



# Blitzschutz von Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen – praktische Auslegung

Bernhard Schober · Lukas Schwalt · Stephan Pack

Eingegangen: 14. Januar 2022 / Angenommen: 28. Februar 2022 / Online publiziert: 4. April 2022  
 © Der/die Autor(en) 2022

**Zusammenfassung** Der Blitzschutz von Hochspannungs-Schaltanlagen liefert einen wesentlichen Beitrag für den zuverlässigen Betrieb unserer Hochspannungssysteme. Da Schaltanlagen die Knotenpunkte der elektrischen Verteil- und Übertragungsnetze darstellen, können direkte Blitzeinschläge zu Beeinträchtigungen der Versorgungssicherheit und des zuverlässigen Betriebs dieser Anlagen führen. In diesem Zusammenhang sind besonders Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen den direkten Einwirkungen von Blitzentladungen ausgesetzt, da sich deren spannungsführende Anlagenteile im Freien und in exponierter Lage befinden. Der Blitzschutz von baulichen Anlagen und Personen ist in der Norm ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 definiert. Die Norm bietet unter anderem verschiedene Methoden für die Auslegung des Blitzschutzes und kann auch auf Freiluftschaltanlagen umgelegt werden. Andererseits werden in der Norm ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 die Anforderungen an Hochspannungsanlagen behandelt, wie beispielsweise Mindestabstände und Mindesthöhen von aktiven Teilen sowie die Definition einer Gefahrenzone. Am Beispiel der praktischen Auslegung des äußeren Blitzschutzes einer 380-kV-Hochspannungs-Freiluftschaltanlage werden beide Normen miteinander kombiniert.

**Schlüsselwörter** Blitzschutz · Hochspannungs-Freiluftschaltanlage · Blitzkugelverfahren · ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 · ÖVE/ÖNORM EN 61936-1

## Lightning protection of air-insulated high voltage outdoor substations—a practical design

**Abstract** Lightning protection of high voltage substations provides a significant contribution to the reliable operation of our high voltage systems. Since substations represent the hubs of electrical distribution and transmission grids, direct lightning strikes can affect the stability of supply and the reliable operation of these systems. In this context, air-insulated high voltage outdoor substations are particularly exposed to the direct effects of lightning discharges since their active parts are located in exposed positions outdoors. Lightning protection of structures and living beings is defined in the standard ÖVE/ÖNORM EN 62305-3. This standard provides various methods for the design of lightning protection and can be adapted for outdoor substations, whereas the standard ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 deals with the requirements for high voltage installations, such as minimum distances and minimum heights of active parts and the definition of a danger zone. Both standards are combined using the example of a 380 kV high voltage outdoor substation based on the practical design of external lightning protection measures.

**Keywords** Lightning protection · Air-insulated high voltage outdoor substation · Rolling sphere method · ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 · ÖVE/ÖNORM EN 61936-1

## 1 Einleitung

Elektrische Energie zählt längst zu den heutigen Grundgütern und ist aus unserem gesellschaftlichen Leben nicht mehr wegzudenken. Zusätzlich steigt der Anteil an dezentraler Energieerzeugung durch Windkraft und Photovoltaik, weshalb den elektrischen Verteil- und Übertragungsnetzen eine tragende

B. Schober, OVE (✉) · L. Schwalt, OVE · S. Pack, OVE  
 Institut für Hochspannungstechnik und  
 Systemmanagement, Technische Universität Graz,  
 Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Österreich  
[bernhard.schober@tugraz.at](mailto:bernhard.schober@tugraz.at)

Rolle zukommt. Diese Übertragungssysteme sollen redundant betrieben werden und eine hohe Versorgungssicherheit und Zuverlässigkeit aufweisen. Einen wesentlichen Bestandteil elektrischer Netze stellen Hochspannungs-Schaltanlagen dar, welche als Knotenpunkte das gesamte Hochspannungsnetz miteinander verbinden. Das Kernstück jeder Schaltanlage bilden die Sammelschienen, welche abgehende und ankommende Leitungen miteinander verbinden. Hier gilt es jede Anlage vor externen Einwirkungen wie Blitzeinschlägen zu schützen, um längerfristige Unterbrechungen zu vermeiden und eine stabile Versorgung zu gewährleisten.

Die Norm ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 behandelt den Schutz von baulichen Anlagen und Personen und bietet verschiedene Methoden zur Auslegung des Blitzschutzes [1], der Blitzschutz von Hochspannungsanlagen wird darin nicht gesondert behandelt. In diesem Beitrag soll eine Vorgehensweise für die Auslegung des Blitzschutzes von Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen vorgestellt werden. Auf Basis des Blitzkugelverfahrens nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 wird eine Methodik entwickelt, mit welcher es möglich ist, die notwendigen Schutzbereiche rund um die aktiven Sammelschienen einer Schaltanlage zu ermitteln und zugleich die Wahrscheinlichkeit von Blitzeinschlägen zu reduzieren. Nicht behandelt werden Erdungsanlagen sowie Verletzungen durch Berührungs- und Schrittspannungen.

Anhand der Norm ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV“ werden angegebene Mindestabstände zwischen aktiven und geerdeten Anlagenteilen vorgegeben, um den zu schützenden Bereich um die spannungsführenden Sammelschienen (definiert als Gefahrenzone) festzulegen [2, 3]. Aus diesen Überlegungen ergibt sich ein um die aktiven Teile vergrößertes, zu schützendes Volumen in der Freiluftschaltanlage, in das der sogenannte Leitblitzkopf nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 nicht eindringen soll. Um direkte Blitzeinschläge in das zu schützende Volumen, definiert durch die Grenzen der Gefahrenzone um die aktiven Teile, zu verhindern, werden Fangeinrichtungen vorgesehen. Fangstangen kommt hier zum Schutz

von Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen die größte Relevanz zu. Ob eine Fangstange den Anforderungen an einen ausreichenden Blitzschutz genügt, hängt von der Positionierung und ihrer Höhe ab.

