtliche Nähe der Einspeisung, welche im vorliegenden Fall nicht geändert werden kann.

Im zweiten Versuch wurde der Brückenmesswert zur Kapazität der Unterbrechereinheiten mittels Strommessung überprüft. Es ergab sich eine geringe Toleranz, jedoch in akzeptablem Maße. Brückenmesswert siehe 4.4.

Brückenmessung: 23pF (138,4M Ω)

Strommessung: 22,3pF (142,74M Ω)

Es zeigt sich, dass beide Messverfahren eine gute Übereinstimmung bezüglich der Ergebnisse haben.

Auch hier besteht der Fehlereinfluss der Einspeisung. Der Messwert kann durch die Strommessung ohne Brücke und Normalkondensator bestimmt werden, was den Aufwand verringert.

4.4 Brückenmessungen am Leistungsschalter

Die Kapazitäten der Unterbrechereinheiten wurden mittels Messbrücke bestimmt [6, 17]. Es wurden ebenfalls Spannungen bis 20kV verwendet.

Der Versuchsaufbau bestand aus Wechselspannungsanlage mit Teiler und Steuerung, Normalkondensator, Prüfling, Messbrücke und Zuführungen. Die Kapazität C_N des Normalkondensators betrug 103,63pF.

Die Schalterkontakte waren geöffnet. Der SF₆-Druck im Schalter betrug 0,4bar.

Es wurde eine Spannung von ca. 20kV angelegt. Nach Abgleich der Messbrücke wurde die Kapazität abgelesen.

In verschiedenen Konfigurationen wurde die Messleitungszuführung zum Prüfling variiert, sodass ein Einfluss der Messleitung sichtbar wurde.

Um den Einfluss der Umgebung (Hochspannungshallenwände, Versuchs- und Prüfanlagen in der Hochspannungshalle usw.) auf die Spannungsverteilung über den Unterbrechereinheiten zu zeigen, wurden Versuche an zwei Standorten innerhalb der Hochspannungshalle durchgeführt.



Abbildung 4-18: Allgemeiner Versuchsaufbau



Abbildung 4-19: Spannungszuführung außen und Anschluss der Brücke in der Mitte



Abbildung 4-20: Brückenmessgerät

4.4.1 Durchführung der ersten Brückenmessung an einem Standort

In dieser Position des Schalters wurden vier verschiedene Versuche mit jeweils veränderter Leitungslage bei ca. 20kV durchgeführt. Es wurden beide Unterbrechereinheiten gemessen und verschiedene Aufbauten hinsichtlich der Spannungszuführung realisiert.

[Abbildungen 4-21 bis 4-24]

4.4.1.1 1. Versuch

Die Leitung wurde direkt vom Teiler zum Prüfling geführt.

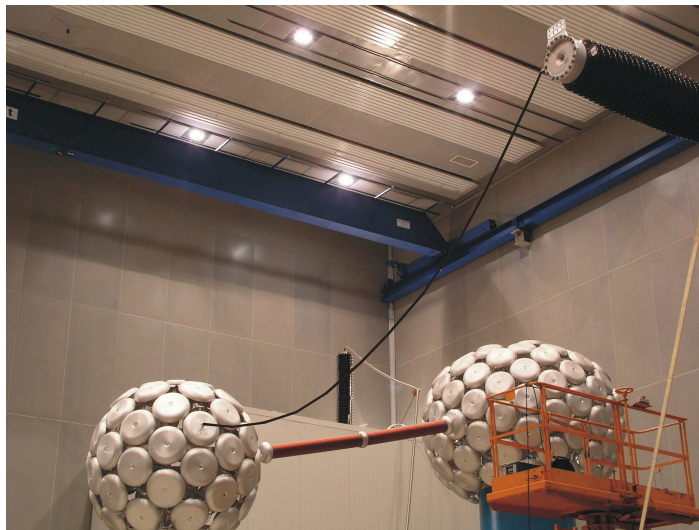


Abbildung 4-21: 1. Brückenmessung: Die Leitung wurde direkt vom Teiler zum Prüfling geführt

Versuchsergebnisse

Die Länge der Leitung zur Spannungszuführung betrug ca. 6m.

1. Messwert	
$C_{UE2}=22,3 \cdot 10^{-2} \cdot C_N$	23pF

2. Messwert	
$C_{UE2}=22,3 \cdot 10^{-2} \cdot C_N$	23pF

4.4.1.2 2. Versuch

Die Leitung wurde ca. 5-6m gerade kontaktseitig vom Schalter weg und dann im spitzen Winkel zum Teiler geführt.

Dies brachte eine geringere Beeinflussung der Schalterkapazitäten durch die Leitung als im Versuch 1. Diese Leitungsführung ist eine Nachbildung der vom Leistungsschalter im Betrieb abführenden Leitung, also ein realitätsnäherer Aufbau als im Versuch 1.



Abbildung 4-22: 1. Brückenmessung: Entfernte Leitungsführung vom Teiler zum Schalter

Versuchsergebnis

Die Länge der Leitung zur Spannungszuführung betrug ca. 12m.

Spannung U	20,1kV
$C_{UE2}=22,54 \cdot 10^{-2} \cdot C_N$	23pF

4.4.1.3 3. Versuch

Die Leitung wurde vom Teiler nach oben, dann schräg über die Mitte des Schalters und dann zum Pol 2 des Schalters geführt.

Es war ein stärkerer Leitungseinfluss vorhanden.

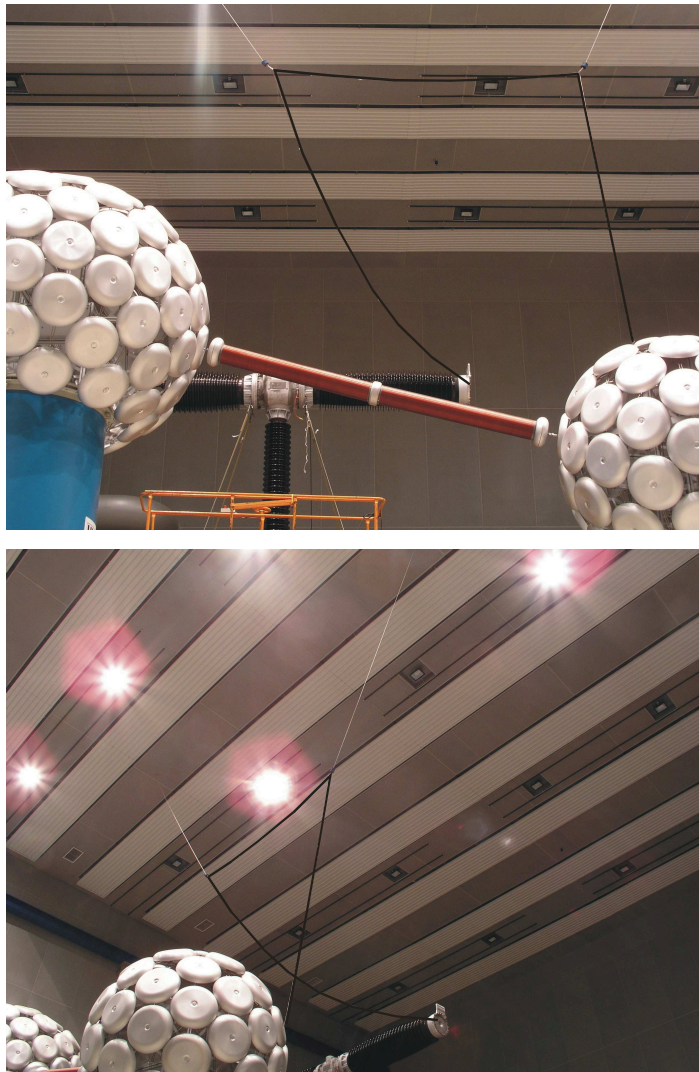


Abbildung 4-23: 1. Brückenmessung: Leitungsführung zur Mitte des Schalters (Pol 2)

Versuchsergebnis

Die Länge der Leitung zur Spannungszuführung betrug ca. 12m.

Spannung U	20,55kV
$C_{UE2}=25,3 \cdot 10^{-2} \cdot C_N$	26pF

4.4.1.4 4. Versuch

Die Leitung ist vom Teiler nach oben, dann schräg über die Mitte des Schalters und dann zum Pol 1 des Schalters geführt (lange Parallelführung der Leitung).

Es war ein stärkerer Leitungseinfluss ähnlich zu Versuch 3 vorhanden.



Abbildung 4-24: 1. Brückenmessung: Leitungsführung zur Mitte des Schalters (Pol 1)

Versuchsergebnis

Die Länge der Leitung zur Spannungszuführung betrug ca. 12m.

Spannung U	20,9kV
$C_{UE1}=25,75 \cdot 10^{-2} \cdot C_N$	26pF

4.4.1.5 Auswertung der ersten Brückenmessung

Nachfolgend sind die Messergebnisse dargestellt.

Versuchsnummer	Spannung [kV]	Kapazität [pF] der UE
1 (UE 2)	20,9	23
2 (UE 2)	20,1	23
3 (UE 2)	20,5	26
4 (UE 1) (lange Parallelführung der Leitung zum Schalter)	20,9	26

Eine Abhängigkeit vom Versuchsaufbau ist deutlich erkennbar.

Die größeren Fehler entstanden in den Versuchen 3 und 4, da hier eine lange Leitung relativ nahe am Schalter entlang geführt war.

Die Versuche 1 und 2 zeigen eine gewisse Abweichung untereinander, da bei Versuch 2 eine längere Leitung verwendet wurde. Daraus ergibt sich, dass die größte Genauigkeit erreicht wird, wenn der Normalkondensator so positioniert wird, dass eine gerade Leitungsführung in Verlängerung der Strombahn gegeben ist.

Die Versuche 1 und 2 stellen die genauere Messung dar, sodass die Kapazität einer Unterbrechereinheit hier mit 23pF angegeben wird.

Es ist zu beachten, dass sich auch der Einspeisetransformator sowie Teiler und Normalkondensator relativ nahe (ca. 4m entfernt) am Prüfling befinden. Die Abstände konnten nicht vergrößert werden. Dies ist wichtig bei der Berechnung der Spannungsverteilung in Abhängigkeit von der Kapazität der Unterbrechereinheiten.

4.4.2 Durchführung der zweiten Brückenmessung an weiter variierten Standorten

4.4.2.1 1. Versuch: Schalter an der Warte

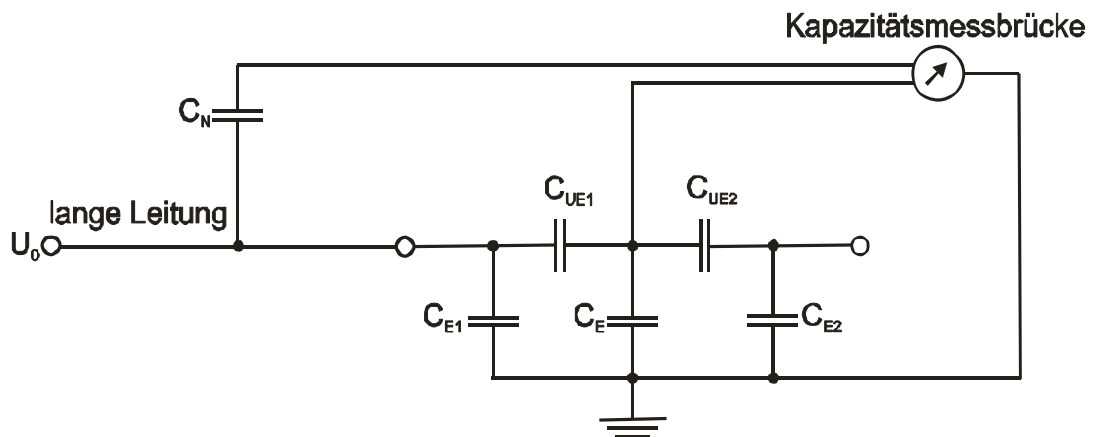


Abbildung 4-25: Stromlaufplan 2. Brückenmessung: Schalter an der Warte

Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde
C_{E2}	Erdkapazität des Schalters vom Ausgang zur Erde
C_N	Normalkondensator



Abbildung 4-26: 2. Brückenmessung: Schalter an der Warte

Brücke mittig angeschlossen, Schalter nicht geerdet, beide UE offen,
mit Schlupfe

Versuchsergebnis: $C_{UE1} = 20\text{pF}$

4.4.2.2 2. Versuch: Schalter neben der Stoßanlage

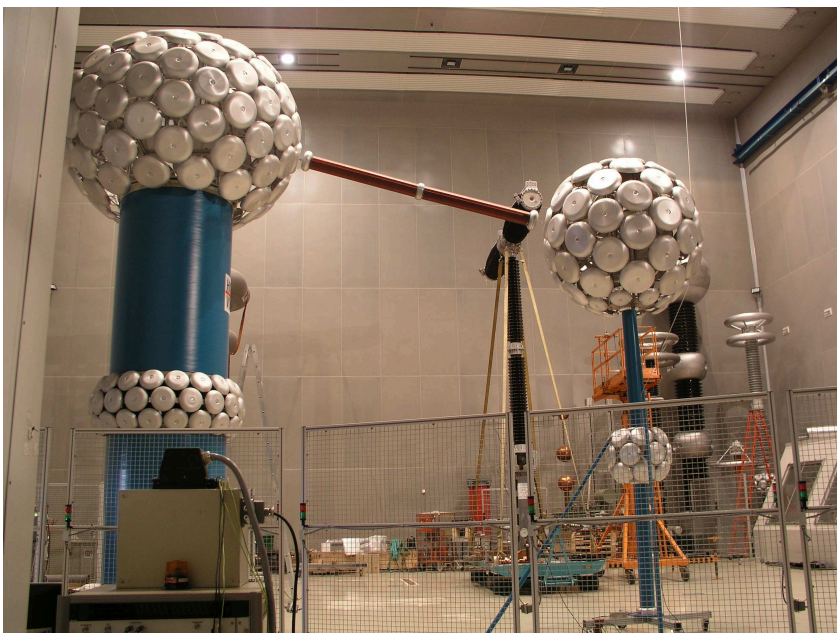


Abbildung 4-27: 2. Brückenmessung: Schalter neben der Stoßanlage

Brücke mittig angeschlossen, Schalter nicht geerdet, beide UE offen,
ohne Schlupfe

Versuchsergebnis: $C_{UE1} = 20,3\text{pF}$

4.4.2.3 Auswertung der zweiten Brückenmessung

Nachfolgend sind die Messergebnisse dargestellt.

Versuchsnummer	Spannung [kV]	Kapazität [pF] der UE
1 (UE 1)	20,8	20
2 (UE 1)	20,5	20

Durch die Veränderung des Standortes konnte auch eine Änderung der ermittelten Kapazitäten festgestellt werden. Es sind Einflüsse der Umgebung vorhanden. Die Kapazität der Unterbrechereinheit wird mit 20pF angegeben. Die Umgebung ist neben den Messleitungen als Fehlerquelle der Messung anzusehen.

4.5 Direkte Messung der Spannungsaufteilung am Leistungsschalter

Es wurden direkte Spannungsmessungen mit kapazitiven Teilern an beiden Unterbrechereinheiten des Leistungsschalters durchgeführt [6]. Die Spannungsmessungen über den Unterbrechereinheiten und gegen Erde erfolgten mittels Handmultimeter mit Reihenkapazitäten als Spannungsteiler. Dabei wurden Spannungen bis 20kV angelegt. Das Teilungsverhältnis wurde jeweils durch Kurzschließen einer Unterbrechereinheit ermittelt. Nach der Messung wurden die tatsächlichen Spannungen berechnet.

Die räumliche Position des Leistungsschalters in der Hochspannungshalle wurde, ähnlich wie bei den Strommessungen in Abschnitt 4.2.1, systematisch variiert.



Abbildung 4-28: Spannungsmessung

Das Messgerät ist in einem Gehäuse verbaut. Die Reihenkapazitäten sind im weißen Röhrchen rechts am Messgerät untergebracht.

4.5.1 Durchführung der Spannungsmessungen

4.5.1.1 1. Versuch: Schalter zwischen Stoß- und AC-Anlage

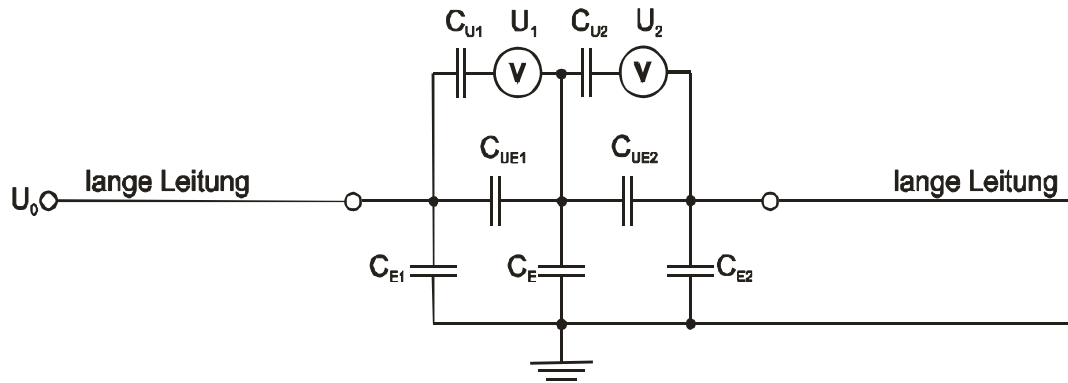


Abbildung 4-29: Stromlaufplan Spannungsmessung: Schalter zwischen Stoß- und AC-Anlage

Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
U_1	Spannungsmessgerät Spannung U_1 (Unterbrechereinheit 1)
U_2	Spannungsmessgerät Spannung U_2 (Unterbrechereinheit 2)
C_{U1}	Teilerkapazität Unterbrechereinheit 1
C_{U2}	Teilerkapazität Unterbrechereinheit 2
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde
C_{E2}	Erdkapazität des Schalters vom Ausgang zur Erde

Ergebnis der Messung

$$U_1 = 13,75\text{kV}, U_2 = 6,43\text{kV}, \frac{U_1}{U_2} = \frac{68\%}{32\%}$$

4.5.1.2 2. Versuch: Schalter an der Warte

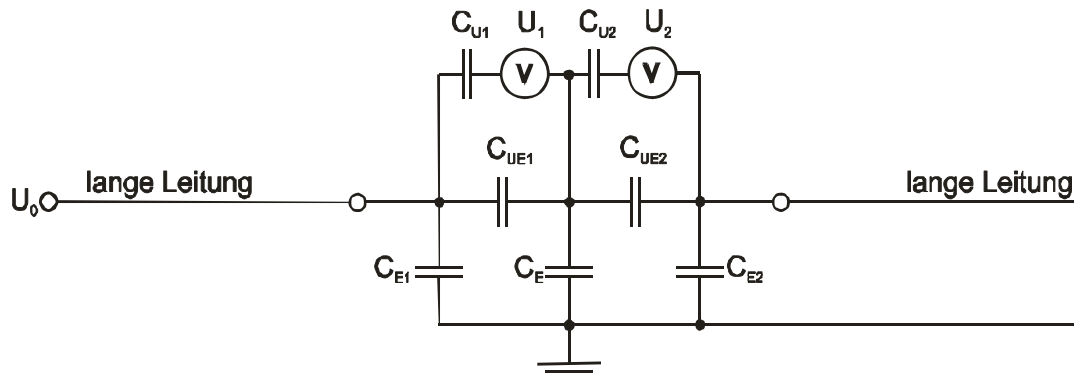


Abbildung 4-30: Stromlaufplan Spannungsmessung: Schalter an der Warte

Bedeutung der Zeichen	
U_0	angelegte Versuchsspannung
U_1	Spannungsmessgerät Spannung U_1 (Unterbrechereinheit 1)
U_2	Spannungsmessgerät Spannung U_2 (Unterbrechereinheit 2)
C_{U1}	Teilerkapazität Unterbrechereinheit 1
C_{U2}	Teilerkapazität Unterbrechereinheit 2
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde
C_{E2}	Erdkapazität des Schalters vom Ausgang zur Erde

Ergebnis der Messung

$$U_1 = 14,34\text{kV}$$

$$U_2 = 6,03\text{kV}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{70\%}{30\%}$$

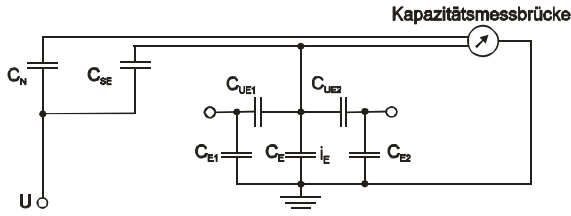
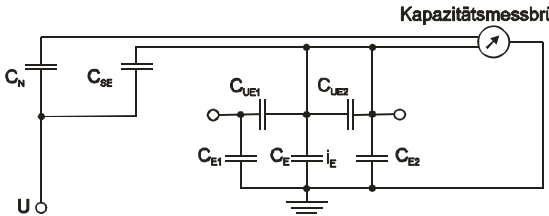
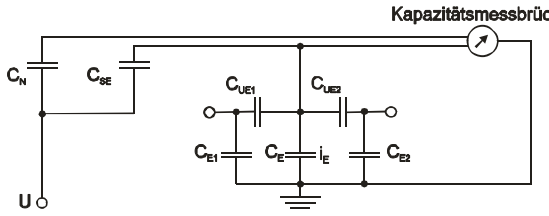
4.5.2 Auswertung der Spannungsmessungen

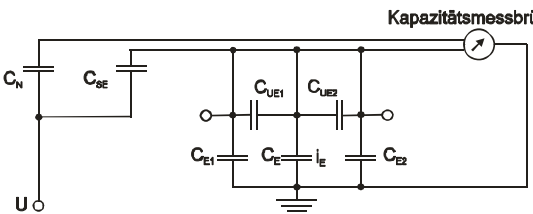
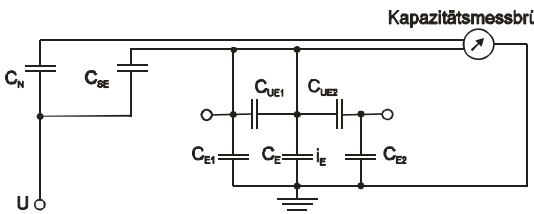
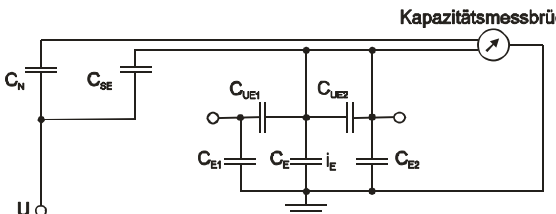
Bei der direkten Spannungsmessung wurden Spannungsverhältnisse von ca. 70% / 30% ermittelt.

Spannungsverhältnis	1. Versuch	2. Versuch
$\frac{U_1}{U_2}$	$\frac{68\%}{32\%}$	$\frac{70\%}{30\%}$

4.6 Bestimmung der Kapazität zwischen Prüfling und Einspeisung

Es wurden die Kapazitäten vom Schalter zur Einspeisung C_{SE} in verschiedenen Konfigurationen mittels Messbrücke bestimmt [6, 17].
Darstellung ohne Streukapazitäten.

