



Berichte  
des Deutschen Zentrums  
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 9 (2021)

# Ermittlung der Vogelschutz- wirksamkeit von Kleintierabweisern

Bestimmung von Strömen und Einschätzung der elektrischen Wirkung bei  
unterschiedlichen Isolatoren



Berichte des Deutschen Zentrums  
für Schienenverkehrsforschung, Nr. 9 (2021)  
Projektnummer 2018-U-10-1217

## Ermittlung der Vogelschutzwirksamkeit von Kleintierabweisern

Bestimmung von Strömen und Einschätzung der elektrischen  
Wirkung bei unterschiedlichen Isolatorzuständen

von

Jana Görlich<sup>1</sup>, Stefan Kornhuber<sup>1</sup>, Hans-Peter Pampel<sup>2</sup>  
Hochschule Zittau/Görlitz<sup>1</sup>, GWT-TUD GmbH Service Center AuS<sup>2</sup>

Harald Rüdiger<sup>3</sup>, Hubert Lücker<sup>3</sup>  
IVIS, Dresden<sup>3</sup>

Im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

# Impressum

## HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10  
01219 Dresden

[www.dzsf.bund.de](http://www.dzsf.bund.de)

## DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Hochschule Zittau/Görlitz  
Theodor-Körner-Allee 16  
02763 Zittau

## GWT-TUD GmbH Service Center AuS

Freiberger Straße 33  
01067 Dresden

## IVIS GmbH Luzern/Dresden

Institut für Verkehrsinfrastruktur und Systems  
Neustadtstr. 7  
6003 Luzern  
Schweiz

## ABSCHLUSS DER STUDIE

April 2020

## REDAKTION

Eisenbahn-Bundesamt  
Dr. Marion Leiblein-Wild, Referat Umwelt  
Christoph Jöckle, Referat Umwelt

## BILDNACHWEIS

Jana Görlich, Hans-Peter Pampel

## PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.21010.01](https://doi.org/10.48755/dzsf.21010.01)

Dresden, März 2021

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>9</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>13</b>
<b>2 Versuchstechnik und-durchführung .....</b>	<b>16</b>
2.1 Parameter reale Anordnung.....	16
2.2 Versuchsstrategie .....	18
2.3 Prüfkörper .....	21
2.3.1 Isolatoren.....	21
2.3.2 Kleintierabweiser .....	22
2.4 Oberflächenzustand der Prüfkörper .....	24
2.4.1 Vorbereitung Prüfkörper.....	24
2.4.2 Gereinigter Prüfkörper .....	24
2.4.3 Zusammensetzung und Applikation der leichten und starken Verschmutzungsschicht.....	24
2.4.4 Bewertung der aufgetragenen Verschmutzungsschichten .....	25
2.4.5 Realisierung der Umwelteinflüsse .....	31
2.5 Versuchsanordnungen.....	36
2.5.1 Ausleger waagrecht.....	36
2.5.2 Senkrecht in Prüfkammer .....	37
2.6 Messkreise .....	38
2.6.1 Waagerechter Ausleger .....	38
2.6.2 Senkrecht in Prüfkammer .....	40
<b>3 Elektrische Wirkungsweise KTA .....</b>	<b>42</b>
3.1 Ersatzschaltbild Isolator – KTA – Vogel .....	42
3.2 Vogel vor dem Berühren des KTAs.....	46
3.2.1 Vogel auf Erdpotential.....	46
3.2.2 Vogel auf Hochspannungspotential.....	48
3.3 Vogel im Zeitpunkt der Berührung des KTAs (impulsförmige Durchströmung) .....	48
3.3.1 Vogel auf Erdpotential.....	48
3.3.2 Vogel auf Hochspannungspotential.....	49
3.4 Vogel berührt den KTA (stationäre Durchströmung).....	50
3.4.1 Vogel auf Erdpotential.....	50
3.4.2 Vogel auf Hochspannungspotential.....	51

