

Ein Beitrag zur Begrenzung der Schrittspannung durch isolierende Schichten

A contribution to the limitation of step voltages using surface layer.

Prof.Dr.-Ing. Jan Meppelink, Professor Meppelink, Soest, Deutschland, janmeppelink@mac.com

Kurzfassung

In der DIN EN 62305-3 wird zur Reduktion der Schrittspannung eine Schicht aus Isolierstoff, z.B. Asphalt mit einer Dicke von 5 cm (oder eine Schicht Kies mit einer Dicke von 15 cm) vorgeschlagen, die im Allgemeinen die Gefahr auf ein annehmbares Maß reduziert. Die Wirkung dieser Maßnahme wird am Beispiel eines für Schutzräume typischen 5 m x 5 m Maschengitters mit Hilfe der Programme GSA (Grounding System Analysis) und Comsol – Multiphysics im blitzrelevanten Frequenzbereich für einen positiven Erstblitz von 100 kA 10/350 untersucht. In der Praxis wird die Frage nach der Schrittspannung auf einer isolierenden Schicht bei Regen aufgeworfen. Die Berechnungen zeigen, dass trockene Schichten aus Asphalt oder Kies wirksam sind, bei Nässe reduziert wirksam sind und bei Regenwasser versagen. Eine Lösung ist eine zusätzliche Potentialsteuerung mit zwei Ringen, 4 Tiefenerdern und eine isolierte Einführung der Ableitung/Erdeinführung.

Abstract

In order to reduce the hazard to a tolerable level, the standard DIN EN 62305-3 recommends a surface layer e.g. asphalt, of 5 cm thickness or a layer of gravel 15 cm thickness. The efficiency of such measure is shown based on an example of a meshed 5 m x 5 m earth electrode, typical for a shelter. The computer programs GSA (Grounding System Analysis) as well as Comsol – Multiphysics have been used to verify the performance of such a system. Simulations were made in frequency domain using a first positive short (single) stroke of 100 kA 10/350 represented by an equivalent frequency of 25 kHz. Also, rainwater on an asphalt layer has been studied. As a result, soil covering layers in dry condition work satisfactorily, in wet conditions with limitations but under rain conditions they fail. The reliable protection of a shelter requires an additional equipotentialization system that consists of 2 additional ring electrodes and 4 counterpoise as well as an insulated down conductor/earth inlet rod.

1 Stand der Technik

Die Errichtung eines Blitzschutzsystems nach dem Stand der Technik [1] umfasst die Einhaltung der Anforderungen aus Abschnitt 8 [1]. Darin sind die Schutzmaßnahmen zur Einhaltung der Schritt- und Berührungsspannung genannt:

- Unter bestimmten Bedingungen kann die Nähe zu den Ableitungen lebensgefährlich sein, selbst wenn das LPS nach den vorstehenden Anforderungen ausgelegt und errichtet wurde.
- Die Gefahr wird auf ein annehmbares Maß verringert, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt wird:
- A) Unter bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen befinden sich keine Personen in einem Umkreis von 3 m von den Ableitungen
- B) Ein System von mindestens zehn Ableitungen, die 5.3.5 entsprechen, ist vorhanden. ^{N5)}

^{N5)} Nationale Fußnote: Siehe Nationales Vorwort, Erläuterung zu 8.1 und 8.2. Das zuständige deutsche Normungskomitee hat gegen folgende Abschnitte Bedenken: Die Berechtigung dieser Aussage kann von den Experten des K 251 nicht nachvollzogen werden. Anwenden dieser Norm wird

daher empfohlen, diese Maßnahme zur Vermeidung von Schritt- bzw. Berührungsspannungen nicht anzuwenden und nach anderen Lösungen zu suchen. Alternative, physikalisch begründete Lösungen sind in Diskussion.

- C) Der Übergangswiderstand der oberflächlichen Bodenschicht ist innerhalb von 3 m um die Ableitungen nicht kleiner als 100 kOhm
- ANMERKUNG Eine Schicht aus Isolierstoff, z.B. Asphalt mit einer Dicke von **5 cm** (oder eine Schicht Kies mit einer Dicke von **15 cm**), reduziert im Allgemeinen die Gefahr auf ein annehmbares Maß.
- Wenn keine dieser Bedingungen erfüllt ist, müssen folgende Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Verletzungen von Personen infolge Schrittspannung ergriffen werden.
 - Potentialausgleich durch eine vermaschte Erdungsanlage
 - Absperrungen und/oder Warnhinweise zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit des Betretens des gefährlichen Bereichs innerhalb von 3m um die Ableitung

Der Stand der Technik hat sich seit Erscheinen von [1] geändert. Neben obigen Schutzmaßnahmen stellen sich in der Praxis weitere Fragen:

- Welche Schrittspannung tritt bei einer mit Regenwasser belegten Asphaltschicht auf ?
- Treten bei Gleitentladungen auf ?
- Bodenaustrocknung unter einer Asphaltschicht ?
- Wie wirkt die Ionisation im Boden auf die Höhe der Schrittspannung ?
- Wie verhält sich eine durchnässte Kiesschicht ?
- Wie ändert sich der spezifische Widerstand einer Kiesschicht durch Umwelteinflüsse ?
- Welche Alterung ist bei Asphalt zu erwarten ?
- Welche Effekte treten an den Kanten einer Asphaltschicht auf ?

Der Aufsatz gibt Antworten auf diese Fragen am Beispiel einer für Schutzhütten typischen Erdungsanlage bei einem Blitzeinschlag von 100 kA der Form 10/350. Damit wird der worst case abgedeckt [2,3]. Die Berechnung anderer Stoßstromformen erübrigt sich daher.

2 Isolierstoffe

Asphalt [4] ist ein natürlich vorkommendes oder technisch hergestelltes Gemisch aus Bitumen und groben und feinen Gesteinskörnungen sowie gegebenenfalls aus Zusätzen. Gussasphalt ist wasserdicht und praktisch gas- und wasserdampfdicht. Asphalt ist über viele Jahre stabil. Daher wird der Boden unterhalb einer größeren Asphaltschicht zu einem gewissen Grad austrocknen. Asphalt weist eine Durchschlagsfestigkeit von 10...60 kV/mm und einer Permittivität von 2,4...3,3 auf [5]. Der spezifische Widerstand von Asphalt und Kies ist in [6] ausführlich dargestellt. Gebrochenes Gestein ist in [7] dargestellt wobei keine elektrischen Eigenschaften angegeben werden.