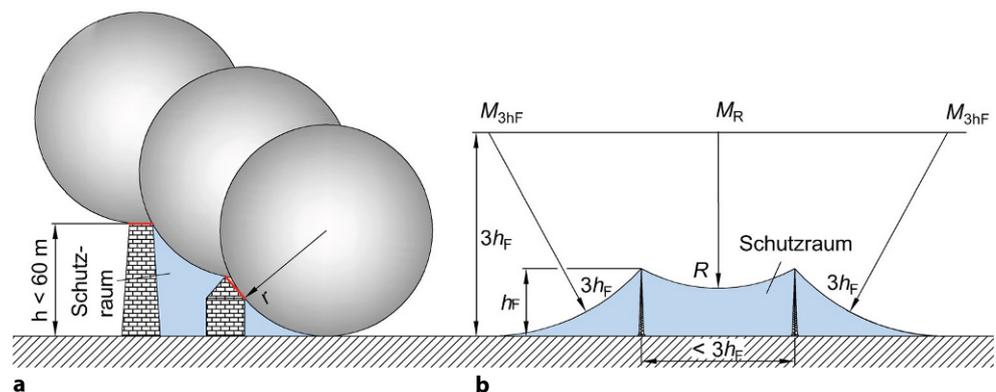
Am Beispiel einer 380-kV-Hochspannungs-Freiluftschaltanlage werden die relevanten Abschnitte beider Normen miteinander kombiniert und die Auslegung eines äußeren Blitzschutzes vorgestellt. Die gezeigte Methodik hat in die in Österreich gültigen ÖVE-Richtlinien der Reihe R 1000 Eingang gefunden [4, 5].

## 2 Methoden zur Auslegung des äußeren Blitzschutzes

### 2.1 Blitzkugelverfahren nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3

Das Blitzkugelverfahren nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 stellt eine von drei Methoden dar, um einschlagsgefährdete Bereiche eines zu schützenden Objekts bzw. Volumens zu ermitteln und die Wahrscheinlichkeit von direkten Blitzeinschlägen wesentlich zu reduzieren. Das Blitzkugelverfahren beruht auf dem sogenannten geometrisch-elektrischen Modell [1]. Dabei wird die Enddurchschlagstrecke als Kugel modelliert, wobei der Mittelpunkt dieser Kugel den Leitblitzkopf darstellt, welcher dem unteren Ende der heranwachsenden Entladung entspricht. In Abhängigkeit der Entfernung zum Leitblitzkopf können allen Punkten, von denen Fangentladungen ausgehen, bestimmte Einschlagswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Die minimale Entfernung zwischen Leitblitzkopf und dem Ausgangspunkt einer Fangentladung wird Enddurchschlagstrecke genannt, dies entspricht beim Blitzkugelverfahren dem Radius der Blitzkugel  $r$ . Bei der Oberfläche der Blitzkugel handelt es sich somit um potenzielle Einschlagspunkte. Aus diesen Überlegungen kann das Blitzkugelverfahren abgeleitet werden, wobei die Kugel in alle Richtungen über das zu schützende Volumen „gerollt“ wird (Abb. 1a). Alle Punkte, wo die Blitzkugel das betrachtete Volumen berührt, müssen geschützt werden. In Abhängigkeit vom maximalen Stromsichelwert des Blitzstromes wurden definierte Blitzschutzklassen

**Abb. 1** **a** Blitzkugelverfahren zur Ermittlung potenzieller Einschlagspunkte (rote Linien) nach [1] und **b** aufgespannter Schutzraum (blau) bei Verwendung von zwei Fangstangen nach [2]



(BSK) festgelegt, welchen unterschiedliche Radien  $r$  der Blitzkugel zugeordnet wurden. Für BSK III beträgt der Blitzkugelradius  $r=45\text{ m}$  und für BSK II ist der Blitzkugelradius mit  $r=30\text{ m}$  vorgegeben. Mit  $r=20\text{ m}$  gibt BSK I den kleinsten Radius vor [1].

## 2.2 Schutzmethode nach ÖVE/ÖNORM EN 61936-1

Die in der Norm ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 beschriebene Schutzmethode gegen direkten Blitzeinschlag (Anhang E, informativ) geht nicht von definierten Blitzkugelradien aus, sondern macht den Radius  $R$  von den Abmessungen des zu schützenden Objekts bzw. Volumens abhängig (Abb. 1b). Eine Einschränkung besteht darin, dass die Höhe des Schutzraumes auf  $25\text{ m}$  begrenzt ist, wobei diese Höhe den Verhältnissen in der  $420\text{-kV}$ -Netzebene entspricht. Der aufgespannte Schutzraum zweier Fangstangen der Höhe  $h_F$  mit einem maximalen Abstand von  $3h_F$  ist in Abb. 1b dargestellt. Das zu schützende Objekt (z. B. eine Sammelschiene) muss sich innerhalb des aufgespannten Schutzraumes befinden [2].

## 3 Blitzschutzauslegung nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 adaptiert für eine Hochspannungs-Freiluftschaltanlage

### 3.1 Methodik

In diesem Beitrag wird eine Vorgehensweise für die Auslegung des Blitzschutzes von Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen beschrieben, die auf Basis des Blitzkugelverfahrens nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 eine Methodik entwickelt, mit welcher es möglich ist die Positionen und Höhen der Fangeinrichtungen rund um die aktiven Sammelschienen zu ermitteln und zugleich die Wahrscheinlichkeit von Blitzeinschlägen zu reduzieren.

Zunächst wird ein erweiterter Bereich um die Sammelschienen als Hochspannungs-Gefahrenzone, welche es vor direkten Blitzeinschlägen zu schützen gilt, definiert. Hierzu müssen die geometrischen Abmessungen der Sammelschienen, Mindestabstände zwischen aktiven und passiven Leitern, Mindesthöhen zwischen aktiven Leitern und geerdeten Anlagenteilen, Trennungsabstände sowie Mindestmaße der Fangstangen ermittelt werden. Der Blitzschutz wurde am Beispiel der  $380\text{-kV}$ -Spannungsebene im österreichischen Höchstspannungsnetz ausgelegt.