<b>4</b>	<b>Messergebnisse .....</b>	<b>52</b>
4.1	Versuchsdurchführung.....	52
4.2	Stromkennwerte .....	53
4.2.1	Definition impulsförmiger Strom.....	53
4.2.2	Definition stationärer Strom .....	54
4.3	Messergebnisse Impulswerte an Verbundisolatoren.....	55
4.3.1	Oberfläche: gereinigt .....	55
4.3.2	Oberfläche: leicht verschmutzt .....	58
4.3.3	Oberfläche: stark verschmutzt .....	61
4.4	Messergebnisse Stationäre Ströme bei Verbundisolatoren.....	64
4.4.1	Oberfläche: gereinigt .....	64
4.4.2	Oberfläche: leicht verschmutzt .....	66
4.4.3	Oberfläche: stark verschmutzt .....	68
4.4.4	Oberfläche: sehr schwer verschmutzt .....	70
4.5	Messergebnisse Impulswerte an Porzellanisolatoren .....	72
4.6	Messergebnisse stationäre Ströme bei Porzellanisolatoren.....	74
<b>5</b>	<b>Grenz- und Richtwerte für Vögel und Kleintiere bei elektrischer Durchströmung .....</b>	<b>76</b>
5.1	Einleitung.....	76
5.2	Vorgehensweise zur Ermittlung der Referenz- und Grenzwerte.....	78
5.3	Ergebnis der Literaturrecherche.....	78
5.4	Betrachtung zum biologischen Vorgang der Reizauslösung bei Vögeln und Säugetieren ....	79
5.5	Weitergehende Literaturrecherche zur Ermittlung von Anhaltspunkten für Reiz- und Gefährdungsschwellen.....	81
5.5.1	Einleitung.....	81
5.5.2	Anwendung eines Ladungs- und Energieimpulses in zoologischen Gärten und bei Gelegeschutzmaßnahmen .....	82
5.5.3	Reizschwellen und Grenzwerte beim Menschen .....	85
5.6	Fazit: Festlegung der Referenz- und Grenzwerte .....	86
<b>6</b>	<b>Zusammenfassender Vergleich der Messwerte.....</b>	<b>88</b>
6.1	Einleitung und einführende Betrachtungen.....	88
6.2	Gegenüberstellung der Messwerte zu den Referenz- und Grenzwerten.....	88
6.3	Verbundisolator.....	90
6.3.1	Zusammenfassende Betrachtung Gefährdung bei Berührung (impulsförmige Durchströmung).....	90
6.3.2	Zusammenfassende Betrachtung Gefährdung bei längerer Berührung (stationäre Durchströmung).....	90

6.3.3	Zusammenfassende Betrachtung Referenzwert Reizschwelle bei Berührung (impulsförmige Durchströmung).....	90
6.3.4	Zusammenfassende Betrachtung Referenzwert Reizschwelle bei längerer Berührung (stationäre Durchströmung).....	90
6.4	Porzellanisolator .....	91
6.4.1	Zusammenfassende Betrachtung Gefährdung bei Berührung (impulsförmige Durchströmung).....	91
6.4.2	Zusammenfassende Betrachtung Gefährdung bei längerer Berührung (stationäre Durchströmung).....	91
6.4.3	Zusammenfassende Betrachtung Referenzwert Reizschwelle bei Berührung (impulsförmige Durchströmung).....	92
6.4.4	Zusammenfassende Betrachtung Referenzwert Reizschwelle bei längerer Berührung (stationäre Durchströmung).....	92
6.5	Weitere Betrachtungen aus den Beobachtungen .....	93
<b>7</b>	<b>Anwendungsempfehlungen .....</b>	<b>94</b>
7.1	Allgemeine Hinweise .....	94
7.2	Anwendungsempfehlung zum untersuchten System.....	95
7.2.1	Verbundisolator.....	95
7.2.2	Porzellanisolator .....	96
7.3	Lösungsansätze zur Erhöhung der Wirksamkeit.....	97
7.3.1	Vergrößerung der elektrischen Wirkung bei impulsförmiger Durchströmung bei Kontakt .	97
7.3.2	Verringerung der Gefährdung durch einen möglichen Überschlag bei Kontakt bei Porzellanisolatoren .....	98
7.3.3	Reduktion der Möglichkeit des Überbrückens der Isolationsstrecke.....	98
<b>8</b>	<b>Weiterer Forschungsbedarf .....</b>	<b>99</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>101</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>105</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>108</b>
<b>12</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>111</b>
<b>13</b>	<b>Anhänge .....</b>	<b>115</b>
13.1	Beispiel Strommesswerte gereinigt, trocken Vergleich TUD und HSZG .....	115
13.2	Beispiel Strommesswerte leicht verschmutzt, trocken Vergleich TUD und HSZG .....	116
13.3	Beispiel Strommesswerte stark verschmutzt, trocken Vergleich TUD und HSZG .....	117