In Anbetracht der Fülle verschiedenster Werkstoffe ist eine Messung der spezifischen Widerstands des vorgesehenen Werkstoffs empfehlenswert [8].

Nach [6] ist zu berücksichtigen, dass sich im Laufe der Zeit die Zwischenräume durch lockeren Boden unterhalb der Kiesschicht füllen und Staub aus der Luft ablagert. Diese Effekte reduzieren den spezifischen Widerstand.

Tabelle 1 Spezifischer Widerstand von Werkstoffen für isolierende Schichten [6]

Werkstoff	Spezifischer Widerstand Ohmm	
	Trocken	Nass
Asphalt	$2 \cdot 10^6 \dots 30 \cdot 10^6$	$10.000 \dots 2 \cdot 10^6$ ¹
Beton	$10^6 \dots 10^9$	21..... 200
Gebrochener Granit mit Feinanteilen	$140 \cdot 10^6$	1300 Grundwasser mit 45 Ohmm

¹ Es ist anzunehmen, dass die Leitfähigkeit durch den Wasserfilm auf der Oberfläche reduziert wird.

0,04 m Gebrochener Granit mit Feinanteilen	4000	1200 Regenwasser mit 100 Ohmm
0,025 m bis 0,1 m Gewaschener Granit Ähnlich Kies	$1,5 \cdot 10^6$ bis $3 \cdot 10^6$	5000 Regenwasser mit 100 Ohmm

3 Berechnung mit GSA (Grounding System Analysis)

Wie in [2,3] ausführlich beschrieben, ist für die Schrittspannung mit dem Impuls 10/350 als worst case zu rechnen, der mit einem sinusförmigen Strom von 25 kHz im Frequenzbereich nachgebildet wird. Dieser Ansatz ist für physikalische Betrachtungen in linearen Systemen mit rein ohmscher Kopplung, die mit dem Scheitelwert des Stoßstromes verbunden sind, gerechtfertigt und wurde durch Vergleichsrechnungen mit Kettenleitermodellen und mit Zeitbereichsberechnungen mit GSA nachgewiesen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer transversalen elektromagnetischen Welle (TEM-Welle) ist abhängig vom spezifischen Erdwiderstand und der Frequenz des erregenden Stromes. Für eine quasistationäre Berechnung mit fester Frequenz von 25 kHz ist die Abmessung der Erdungsanlage auf 10% der Wellenlänge beschränkt. **Bild 1** zeigt die Abhängigkeit der $\lambda/10$ -Wellenlänge vom spezifischen Erdwiderstand. So beträgt die zulässige Größe für eine Berechnung mit einem spezifischen Erdwiderstand von 100 Ohmm etwa 30 m und ist damit für die hier vorgelegte Berechnung an einer Erdungsanlage mit Abmessungen von 5 m x 5 m völlig ausreichend. Ist die Abmessung der Erdungsanlage jedoch größer als die zugehörige $\lambda/10$ -Wellenlänge, liegen instationäre Verhältnisse vor, wobei in der Erdungsanlage Wanderwellen auftreten. In diesen Fällen wird eine Berechnung mit GSA im Zeitbereich empfohlen. Dabei können die genormten Impulsformen [9] verwendet werden.

Das Programm berücksichtigt die magnetische Kopplung von Leiterschleifen und erlaubt die Verwendung von Leitern oberhalb der Erdoberfläche und isolierende Schichten auf der Erdoberfläche. Damit können gesamte Blitzschutzsysteme modelliert werden. Das Erdreich kann durch Multilayer und Multiareas modelliert werden. Der spezifische Erdwiderstand und die Permittivität werden frequenzabhängig nachgebildet. Der spezifische Erdwiderstand ist eine meist nicht genau bekannte Größe und von der Temperatur, der Bodenfeuchtigkeit und vom Salzgehalt des Bodens abhängig [6]. Für die zulässige Schritt- und Berührungsspannung, zulässige elektrische und magnetische Felder, können Grenzwerte eingegeben werden, deren Überschreitung dann in der Lösung visualisiert wird. Elektrische und magnetische Felder können als Betrag und als Komponenten berechnet werden, jedoch keine Vektoren. GSA erlaubt eine komfortable Darstellung der Leerlauf-Schrittspannung und der belasteten Schrittspannung für einen Körperwiderstand von 1 kOhm. Die zulässige Schrittspannung wird nach den Angaben von [10] auf 25

kV 10/350 entsprechend einer spezifischen Energie von $W/R = 156,25 \text{ A}^2\text{s}$ festgelegt und ist auch für die Neufassung der IEC 62305-3 vorgesehen. Für die Berührungsspannung wurde ein Wert von 2 kV vorgeschlagen [11]. GSA ermöglicht eine komfortable Darstellung der Ergebnisse.

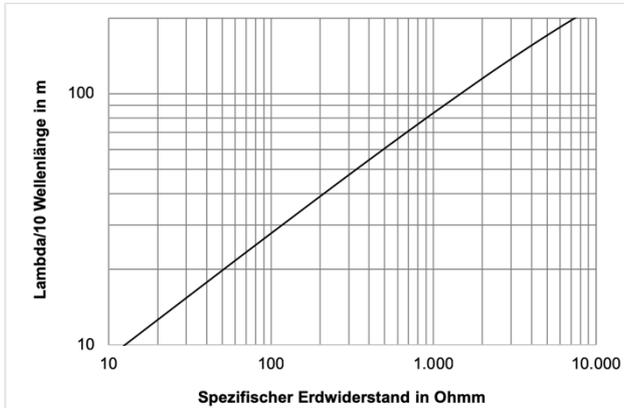


Bild 1 $\lambda/10$ Wellenlänge in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstands für eine Frequenz von 25 kHz entsprechend einem Impulsstrom 10/350

4 Berechnung mit Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics ist ein Programmpaket zur allgemeinen Lösung partieller Differentialgleichungen mit finiten Elementen. Das Programm eignet sich insbesondere zur Visualisierung von elektrischen Feldern mit Vektoren. Erdungsanlagen lassen sich berechnen wobei die belastete Schrittspannung nicht ohne größeren Aufwand darstellbar ist. In diesem Beitrag wird das Programm als Ergänzung zu GSA für folgende Fragestellungen eingesetzt:

- Prüfung von Gleitentladungen auf isolierenden Flächen
- Schrittspannung an Kanten begrenzter Asphalt-schichten

5 Berechnung mit Bodenionisation

Ionisation des Erdbodens an Elektroden ist in GSA nicht berücksichtigt. Daher wurde eine Möglichkeit gesucht, die Ionisation einzufügen.