<p>mit Schlupfe</p>  <p>1.) Brücke mittig angeschlossen, Schalter nicht geerdet und ohne Einspeisung, beide UE offen</p>	<p>$p=994\text{bar}$, $T=16,5^\circ\text{C}$ relative Luftfeuchte=32,6%</p> <p>mit Schlupfe</p>  <p>1.) Brücke mittig angeschlossen, Schalter nicht geerdet und ohne Einspeisung, zweite UE gebrückt</p>	<p>$p=1.016\text{bar}$, $T=20,3^\circ\text{C}$ relative Luftfeuchte=28,1%</p> <p>ohne Schlupfe</p>  <p>1.) Brücke mittig angeschlossen, Schalter nicht geerdet und ohne Einspeisung, beide UE offen</p>
<p>$C \approx 8\text{pF}$</p>	<p>$C \approx 3,2\text{pF}$</p>	<p>$C \approx 4,3\text{pF}$</p>

 <p>Kapazitätsmessbrücke</p> <p>2.) Brücke mittig angeschlossen, Schalter nicht geerdet und ohne Einspeisung, beide UE gebrückt</p>		 <p>Kapazitätsmessbrücke</p> <p>2.) Brücke mittig angeschlossen, Schalter nicht geerdet und ohne Einspeisung, erste UE gebrückt</p>
<p>$C \approx 12\text{pF}$</p>		<p>$C \approx 7,05\text{pF}$</p>
		 <p>Kapazitätsmessbrücke</p> <p>3.) Brücke rechts angeschlossen, Schalter nicht geerdet und ohne Einspeisung, zweite UE gebrückt</p> <p>$C \approx 4,97\text{pF}$</p>

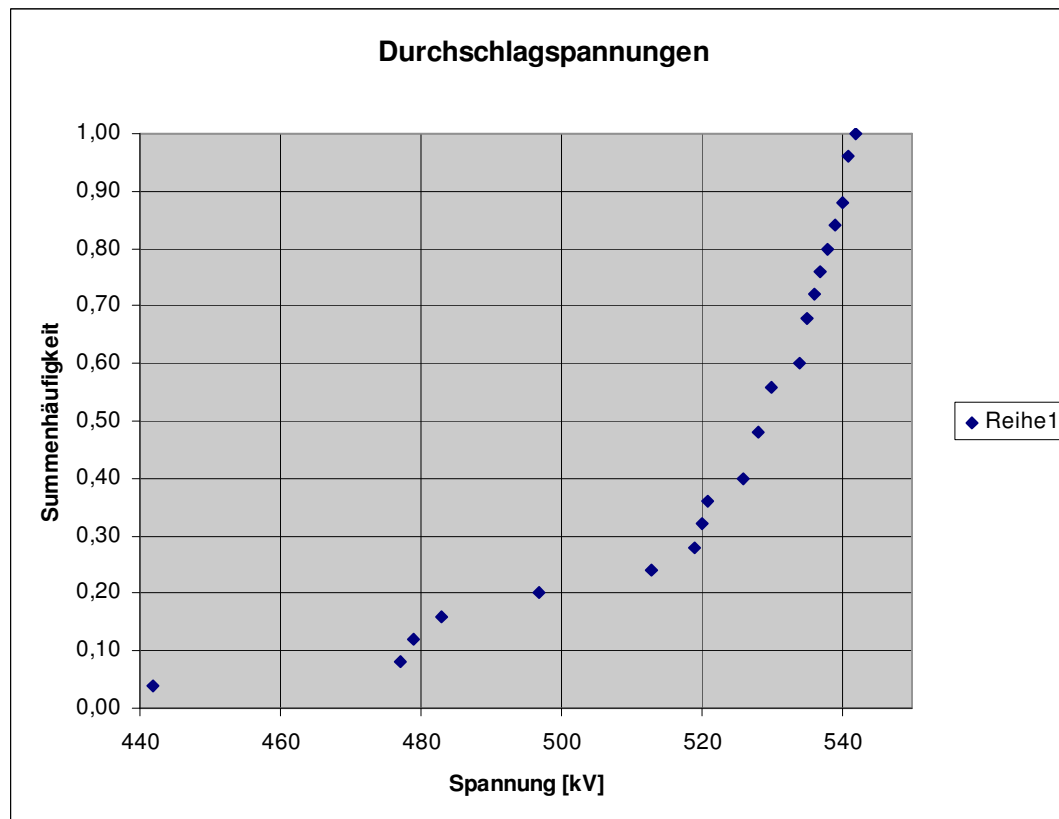
4.7 Hochspannungsversuche

Zur Ergänzung der Messungen des Spannungsverhältnisses wurden verschiedene Hochspannungsversuche durchgeführt, Wechselspannungsversuche und Stoßspannungsversuche [7]. Die Versuche erfolgten bei abgesenktem Druck, sie waren auf die Problemstellung angepasst. Daher entsprechen die Ergebnisse nicht den tatsächlichen Leistungsschalterdaten.

4.7.1 Durchführung der Wechselspannungsversuche

Es erfolgten Durchschlagsversuche für den gesamten Schalter sowie für eine Unterbrechereinheit.

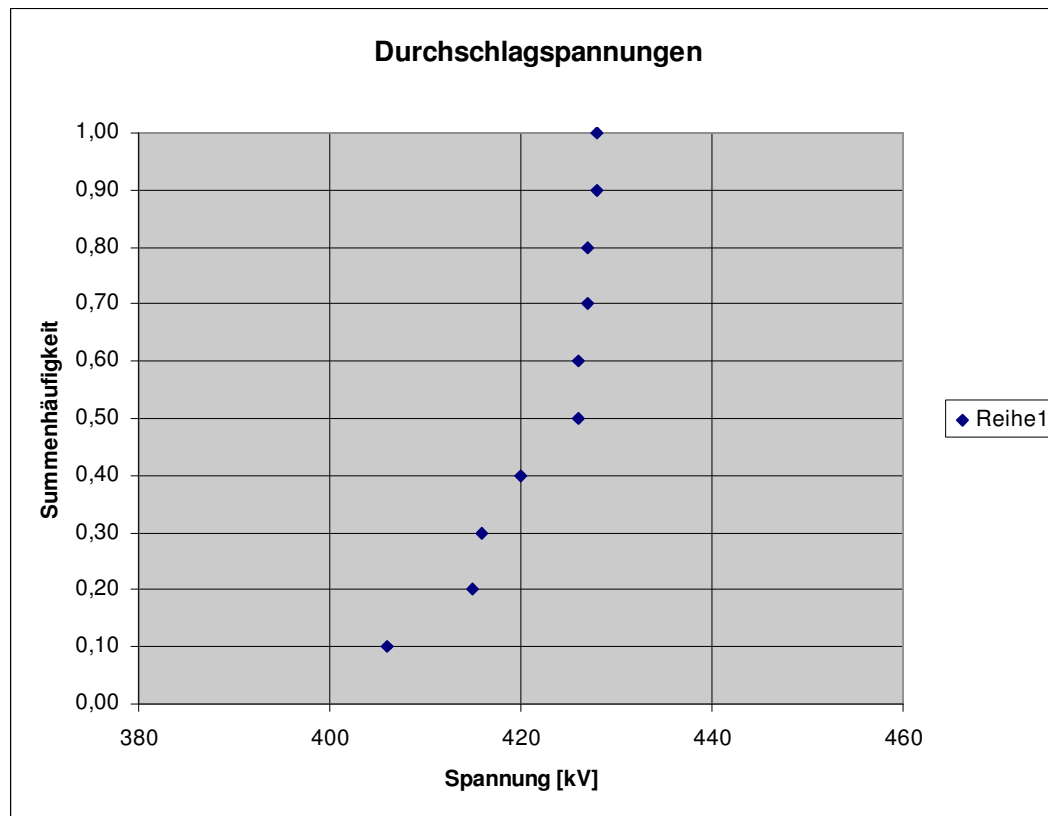
4.7.1.1 Wechselfspannungsversuche gesamter Schalter, nach [7]



Arithm. Mittelwert $x_m = 520,44\text{kV}$
Zentralwert $u_{d50} = 530,00\text{kV}$
(aus dem Diagramm)
Standardabweichung $s = 24,95\text{kV}$

Abbildung 4-31: Wechselfspannungsversuche gesamter Schalter

4.7.1.2 Wechselfspannungsversuche Unterbrechereinheit 1, nach [7]



Arithm. Mittelwert $x_m = 421,90\text{kV}$
Zentralwert $u_{d50} = 426,00\text{kV}$
(aus dem Diagramm)
Standardabweichung $s = 7,06\text{kV}$

Abbildung 4-32: Wechselfspannungsversuche Unterbrechereinheit 1

4.7.2 Auswertung der Wechselfspannungsversuche

Es ergibt sich ein Verhältnis von ca. 80% / 20%. Da der Schalter an der Warte stand, ist hier eine starke Verschiebung nach 80% / 20% zu erkennen. Dies liegt an der erhöhten Erdkapazität Getriebe-Warte.

4.7.3 Durchführung der Stoßspannungsversuche

Der Versuchsaufbau wurde in der Hochspannungshalle der BTU Cottbus realisiert.

Geprüft wurde ein 550kV-Hochspannungsschalter mit SF₆-Füllung bei 0,35bar Überdruck. Es wurde sowohl ein kompletter Pol als auch nur eine Unterbrechereinheit geprüft. Der Schalter war auf einem Prüf-10-Tonner-Tiefladerwagen montiert. Die Prüfungen erfolgten ohne Steuerkondensatoren.

Es wurde das Auf-und-Ab-Verfahren angewendet.

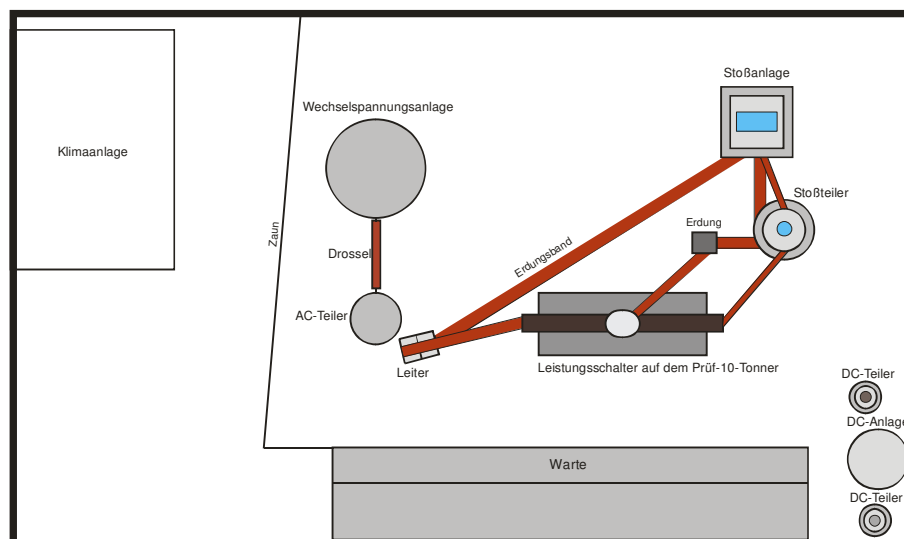


Abbildung 4-33: Versuchsaufbau (Hallenansicht von oben)

Geprüft wurde sowohl mit Blitzstoßspannung 4.7.3.1.1-4.7.3.1.2 als auch mit Schaltstoßspannung 4.7.3.2.1-4.7.3.2.2 mit jeweils positiver Polarität.

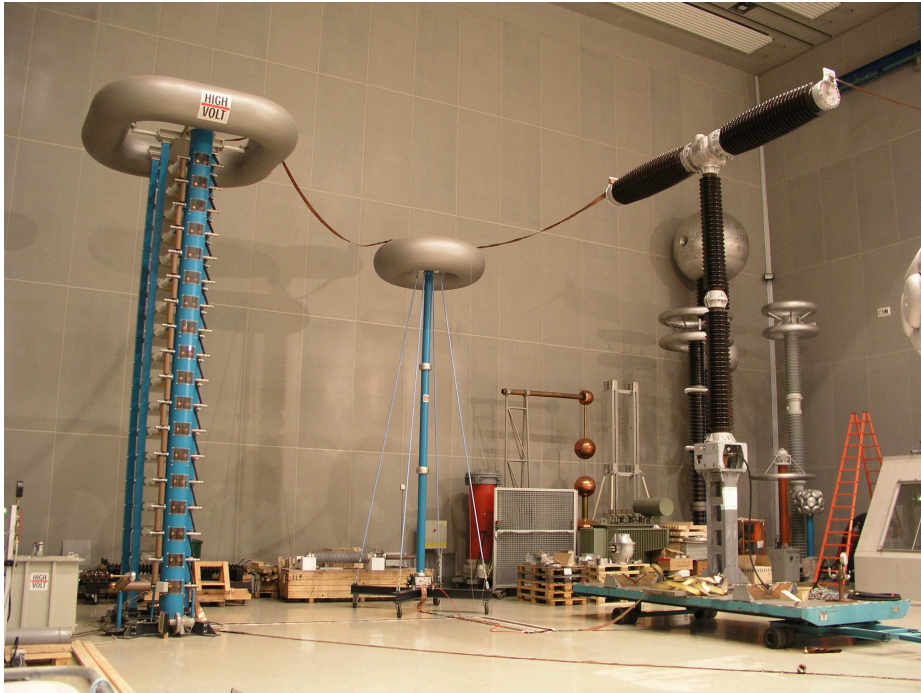


Abbildung 4-34: Stoßanlage und Hochspannungsschalter

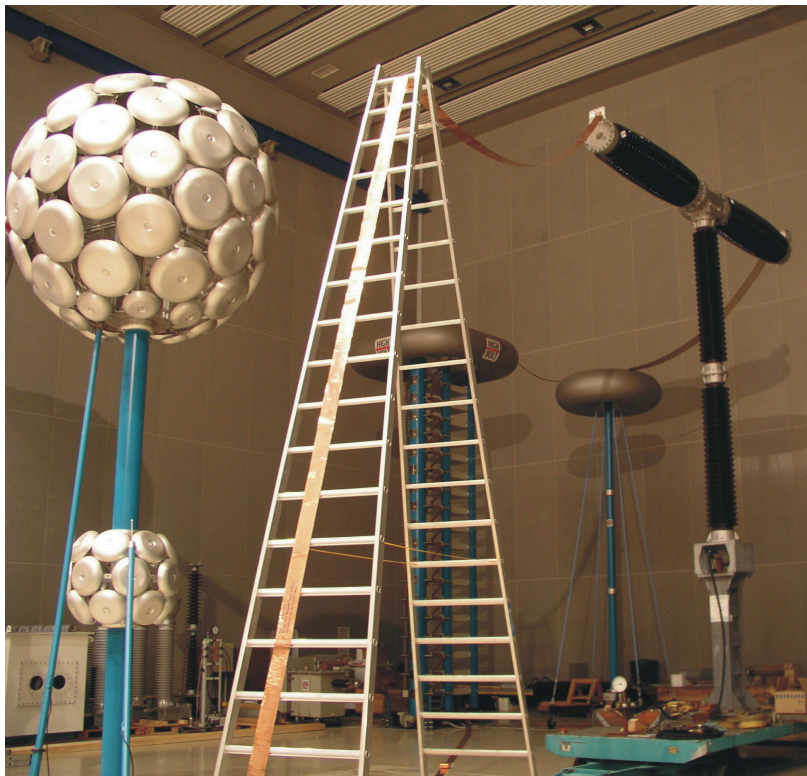


Abbildung 4-35: Erdungsband vom Schalter über eine Leiter

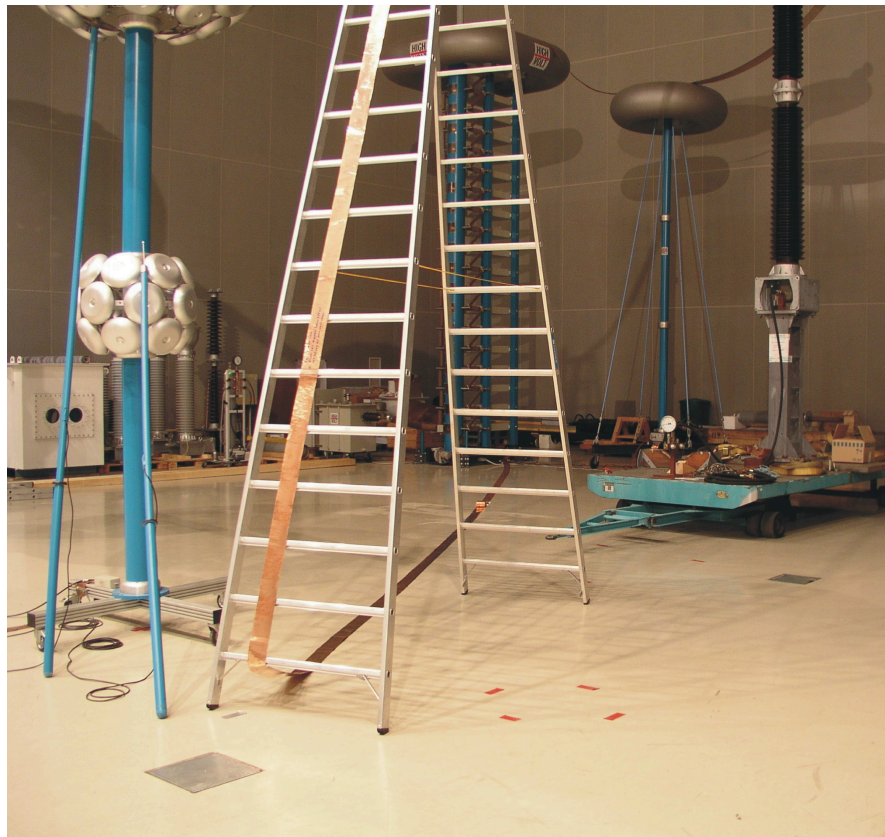


Abbildung 4-36: Erdungsband zum Generator

4.7.3.1 Durchführung der Blitzstoßspannungsversuche

4.7.3.1.1 1. Prüfung: Unterbrechereinheit 1 (spannungsseitig), positiv, nach [7]

Prüfverfahren: Auf-und-Ab-Methode

Messaufbau: Prüfung von Unterbrechereinheit 1 (spannungsseitig) ohne Steuerkondensatoren, Unterbrechereinheit 2 (erdseitig) ist gebrückt und geerdet.

Polarität: positiv

ΔU : 20kV

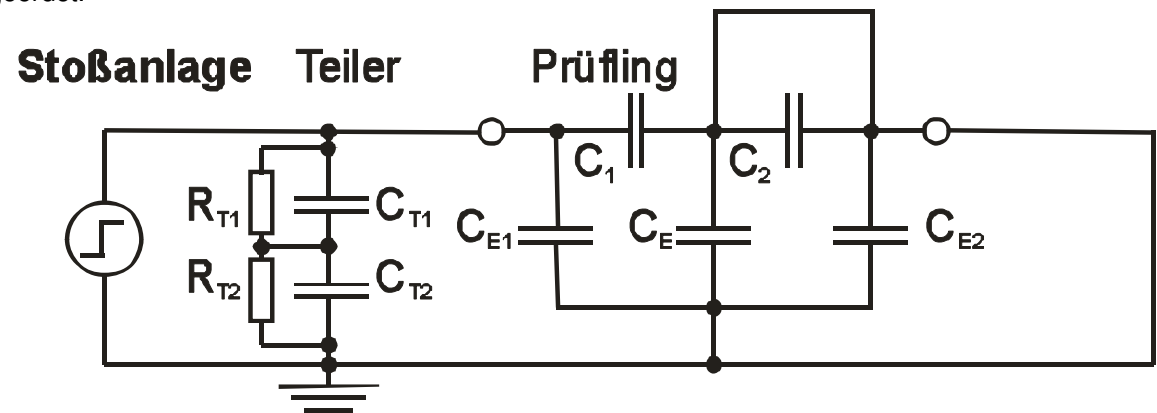
p_{SF6} : 0,35bar Überdruck

T_{Luft} : 21°C

p_{Luft} : 1.001hPa

relative

Luffeuchte: 33,30%



Die 50%-Durchschlagspannung wurde über 20 Versuche ermittelt, beginnend mit dem ersten Durchschlag.

Arithmetischer Mittelwert U_{soll} :

$$U_{d50s} = \frac{\sum U_i}{n_i} = 769kV$$

Arithmetischer Mittelwert U_{peak} :

$$U_{d50p} = \frac{\sum U_i}{n_i} = 770,1kV$$

4.7.3.1.2 2. Prüfung: gesamter Schalter, positiv, nach [7]

Prüfverfahren: Auf-und-Ab-Methode

Messaufbau: Prüfung von Unterbrechereinheiten 1 (spannungsseitig) und 2 (erdseitig) ohne Steuerkondensatoren, Unterbrechereinheit 2 ist geerdet.

Polarität: positiv

ΔU : 30kV

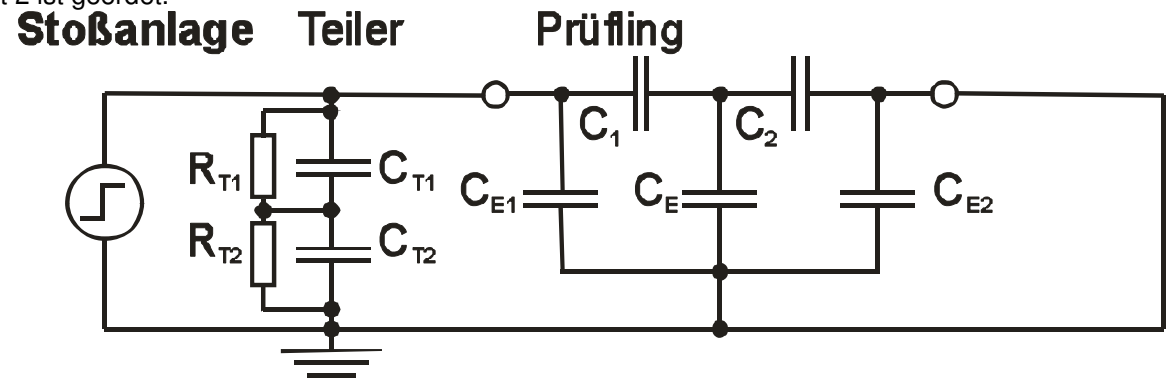
p_{SF6} : 0,35bar Überdruck

T_{Luft} : 21°C

ρ_{Luft} : 1.001hPa

relative

Luftfeuchte: 33,30%



Die 50%-Durchschlagspannung wurde über 13 Versuche ermittelt, beginnend mit dem ersten Durchschlag.

Die Spannung war auf 1.150kV begrenzt, daher wurde hier abgebrochen.

Nach dem Verlauf der Spannung ist eine höhere U_{d50} zu erwarten.

Arithmetischer Mittelwert U_{soll} :

$$U_{d50s} = \frac{\sum U_i}{n_i} = 1.109,2kV$$

Arithmetischer Mittelwert U_{peak} :

$$U_{d50p} = \frac{\sum U_i}{n_i} = 1.107,2kV$$

4.7.3.2 Durchführung der Schaltstoßspannungsversuche

4.7.3.2.1 1. Prüfung: Unterbrechereinheit 1 (spannungsseitig), positiv, nach [7]

Prüfverfahren: Auf-und-Ab-Methode

Messaufbau: Prüfung von Unterbrechereinheit 1 (spannungsseitig) ohne Steuerkondensatoren, Unterbrechereinheit 2 (erdseitig) ist gebrückt und geerdet.