# Zusammenfassung

Elektrifizierte Eisenbahnstrecken weisen im Vergleich zu anderen Verkehrsinfrastrukturen Besonderheiten auf, die spezifische Gefahren für Vögel hervorrufen können. Oberleitungsanlagen der Bahn bieten Vögeln vielfältige Sitzplätze. Dabei besteht speziell beim gleichzeitigen Berühren von Anlagenteilen unterschiedlichen elektrischen Potentials für Vögel die Gefahr von schädigenden Durchströmungen bis hin zur Schädigung durch Auslösen eines Kurzschlusses. Die DB Netz AG setzt dabei zunehmend einen, auf dem isolierenden Teil der Hochspannungsisolatoren montierten, Kleintierabweiser (KTA) ein. Die KTA bieten keinen Schutz für größere Vögel und erfüllen für neue Anlagen nicht die Forderungen des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG). Nach § 41 BNatSchG sind für den Neubau nur konstruktive Maßnahmen vorzusehen. KTA dürfen deshalb nur zur Nachrüstung bestehender Anlagen eingesetzt werden. Ihre Wirkungsweise beruht auf mechanischer Abwehr in Verbindung mit einer Abschreckwirkung durch Entladung statischer Elektrizität<sup>1</sup>. Von Naturschutzseite bestehen Bedenken, dass Vögel bei eingesetztem KTA zu Schaden kommen können. Damit wäre für Vögel keine ausreichende Schutzwirkung gegeben.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Welche Durchströmungen treten in welcher Stärke bei Berühren des KTAs durch einen Kleinvogel auf?
- Wie beeinflussen Verschmutzung des Isolators und Umwelteinflüsse die Durchströmung?
- Überschreiten die Ströme die Reizschwelle von Kleinvögeln?
- Werden Kleinvögel durch die auftretenden Ströme gefährdet?
- Sind Kurzschlüsse bei Berühren des KTAs durch einen Kleinvogel zu erwarten?
- Welche Empfehlungen können aus diesen Ergebnissen abgeleitet werden?

Es wurden an zwei Forschungsstellen, der Technischen Universität Dresden (TUD) und der Hochschule Zittau/Görlitz (HSZG), Versuchsanordnungen aufgebaut, um die Durchströmung von Vögeln und Kleintieren unter Nutzung von Körperersatzwiderständen zu simulieren. Der Widerstand von 5 k $\Omega$  bildet den Körperwiderstand von Vögeln entsprechend der Angaben in VDE-AR-N 4210-11 [1] nach. Drei weitere Körperwiderstände von 3; 1 und 0,5 k $\Omega$  berücksichtigen kleinere Vögel und Säugetiere. Es wurden Untersuchungen bei

- sauberen, trockenen und beregneten;
- leicht verschmutzten, trockenen, beregneten und durch Nebel durchfeuchteten;
- stark verschmutzten, trockenen, beregneten und durch Nebel durchfeuchteten und
- vereisten

Verbundisolator mit einem KTA durchgeführt. Entsprechend der DB Netz AG werden Verbundisolatoren der untersuchten Bauart in bestehenden Anlagen bei technischer Machbarkeit vornehmlich als Austauschisolator eingesetzt. In Neubauanlagen kommt die untersuchte Bauart zum Einsatz, wenn Einschränkungen für den Einsatz längerer Verbundisolatoren bestehen.

Darüber hinaus wurden Untersuchungen an einem

- sauberen, trockenen;
- leicht verschmutzten, trockenen und durch Nebel durchfeuchteten;
- stark verschmutzten, trockenen und durch Nebel durchfeuchteten

---

<sup>1</sup> Wortwahl entsprechend aus [41]

Porzellanisolator mit einem KTA durchgeführt. Dies stellt entsprechend DB Netz AG gegenwärtig die Nachrüstvariante bei Bestandsanlagen dar.

Grundsätzlich muss zwischen drei Szenarien unterschieden werden:

- Der Vogel berührt den KTA: Es kommt zum impulsförmigen Durchströmen des Lebewesens aufgrund der elektrostatischen Entladung (Zeitbereich des Entladungsvorgangs bis etwa 100 ns);
- Der Vogel berührt den KTA über einen längeren Zeitraum (z. B. ms bis s): Es kommt zur stationären Durchströmung des Lebewesens;
- Aufgrund der Berührung des Vogels kommt es zur Entstehung eines Überschlages mit entsprechend thermischer Wirkung.