Nach [12, 13] kann der Stoßerdungswiderstand R_{ST} für Erdungsanlagen mit Abmessungen von 3 m bis 30 m und Stoßströme mit Stirnzeiten $> 0,2 \mu\text{s}$ mit GL. 1 dargestellt werden. Für Stoßströme 10/350 ist der Stoßfaktor $\alpha = 1$; [2,3]. Damit ergibt sich ein Reduktionsfaktor K für die Berücksichtigung der Ionisation im Boden nach GL. 1, der in **Bild 2** für einen Stoßstrom 10/350 mit 100 kA Scheitelwert dargestellt ist. Der Scheitelwert der Schrittspannung ist proportional zum Stoßerdungswiderstand R_{ST} . Für eine Berechnung in GSA mit Ionisation wird gemäß **Tabelle 2** und **Tabelle 3** die zulässigen Schritt- und Berührungsspan-

nung mit dem Reduktionsfaktor multipliziert. Die Berechnung zeigt dann die Grenzen, bei denen durch Wirkung der Ionisation die Werte von 25 kV bzw. 2 kV erreicht werden.

Tabelle 2 Berücksichtigung der Ionisation. Indizes bedeuten: (P : Prospective; S : Step; T : Touch)

Ionisation	Zulässige Schrittspannung	Zulässige Berührungsspannung
Ohne	$U_{SP} = 25 \text{ kV}$	$U_{TP} = 2 \text{ kV}$
Mit	$U_{SP} * K; 25 \text{ kV} * K$	$U_{TP} * K = 2 \text{ kV} * K$

$$R_{ST} = R_A * A_i \quad \text{GL. 1}$$

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_G}}} + \alpha - 1; \quad I_G = \frac{E_G * \rho_E}{2\pi * R_A^2} \quad \text{GL. 2}$$

$$K = \frac{1}{A_i} = \sqrt{1 + \frac{I}{I_G}} \quad \text{GL. 3}$$

- A_i Koeffizient für Ionisation und Wanderwellen
- I Stoßstrom in kA (im Bereich 0-100 kA)
- I_G Grenzstrom nach
- ρ_E Spezifischer Erdwiderstand in Ohmm (Im Bereich 10-1000 Ohmm)
- E_G Grenzfeldstärke des Erdbodens (300-1000 kV/m)
- R_A Stationärer Ausbreitungswiderstand = 7,85 Ohm
- α Stoßfaktor, der Wanderwellen im Erder berücksichtigt
- K Reduktionsfaktor für die Ionisation

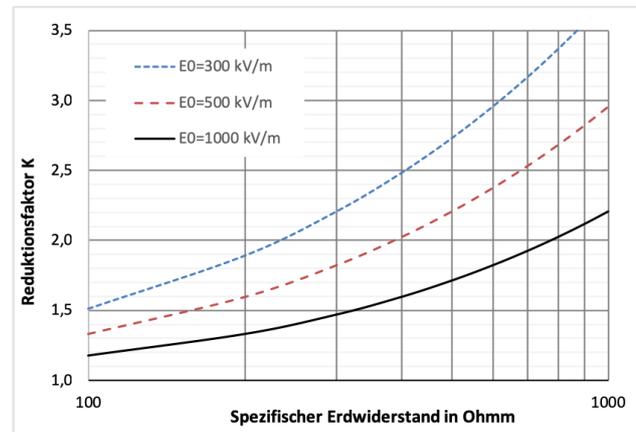


Bild 2 Reduktionsfaktor K nach GL. 1 für $I = 100 \text{ kA}$.

Tabelle 3 Reduktionsfaktoren K zur Berücksichtigung der Ionisation. $I = 100 \text{ kA}$; $R_A = 7,85 \text{ Ohm}$

Spez. Erdwiderstand	Grenzfeldstärke E_G der Ionisation		
	300 kV/m	500 kV/m	1.000 kV/m
$\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$	1,513	1,332	1,178
$\rho_E = 1000 \text{ Ohmm}$	3,728	2,956	2,207

6 Berechnete Erdungsanlage

Die beispielhaft in Anlehnung an [18] berechnete Erdungsanlage eines Schutzraums zeigt **Bild 3**. Das Erdungsgitter mit den Abmessungen 5 m x 5 m x 0,25 m mit Edelstahlstäben von 5 mm Durchmesser ist einer Tiefe von 25 cm angeordnet. Die Fangeinrichtung mit den beiden Ableitungen ist aus 8 mm Stäben aus Edelstahl modelliert. Isolierende Schichten sind in den weiteren Studien angegeben.

Messungen des spezifischen Erdwiderstands haben Schwankungen von bis zum 6-fachen des gemessenen Maximalwertes ergeben [14]. Vor der Planung einer Erdungsanlage, sollte der spezifische Erdwiderstand durch Messung bestimmt werden. Weiterhin sind jahreszeitliche Schwankungen, insbesondere tiefe Temperaturen zu beachten.