Polarität: positiv

ΔU : 25kV

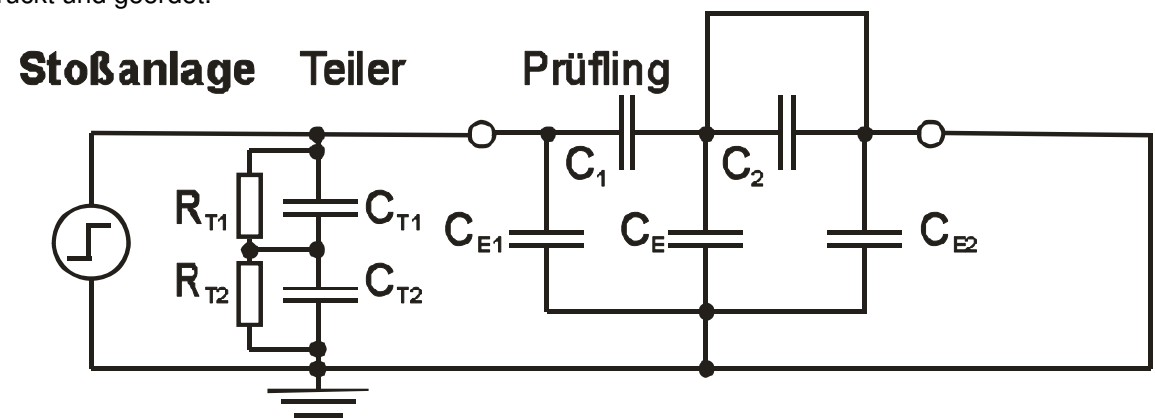
p_{SF6} : 0,35bar Überdruck

T_{Luft} : 21°C

ρ_{Luft} : 1.001hPa

relative

Luftfeuchte: 33,30%



Die 50%-Durchschlagspannung wurde über 20 Versuche ermittelt, beginnend mit dem ersten Durchschlag.

Arithmetischer Mittelwert U_{sol} :

$$U_{d50s} = \frac{\sum U_i}{n_i} = 682,5kV$$

Arithmetischer Mittelwert U_{peak} :

$$U_{d50p} = \frac{\sum U_i}{n_i} = 673,86kV$$

4.7.3.2.2 2. Prüfung: gesamter Schalter, positiv, nach [7]

Prüfverfahren: Auf-und-Ab-Methode

Messaufbau: Prüfung von Unterbrechereinheiten 1 (spannungsseitig) und 2 (erdseitig) ohne Steuerkondensatoren, Unterbrechereinheit 2 ist geerdet.

Polarität: positiv

ΔU : 25kV

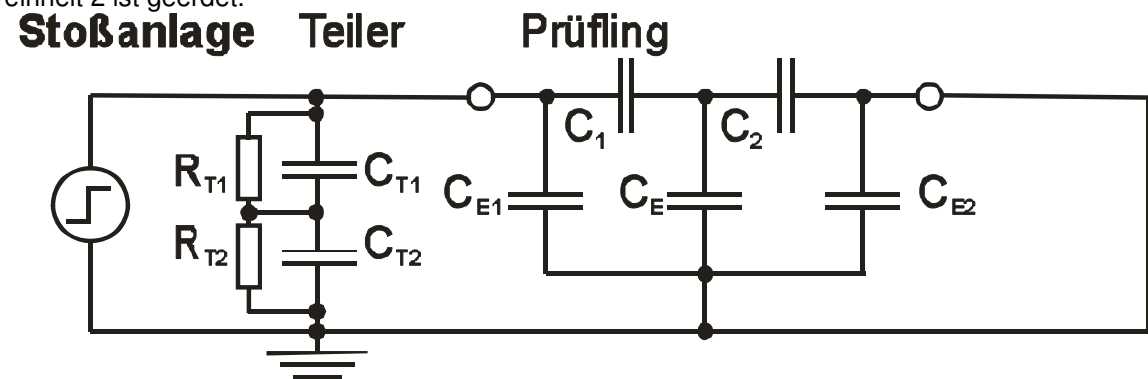
p_{SF6} : 0,35bar Überdruck

T_{Luft} : 21°C

ρ_{Luft} : 1.001hPa

relative

Luftfeuchte: 33,30%



Die 50%-Durchschlagspannung wurde über 13 Versuche ermittelt, beginnend mit dem ersten Durchschlag.

Arithmetischer Mittelwert U_{soll} :

$$U_{d50s} = \frac{\sum U_i}{n_i} = 1.017,3kV$$

Arithmetischer Mittelwert U_{peak} :

$$U_{d50p} = \frac{\sum U_i}{n_i} = 1.007,7kV$$

4.7.4 Auswertung der Stoßspannungsversuche

Folgende 50%-Durchschlagspannungen haben sich aus den Mittelwerten der Sollspannungen ergeben:

Prüfaufbau	U_{d50bil} [kV]	U_{d50sil} [kV]
Unterbrechereinheit 1, UE 2 gebrückt, positive Polarität	770	673
gesamter Schalter UE 1 und UE 2, positive Polarität	1.107	1.007

(Die Prüfung *gesamter Schalter UE 1 und UE 2, positive Polarität* war auf 1150kV begrenzt!)

Die positiven Blitz-Durchschlagspannungen ergeben eine Spannungsverteilung von $\frac{U_1}{U_2} = \frac{70\%}{30\%}$.

Die positiven Schalt-Durchschlagspannungen ergeben eine Spannungsverteilung von $\frac{U_1}{U_2} = \frac{67\%}{33\%}$.

4.7.5 Zusammenfassung

Die Wechselspannungsprüfung ergab eine Spannungsaufteilung über den beiden Unterbrechereinheiten von ca. 80% / 20%, während bei den Stoßspannungsprüfungen sich eine Aufteilung von ca. 70% / 30% ergab.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Werte erheblich durch die räumlichen Verhältnisse der Hochspannungshalle beeinflusst worden sind.

5 Simulation

Zur weiteren theoretischen Untersuchung der Spannungsaufteilung über dem Leistungsschalter wurde eine Feldsimulation durchgeführt. Dafür wurde das Feldprogramm der Firma CST genutzt.

Es wurden zwei verschiedene Modelle für die Untersuchung verwendet. Zum einen wurde ein vereinfachtes Modell mittels CST erstellt, das zweite Modell wurde von Extern zur Verfügung gestellt [9, 10]. Das zur Verfügung gestellte Modell enthielt sehr viel mehr Einzelheiten und war im Ganzen sehr viel feiner, da es ein Konstruktionsmodell war. Das selbst erstellte Modell wurde nur aus einfachen Strukturen erarbeitet und war daher sehr viel gröber. Für erste Untersuchungen hinsichtlich der Feldverteilung war es jedoch gut verwendbar.

Zur Feldsteuerung wird der Leistungsschalter an den äußeren Enden der Unterbrechereinheiten sowie am oberen Ende des Stützisolators mit einem ringförmigen Schirm versehen.

5.1 Feldsimulation des Leistungsschalters

Im Folgenden sind die Schalter-Feldsimulationen dargestellt. Die Simulationsergebnisse mit und ohne Schirm sind hier im Text, die Simulationen ohne Schirm sind im Anhang dargestellt. Verwendet wurde das Konstruktionsmodell, erweitert um verschiedene Einzelheiten [12, 13].

5.1.1 Schaltermodell mit Schirm, Grenzen 100.000 mm

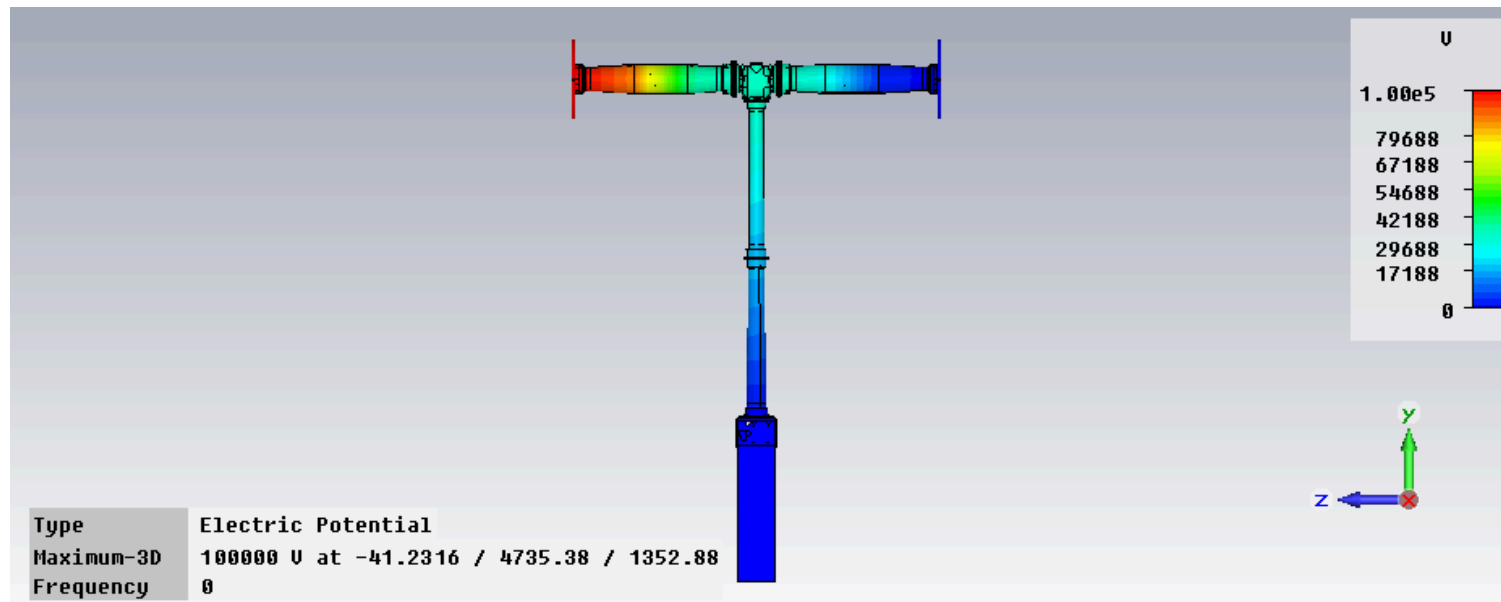


Abbildung 5-1: Feldsimulation Schaltermodell mit Schirm

5.1.2 Auswertung der Feldsimulation Schaltermodell

Es wurden verschiedene Simulationen durchgeführt. Hierbei wurden diverse Parameter variiert. Es erfolgt eine grundsätzliche Einteilung in Simulationen mit Schirmen und ohne Schirme.

Die Haupteinflüsse haben Schirm und Umgebung. Mit Annäherung der geerdeten Umgebung verändert sich das Spannungsverhältnis in Richtung 80% / 20%. Die Umgebung auf Hochspannungspotenzial (Wandler, Seile) verschieben das Verhältnis in Richtung 70% / 30%. Die Schirme haben einen Einfluss in Richtung 65% / 35%.

Die Innenteile Düse und Schaltstift haben nur einen geringen Einfluss.

Die restlichen untersuchten Parameter haben ebenso nur einen geringen Einfluss.

Der Abstand der Grenzen des Simulationsfeldes wurde zwischen 10.000mm und 150.000mm realisiert.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Simulation mit und ohne Schirm zusammengefasst.

Simulation mit Schirm

Nr.	Versuchsaufbau	Spannungsanteil der geerdeten Unterbrechereinheit [%]
6-1-1	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 10.000mm	25,2
6-1-2	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm	34
6-1-3	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, Wandler 1, Seil HV lang	34,7
6-1-4	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, Wandler 1, Seil HV lang, Trenner, Seile LV	34
6-1-5	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, Wandler 2, Seil HV kurz	35,4

6-1-6	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, 2 Wandler, Seil HV kurz, Trenner, Seile LV	34,1
6-1-7	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, 2 Wandler, Seile	35,5
6-1-8	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, 2 Wandler, Trenner, Seile	34,8
6-1-9	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000 mm, Seile HV kurz	34,6
6-1-10	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, Seile HV kurz, LV	32,8
6-1-11	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, Seile HV lang	35,2
6-1-12	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, Seile HV lang, LV	33,3
6-1-13	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, Seile LV	32
6-1-14	Mit Erdung, mit Schirm, Grenzen 100.000mm, Trenner, Seile LV	32
6-1-15	Mit Erdung, mit Schirm, in der Halle (X1,2=15.000mm, Y1=0mm, Y2=15.000mm, Z1,2=11.500mm)	25,2
6-1-16	Dreipolig, mit Erdung, mit Schirm, 2 Wandler, 1 Trenner im Freifeld	38,6

Tabelle 5-1: Simulation mit Schirm

Simulation ohne Schirm

Nr.	Versuchsaufbau	Spannungsanteil der geerdeten Unterbrechereinheit [%]
6-2-1	Ohne Erdung	29,8
6-2-2	Mit Erdung, Grenzen 100.000mm	27,9
6-2-3	Mit Erdung, 1 Wandler, Seile	30,8
6-2-4	Erdung, 2 Wandler, Seile	31,4
6-2-5	Mit Erdung, 2 Wandler, 1 Trenner, Seile	30,2
6-2-6	Mit Erdung, Düse	28
6-2-7	Mit Erdung, Fuß 1m höher	28,1
6-2-8	Mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 200mm	28
6-2-9	Mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 280mm	28,7
6-2-10	Mit Erdung, Seile	28,6
6-2-11	Mit Erdung, Bodenplatte 100.000mm	27,9
6-2-12	Mit Erdung, Teiler, Seile	28,4
6-2-13	Mit Erdung, Schaltstift	27,9
6-2-14	Mit Erdung, Grenzen 110.000mm	28,5
6-2-15	Mit Erdung, Grenzen 150.000mm	30,3
6-2-16	Mit Erdung, Grenzen 10.000mm	21,9
6-2-17	Mit Erdung, Grenzen 1.000mm	21,3

6-2-18	Mit Erdung, Bodenplatte 10.000mm, Grenzen 100.000mm	28,5
6-2-19	Mit Erdung, Bodenplatte 10.000mm, Grenzen 0 mm, oben 100.000mm	21,3
6-2-20	Mit Erdung, Bodenplatte 10.000mm, Grenzen 0mm, oben 10mm	22,5
6-2-21	Mit Erdung, Grenzen 150.000mm, oben 10mm	27,7
6-2-22	Mit Erdung, in der Hochspannungshalle	24
6-2-23	Mit Erdung, im Freifeld	32,9

Tabelle 5-2: Simulation ohne Schirm

6 Effekte für die Spannungsaufteilung

6.1 Positive Effekte für die Spannungsaufteilung

Die positiven Effekte für eine Verschiebung der Spannungsaufteilung besser als 70% / 30%:

Vergrößerung der Kapazität der Unterbrechereinheiten	Durch die Vergrößerung der Kapazitäten der Unterbrechereinheiten wird der Einfluss der Getriebe-Erdkapazität verringert. Dieser Fall entspricht dem Anbringen von Steuerkondensatoren als Parallelkapazität. Praktisch nicht relevant.
Verringerung der Erdkapazität vom Getriebe zur Erde	Dieser Parameter wird über die Höhe des Schalters beeinflusst. Durch Erhöhung um einen Meter entsteht jedoch nur eine geringe Verbesserung.
Schaltstift	Die Fälle mit Schaltstift oder ohne Schaltstift unterscheiden sich nur minimal. Kein bedeutsamer Einfluss.
Düse	Die Fälle mit Düse oder ohne Düse unterscheiden sich nur minimal. Kein bedeutsamer Einfluss.
Isolatoraußendurchmesser	Die Vergrößerung der Isolatoraußendurchmesser zeigt nur eine geringe Verbesserung des Spannungsverhältnisses. Kein bedeutsamer Einfluss.
Schirm	Der Schirm auf Einspeiseseite stellt den größten Einfluss der Parameter am Schalter dar. Trotz Schirm auf Erdseite verbessert sich das Verhältnis deutlich.

Angeschlossene Leitung, einspeiseseitig	Je nach Durchmesser, Anzahl, Länge, örtlichem Verlauf ist ein Einfluss bis in den Prozentbereich zu erkennen.
Wandler, einspeiseseitig	Der Einfluss ist abhängig von Größe und Entfernung des Wandlers.
Trenner, einspeiseseitig	Der Einfluss ist abhängig von Größe und Entfernung des Trenners.
Benachbarte Pole	Im dreipoligen Aufbau ergibt sich eine Verbesserung des Spannungsverhältnisses.

6.2 Negative Effekte für die Spannungsaufteilung

Die negativen Effekte für eine Verschiebung der Spannungsaufteilung schlechter als 70% / 30%:

Verkleinerung der Kapazität der Unterbrechereinheiten	Die Verkleinerung der Kapazität der Unterbrechereinheiten bei konstanter Getriebe-Erdkapazität bewirkt eine Verschlechterung der Spannungsaufteilung.
Vergrößerung der Erdkapazität vom Getriebe zur Erde	Bei der Vergrößerung der Erdkapazität vom Getriebe zur Erde wird das Spannungsverhältnis schlechter.
Isolatoraußendurchmesser	Kein bedeutsamer Einfluss.
Schirm	Ohne Schirm ist das Spannungsverhältnis deutlich schlechter.
Leiter, erdseitig	Je nach Durchmesser, Anzahl, Länge, örtlichem Verlauf ist ein Einfluss bis in den Prozentbereich zu erkennen.
Trenner, erdseitig	Der Einfluss ist abhängig von Größe und Entfernung des Trenners.

7 Auswertung und Zusammenfassung

Die verschiedenen untersuchten Messverfahren haben – wie erwartet – zu unterschiedlichen Ergebnissen geführt.

Bei der Spannungsmessung sind die Einflüsse der Messleitungen größer als bei der Strommessung. Die Variation der Anordnung der Messleitungen in Bezug auf den Prüfschalter führt zu einer großen Bandbreite von Messergebnissen. Die Strommessung hat sich als die am Besten geeignete Möglichkeit der Messung von kleinen Kapazitäten an räumlich ausgedehnten Objekten erwiesen. Hier ist der Einfluss der Messleitungen quasi Null.

Die Messergebnisse wurden von der Umgebung (Hochspannungshalle mit den verschiedenen Einbauten) erheblich beeinflusst. Da die Schalterkapazitäten sehr klein sind, hat die Umgebung eine Änderung der Kapazitätsverhältnisse zur Folge. Das konnte systematisch beobachtet werden, indem der Prüfling innerhalb der Halle in verschiedenen Positionen untersucht worden ist. Hier spielt zunächst der Abstand zum Einspeisetransformator eine Rolle, weiterhin der Abstand zu Wänden bzw. geerdeten Gegenständen, welche die Erdkapazität des Schalters erhöhen.

Dies spiegelt den Einfluss, den die Nachbarpole und andere Geräte in der Umgebung des Schalters zum Beispiel in einer Freiluft-Schaltanlage haben. Dieser Einfluss der Umgebung des Schalters auf seine Spannungsaufteilung wurde in Simulationen gründlich untersucht und wird im Abschnitt 7 im Einzelnen diskutiert.

Um die Feldverteilung im Bereich der Anschlussklemmen des Schalterpols, das heißt am äußeren Ende der Unterbrechereinheit, zu vergleichmäßigen, wird dort häufig ein Schirmring angebracht.

Die Spannungsaufteilung über dem Schalter ohne Schirm und ohne Umgebung, also gewissermaßen im freien Raum, beträgt ca. 72% / 28%.

Durch den Schirm wird das Verhältnis auf 66% / 34% verbessert. Durch Umgebungseinflüsse wird dieses Verhältnis nicht über 70% / 30% verschlechtert. Die Spannungsaufteilung ist beim dreipoligen Schalter in einer Freiluft-Schaltanlage sogar noch etwas günstiger.

Durch geerdete Anlagenteile, die sich in der Nähe des Schalters befinden, verschiebt sich die Spannungsaufteilung ungünstig in Richtung $>70\% / <30\%$, zum Beispiel auf 80% / 20%. Dies ist bedingt durch die Vergrößerung der Kapazität zwischen Erde und dem auf Potenzial befindlichen Schalterkopf (Erdkapazität), für die die benachbarten geerdeten Anlagenteile eine zusätzliche Parallelkapazität bedeuten. Daher ist bei der Simulation darauf zu achten, dass die Grenzen des Simulationsraumes nicht zu dicht an der Schalterpol-Nachbildung liegen.

Anlagenteile in der Nähe des Schalters, die sich auf Einspeisepotenzial befinden, stellen eine Parallelkapazität zur ersten, dem Klemmenkurzschluss abgewandten, Unterbrechereinheit dar. Dadurch verschiebt sich das Spannungsverhältnis günstig in Richtung unter 70% / 30%, zum Beispiel auf 65% / 35%.

Eine Spannungsaufteilung von 70% / 30% entspricht also den im Einsatz herrschenden Verhältnissen und sollte für Prüfungen zugrunde gelegt werden.

Simulation mit Schirm

Versuch	Spannungsanteil der geerdeten Unterbrechereinheit [%]
Strommessung 1-phasig, in der Halle, ohne Schirm	24
Simulation 1-phasig in der Halle, ohne Schirm	24
Simulation 1-phasig in der Halle, mit Schirm	25,2
Simulation 1-phasig im Freifeld, ohne Schirm	27,9
Simulation 1-phasig im Freifeld, mit Schirm	34
Simulation 3-phasig im Freifeld, ohne Schirm	34,3
Simulation 3-phasig im Freifeld, mit Schirm	38,6

Dazu kommen die Einflüsse von Trennern und Wandlern.

Wie die Ergebnisse der Messungen und der Simulationen zeigen, wird die Spannungsverteilung über die Schaltstrecken eines mehrfach unterbrechenden Leistungsschalters weitgehend bestimmt durch das äußere elektrische Feld im Bereich dieser Schaltstrecken. Dies zeigte sich beispielsweise bei den Messungen in der Hochspannungshalle der BTU Cottbus, bei denen die gemessenen Werte der Kapazität der offenen Schaltstrecken erheblich beeinflusst waren durch den Standort des Leistungsschalters, das heißt durch die Entfernung zu geerdeten (Wände, Warte) oder zu spannungsführenden Teilen sowie durch die Lage und Dimension der angelegten Messleitungen. In der Simulation bestätigte sich, dass benachbarte Schalterpole sowie andere Geräte im Schaltfeld, wie Messwandler und Trennschalter, aber auch die angeschlossenen Leiter, einen erheblichen Einfluss auf die Spannungsverteilung über den offenen Schaltstrecken haben.

Als Konsequenz muss geschlossen werden: Im begrenzten Raum möge sich eine Spannungsaufteilung zwischen zwei Schaltstrecken eines einpoligen Leistungsschalters im Verhältnis in der Größenordnung 80% / 20% einstellen. Unter realen Betriebsbedingungen (dreipoliger Schalter) verändert sich diese Spannungsaufteilung auf ein Verhältnis <70% / >30%. Durch Abschirmringe, die an den äußeren Enden der Schaltstrecken angebracht sind, wird diese Aufteilung weiter in Richtung einer gleichmäßigeren Spannungsaufteilung verschoben.