Zur Beurteilung der Durchströmungen von Kleinvögeln und Kleintieren wurden auf Basis von Literaturrecherchen, physiologischen Grundlagen und Analogiebeziehungen die Gefährdungsgrenzwerte (Schädigung) und Referenzwerte für die Reizschwelle (d. h. Wahrnehmungsschwelle) bei stationärer Durchströmung ermittelt. Ein Referenzwert für die Reizschwelle bei Kleinvögeln bei impulsförmiger Durchströmung konnte nicht gefunden werden.

Auf Basis des untersuchten **Verbundisolators** kann

- keine Überschreitung von Gefährdungsgrenzwerten erkannt werden;
- nicht abschließend beurteilt werden, ob es zur Überschreitung der Reizschwelle bei impulsförmiger Durchströmung kommt (es konnte kein Referenzwert für die Reizschwelle ermittelt werden);
- deshalb die Anwendung des KTAs an dem untersuchten Verbundisolatortyp (oder an Isolatoren vergleichbarer Bauweise) empfohlen werden, da auf Basis der in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen und fokussierten Fragestellungen keine Gefährdung von Kleinvögeln und Kleintieren durch den KTA festgestellt werden kann.

Auf Basis des untersuchten **Porzellanisolators** kann:

- keine Überschreitung von Gefährdungsgrenzwerten bei sauberem, trockenem Zustand erkannt werden;
- eine Überschreitung von Gefährdungsgrenzwerten bei durch Nebel durchfeuchteten, leicht verschmutztem Zustand erkannt werden;
- eine Ausbildung eines Überschlages bei stark verschmutzter und durch Nebel durchfeuchtete Verschmutzung beobachtet werden;
- deshalb für die Anwendung des KTAs an dem untersuchten Porzellanisolatortyp (oder Isolatoren vergleichbarer Bauweise) keine Empfehlung ausgesprochen werden.

Zusätzlich wurden in dieser Projektarbeit weitere Hinweise zur Weiterentwicklung des KTAs bzw. zum Einsatz von alternativen Methoden gegeben.

Neben der untersuchten elektrischen Wirkungsweise könnte möglicherweise der KTA eine noch nicht untersuchte mechanische und optische Wirkungsweise besitzen, deren Untersuchung jedoch nicht Teil dieser Forschungsarbeit war. Für die Bewertung der optischen Abschreckwirkung wären zusätzliche Untersuchungen notwendig.

Zur besseren Beurteilung der Messwerte insbesondere in Bezug auf einen Referenzwert für die Reizschwelle sind weitere physiologische Untersuchungen notwendig.

# Abstract

Compared to other transport infrastructures, electric railways have unique features that can cause specific hazards for birds. Overhead line systems of electric railways provide birds with a variety of resting places. In particular, the simultaneous contact with system components of different electrical potentials possesses a risk of damaging currents flowing or even triggering a short circuit for birds. The company DB Netz AG is increasingly using an animal deflector (german: Kleintierabweiser - KTA) mounted on the insulating part of the high-voltage insulators. The KTAs do not provide protection for larger birds and do not meet the requirements of the Federal Nature Conservation Act (§ 41 BNatSchG, according to which only constructive measures are to be provided for new installations). They may therefore only be used for retrofitting existing plants. The KTA works by providing a mechanical defence in combination with a repelling effect caused by a discharging static electricity. From the nature conservation side, however, there are concerns that birds may be harmed even when a KTA is used on an insulator. This would not provide sufficient protection for birds.

This leads to the following questions:

- Which levels of electrical currents occur when a small bird touches the KTA?
- How do pollution of the insulator and environmental influences impact the electrical current?
- Do the currents exceed the stimulus threshold of small birds?
- Are small birds endangered by the occurring currents?
- Are short circuits to be expected if the KTA is touched by a small bird?
- Which recommendations and further possibilities can be derived from these results?