Alle Berechnungen wurden mit der für die Impulsform 10/350 äquivalenten Frequenz von 25 kHz mit einem Scheitelwert von 100 kA entsprechend der Schutzklasse III/IV durchgeführt. Als Variablen wurden betrachtet:

- Spezifischer Erdwiderstand
- Spezifischer Widerstand isolierender Schichten
- Grenzfeldstärke des Bodens (Ionisation)

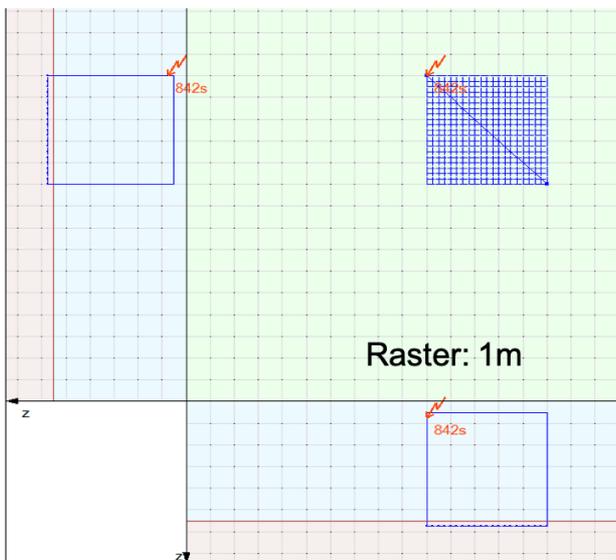


Bild 3 Berechnete beispielhafte Erdungsanlage in isometrischer Ansicht (Ausschnitt)

6.1 Konvention für die Ergebnisse der Berechnung

	Ergebnis der Berechnung für die Grenzwerte Zulässige Berührungsspannung: 2 kV 10/350; Zulässige Schrittspannung: 25 kV 10/350
Grün	Schritt- und Berührungsspannung sind ungefährlich
Gelb	Berührungsspannung ist gefährlich hoch 1) Schrittspannung ist ungefährlich
Rot	Schritt- und Berührungsspannung sind gefährlich hoch 1) 1) Personen, deren Mittelachse im roten oder gelben Bereich liegt, sind gefährdet.

6.2 Schrittspannung ohne isolierende Schicht

Die Berechnung in **Bild 4** zeigt, dass selbst bei Annahme guten Bodens mit $\rho_E = 100$ Ohmm an den Rändern und außerhalb des Gitters auch unter Berücksichtigung der Ionisation im Boden Gefahr besteht.

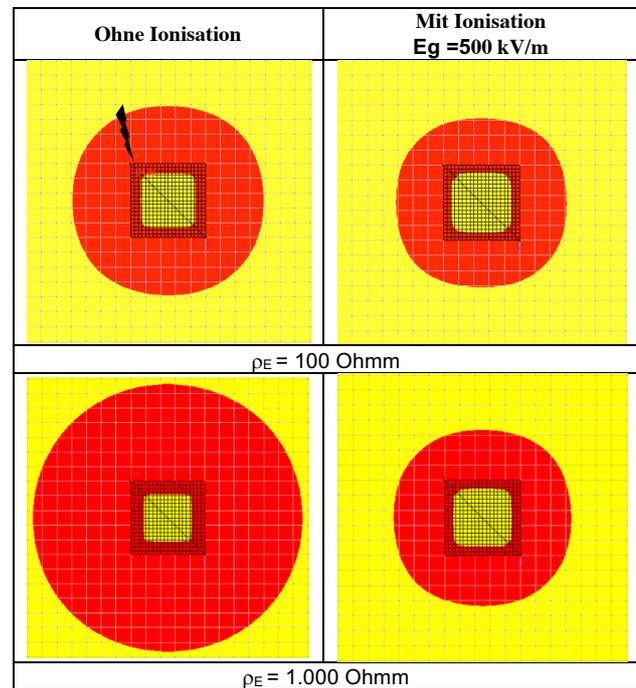


Bild 4 Schritt- und Berührungsspannung der Erdungsanlage. Rastermaß: 1m.

Zur Vermeidung der Gefahr durch zu hohe Schrittspannung an den Rändern sind folgende Maßnahmen möglich:

- Potentialsteuerung durch weitere Erdleiter
- Trockene 5 cm hohe Asphalttschicht, die mindestens den roten Bereich für $\rho_E = 1.000$ Ohmm überdeckt
- Trockene Kiesschicht von 15 cm Höhe.

6.3 Schrittspannung mit einer trockenen, isolierenden Schicht aus 5 cm Asphalt bzw. 15 cm Kies

Eine isolierende Schicht (Asphalt mit dem kleinsten Wert nach Tabelle 1) wird in GSA als eine den Erdboden gesamthaft abdeckende Schicht berechnet. Zu erkennen ist in **Bild 5** die Wirkung der Asphalttschicht bzw. der Kiesschicht und der Einfluss des spezifischen Erdwiderstands. Asphalt und Kies reduzieren die Schrittspannung.

6.4 Schrittspannung mit nasser Asphalttschicht

Mit den Werten für nassen Asphalt nach **Tabelle 1** und der Annahme, dass unterhalb einer größeren Asphalttschicht der Boden ausgetrocknet ist, werden alle folgenden Berechnungen als worst case Berechnungen für einen spezifischen Erdwiderstand von $\rho_E = 1.000$ Ohmm durchgeführt. Unter nassem Asphalt ist hier Asphalt mit einem spezifischen Volumenwiderstand zu verstehen, d.h. Asphalt ohne oberflächliche Wasserschicht. **Bild 6** zeigt, dass Asphalt

mit $\rho_{\text{Asphalt}} = 10.000 \text{ Ohmm}$ nicht ausreicht. Unter Annahme der Ionisation im Boden ist auch eine Schicht mit $\rho_{\text{Asphalt}} = 10.000 \text{ Ohmm}$ bis auf die Kanten an den Ableitungen ausreichend. Bei Asphalt mit $\rho_{\text{Asphalt}} = 100.000 \text{ Ohmm}$ besteht oberhalb des Gitters keine Gefahr.

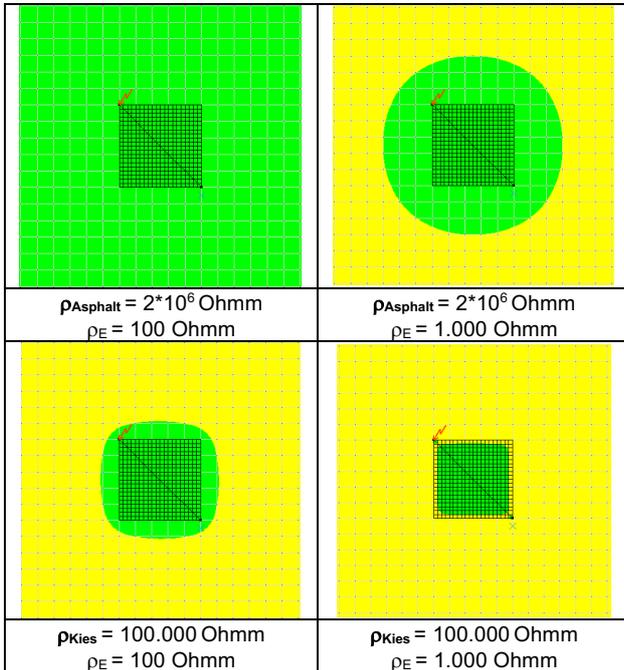


Bild 5 Schritt- und Berührungsspannung für trockene isolierende Schicht aus 5 cm Asphalt bzw. 15 cm Kies