Bei der Positionierung und Dimensionierung von Fangstangen sind anlagentechnische und normative Vorgaben zu berücksichtigen. Die Methodik zur Auslegung der Fangstangen legt die BSK II zu Grunde und wurde in folgende Teile gegliedert, wobei sich Teil 1 und Teil 2 nach der Norm ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 und Teil 3–6 nach der Norm ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 richten:

1. Sammelschienenanordnung anhand der Mindestabstände
2. Definition einer Hochspannungs-Gefahrenzone
3. Ermittlung einschlagsgefährdeter Bereiche
4. Berücksichtigung des Trennungsabstandes
5. Erforderliche Mindesthöhe der Fangstangen
6. Graphische Überprüfung

### 3.2 Sammelschienenanordnung und Definition der Hochspannungs-Gefahrenzone

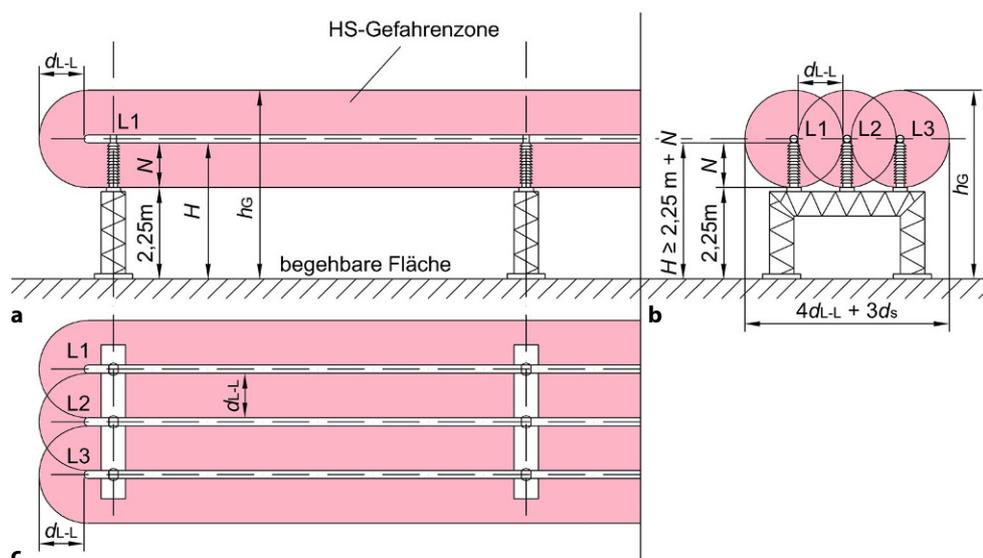
Zunächst wurden die geometrischen Abmessungen einer dreipoligen Sammelschienenanordnung, welche es zu schützen gilt, bestimmt. Dazu mussten die Mindestabstände von aktiven Teilen sowie deren Mindesthöhe über begehbbaren Flächen nach ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 ermittelt werden. Die Mindesthöhe über begehbbaren Flächen muss wenigstens  $2,25\text{ m}$  betragen [2]. Daraus kann die Mindesthöhe  $H$  von aktiven Teilen berechnet werden. Es wird nur von den vorgeschriebenen Mindestabständen ausgegangen. Je nach Schaltanlage und Bauweise kann es sein, dass sich unter den Sammelschienen Trennschalter, Transport- oder Bedienwege befinden. Weiter müssen zwischen den Gerüsten und den Sammelschienen Isolatoren, deren Länge abhängig vom Isolationspegel ist, angebracht werden. Dadurch kann die Anbringungshöhe der Sammelschienen variieren.

Aufgrund obiger Überlegungen ergibt sich um die Sammelschienen ein Bereich, der anhand der Mindestabstände definiert ist. Dieser in allen Darstellungen flächig rot gekennzeichnete Bereich wird als Hochspannungs-Gefahrenzone (HS-Gefahrenzone) bezeichnet (Abb. 2). Die Höhe der HS-Gefahrenzone  $h_G$  kann mit Gl. 1 berechnet werden, wobei  $N$  (nach ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 [2]) den Leiter-Erde-Abstand,  $d_{L-L}$  den Leiter-Leiter-Abstand und  $r_s$  den Radius der Sammelschienen darstellt:

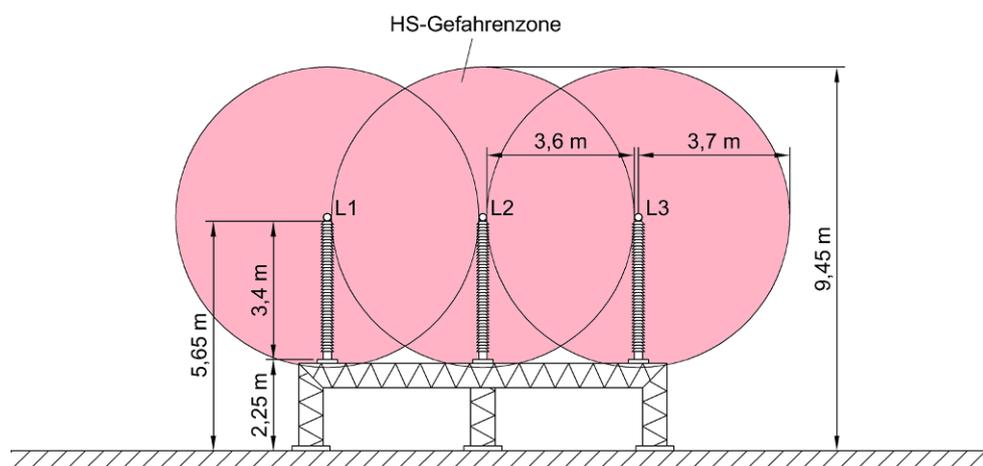
$$h_G = 2,25\text{ m} + N + d_{L-L} + 2r_s \quad (1)$$