Es wird daher empfohlen, Schaltleistungs-Prüfungen an zweifach unterbrechenden Leistungsschaltern ohne Steuerkondensatoren mit einer Spannungsaufteilung 70% / 30% durchzuführen.

8 Anhang

8.1 Feldsimulation des Schalters

8.1.1 Feldsimulation Schaltermodell: ohne Erdung, angelegte Spannung 100kV

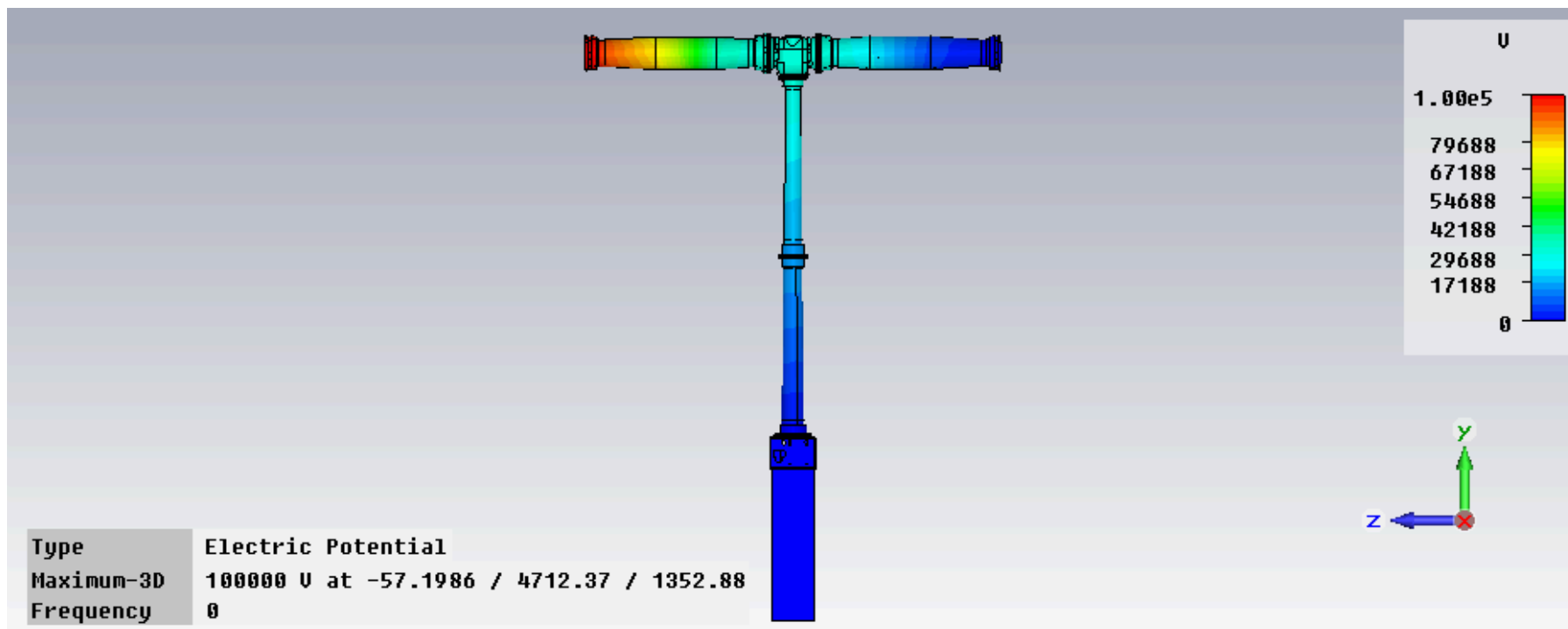


Abbildung 8-1: Feldsimulation Schaltermodell ohne Erdung

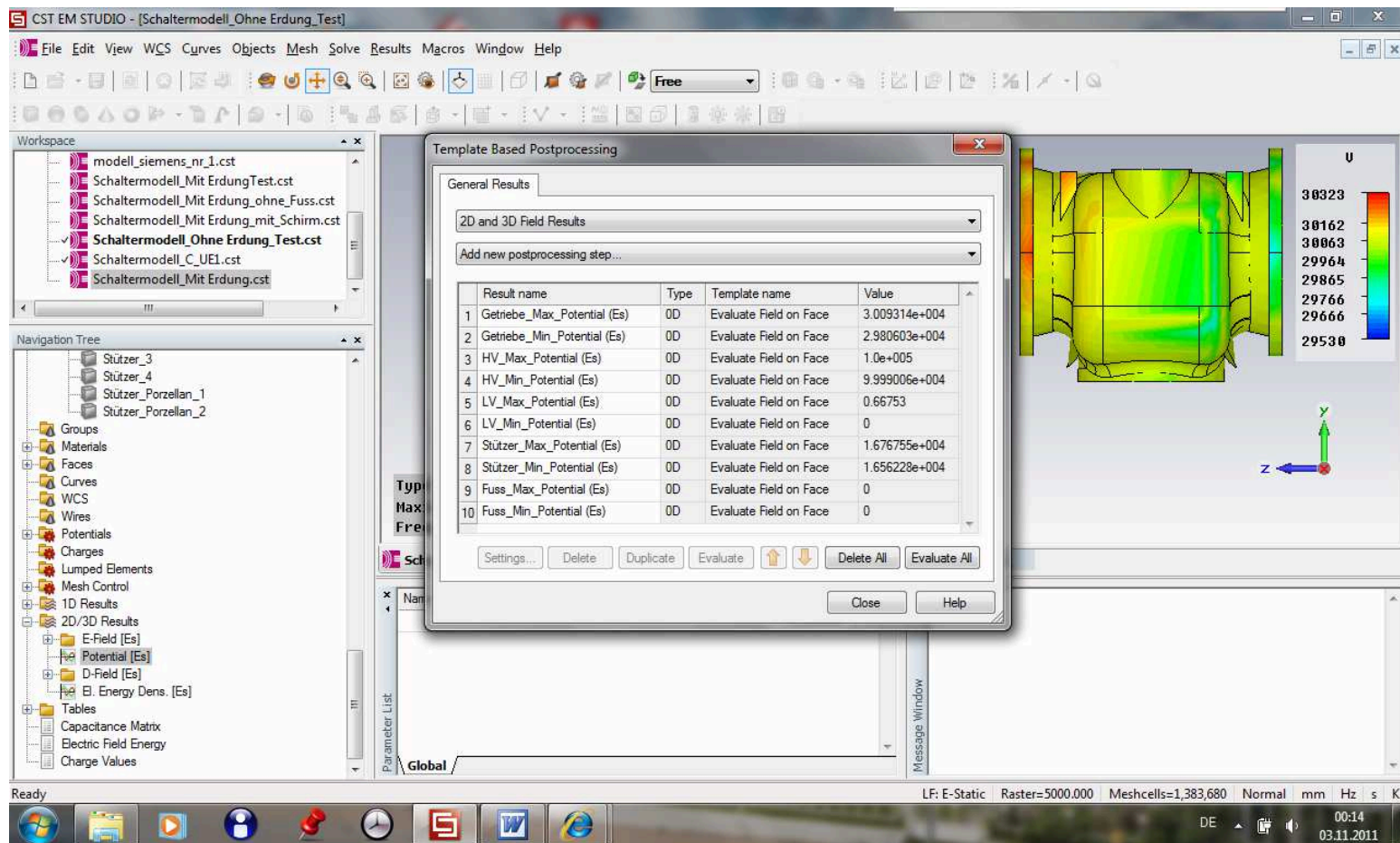


Abbildung 8-2: Feldsimulation Schaltermodell ohne Erdung

8.1.2 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung

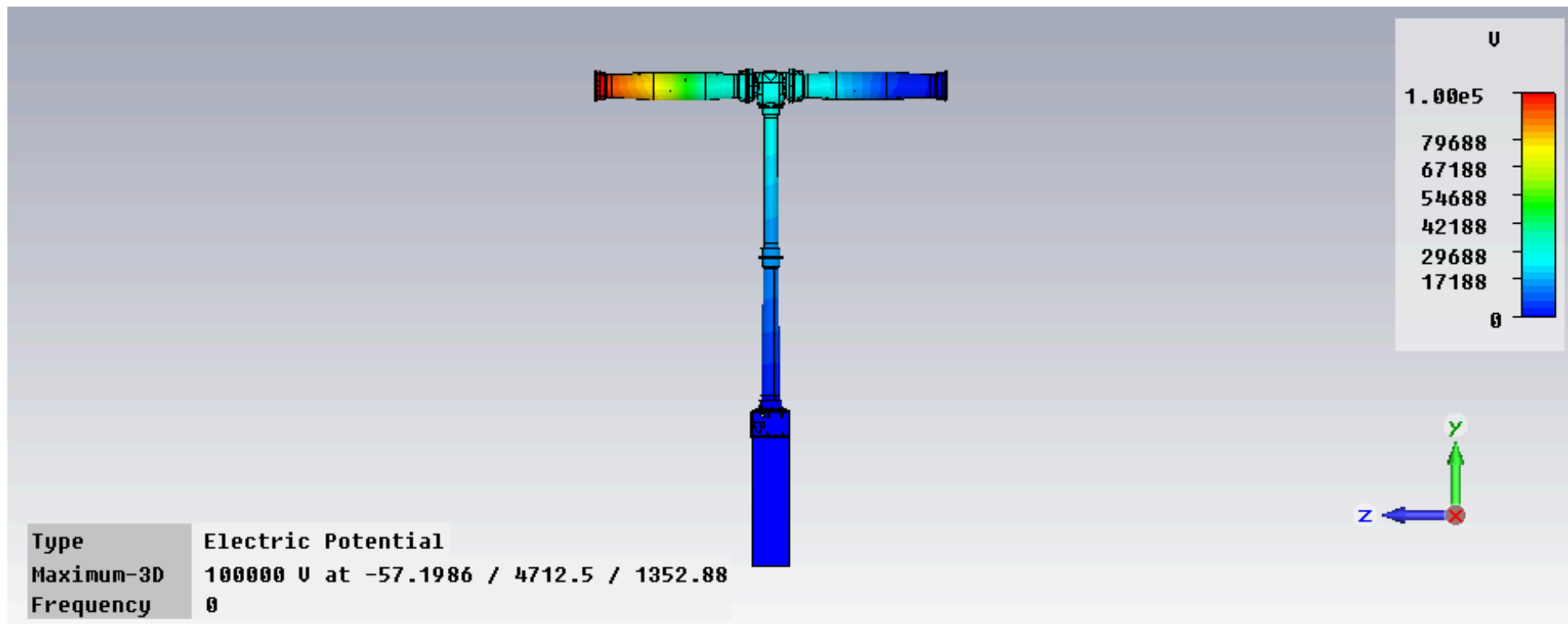


Abbildung 8-3: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung

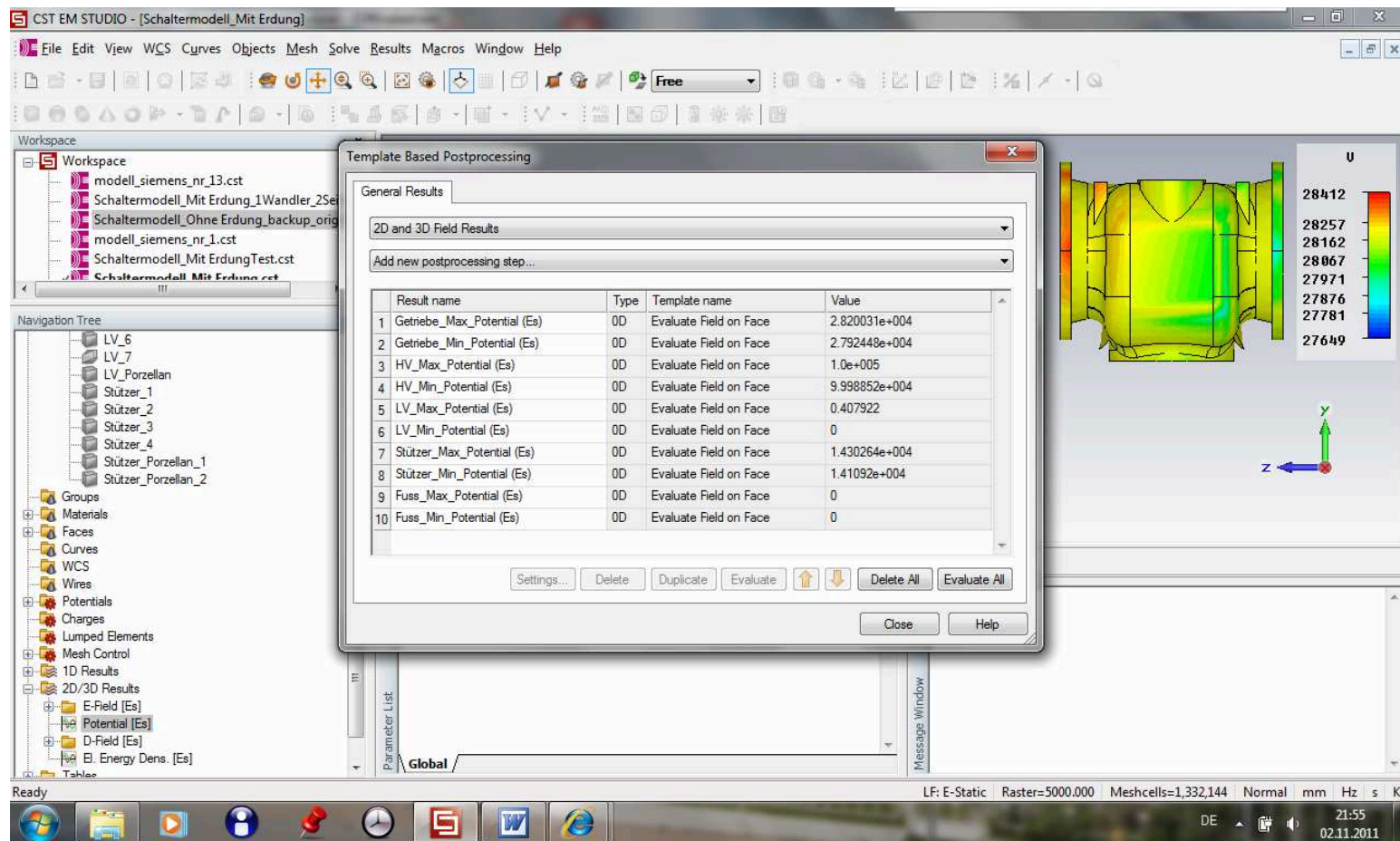


Abbildung 8-4: Feldsimulation Schaltermmodell mit Erdung

8.1.3 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, 1 Wandler, Zuleitung

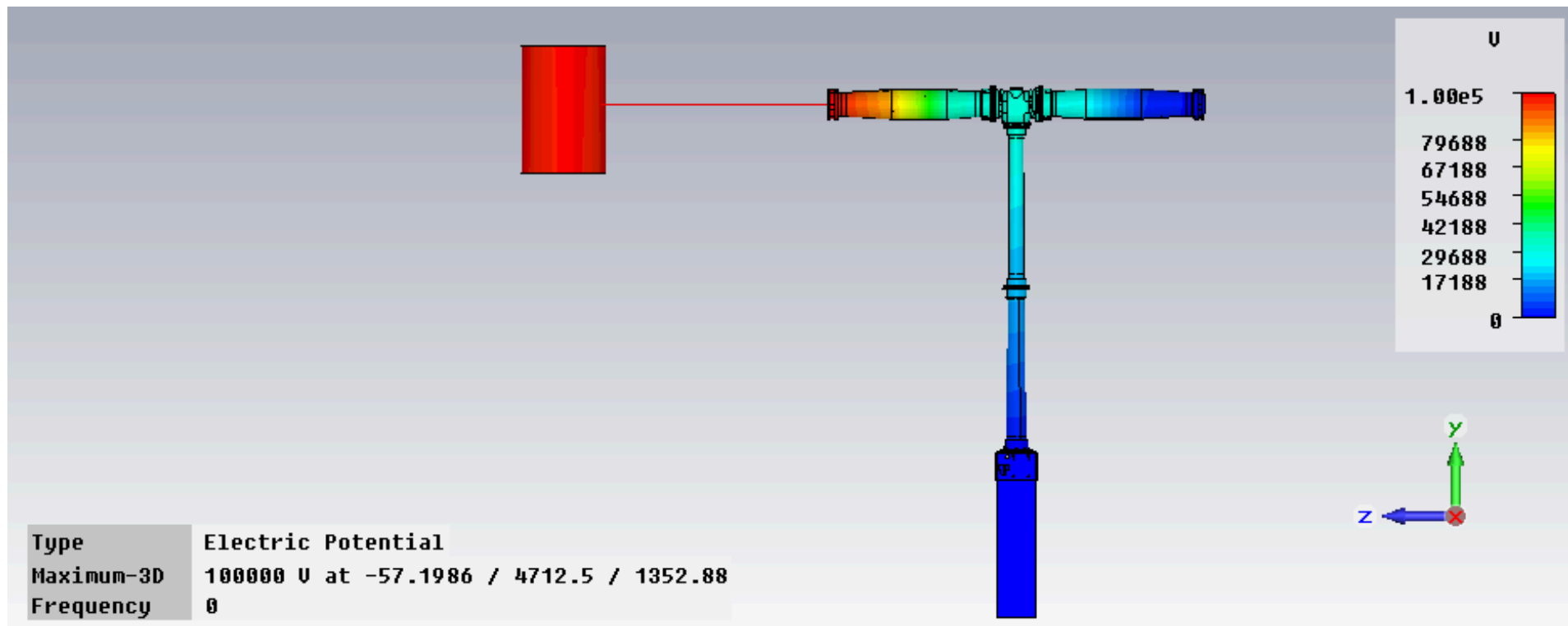


Abbildung 8-5: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 1 Wandler, Zuleitung

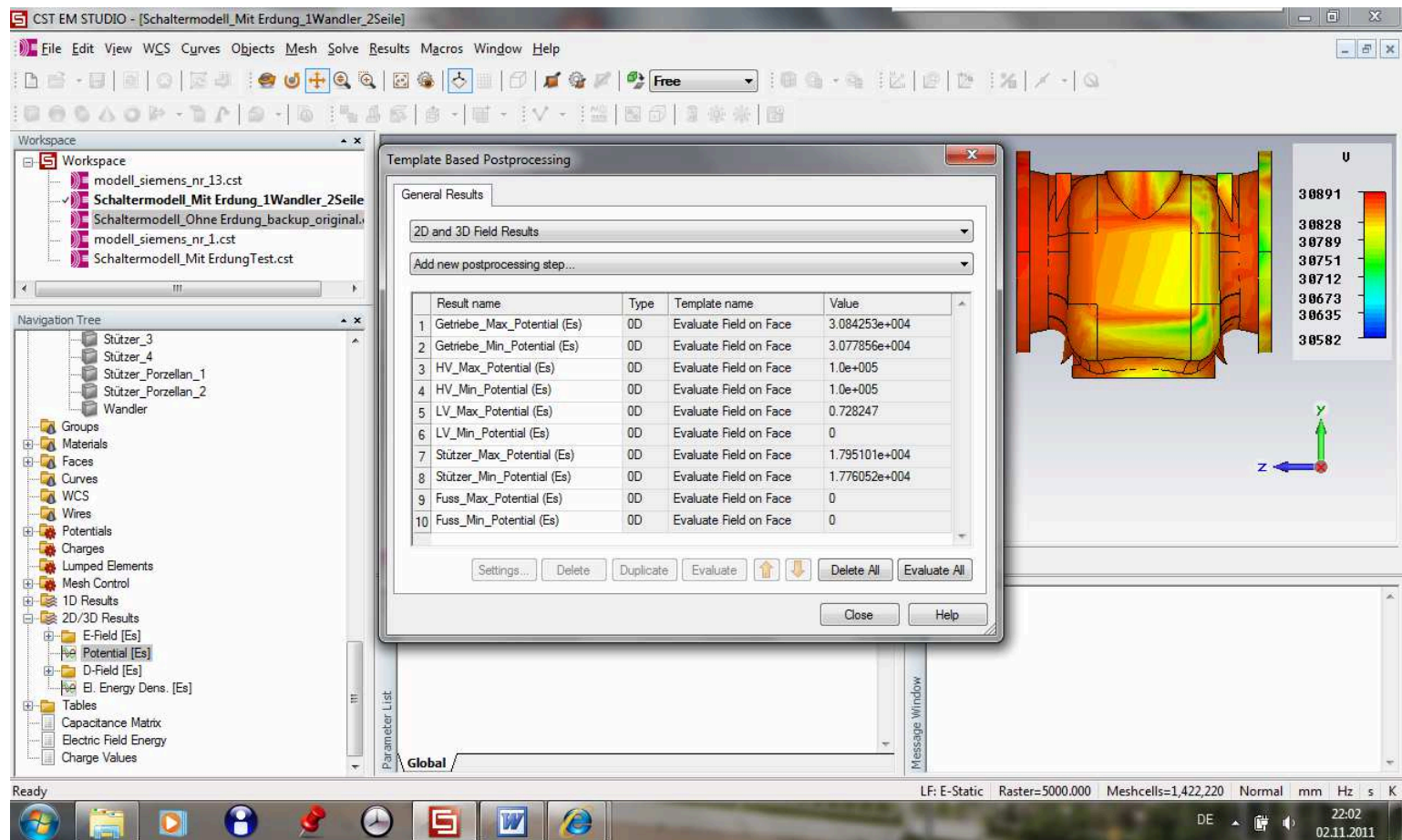


Abbildung 8-6: Feldsimulation Schaltermmodell mit Erdung, 1 Wandler, Zuleitung

8.1.4 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, 2 Wandler, Zuleitung