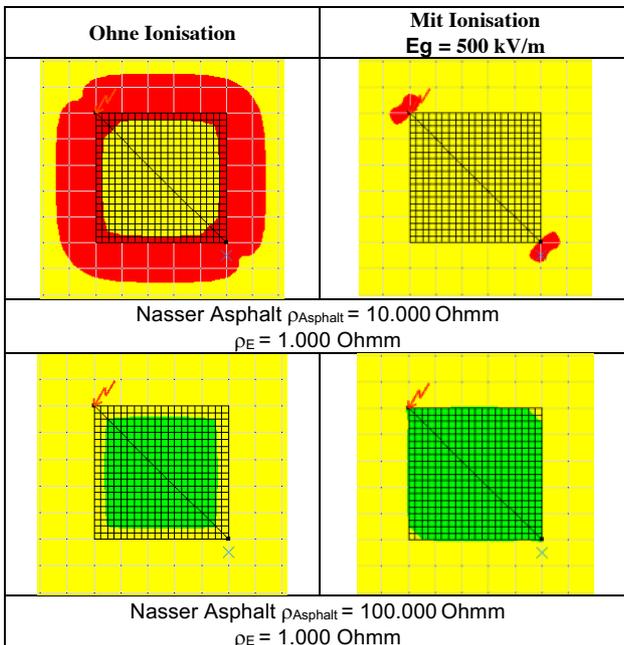


Bild 6 Schritt- und Berührungsspannung bei einer isolierenden Schicht aus 5 cm nassem Asphalt

6.5 Schrittspannung mit nasser Kiesschicht

Eine nasse Kiesschicht nach **Tabelle 1** ist nach **Bild 7** unkritisch für die Schrittspannung bis zu $\rho_E = 300 \text{ Ohmm}$. Die Berührungsspannung ist gefährlich.

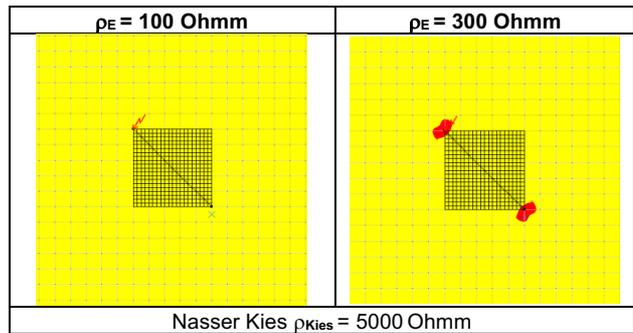


Bild 7 Schritt- und Berührungsspannung bei einer nassen Kiesschicht 15 cm hoch

6.6 Schrittspannung bei einer 10 cm hohen Regenwasserschicht auf isolierender Schicht aus 5 cm Asphalt

Obwohl bereits nasser Asphalt im obigen Abschnitt untersucht wurde, wird folgend eine 10 cm hohe Schicht aus Regenwasser mit $\rho_W = 45 \text{ Ohmm}$ auf einer trockenen, 5 cm hohen Asphalttschicht mit einem spezifischen Widerstand von $\rho_{\text{Asphalt}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Ohmm}$ über einer trockenen Erdschicht mit $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$ berechnet. Die Schritt- und Berührungsspannung werden mit dem Programm GSA auf der Wasseroberfläche berechnet und sind gemäß **Bild 8** zu groß.

Starker Regen stellt daher trotz des Gitters und hochisolierendem Asphalt eine Gefahr dar. Das gilt gemäß Abschnitt 6.8 auch für eine 2 cm hohe Wasserfläche.

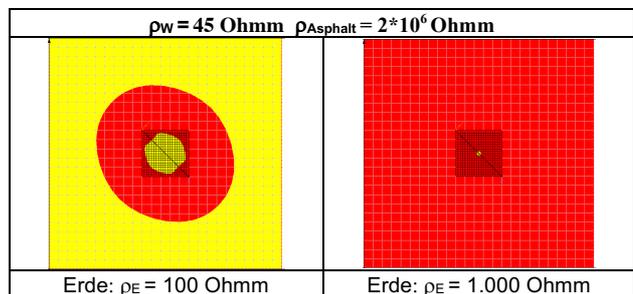
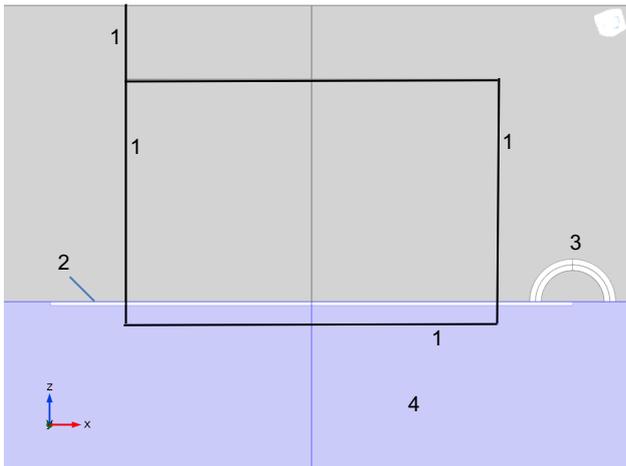


Bild 8 Schritt- und Berührungsspannung bei einer Wasserschicht von 10 cm Höhe auf Asphalt von 5 cm Höhe

6.7 Berechnung des Kanteneffekts an einer trockenen Asphalttschicht mit Comsol-Multiphysics

Die Berechnungen mit GSA wurden mit unbegrenzter Asphalttschicht ausgeführt. Daher wird folgend eine Berechnung mit einer den roten Bereich in **Bild 4** bedeckenden begrenzten Asphalttschicht von 3,5 m Durchmesser durchgeführt, **Bild 9**. Der Boden unterhalb der Asphalttschicht wird mit 1.000 Ohmm angesetzt. Die Schrittspannung wird nach **Bild 10** als belastete Schrittspannung aus dem Strom in der Personennachbildung bestimmt. Dazu wird die Person durch einen leitenden Schlauch mit einem Widerstand von 1.000 Ohm nachgebildet. Die Schrittspannung kann ausgewertet werden und bezieht sich auf die vertikale Mittenachse des Schlauchs. Die mit dem Programm Comsol-Multiphysics berechnete Schrittspannung beträgt in diesem Fall 10.121 Volt und liegt damit unterhalb des Grenzwertes

von 25 kV. Eine Person, die mit einem Fuß auf Asphalt- und mit anderen Fuß im roten Bereich steht, ist sicher.