Die Mindestabstände in der  $380\text{-kV}$ -Spannungsebene ergeben einen Leiter-Leiter-Abstand von  $d_{L-L} = 3,6\text{ m}$  und Leiter-Erde-Abstand von  $N = 3,4\text{ m}$  (Bemessungs-Blitzstoßspannung  $U_p = 1300\text{ kV}/1425\text{ kV}$  und Bemessungs-Schaltstoßspannung  $U_s = 1050\text{ kV}/1575\text{ kV}$  (Leiter/Erde und Leiter/Leiter)) [2]. Typischerweise werden Sammelschienen als Rohr ausgeführt und haben einen Durchmesser von  $d = 0,1\text{--}0,25\text{ m}$  [6]. Für die Betrachtungen wurde ein Durchmesser von  $d_s = 0,2\text{ m}$  (Radius  $r_s = 0,1\text{ m}$ ) gewählt. Um die HS-Gefahrenzone definieren zu können, wurde der Leiter-Leiter-Abstand  $d_{L-L}$  herangezogen und die HS-Gefahrenzone zylinderförmig um die drei Leiter angenommen. Da in der  $380\text{-kV}$ -Spannungsebene die Leiter-Erde-Abstände weniger als die Leiter-Leiter-Abstände betragen, reicht die HS-Gefahrenzone bis zum geerdeten Gerüst, an dem die Stützisolatoren befestigt sind

**Abb. 2** Prinzipieller Aufbau einer dreipoligen Sammelschienenanordnung mit HS-Gefahrenzone (flächig rot): **a** Längsschnitt, **b** Querschnitt und **c** Aufsicht



**Abb. 3** Dreipolige Sammelschienenanordnung einer 380-kV-Freiluftschaltanlage mit HS-Gefahrenzone (flächig rot)



(Abb. 3). Die Höhe der HS-Gefahrenzone berechnet sich hierbei nach Gl. 1 zu  $h_G = 9,45$  m.

### 3.3 Ermittlung einschlagsgefährdeter Bereiche

Zur Ermittlung einschlagsgefährdeter Bereiche am Rand der HS-Gefahrenzone um die Sammelschienen wurde das Blitzkugelverfahren mit einem Kugelradius von  $r = 30$  m für BSK II<sup>1</sup> auf das Modell angewendet (Abb. 4). Alle Bereiche, wo die Blitzkugel die Ränder der HS-Gefahrenzone berührt, sind als rote Linien eingezeichnet und stellen Bereiche mit hoher Einschlagswahrscheinlichkeit dar. Die HS-Gefahrenzone muss innerhalb des Schutzraumes der geplanten Fangstangen liegen.

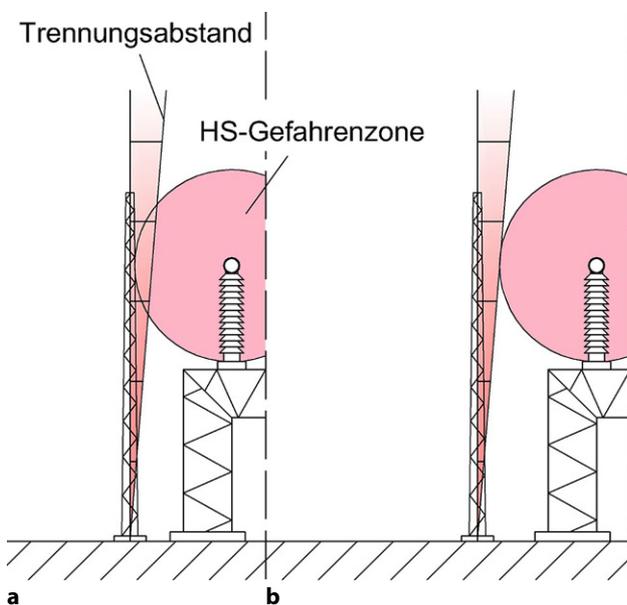
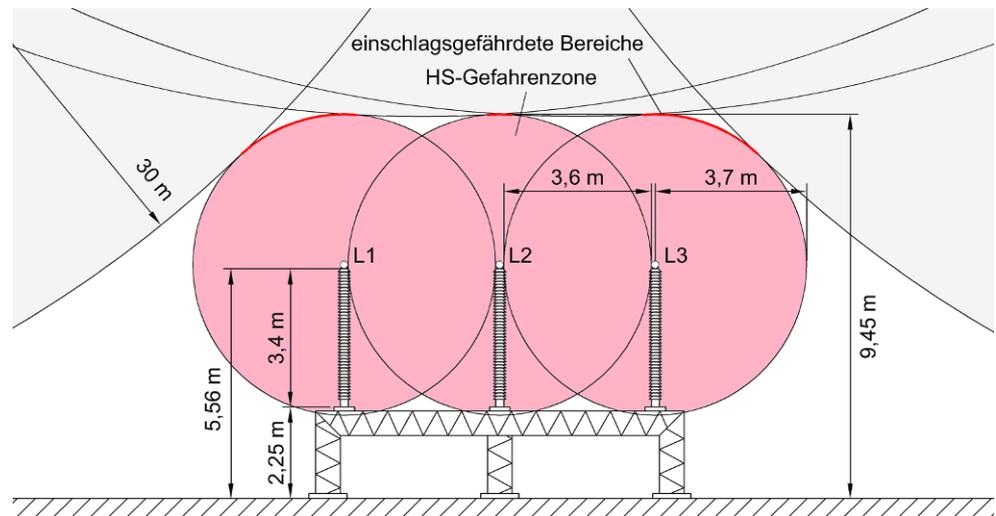
### 3.4 Berücksichtigung des Trennungsabstandes