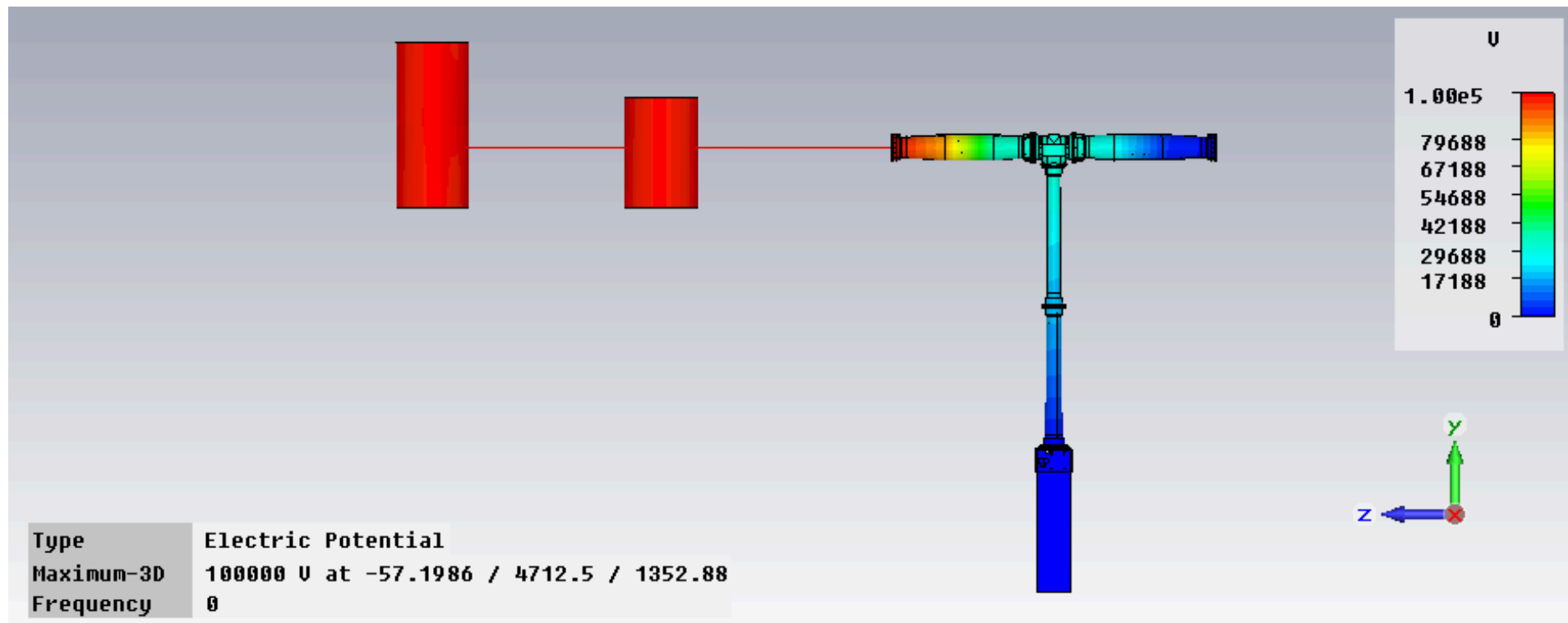


Abbildung 8-7: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 2 Wandler, Zuleitung

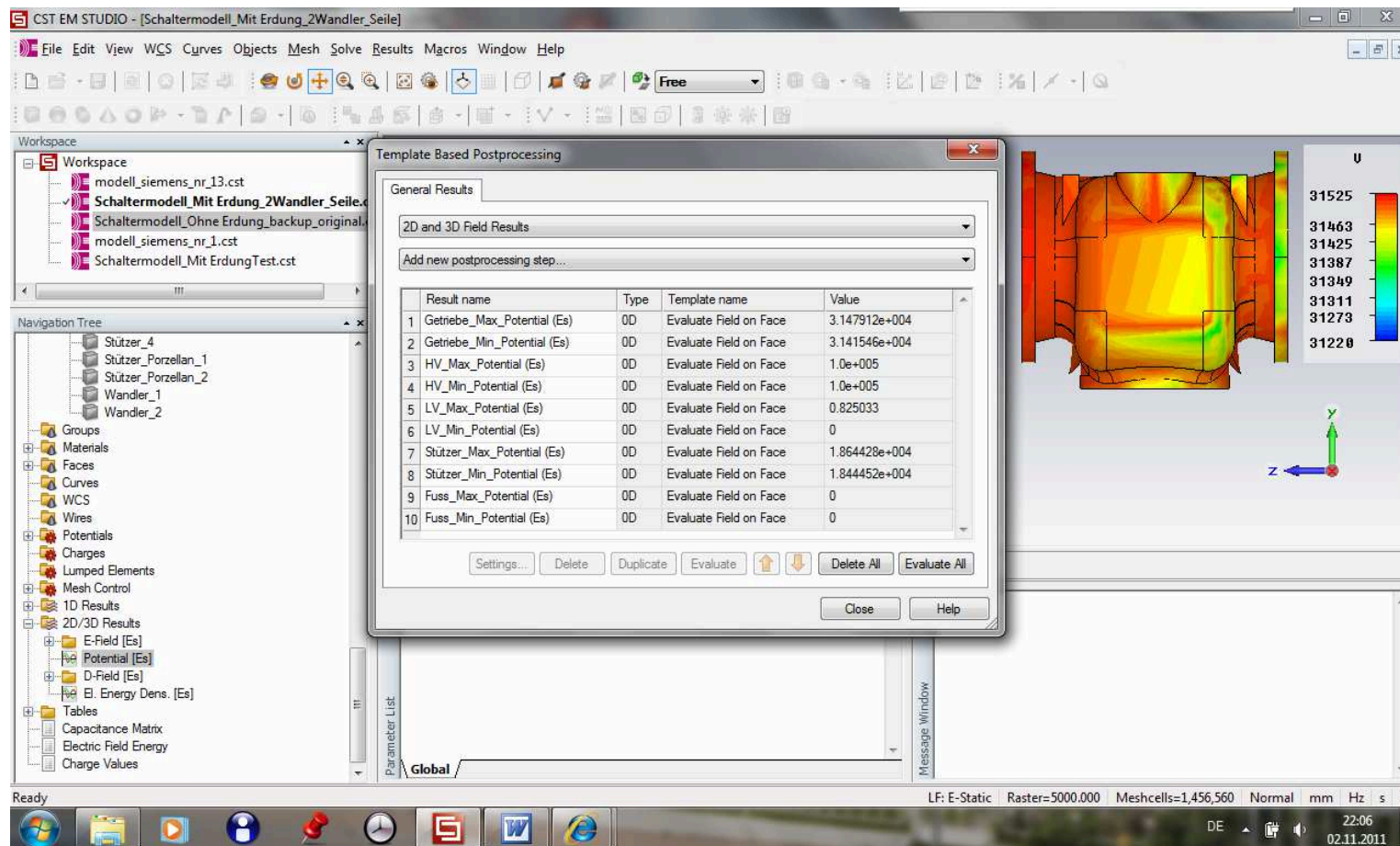


Abbildung 8-8: Feldsimulation Schaltermmodell mit Erdung, 2 Wandler, Zuleitung

8.1.5 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, 2 Wandler, 1 Trenner, Zuleitung

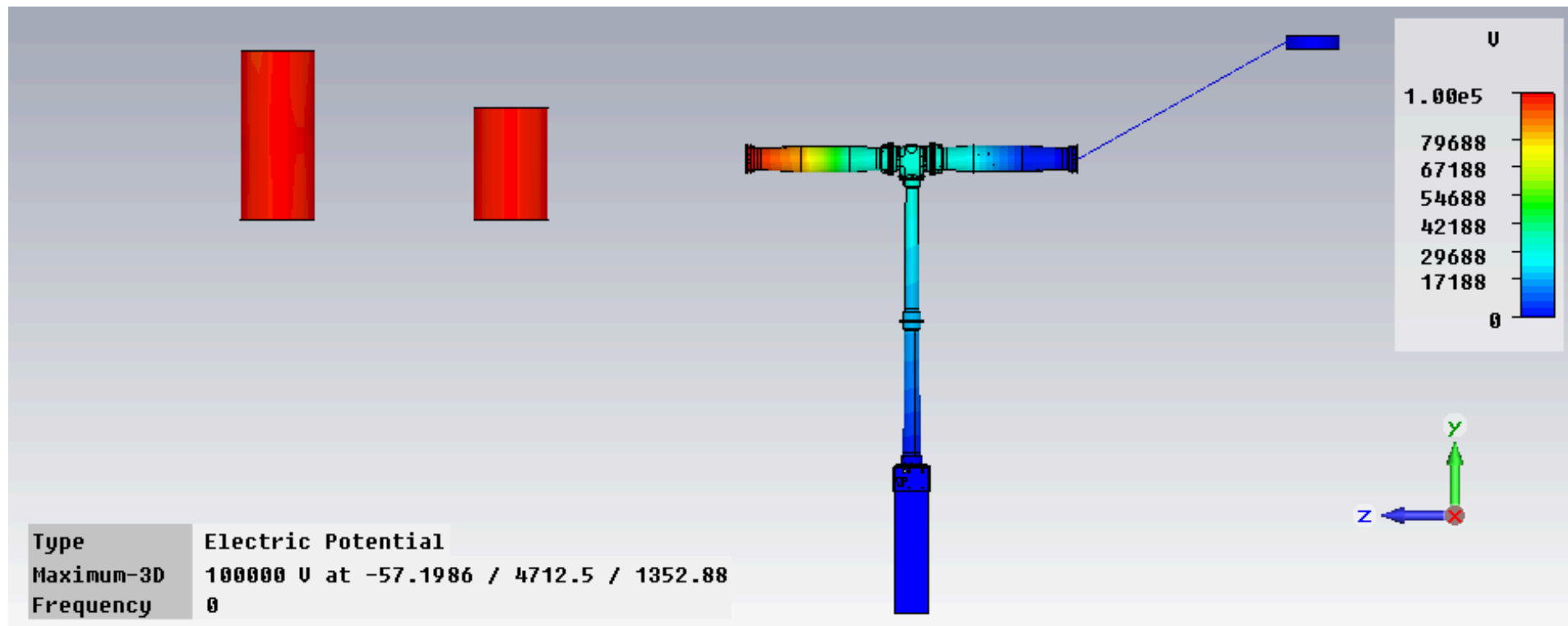


Abbildung 8-9: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 2 Wandler, 1 Trenner, Zuleitung

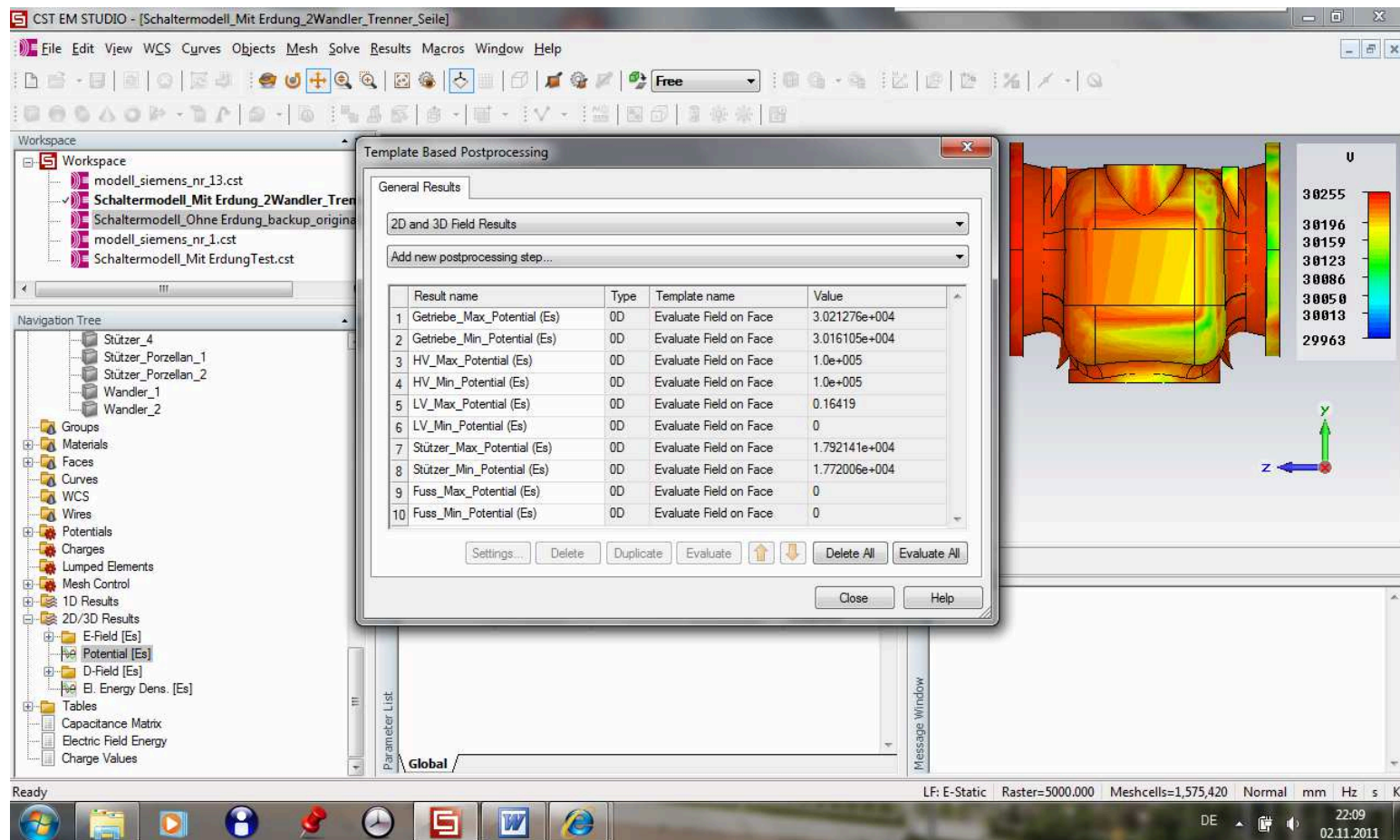


Abbildung 8-10: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 2 Wandler, 1 Trenner, Zuleitung