- 1 Fangstange, Ableitungen und Erdungsgitter 0,25 m tief
- 2 Asphaltsschicht mit 5 cm dicke; $\rho_{\text{Asphalt}} = 250.000 \text{ Ohmm}$
- 3 Personennachbildung; Schlauch mit $R = 1.000 \text{ Ohm}$
- 4 Halbkugel; $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$

Bild 9 Querschnittsansicht des verwendeten 3-D Modells

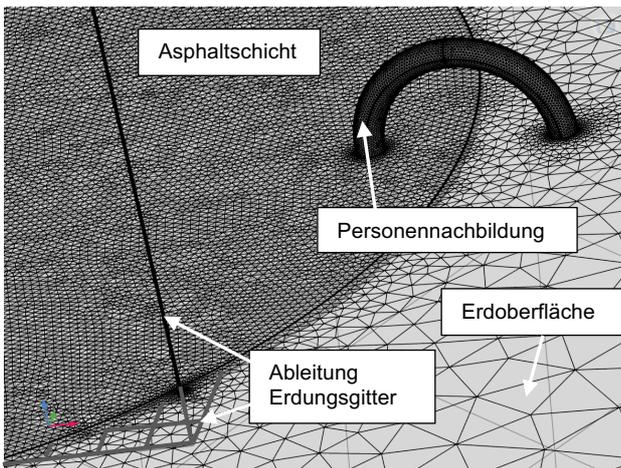


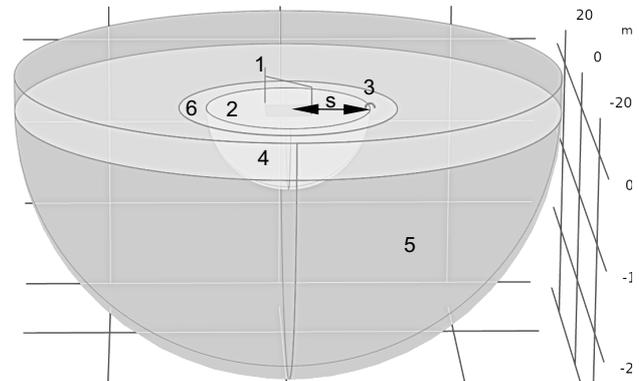
Bild 10 3-D Ansicht mit Vermaschung

6.8 Berechnung mit begrenzter und beregneter Asphaltsschicht mit Comsol-Multiphysics

Die Schrittspannung bei Starkregen und begrenzter Asphaltfläche ist gemäß **Bild 11** modelliert. Hier wurde ein Zweischichtmodell mit $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$ unterhalb der Asphaltfläche und mit $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$ außerhalb der Asphaltfläche verwendet. Die Person steht dabei auf dem Erdboden und damit in einer 2 cm oder 15 cm hohen Wasserschicht. Die Berechnung, **Tabelle 4**, zeigt, dass im gesamten Bereich der Oberfläche die Schrittspannung zu groß ist und dass Starkregen eine große Gefahr darstellt. Das Erdungsgitter und die Asphaltsschicht werden durch den gut leitenden Regen wirkungslos. In einer 2-D-Simulation wurde das Erdungsgitter zur Reduktion der Rechenzeit als leitende Platte nachgebildet. **Bild 12** zeigt ein starkes Strömungsfeld in der Wasserschicht als Grund für die hohe Schrittspannung bei Wasser auf der Asphaltfläche.

Tabelle 4 Schrittspannung an Positionen auf der Erdoberfläche im Abstand s gemäß **Bild 11**. 100 kA 10/350.

Abstand s (Bild 11)	Schrittspannung U_s bei 2 cm Regenwasser	Schrittspannung U_s bei 15 cm Regenwasser
m	kV	kV
1	76,5	45
2,5	228	159
4,5	272	229
9	112	114,5



- 1 Fangstange, Ableitungen und Erdungsgitter
- 2 Asphaltsschicht 9 m Radius, $\rho_{\text{Asphalt}} = 250.000 \text{ Ohmm}$
- 3 Personennachbildung mit Abstand s vom Mittelpunkt
- 4 Halbkugel, 9 m Radius; $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$
- 5 Halbkugel 30 m Radius; $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$
- 3 Wasserschicht 12 m Radius; $\rho_W = 45 \text{ Ohmm}$

Bild 11 3-D Ansicht des Modells zur Berechnung der Schrittspannung mit Asphalt- und Wasserschicht

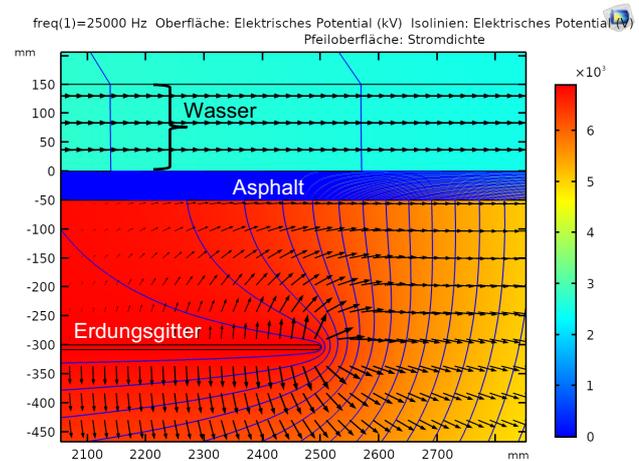


Bild 12 Darstellung des Potentials (in Farben), Äquipotentiallinien und Stromdichtevektoren als „arrow-surface“ mit logarithmischer Darstellung der Vektoren. $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$ Asphaltsschicht und darauf liegender Wasserschicht mit $\rho_{\text{Asphalt}} = 2 \cdot 10^5 \text{ Ohmm}$; $\epsilon_{\text{Asphalt}} = 3$ und Regenwasser mit $\rho_W = 45 \text{ Ohmm}$; $\epsilon_W = 80$

7 Lösung mit Potentialsteuerung

Die Lösung mit Hilfe einer Asphaltsschicht ist nur bei trockenem Asphalt zielführend, jedoch realitätsfremd. Eine Asphaltsschicht, mit Regenwasser belegt, versagt schon bei

einem Wasserstand von 2 cm Höhe. Die einzig zuverlässige Möglichkeit zur Verhinderung gefährlicher Schrittspannungen, auch oberhalb von Kanten von feinmaschigen Erdelektroden, bleibt daher die bekannte Potentialsteuerung mit Hilfe von weiteren Erdelektroden.