Um aufgrund des großen Spannungsabfalls an Fangstangen bei Blitzeinschlägen einen Überschlag zu vermeiden, ist nach der Norm ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 zwischen den Fangeinrichtungen und Ableitungen des Blitzschutzsystems auf der einen Seite und den spannungsführenden Teilen auf der anderen Seite ein Trennungsabstand einzuhalten [1]. Dieser sollte mindestens dem berechneten Trennungsabstand  $s$  aus Gl. 2 entsprechen. Der Trennungsabstand  $s$  kann bei Sammelschienen nach den folgenden Überlegungen berücksichtigt werden:

- **Fall A:** Geerdete Fangstangen führen bei einem Einschlag einen Blitzstrom und sind somit als spannungsführende Teile zu betrachten. Werden die Fangstangen direkt an der Grenze der HS-Gefahrenzone platziert – was bei eingehaltenem Mindestabstand  $d_{L-L}$  der Norm ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 entspricht – würde es zu einer Verletzung des Trennungsabstandes  $s$  in der HS-Gefahrenzone kom-

<sup>1</sup> In ÖVE-Richtlinie R 1000-3 wird die Mindestblitzschutzklasse BSK II für Freiluftschaltanlagen vorgegeben [5].

**Abb. 4** Ermittlung einschlagsgefährdeter Bereiche (rote Linien) am Rand der HS-Gefahrenzone (flächig rot) einer dreipoligen Sammelschienenanordnung nach dem Blitzkugelverfahren (BSK II)



**Abb. 5** Trennungsabstand (rot-weiß) einer Fangstange zur HS-Gefahrenzone (flächig rot): **a** Verringerung der HS-Gefahrenzone durch den Trennungsabstand und **b** korrekte Berücksichtigung des Trennungsabstandes zwischen Fangstange und HS-Gefahrenzone

men (Abb. 5a). Dies kann durch die hohe Feldstärke an den Sammelschienen und die transiente Spannungsanhebung an der Fangstange zu einem Überschlag führen.

- **Fall B:** Der Trennungsabstand  $s$  zwischen den Fangstangen und der HS-Gefahrenzone wird eingehalten, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Überschlages stark reduziert wird, da es zu keiner Verletzung der HS-Gefahrenzone kommt (Abb. 5b).

Aufgrund obiger Ausführungen wurde der Trennungsabstand  $s$  nach Fall B (Abb. 5b) berücksichtigt. Der Trennungsabstand  $s$  sollte im betrachteten Beispiel mit mindestens  $s \geq 0,35$  m ausgeführt werden (Gl. 2).

Die Werte der Parameter  $k_i$ ,  $k_c$  und  $k_m$  sind in der Norm ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 definiert, wobei BSK II, Luft als Isoliermedium und eine Fangstange angenommen wurde [1].  $l$  entspricht der Länge entlang der Fangstange von dem Punkt aus, an dem der Trennungsabstand berechnet werden soll und ergibt sich somit aus der Geometrie der Sammelschienenanordnung und der HS-Gefahrenzone zu  $l = 5,75$  m<sup>2</sup>. Damit beläuft sich der Abstand  $d_{F,quer}$  zwischen den Fangstangen auf  $d_{F,quer} = 16$  m (Trennungsabstand gerundet auf  $s = 0,5$  m, Abb. 6).

$$s \geq \frac{k_i \cdot k_c}{k_m} \cdot l = \frac{0,06 \cdot 1}{1} \cdot 5,75 \text{ m} = 0,35 \text{ m} \quad (2)$$

### 3.5 Erforderliche Mindesthöhe der Fangstangen

Maßgeblich von der Höhe der Fangstange  $h_F$  hängt die Eindringtiefe  $p$  der Blitzkugel ab (i.e. wie weit die Blitzkugel in den Schutzraum hineinragt, Abb. 7). Die Fangstangen müssen eine Mindesthöhe aufweisen, sodass trotz Eindringtiefe  $p$  kein Punkt der Blitzkugel die HS-Gefahrenzone verletzt. Die Eindringtiefe  $p$  kann über den größten Abstand  $d_{max}$  zwischen zwei Fangstangen berechnet werden (Gl. 3; [1]). Der größte Abstand der Fangstangen entspricht der Diagonalen eines Rechtecks und kann mit dem pythagoreischen Lehrsatz berechnet werden:

$$d_{max} = \sqrt{d_{F,längs}^2 + d_{F,quer}^2} \quad (3)$$

<sup>2</sup> Der tatsächliche Berührungspunkt, welcher in  $d_{F,quer}$  berücksichtigt wird, liegt unwesentlich höher als der herangezogene horizontale Abstand zwischen der Sammelschiene und der Gefahrenzone.

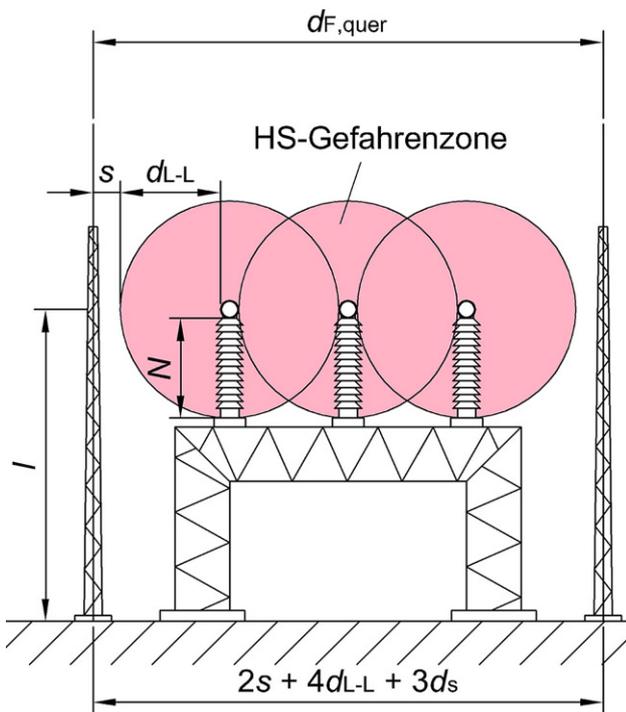


Abb. 6 Ermittlung des Trennungsabstandes unter Berücksichtigung der HS-Gefahrenzone (flächig rot) einer dreipoligen Sammelschienenanordnung