8.1.6 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, Düse

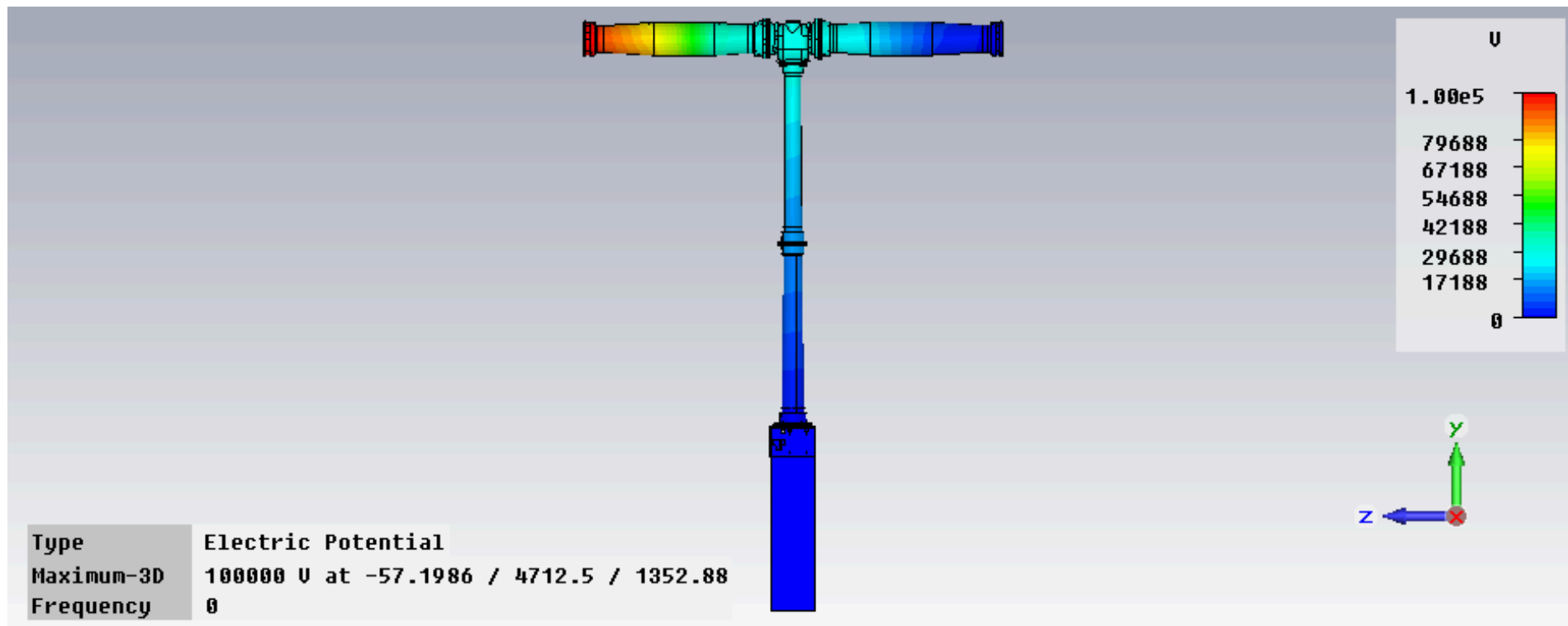


Abbildung 8-11: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Düse

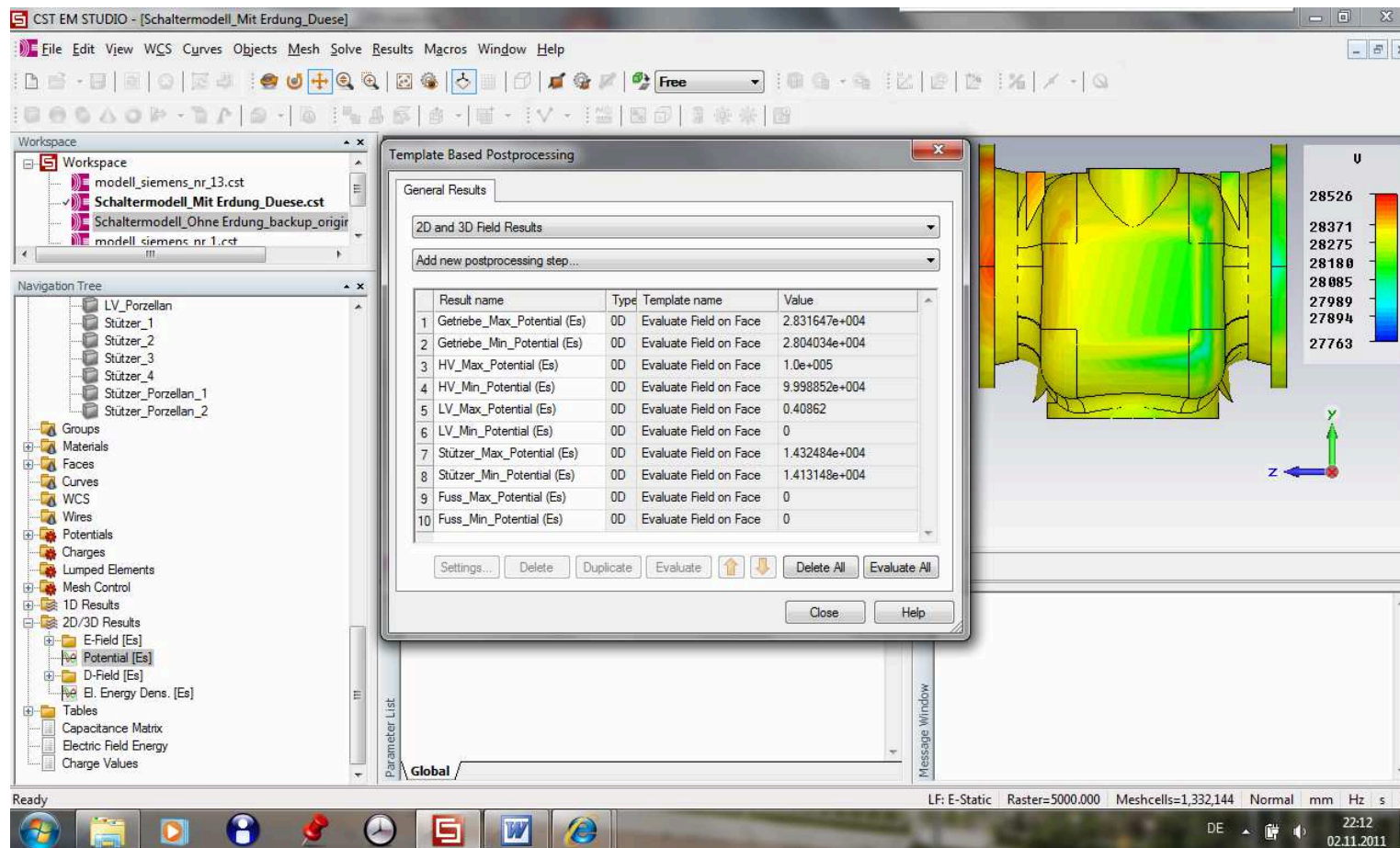


Abbildung 8-12: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Düse

8.1.7 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, Fuß 1m höher

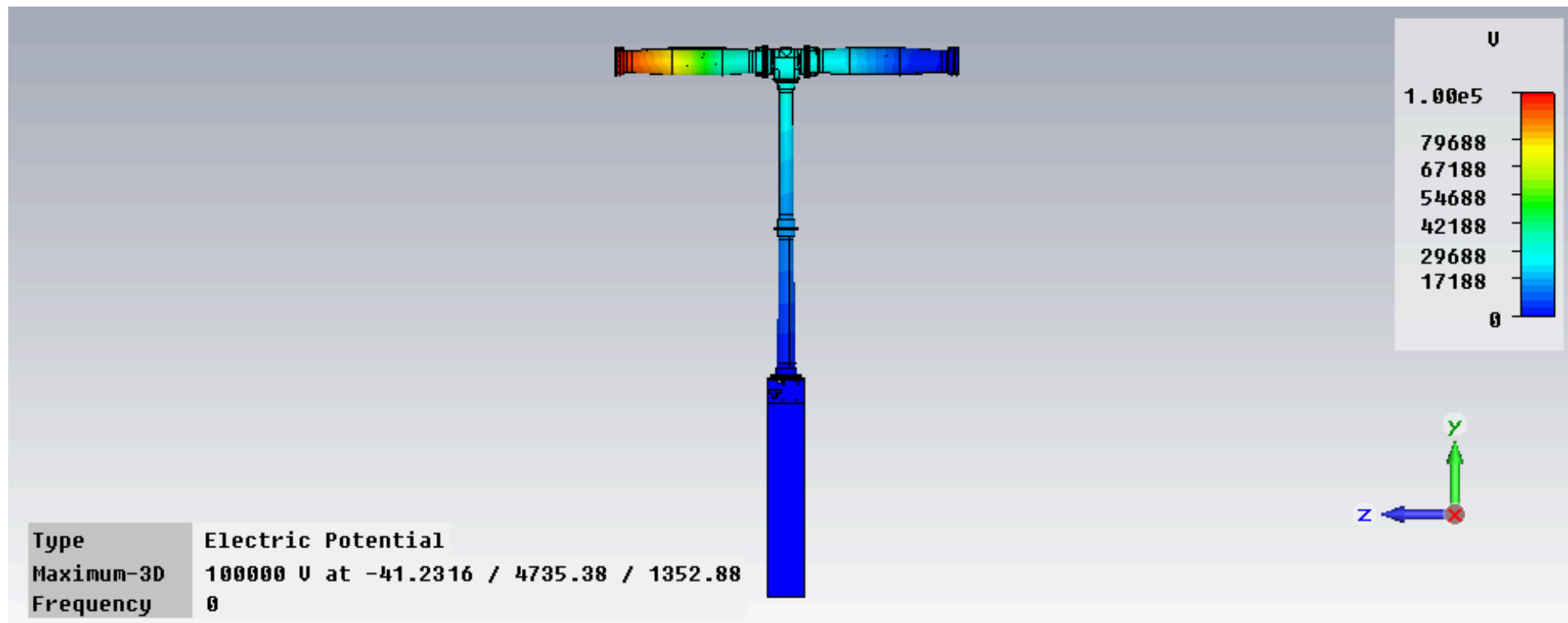


Abbildung 8-13: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Fuß 1m höher

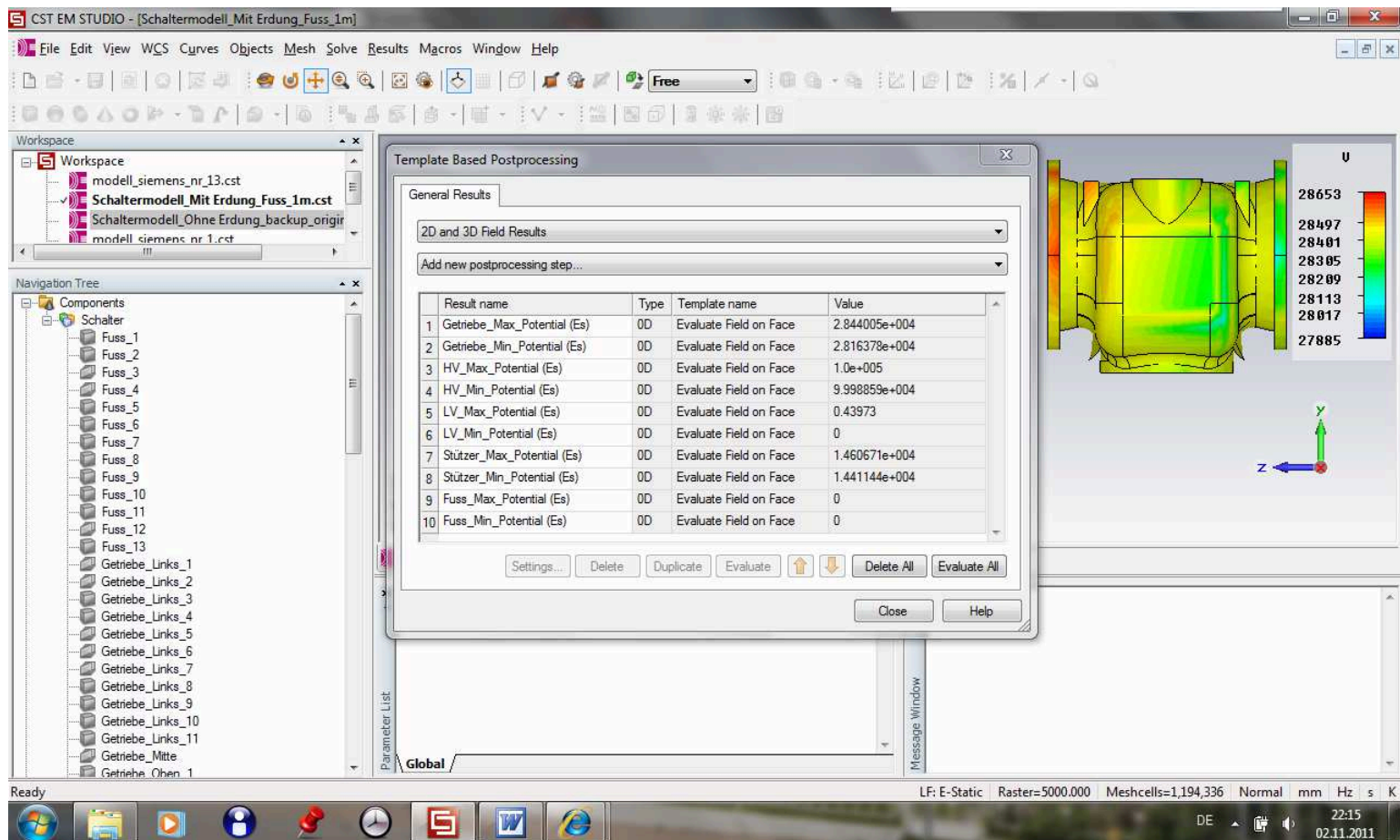


Abbildung 8-14: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Fuß 1m höher

8.1.8 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 200mm

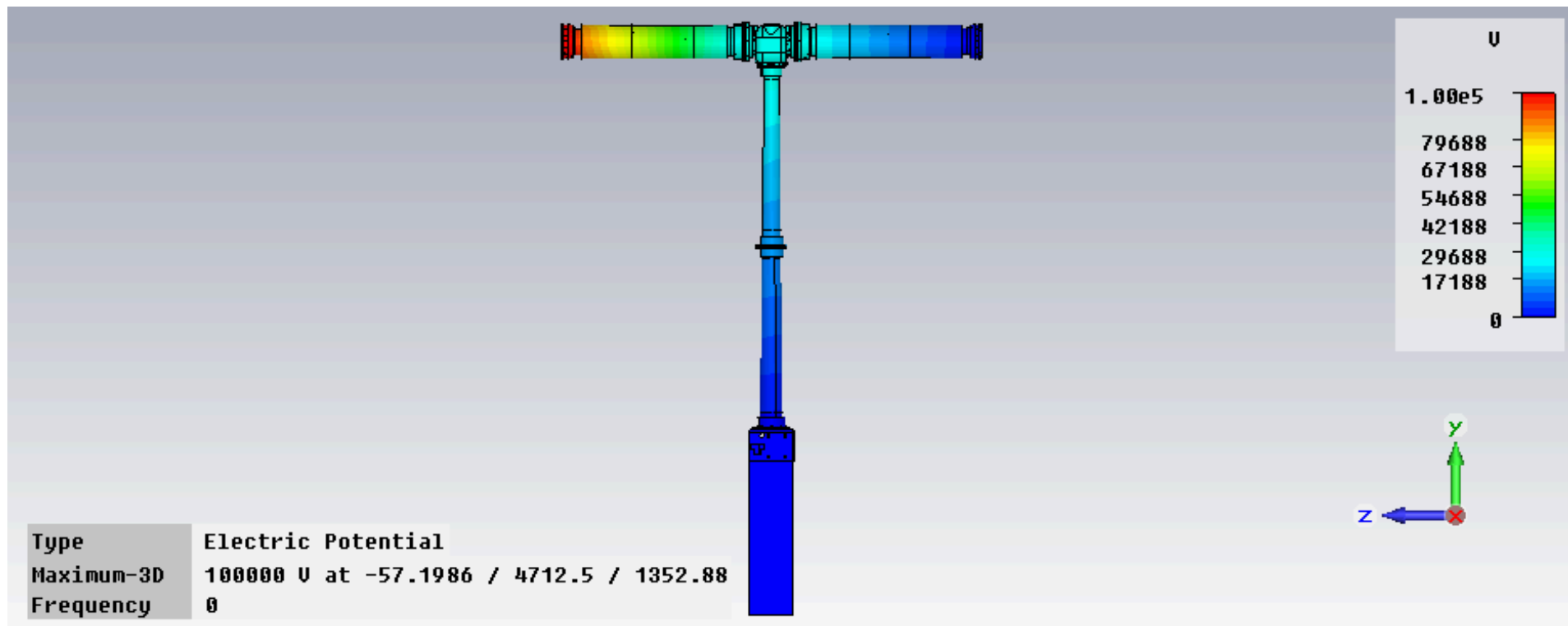


Abbildung 8-15: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 200mm

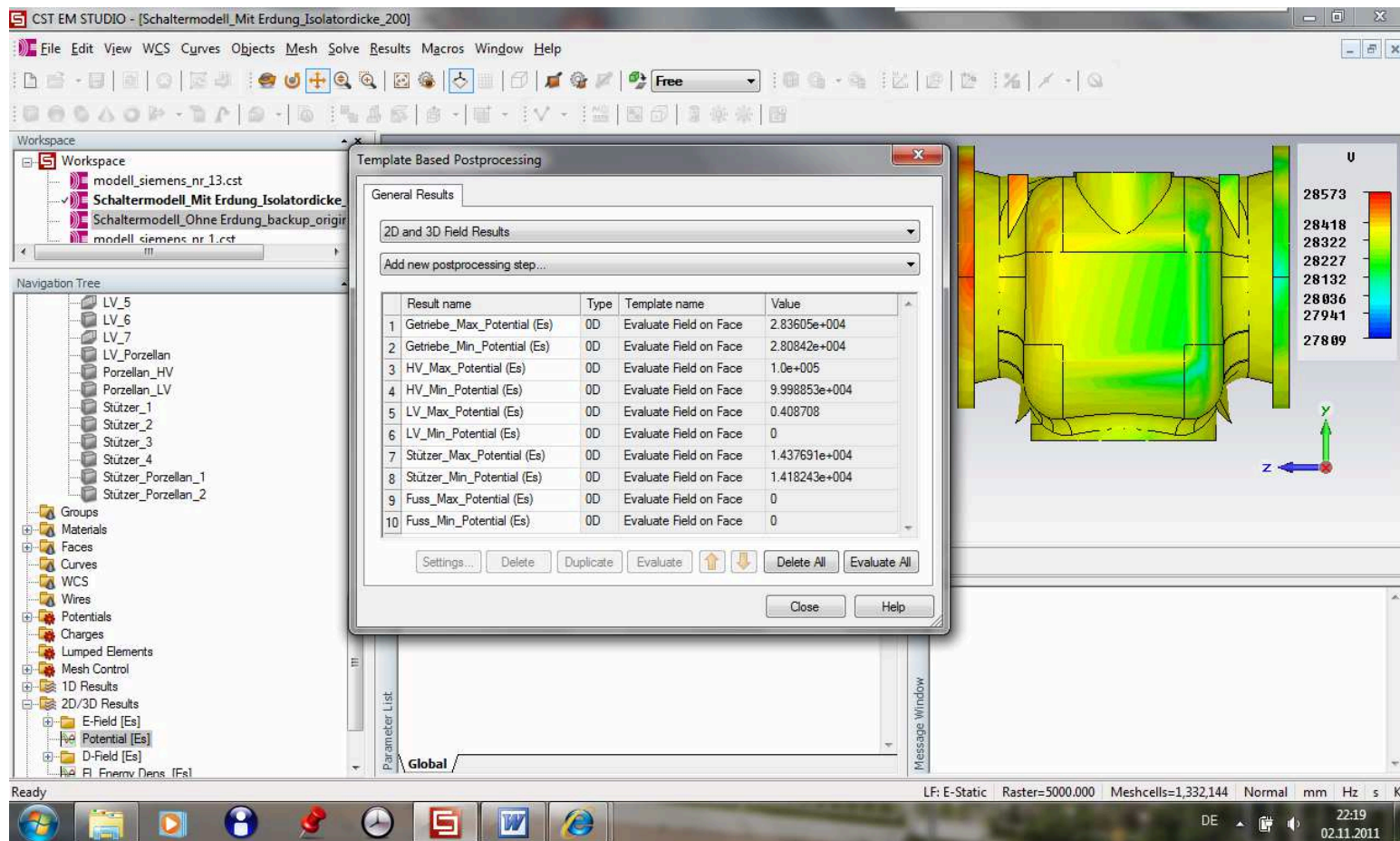


Abbildung 8-16: Feldsimulation Schaltermmodell mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 200mm