Ein sicherer Bereich für Schrittspannung kann im Extremfall einer 15 cm hohen Regenwasserschicht nur in einem Zweischichtmodell des Erdbodens mit unterschiedlichem spezifischen Erdwiderstand und Potentialsteuerung mit Ring- und Tiefenerdern sowie einer isolierten Ableitung/Erdeinführung gemäß **Bild 13** erreicht werden. Die isolierte Ableitung ist dabei für eine Spannung von ca. 100 kV 10/350 zu dimensionieren. Das Feldbild in **Bild 14** wurde in einer Comsol-2-D-Simulation erstellt und zeigt die Wirksamkeit der Tiefenerder.

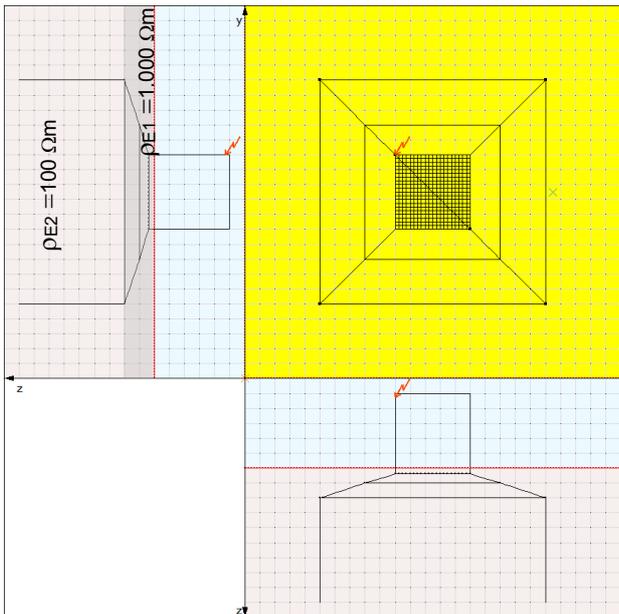


Bild 13 Schritt- und Berührungsspannung bei einer Wasserschicht von 10 cm Höhe auf Asphalt von 5 cm Höhe mit einem Zweischichtmodell.

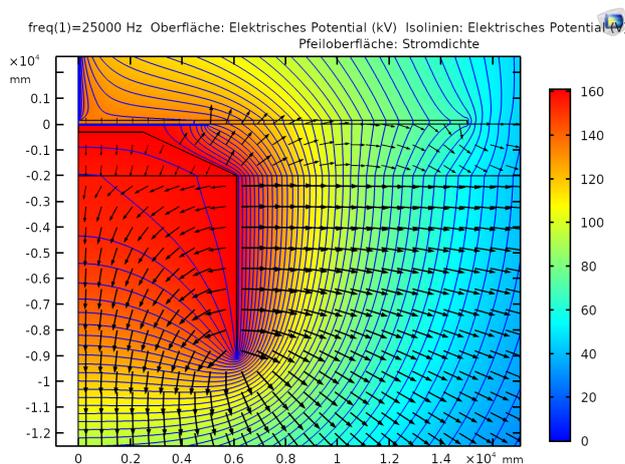


Bild 14 Darstellung des Potentials (in Farben), Äquipotentiallinien und Stromdichtevektoren als „arrow-surface“ mit logarithmischer Darstellung der Vektoren.

8 Ausbildung von Gleitentladungen

Bei einer wasserbelegten Asphaltfläche besteht ohnehin Lebensgefahr, deshalb erübrigt sich hier eine Bewertung von Gleitentladungen.

Bei einer trockenen Asphaltfläche ist die Ausbildung von Gleitentladungen an der Erdeinführung / Ableitung wegen der zu geringen Feldstärke von $< 15 \text{ kV/cm}$ nicht möglich. Oberhalb der Kante der Erdelektrode tritt auf der Oberfläche der Asphaltdecke noch eine hohe Feldstärke knapp oberhalb der Einsetzfeldstärke für Streamerentladungen auf der Erdoberfläche auf. Die Berechnung mit dem 3-D Modell hat aber gezeigt, dass die belastete Schrittspannung gerade oberhalb der Kante der Erdelektrode unkritisch ist. Gleitentladungen sind daher in diesem Bereich nicht zu erwarten, die Personensicherheit ist gegeben.

9 Zusammenfassung

Trockener Asphalt

- **Erde mit $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$:**
Für Personen auf einer trockenen Asphaltdecke mit einem spezifischen Widerstand von $\rho_{\text{Asphalt}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Ohmm}$ und einem spezifischen Erdwiderstand von $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$ besteht keine Gefahr durch Schritt- und Berührungsspannung.
- **Erde mit $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$:**
Für Personen auf einer trockenen Asphaltdecke mit einem spezifischen Widerstand von $\rho_{\text{Asphalt}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Ohmm}$ und einem spezifischen Erdwiderstand von $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$ besteht keine Gefahr durch Schrittspannung. In einem Bereich außerhalb des Erdungsgitters ist dann die Berührungsspannung zu hoch.

Trockener Kies

Erde mit $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$:

Für Personen auf einer trockenen Kiesschicht mit einem spezifischen Widerstand $\rho_{\text{Kies}} \geq 100.000 \text{ Ohmm}$ und besteht keine Gefahr durch Schrittspannung. Außerhalb des Erdungsgitters ist die Berührungsspannung zu hoch.