Die Formel zur Berechnung der Eindringtiefe  $p$  leitet sich aus der Formel für die Höhe eines Kreissegments mit dem Radius  $r$  (Radius der Blitzkugel) ab:

$$p = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{d_{max}}{2}\right)^2} \quad (4)$$

Abb. 8 Dreipolige Sammelschienenanordnung einer 380-kV-Freiluftschaltanlage mit HS-Gefahrenzone (flächig rot) und Fangstangen inklusive Schutzraum (blau) mit zwei Schnittebenen: **a** Schnittebene bei maximaler Eindringtiefe  $p$  und **b** Schnittebene auf Höhe gegenüberliegender Fangstangen

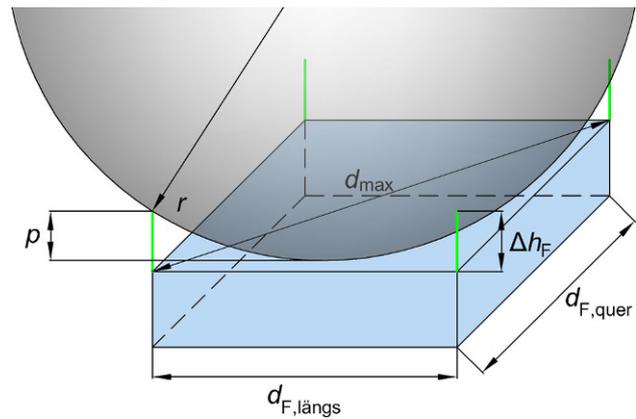
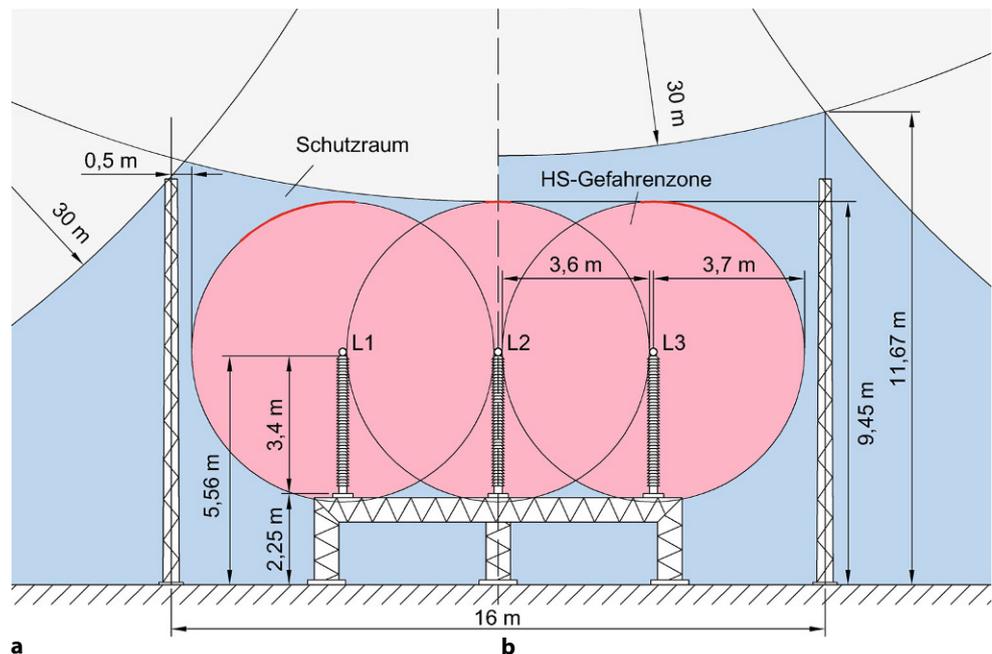


Abb. 7 Zusammenhang zwischen Eindringtiefe  $p$  und Abstand der Fangstangen (grün) zueinander

Zur Ermittlung der Fangstangenhöhe muss jedenfalls darauf geachtet werden, dass die Blitzkugel die HS-Gefahrenzone nicht verletzt. Aus dieser Bedingung ergibt sich, dass die Höhe der Fangstange  $h_F$  in jedem Fall größer als die Höhe der HS-Gefahrenzone  $h_G$  zusätzlich der Eindringtiefe  $p$  sein muss:

$$h_F > p + h_G \quad (5)$$

Bei gleicher Wahl der Abstände zwischen den Fangstangen in Längs- und Querrichtung ( $d_{F,längs} = d_{F,quer} = 16\text{ m}$ , Abschn. 3.4) und BSK II ( $r = 30\text{ m}$ ) ergibt sich die Mindesthöhe  $h_F$  der Fangstangen am Beispiel einer 380-kV-Freiluftschaltanlage zu  $h_F = 11,67\text{ m}$ . Abb. 8 zeigt die HS-Gefahrenzone (flächig rot) inklusive der ermittelten einschlagsgefährdeten Bereiche (rote Linien) sowie die Fangstangen mit der erforderlichen Mindesthöhe  $h_F$  inklusive deren Schutzraum (blau). Abb. 8a zeigt die Schnittebene bei maximaler Ein-

dringtiefe  $p$  der Blitzkugeln, da diese auf allen vier Fangstangen aufliegen (vgl. Abb. 7). Die Blitzkugeln in Abb. 8b liegen in der Schnittebene der gegenüberliegenden Fangstangen. Wie zu erkennen ist, befindet sich die gesamte HS-Gefahrenzone im aufgespannten Schutzbereich der Fangstangen.