8.1.9 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 280mm

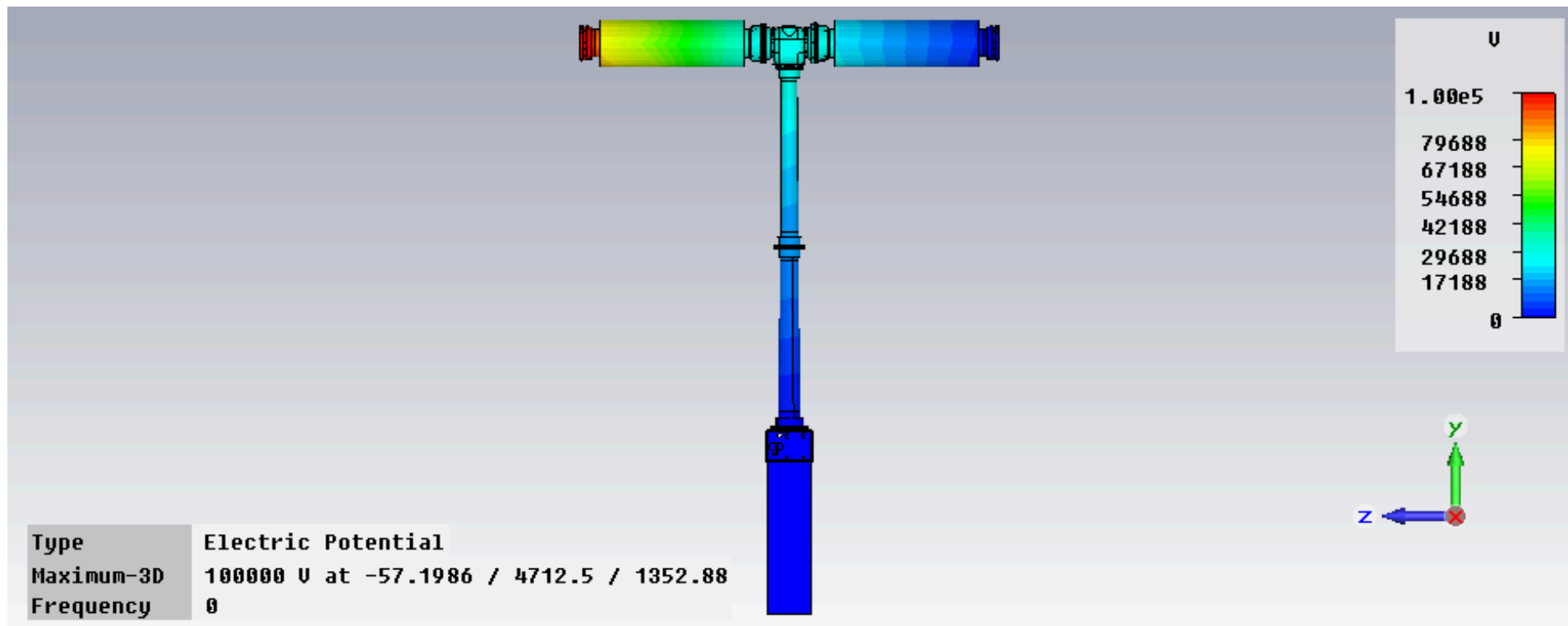


Abbildung 8-17: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 280mm

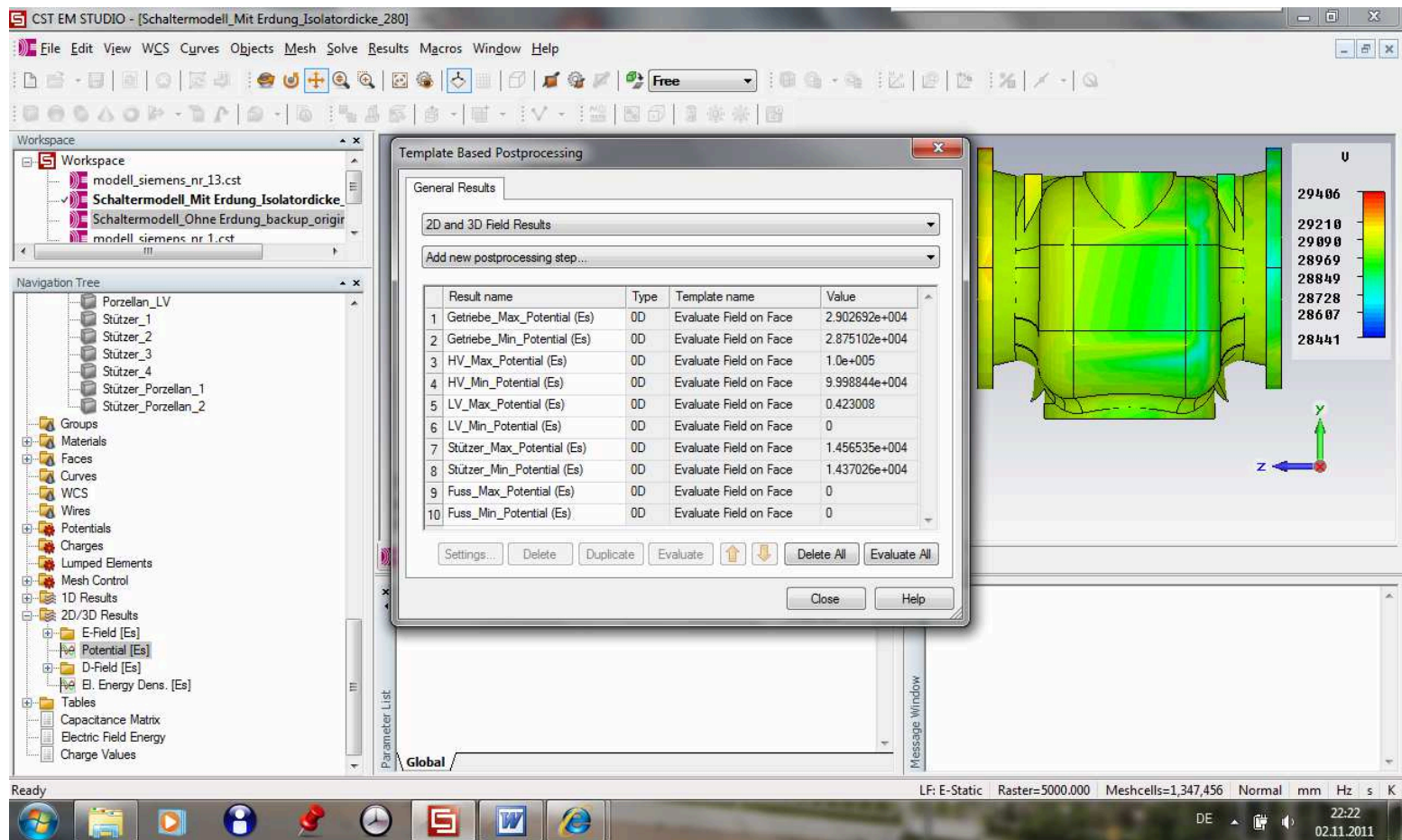


Abbildung 8-18: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 280mm

8.1.10 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, Seile

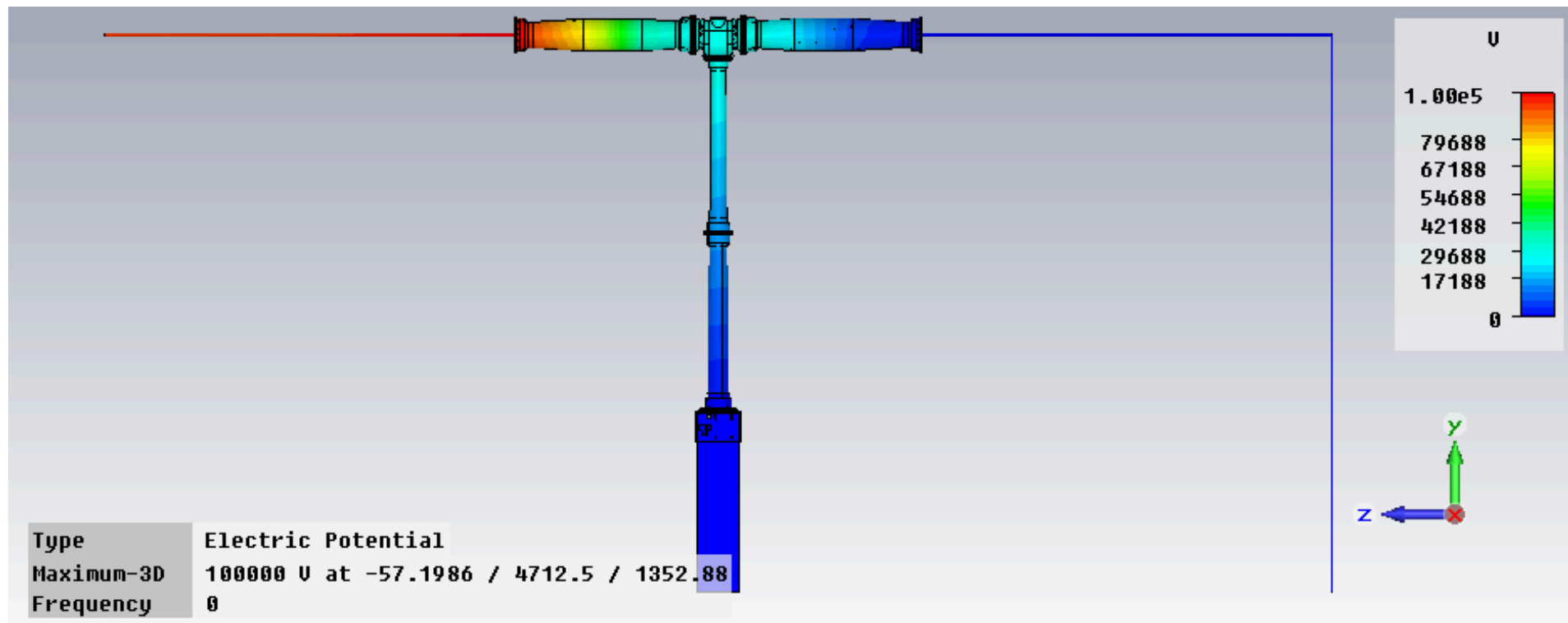


Abbildung 8-19: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Seile

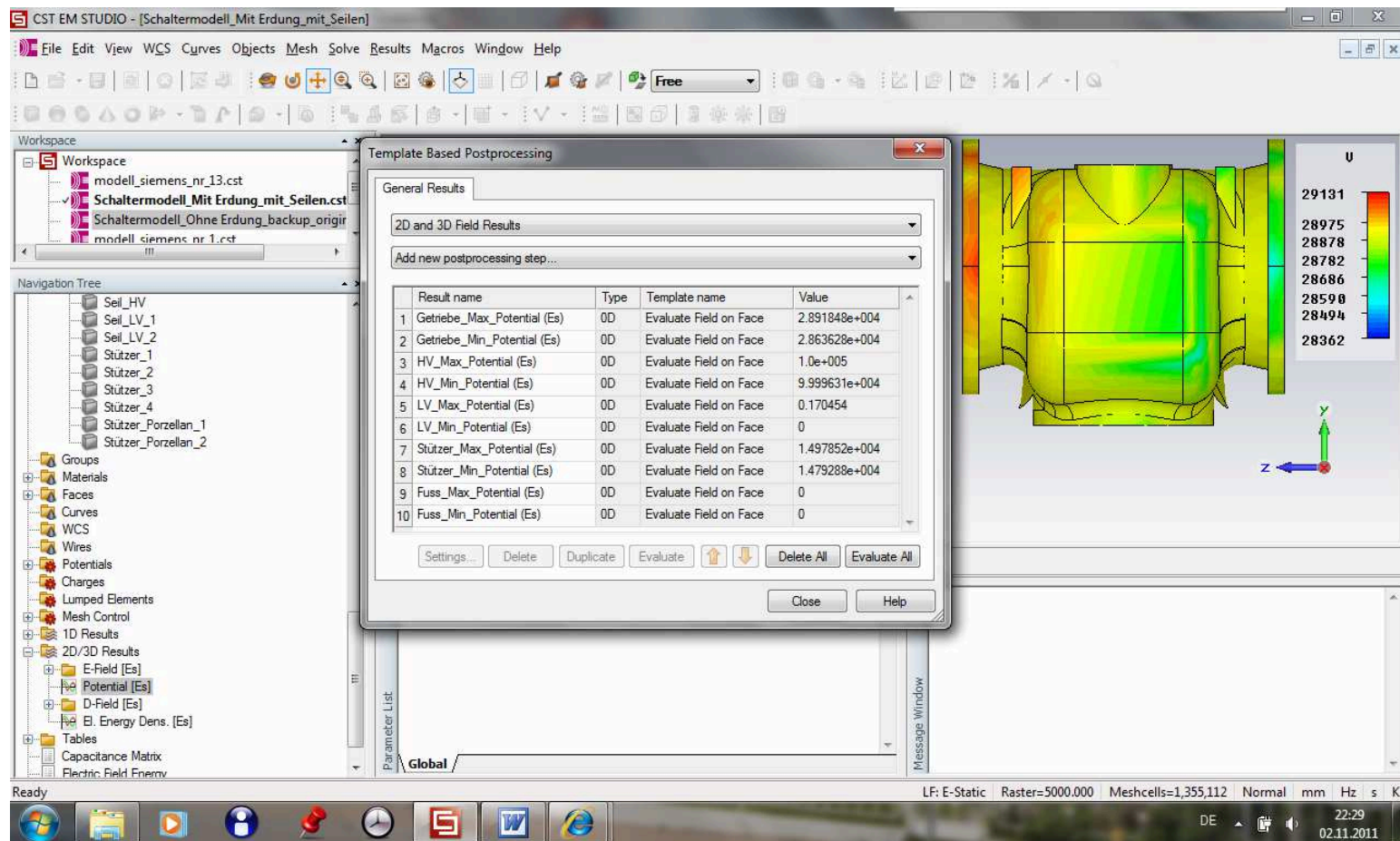


Abbildung 8-20: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Seile

8.1.11 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, Bodenplatte

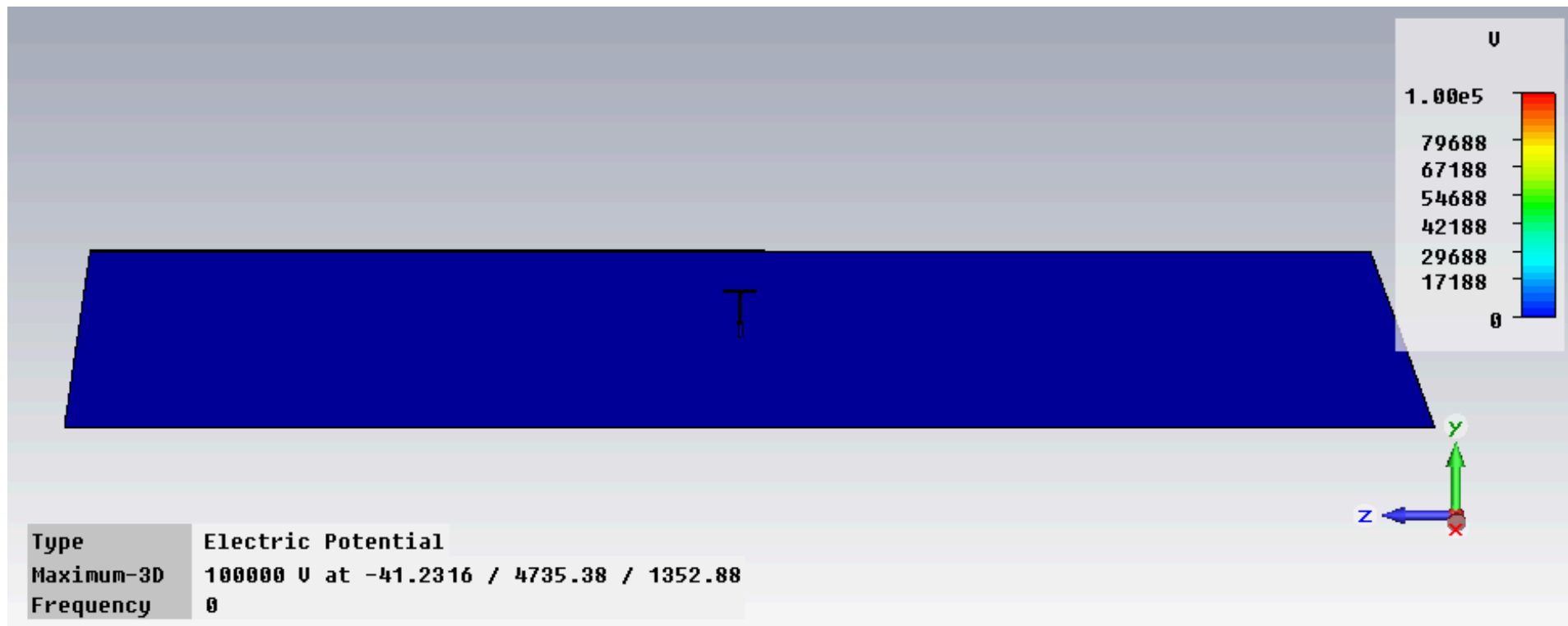


Abbildung 8-21: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Bodenplatte

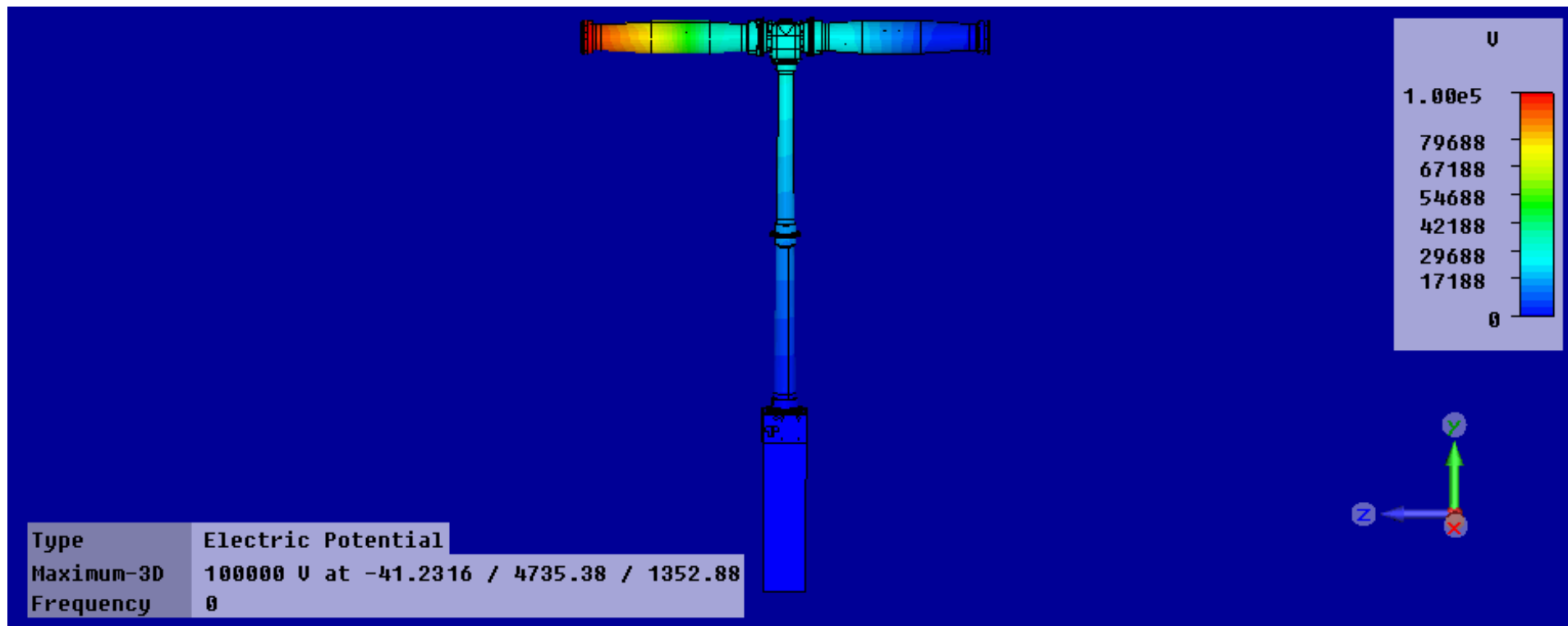


Abbildung 8-22: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Bodenplatte

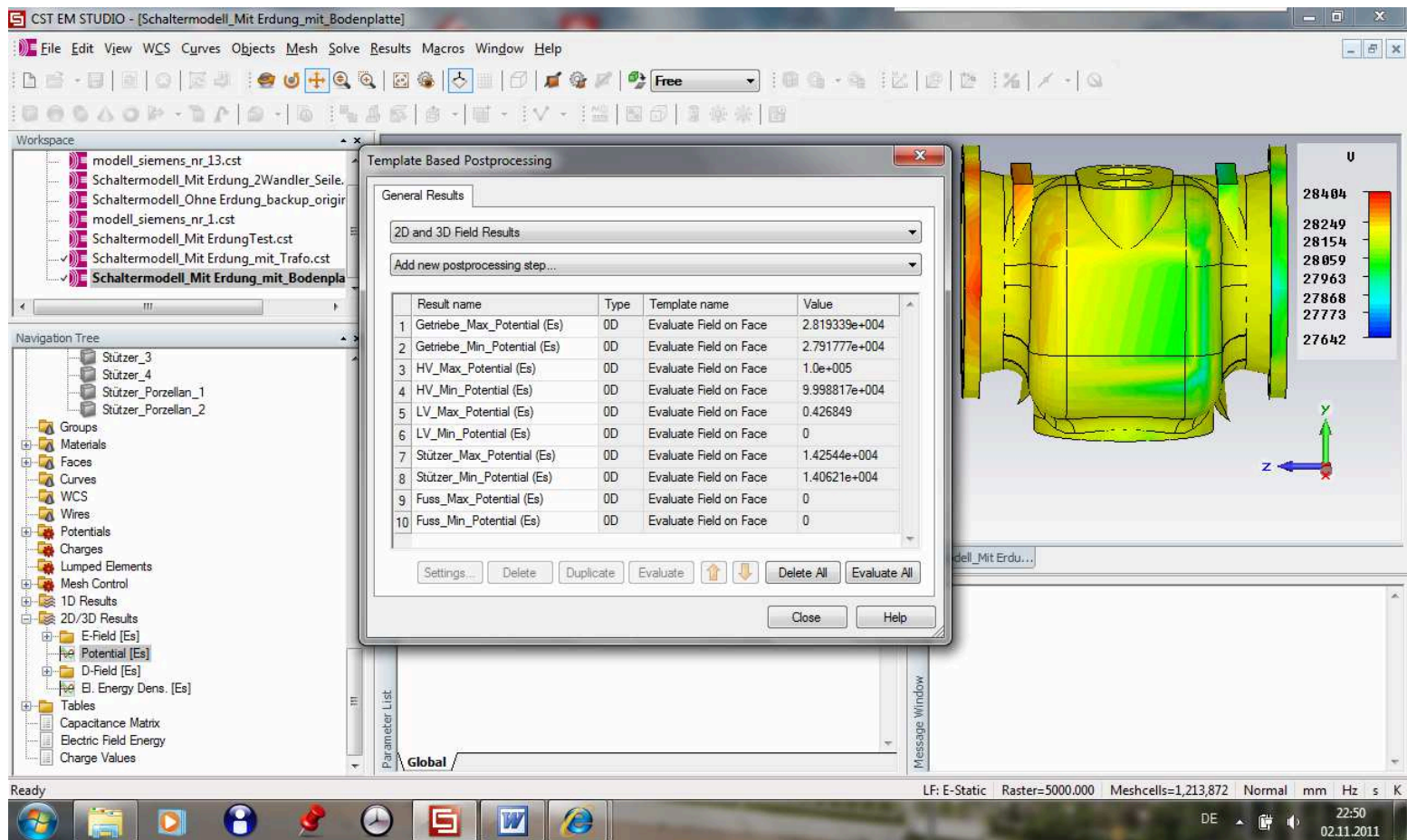


Abbildung 8-23: Feldsimulation Schaltermmodell mit Erdung, Bodenplatte

8.1.12 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, Teiler, Zuleitung

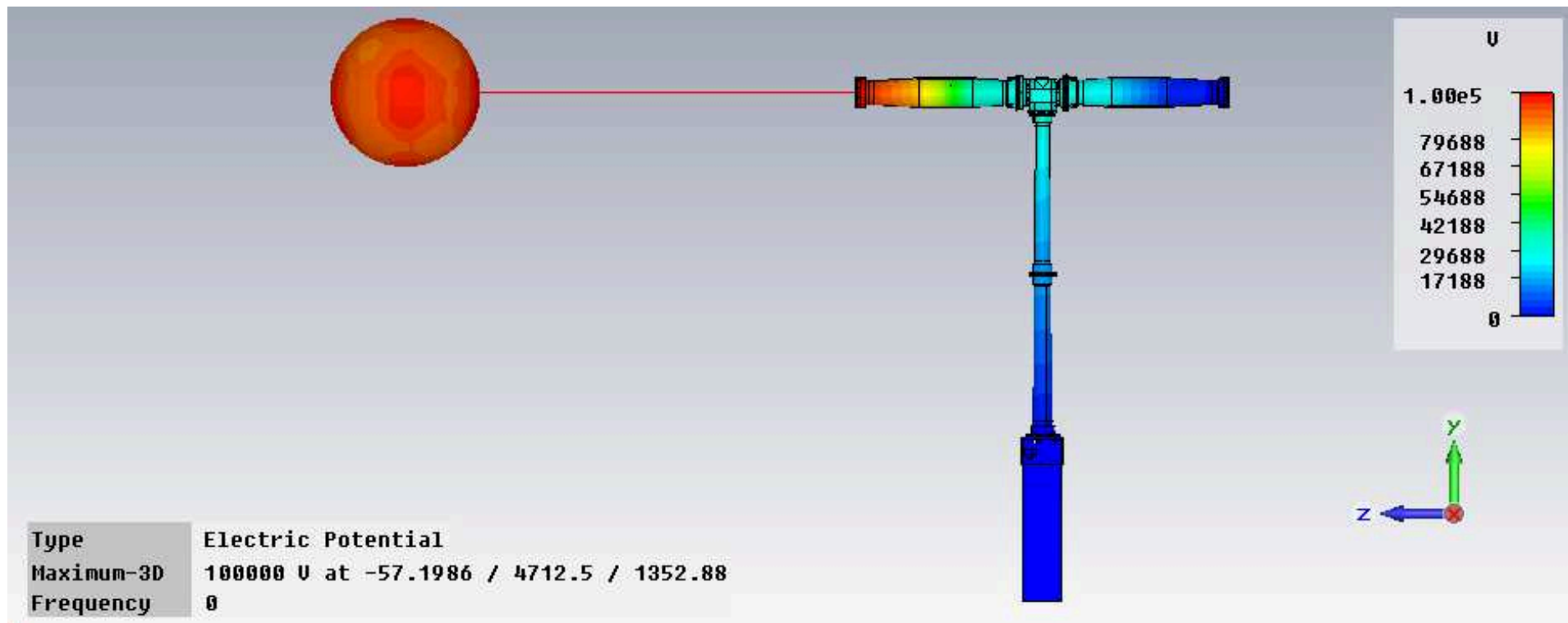


Abbildung 8-24: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Teiler, Zuleitung

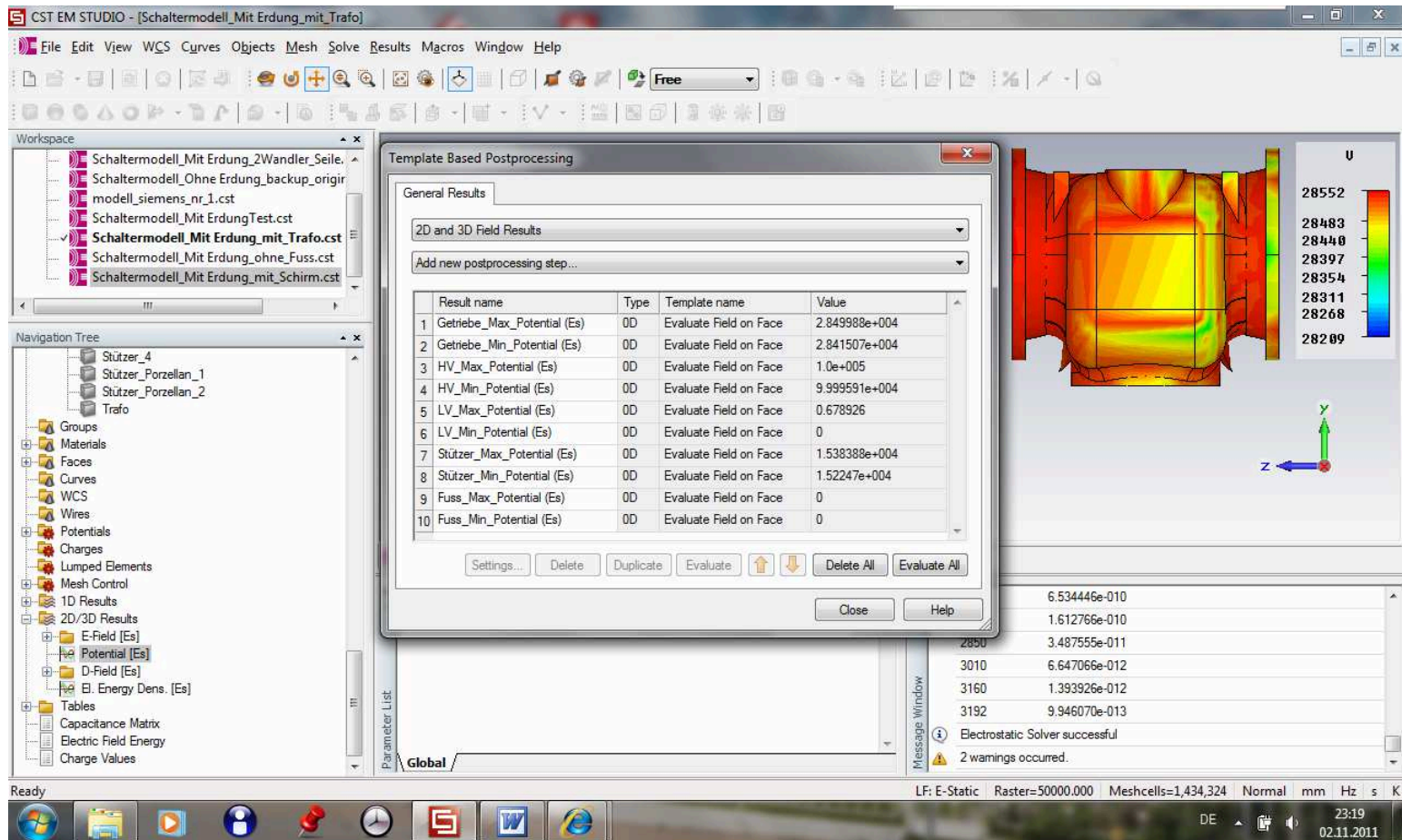


Abbildung 8-25: Feldsimulation Schaltermmodell mit Erdung, Teiler, Zuleitung

8.1.13 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, Pin

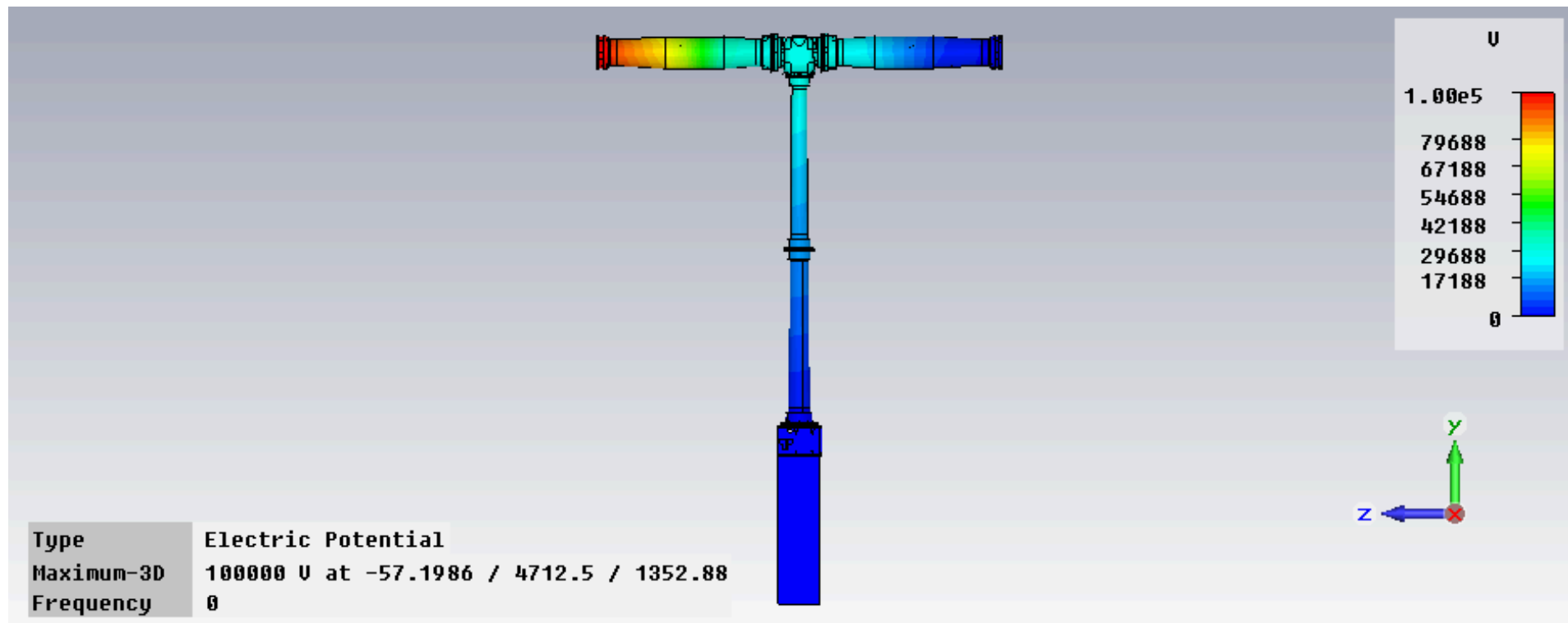


Abbildung 8-26: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Pin

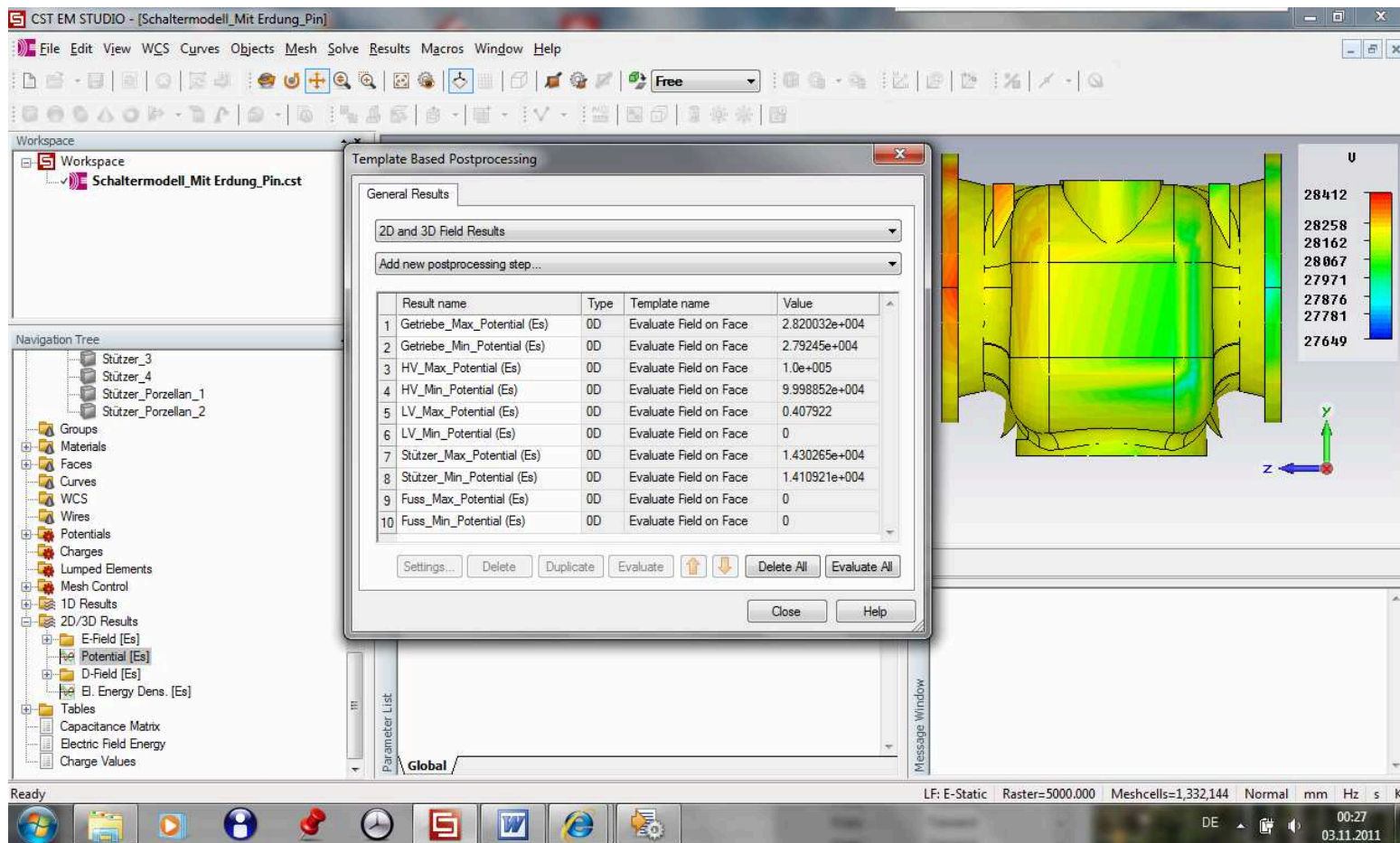


Abbildung 8-27: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Pin

8.1.14 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, in der Hochspannungshalle