- **Erde mit $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$:**
Gleiche Ergebnisse wie oben.

Asphalt in nassem Zustand

Erde mit $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$:

Für Personen auf einer nassen Asphaltdecke mit einem spezifischen Widerstand $\rho_{\text{Asphalt}} \geq 10.000 \text{ Ohmm}$ und besteht keine Gefahr durch Schrittspannung. Erst ab einem Wert von $\rho_{\text{Asphalt}} > 500.000 \text{ Ohmm}$ ist auch die Berührungsspannung unkritisch.

- **Erde mit $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$:**
Für Personen auf einer nassen Asphalttschicht mit einem spezifischen Widerstand von $\rho_{\text{Asphalt}} \cong 100.000 \text{ Ohmm}$ besteht keine Gefahr durch Schrittspannung. Die Berührungsspannung ist aber zu hoch

Kies in nassem Zustand

Bei einer 15 cm hohen Schicht aus Schotter oder Kies dringt Wasser in die Zwischenräume. Dazu wurden zwei Fälle untersucht:

Fall 1 Sehr starker Regen, so dass die Schicht völlig durchwässert ist, so dass mit Wasser mit einem spezifischen Widerstand von $\rho_w = 45 \text{ Ohmm}$ zu rechnen ist. Das Ergebnis zeigt, dass hier keine Verbesserung gegenüber des alleinigen Erdbodens erreicht wird, der gefährliche Bereich verändert sich nicht.

Fall 2 Regen befeuchtet die Schicht aus Schotter oder Kies.

Material 1 (0,04 m gebrochener Granit mit Feinanteilen) nach dem Standard IEEE 80-2013 mit einem spezifischen Widerstand von $\rho_{S,K} = 1200 \text{ Ohmm}$ bei einem Anteil Regenwasser mit $\rho_w = 100 \text{ Ohmm}$.

Das Ergebnis zeigt hier ausschließlich bei einem spezifischen Erdwiderstand von $\rho_E = 50 \text{ Ohmm}$ (Dieser Wert wird aber wohl selten erreicht) sichere Bereiche. Bereits ab $\rho_E \geq 100 \text{ Ohmm}$ bestehen gefährliche Bereiche der Schrittspannung $> 25 \text{ kV}$. Die Berührungsspannung ist zu hoch in allen Bereichen.

Material 2 (0,025 m bis 0,1 m gewaschener Granit ähnlich Kies) nach dem Standard IEEE 80-2013 mit einem spezifischen Widerstand von $\rho_{S,K} = 5000 \text{ Ohmm}$ bei einem Anteil Regenwasser mit $\rho_w = 100 \text{ Ohmm}$. Das Ergebnis zeigt hier ausschließlich bei einem spezifischen Erdwiderstand von $\rho_E = 200 \text{ Ohmm} - 300 \text{ Ohmm}$ sichere Bereiche. Bereits ab $\rho_E \geq 300 \text{ Ohmm}$ bestehen gefährliche Bereiche der Schrittspannung $> 25 \text{ kV}$.

Bei einer Berechnung mit Ionisation und $\rho_E = 400 \text{ Ohmm}$ besteht keine Gefahr, bei $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$ besteht hingegen Gefahr durch zu hohe Schrittspannung. Die Berührungsspannung ist zu hoch in allen Bereichen.

Regenwasser auf einer Asphalttschicht

- Berechnung ist nur für $\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$ sinnvoll, da unterhalb einer Asphalttschicht der Boden austrocknet
- **Regenwasserschicht mit $\rho_w = 45 \text{ Ohmm}$**
Für Personen auf einer mit Regenwasser belegten Asphalttschicht mit einem spezifischen Widerstand von $\rho_{\text{Asphalt}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Ohmm}$ und einem spezifischen Erdwiderstand von **$\rho_E = 1.000 \text{ Ohmm}$** besteht bei einer Wasserhöhe von 2 cm und $> 2 \text{ cm}$ Lebensgefahr durch zu hohe Schritt- und Berührungsspannung. Ab-

hilfe ist nur möglich mit einem zweifachen Potentialsteuerring mit 4 Tiefenerdern und isolierter Einführung der Ableitung/Erdeinführung

10 Literatur

- [1] DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3)2011-10
- [2] Meppelink,J.; König,A.: Numerische Berechnung der Berührungs- und Schrittspannung. 10.VDE/ABB-Blitzschutztagung, 2013 in Neu Ulm
- [3] Meppelink,J.; König,A.: Berechnung der Schrittspannung im Blitzrelevanten Frequenzbereich. 11.VDE/ABB-Blitzschutztagung, 2013 in Neu Ulm
- [4] Deutsche Bauindustrie Bauen und Services sowie bga. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. Bundesfachabteilung Gussasphalt, Kurfürstenstrasse 129, 10785 Berlin. Beratungsstelle für Gussasphalt Anwendung e.V.Dottendorfer Str. 86. 53129 Bonn
- [5] Oburger, W.: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Springer-Verlag 1957
- [6] IEEE Std 80-2000
- [7] EN 13242 Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau
- [8] ASTM_G57-06(2012-00): Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method
- [9] DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1)2011-10
- [10] Suchanek, Sebastian: Auswirkungen von Schrittspannungen auf den Menschen. 9.VDE/ABB-Blitzschutztagung, 27.-28. Oktober 2011 in Neu Ulm.
- [11] Rock, M.: Grenzwerte für Schritt- und Berührungsspannungen an Blitzschutz-Ableitungseinrichtungen und -Erdungsanlagen. 11.VDE/ABB-Blitzschutztagung, 2015 in Neu Ulm.
- [12] Grcev, Leonid: Modeling of Grounding Electrodes Under Lightning Currents. IEEE Transactions on EMC. Vol.51, No 3, August 2009.
- [13] Cigre-Report. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. WG 01 Study committee 33.01; 1991
- [14] Gebhardt, O.: Die Bemessung der Erdung in Hochspannungsanlagen. ETZ-A Bd.96 (1975) H.9.
- [18] VDE/ABB Merkblatt Blitzschutz von Schutzhütten:

Förderung durch den „Ausschuss für Blitzschutz und Blitzforschung des VDE (ABB)“

Der Verfasser dankt dem „Ausschuss für Blitzschutz und Blitzforschung des VDE (ABB)“ für die Förderung