### 3.6 Weiterführung der Methodik

Durch die Anpassung der Mindestabstände und Mindesthöhen nach ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 und somit der HS-Gefahrenzone kann die vorgestellte Methodik auch für andere Spannungsebenen adaptiert werden. Ferner sind die Enden der Sammelschienen (Abb. 2a) sowie die Übergänge zu anderen elektrischen Anlagenteilen und Betriebsmitteln gesondert zu betrachten, da sich die gesamte zylinderförmige HS-Gefahrenzone innerhalb des Schutzraumes befinden muss. Werden die Sammelschienen oberhalb der erforderlichen Mindesthöhe montiert, muss eine Anpassung der Trennungsabstände zwischen den Fangstangen und der HS-Gefahrenzone erfolgen (Abb. 5). Eine Variation des Abstandes zwischen den Fangstangen entlang der Sammelschienen  $d_{F,l\ddot{a}ngs}$  (Abb. 7) erfordert ebenfalls eine Anpassung der Mindesthöhe der Fangstangen. Bei Adaption auf Doppel-, Dreifach- und Mehrfach-Sammelschienenanordnungen ist das zu schützende Volumen anzupassen, wodurch die beschriebene Methodik gleichermaßen angewendet werden kann.

### 3.7 Vergleich der Schutzmethoden

Ein Vergleich der adaptierten Methode nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 (Abschn. 2.1) und der Schutzmethode nach ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 (Abschn. 2.2) zeigt, dass bei steigendem Isolationspegel in beiden Fällen die erforderlichen Mindesthöhen der Fangstangen zunehmen. Die Berechnungsgrundlagen beider Methoden sind in Tab. 1 angeführt.

Für das betrachtete Beispiel ergibt sich nach ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 [2] unter Berücksichtigung des Trennungsabstandes eine Mindesthöhe der Fangstangen von  $h_F = 11,99$  m. Dieses Ergebnis korreliert sehr gut mit dem nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 [1] ermittelten Wert von  $h_F = 11,67$  m. Es zeigt sich jedoch, dass ab einer bestimmten Schutzraumhöhe die erforderliche Fangstangenhöhe nach ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 im Vergleich zum Blitzkugelverfahren abnimmt. Der Grund liegt darin, dass der obere Schutzraum vom Kreisbogen mit dem Radius  $R$  abhängt (Abb. 1b). Übersteigt dieser Radius den Wert des Radius der Blitzkugel nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3, vergrößert sich zwar der aufgespannte Schutzraum, jedoch wäre eine ausreichende Schutzwirkung nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 nicht mehr gewährleistet. Diese Erkenntnis ist besonders bei der Auslegung des Blitzschutzes von Mehrfach-Sammelschienenanord-

Tab. 1 Berechnungsgrundlagen für die Fangstangenhöhen nach ÖVE/ÖNORMEN

Erforderliche Mindesthöhe der Fangstangen $h_F$	Norm
$h_F > h_G + r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{d_{\max}}{2}\right)^2}$	ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 [1]
$h_F > \frac{1}{10} \left(6h_G + \sqrt{5d_{\max}^2 + 16h_G^2}\right)$	ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 [2]

nungen, aufgrund der größeren Abstände zwischen den Fangstangen  $d_{F,quer}$ , zu berücksichtigen.

Ein Vergleich in der praktischen Anwendung zeigt, dass die Adaption des Blitzkugelverfahrens nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 einfacher anzuwenden ist, da hier die Kugelradien fest vorgegeben werden. Diese Erkenntnis spiegelt sich auch in der Komplexität der Formeln in Tab. 1 wieder.

## 4 Zusammenfassung

Hochspannungs-Schaltanlagen bilden die Knotenpunkte der elektrischen Energieversorgungsnetze. Dem Blitzschutz dieser Anlagen kommt deshalb in allen Spannungsebenen und Ausführungsformen große Bedeutung zu, um Schäden an den Anlagenkomponenten zu vermeiden und Versorgungsunterbrechungen zu minimieren. In diesem Zusammenhang sind besonders Freiluftschaltanlagen den direkten Einwirkungen von Blitzentladungen ausgesetzt, da sich deren spannungsführende Anlagenteile im Freien und in exponierter Lage befinden.

Der Blitzschutz von baulichen Anlagen und Personen ist in der Norm ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 geregelt, der Blitzschutz von Hochspannungsanlagen wird darin nicht gesondert angeführt. Die Anforderungen an Hochspannungsanlagen sind in der Norm ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 definiert, in welcher eine Schutzmethode zur Auslegung des Blitzschutzes von Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen beschrieben wird.

Auf Basis dieser beiden Normen wurde eine Methodik zur praktischen Auslegung des äußeren Blitzschutzes am Beispiel einer 380-kV-Hochspannungs-Freiluftschaltanlage erarbeitet, wobei alle relevanten Abschnitte aus den angeführten Normen einbezogen und kombiniert wurden.

Durch die Definition der Hochspannungs-Gefahrenzone nach ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 und unter Berücksichtigung von Mindestabständen und Mindesthöhen aktiver Teile wurde in diesem Beitrag ein vor Blitzeinschlägen zu schützender Bereich definiert. Mit Hilfe des Blitzkugelverfahrens und der definierten Blitzschutzklasse (BSK II) nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 können in weiterer Folge einschlagsgefährdete Bereiche ermittelt werden und die Positionierung der Fangstangen entsprechend des zu schützenden Volumens, definiert durch die Hochspannungs-Gefahrenzone, ausgelegt werden.

Bei der Anordnung der Fangstangen muss zusätzlich zur Hochspannungs-Gefahrenzone ein Trennungsabstand nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 berücksichtigt werden (Vermeidung von Erdschlüssen bei Ableitung von Blitzströmen), woraus sich die erforderliche Mindesthöhe der Fangstangen ergibt.