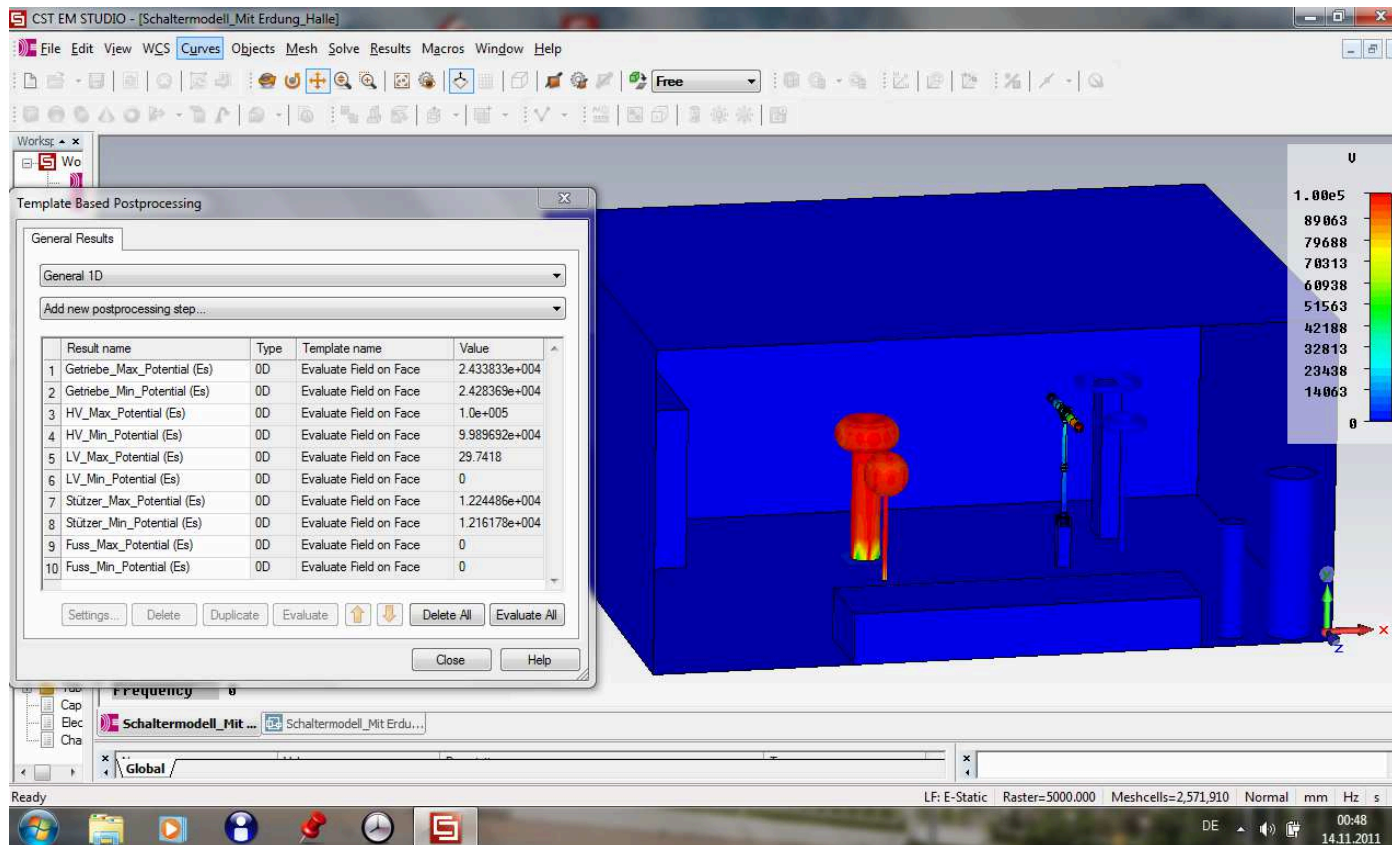


Abbildung 8-28: Simulation Schalter in der Hochspannungshalle

8.1.15 Feldsimulation Schaltermodell: mit Erdung, 3-polig im Freifeld, mit Schirm

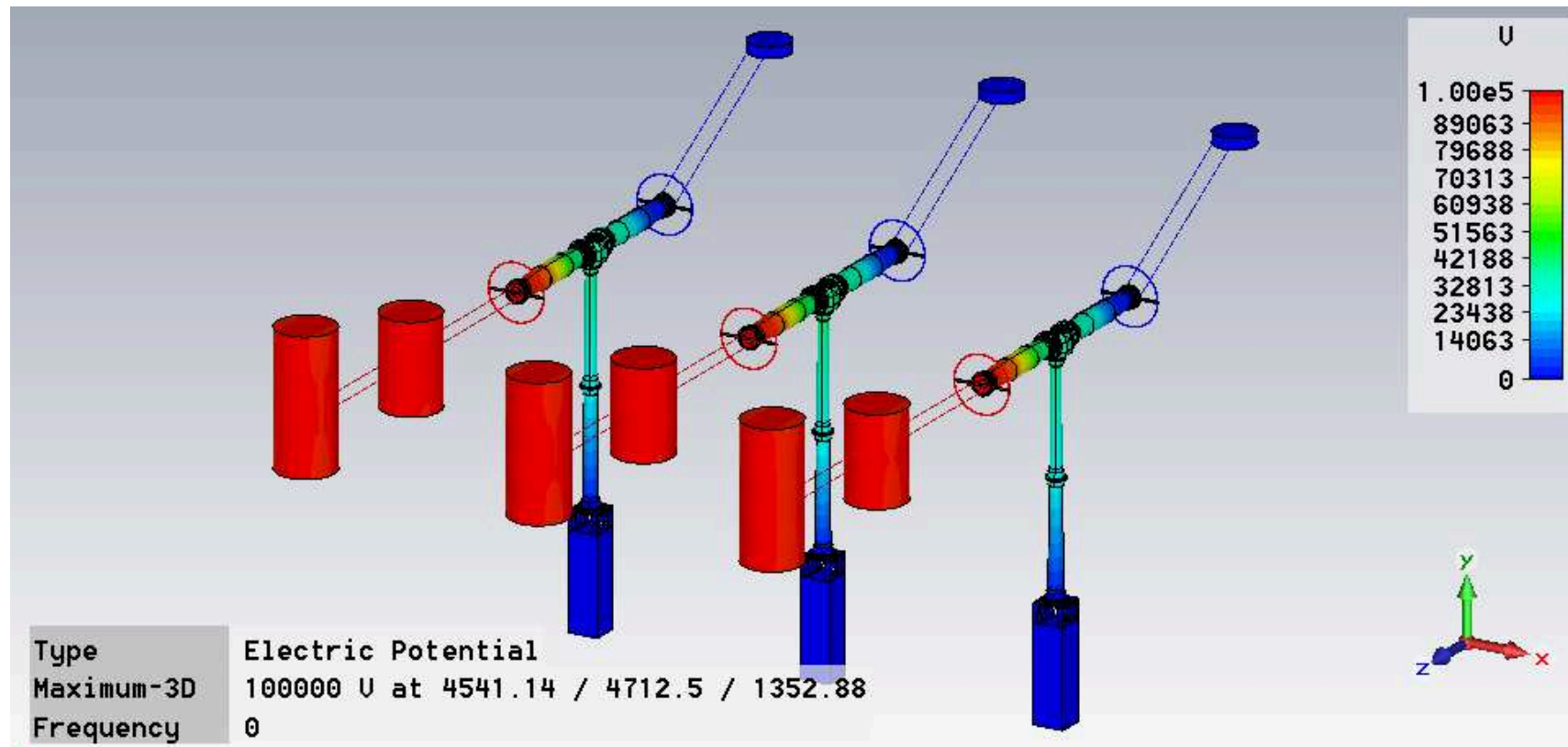


Abbildung 8-29: Simulation Schalter im Freifeld

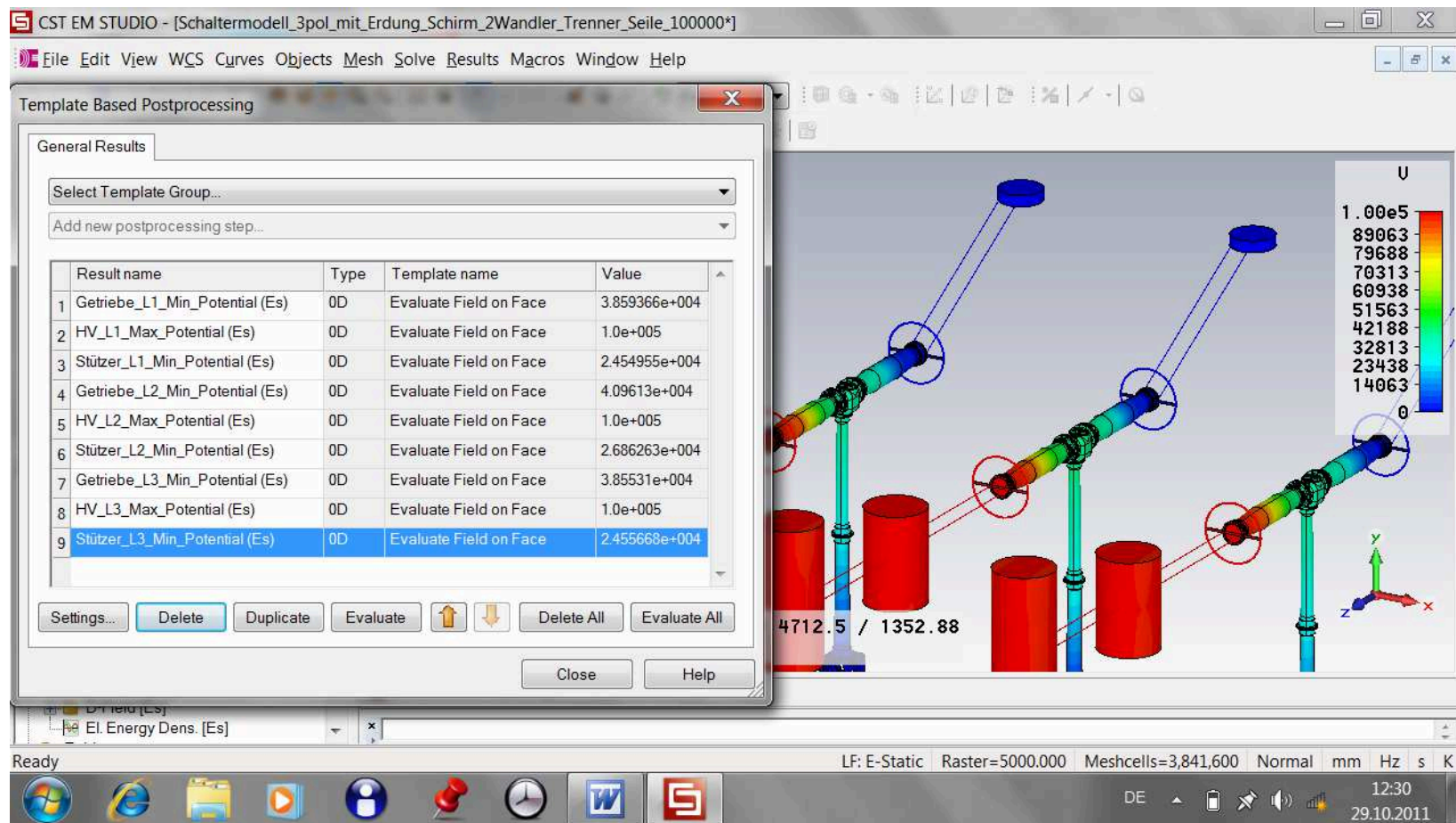


Abbildung 8-30: Simulation Schalter im Freifeld

9 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] T. Kuntze: Analyse und Nachbildung der Spezifik von Hochspannungs-Leistungsschaltern beim Schalten kapazitiver Lasten; Dissertation, Technische Universität Dresden, 2002
 - [2] R. von Starck: Modellierung und CFD-Simulation des Stromnulldurchganges in SF6-Selbstblasschaltern bei Ausschaltung von Kurzschlußströmen; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, 2002
 - [3] M. Lindmayer: Schaltgeräte; Springer-Verlag, 1987
 - [4] K. Heuck, K.-D. Dettmann: Elektrische Energieversorgung; Vieweg, 2002
 - [5] W. Nürnberg, R. Hanitsch: Die Prüfung elektrischer Maschinen; Springer-Verlag, 1987
 - [6] A. J. Schwab: Hochspannungsmesstechnik; Springer-Verlag, 1981
 - [7] A. Küchler: Hochspannungstechnik; VDI-Verlag, 1996
 - [8] Betriebsanleitung Leistungsschalter
 - [9] Unterlagen/Konstruktionsdaten Leistungsschalter
 - [10] Unterlagen/Aufbaudaten Umspannwerk
 - [11] Schalterhersteller
 - [12] Unterlagen Hochspannungshalle Cottbus, Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik
 - [13] Unterlagen Mess- und Prüftechnik in der Hochspannungshalle Cottbus, Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik
 - [14] Horst Löbig, Günter Schöne: Grundkenntnisse der Elektrotechnik; VEB Verlag Technik, Berlin, 1967
 - [15] Anleitung RLC-Meter
 - [16] Klaus Lunze: Theorie der Wechselstromschaltungen; Verlag Technik, Berlin, 1991
 - [17] Anleitung Messbrücke
-

10 Abkürzungen

C	Kapazität allgemein
C_{UE1}	Kapazität der Unterbrechereinheit 1 des Schalters
C_{UE2}	Kapazität der Unterbrechereinheit 2 des Schalters
C_E	Erdkapazität des Schalters vom Getriebe zur Erde
C_{E1}	Erdkapazität des Schalters vom Eingang zur Erde
C_{E2}	Erdkapazität des Schalters vom Ausgang zur Erde
C_N	Kapazität des Normalkondensators
C_{M1}	Teilerkapazität allgemein
C_{M2}	Teilerkapazität allgemein
C_{T1}	Teilerkapazität Wechselspannungsteiler
C_{T2}	Teilerkapazität Wechselspannungsteiler
C_{U1}	Teilerkapazität Unterbrechereinheit 1
C_{U2}	Teilerkapazität Unterbrechereinheit 2
C_{S1}	Kapazität AC-Anlage - Schaltergetriebe
C_{S2}	Kapazität AC-Anlage - Schalterausgang
C_{GE}	Streukapazität Schaltergetriebe zu geerdeten Geräten, Hallenwänden etc.
C_{SE}	Kapazität Schalter - Einspeisung
i_1	Strom allgemein
i_1	Strommessgerät Strom i_1 - Eingangsstrom
i_2	Strommessgerät Strom i_2 - Ausgangsstrom
L	Induktivität

U	Spannung allgemein
U_0	angelegte Versuchsspannung
U_{of}	angelegte frequenzveränderliche Versuchsspannung
U_1	Spannungsmessgerät Spannung U_1
U_{2E}	Spannungsmessgerät Spannung U_{2E}
U_{UE1}	Spannung Unterbrechereinheit 1
U_{UE2}	Spannung Unterbrechereinheit 2
X	Blindwiderstand

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Nachbildung eines Hochspannungs-Leistungsschalters	6
Abbildung 3-2: Spannungsmessung der Spannungen von Unterbrechereinheit 1 und 2	7
Abbildung 3-3: Strommessung von Ein- und Ausgangsstrom	9
Abbildung 3-4: Aufbau eines Schwingkreises	10
Abbildung 3-5: RLC-Meter	11
Abbildung 3-6: Trimpotentiometer	11
Abbildung 4-1: 550kV-Schalter in der Hochspannungshalle	14
Abbildung 4-2: Strommessung am Normalkondensator	15
Abbildung 4-3: Strommessung am Normalkondensator C_N	16
Abbildung 4-4: Strommessung am Leistungsschalter	17
Abbildung 4-5: Multimeter am Leistungsschalter – Strommessung	18
Abbildung 4-6: Strommessungen – Schalter zwischen Stoß- und AC-Anlage	19
Abbildung 4-7: Strommessungen – Schalter an der Warte	19
Abbildung 4-8: Strommessungen – Schalter neben der Stoßanlage	20
Abbildung 4-9: Eingangstrommessung am Leistungsschalter – Ausgang geerdet, Unterbrechereinheiten offen	22
Abbildung 4-10: Eingangstrommessung am Leistungsschalter – Ausgang geerdet, erste Unterbrechereinheit gebrückt	24
Abbildung 4-11: Eingangstrommessung am Leistungsschalter – Ausgang geerdet, zweite Unterbrechereinheit gebrückt	26
Abbildung 4-12: Beispiele für Streukapazitäten bei Messungen in der Hochspannungshalle	29
Abbildung 4-13: Stromlaufplan Streukapazitäten	30
Abbildung 4-14: Allgemeiner Versuchsaufbau	31
Abbildung 4-15: Versuchsaufbau zur Spannungsermittlung aus Strom und Kapazität	32

Abbildung 4-16: Stromlaufplan zur Kapazitätsermittlung aus der Strommessung	33
Abbildung 4-17: Versuchsaufbau zur Kapazitätsermittlung aus der Strommessung	34
Abbildung 4-18: Allgemeiner Versuchsaufbau	36
Abbildung 4-19: Spannungszuführung außen und Anschluss der Brücke in der Mitte	37
Abbildung 4-20: Brückenmessgerät	37
Abbildung 4-21: 1. Brückenmessung: Die Leitung wurde direkt vom Teiler zum Prüfling geführt	38
Abbildung 4-22: 1. Brückenmessung: Entfernte Leitungsführung vom Teiler zum Schalter	39
Abbildung 4-23: 1. Brückenmessung: Leitungsführung zur Mitte des Schalters (Pol 2)	40
Abbildung 4-24: 1. Brückenmessung: Leitungsführung zur Mitte des Schalters (Pol 1)	41
Abbildung 4-25: Stromlaufplan 2. Brückenmessung: Schalter an der Warte	43
Abbildung 4-26: 2. Brückenmessung: Schalter an der Warte	44
Abbildung 4-27: 2. Brückenmessung: Schalter neben der Stoßanlage	44
Abbildung 4-28: Spannungsmessung	46
Abbildung 4-29: Stromlaufplan Spannungsmessung: Schalter zwischen Stoß- und AC-Anlage	47
Abbildung 4-30: Stromlaufplan Spannungsmessung: Schalter an der Warte	48
Abbildung 4-31: Wechselspannungsversuche gesamter Schalter	53
Abbildung 4-32: Wechselspannungsversuche Unterbrechereinheit 1	54
Abbildung 4-33: Versuchsaufbau (Hallenansicht von oben)	55
Abbildung 4-34: Stoßanlage und Hochspannungsschalter	56
Abbildung 4-35: Erdungsband vom Schalter über eine Leiter	56
Abbildung 4-36: Erdungsband zum Generator	57
Abbildung 5-1: Feldsimulation Schaltermodell mit Schirm	64

Abbildung 8-1: Feldsimulation Schaltermodell ohne Erdung	75
Abbildung 8-2: Feldsimulation Schaltermodell ohne Erdung	76
Abbildung 8-3: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung	77
Abbildung 8-4: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung	78
Abbildung 8-5: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 1 Wandler, Zuleitung	79
Abbildung 8-6: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 1 Wandler, Zuleitung	80
Abbildung 8-7: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 2 Wandler, Zuleitung	81
Abbildung 8-8: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 2 Wandler, Zuleitung	82
Abbildung 8-9: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 2 Wandler, 1 Trenner, Zuleitung	83
Abbildung 8-10: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, 2 Wandler, 1 Trenner, Zuleitung	84
Abbildung 8-11: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Düse	85
Abbildung 8-12: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Düse	86
Abbildung 8-13: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Fuß 1m höher	87
Abbildung 8-14: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Fuß 1m höher	88
Abbildung 8-15: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 200mm	89
Abbildung 8-16: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 200mm	90
Abbildung 8-17: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 280mm	91
Abbildung 8-18: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Isolatoraußendurchmesser 280mm	92
Abbildung 8-19: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Seile	93
Abbildung 8-20: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Seile	94

Abbildung 8-21: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Bodenplatte	95
Abbildung 8-22: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Bodenplatte	96
Abbildung 8-23: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Bodenplatte	97
Abbildung 8-24: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Teiler, Zuleitung	98
Abbildung 8-25: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Teiler, Zuleitung	99
Abbildung 8-26: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Pin	100
Abbildung 8-27: Feldsimulation Schaltermodell mit Erdung, Pin	101
Abbildung 8-28: Simulation Schalter in der Hochspannungshalle	102
Abbildung 8-29: Simulation Schalter im Freifeld	103
Abbildung 8-30: Simulation Schalter im Freifeld	104