Auf Basis des Blitzkugelf Verfahrens nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 konnte für den darin nicht behandelten Bereich der Schaltanlagen eine Methodik entwickelt werden, mit welcher es möglich ist, die notwendigen Schutzräume rund um die aktiven Sammelschienen von Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen zu ermitteln und zugleich die Wahrscheinlichkeit von direkten Blitzeinschlägen in aktive Teile wesentlich zu reduzieren.

Die praxisbezogenen Ausführungen dieser Arbeit für den Blitzschutz von Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen stellten die Vorarbeit für die 2019 erschienenen OVE-Richtlinien der Reihe R 1000 dar. Besonders hervorzuheben ist dabei der Blitzschutz unter Berücksichtigung der Gefahrenzone und des Trennungsabstandes (OVE-Richtlinie R 1000-3). Für Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen wird in den Richtlinien Mindestblitzschutzklasse BSK II gefordert, um ein ausreichendes Schutzziel zu gewährleisten.

Tab. 2 Nomenklatur

Formelzeichen	Bezeichnung	Quelle
$d_{F, \text{längs}}$	Abstand der Fangstangen in Längsrichtung (bezogen auf die Sammelschienen)	–
$d_{F, \text{quer}}$	Abstand der Fangstangen in Querrichtung (bezogen auf die Sammelschienen)	–
$d_{L-L}$	Mindestabstand Leiter-Leiter von aktiven Teilen	–
$d_{\text{max}}$	Maximaler/größter Abstand zwischen den Fangstangen	–
$d_s$	Durchmesser der Sammelschienen	–
$h$	Höhe des zu schützenden Objekts	[1]
$H$	Mindesthöhe von aktiven Teilen	[2]
$h_F$	Höhe der Fangstange	–
$h_G$	Höhe der HS-Gefahrenzone (d. h. oberster Punkt) vom Boden aus gemessen	–
$k_c$	Parameter abhängig von der Aufteilung des Blitzstromes in den Ableitungen	[1]
$k_i$	Parameter abhängig von der Blitzschutzklasse (BSK)	[1]
$k_m$	Parameter abhängig vom Werkstoff der Isolierung	[1]
$l$	Länge entlang der Fangstange von dem Punkt aus an dem der Trennungsabstand berechnet werden soll	[1]
$M_{3HF}$	Mittelpunkt der äußeren Kreisbögen mit Radius $3h_F$	–
$M_R$	Mittelpunkt des inneren Kreisbogens mit Radius $R$	[2]
$N$	Mindestabstand Leiter-Erde von aktiven Teilen	[2]
$p$	Eindringtiefe der Blitzkugel	[1]
$R$	Radius in Abhängigkeit eines zu schützenden Objekts	[2]
$r$	Radius der Blitzkugel	[1]
$r_s$	Radius der Sammelschienen	–
$s$	Trennungsabstand	[1]

## 5 Nomenklatur

Die Nomenklatur finden Sie in Tab. 2.

**Funding** Open access funding provided by Graz University of Technology.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

1. ÖVE/ÖNORM EN 62305-3: „Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen“, OVE, Juni 2012
2. ÖVE/ÖNORM EN 61936-1: „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV – Teil 1: Allgemeine Bestimmungen“. OVE, Januar 2015
3. ÖVE/ÖNORM E 8383: „Starkstromanlagen mit Nennspannung über 1 kV“. OVE, März 2000
4. OVE-Richtlinie R 1000-2: „Wesentliche Anforderungen an elektrische Anlagen – Teil 2: Blitzschutzsysteme“, OVE, Januar 2019
5. OVE-Richtlinie R 1000-3: „Wesentliche Anforderungen an elektrische Anlagen – Teil 3: Hochspannungsanlagen“, OVE, Januar 2019
6. Kämpfer S, Kopatsch G (2012) „ABB Schaltanlagen-Handbuch, 12. Aufl., Cornelsen Verlag Scriptor



**Bernhard Schober**, studierte Elektrotechnik mit Schwerpunkt Energietechnik an der Technischen Universität Graz und hat das Masterstudium 2018 abgeschlossen. Seit 2015 ist er am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz angestellt und hat 2018 seine Doktorarbeit begonnen. Er ist auf den Gebieten der Teilentladungsdiagnose von elektrischen Betriebsmitteln bei Wechsel- und Gleichspannung

sowie der automatischen Klassifikation von Teilentladungen mit Machine Learning tätig. Im Zuge einer wissenschaftlichen Arbeit aus dem Jahr 2014 hat er sich mit dem Blitzschutz von Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen beschäftigt.



**Lukas Schwalt**, Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Wien, seit 2016 am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz angestellt, Abschluss des Doktorats im Jahr 2019. Auf den Gebieten Wolke-Erde Blitze im Alpenraum, Messung atmosphärischer Entladungen, Performance von Blitzortungssystemen, Blitzschutzkonzepte, Grundlagenforschung Gewitterereignisse, Wetterentwicklungen und Auswirkungen auf Hochspannungssysteme tätig.

Mitarbeit in OVE und CIGRE.



**Stephan Pack**, Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Graz, seit 1985 am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz und an der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH auf den Gebieten transiente Vorgänge in Hochspannungssystemen und Übertragungsnetzen, Isolationskoordination, Blitzschutz, Schutzzonenkonzepte und Erdungsanlagen tätig. Allg. beeid. und gerichtl. zertif. Sachverständiger für Hochspannungstechnik und Blitzschutzwesen, diplomierter Umwelttechniker, stellv. Leiter des Instituts.

Mitarbeit in OVE, VDE/ABB, ONC, CIGRE. Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Graz, seit 1985 am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz und an der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH auf den Gebieten transiente Vorgänge in Hochspannungssystemen und Übertragungsnetzen, Isolationskoordination, Blitzschutz, Schutzzonenkonzepte und Erdungsanlagen tätig. Allg. beeid. und gerichtl. zertif. Sachverständiger für Hochspannungstechnik und Blitzschutzwesen, diplomierter Umwelttechniker, stellv. Leiter des Instituts. Mitarbeit in OVE, VDE/ABB, ONC, CIGRE.