Experimental set-ups were built at two research institutes, the Technische Universität Dresden (TUD) and the Hochschule Zittau/Görlitz (University of Applied Sciences Zittau/Görlitz- HSZG), to simulate the electrical flow through small birds and small animals using body substitute resistances. The resistance of 5 k $\Omega$  simulates the body resistance of birds according to the specifications in VDE-AR-N 4210-11 [1]. Three further body resistances of 3; 1 and 0.5 k $\Omega$  take smaller birds and mammals into account. During these experiments, the following investigations were carried out on one type of polymeric Insulators including a KTA:

- clean - dry and under rain conditions
- slightly polluted - dry, under rain conditions and moistened by fog
- heavily polluted, - dry, under rain conditions and moistened by fog and
- icy

According to DB Netz AG, polymeric insulators represent the new standard for construction variant or replacement variant.

Furthermore, following investigations were carried out on one type of porcelain insulators including a KTA:

- clean - dry
- slightly polluted – dry and moistened by fog
- heavily polluted, - dry and moistened by fog

According to DB Netz AG, porcelain insulators are used for retrofitting for existing installations.

Basically, a distinction must be made between three scenarios:

- The bird touches the KTA and the electrostatic discharge causes an impulse-like flow through the living being (Time range of the discharge process is up to about 100 ns).
- The bird touches the KTA for a longer period of time (time range ms to s): A stationary electrical flow through the living being occurs.
- The contact of the bird causes a flashover with a corresponding thermal effect.

To assess the electrical flow through birds and small animals, hazard thresholds (damage) and reference values for the stimulus threshold for stationary electrical flow were determined based on literature research, physiological principles and analogy relationships. A reference value for the stimulus threshold for impulse-like flow could not be determined

For the examined **polymeric insulator** following conclusions can be made:

- no exceeding of hazard thresholds is detected;
- it is not possible to conclusively assess whether the stimulus threshold is triggered by impulsive flow (no reference value for the stimulus threshold could be determined);
- for these reasons, the use of investigated animal deflector (KTA) to the examined polymeric insulator type (or insulators of comparable design) can be recommended, since based on the investigations no danger to small birds and small animals can be identified.

For the examined **porcelain insulator** following conclusions can be done:

- no exceedance of hazard threshold value can be detected in clean and dry condition;
- an exceedance of hazard threshold value can be detected when slightly polluted and wetted by fog layer;
- the formation of a flashover can be observed in the case of heavily polluted and wetted by fog layer;
- therefore no recommendation is given for the application of the use of the investigated animal deflector (KTA) for the investigated porcelain insulator type (or insulators of comparable design).

In addition, this project work provided further indications for the further development of the KTA or the introduction of alternative methods.

Besides to the examined electrical mode of operation, the KTA may have a mechanical and optical mode of operation, whereby the investigations on the behaviour of living beings towards the KTA are not part of this research work. Additional investigations would be necessary to evaluate the optical repelling effect.

For a better evaluation of the measured values, especially with respect to a reference value of the stimulus threshold, further physiological examinations would be necessary.

# 1 Einleitung

Elektrifizierte Eisenbahnstrecken weisen im Vergleich zu anderen Verkehrsinfrastrukturen Besonderheiten auf, die spezifische Gefahren für Vögel hervorrufen können. Das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) [2] regelt in Kapitel 5 den Schutz der wildlebenden Tier- und Pflanzenarten, ihrer Lebensstätten und Biotope. In Kapitel 5 Abschnitt 2 „Allgemeiner Artenschutz“ trifft § 41 Festlegungen zum Vogelschutz an Energiefreileitungen. § 41 Satz 1 BNatSchG lautet: „Zum Schutz von Vogelarten sind neu zu errichtende Masten und technische Bauteile von Mittelspannungsleitungen konstruktiv so auszuführen, dass Vögel gegen Stromschlag geschützt sind.“ und gilt auch für Oberleitungsanlagen von Eisenbahnen. Um den gesetzlichen Vorgaben des BNatSchG zum Schutz von Vögeln gerecht zu werden, sind in der Richtlinie (Ril) 997.9114 „Vogelschutz an Oberleitungen“ der DB Netz AG Maßnahmen zum Vogelschutz an Oberleitungsanlagen seit 2012 verankert. Derzeit befindet sich die Ril 997.9114 in der Überarbeitung, um die im BNatSchG vorgegebenen Anforderungen vollumfänglich umzusetzen.

Oberleitungsanlagen der Bahn bieten Vögeln vielfältige Sitzplätze. Dabei besteht speziell beim gleichzeitigen Berühren von Anlagenteilen unterschiedlichen elektrischen Potentials für Vögel die Gefahr von schädigenden Durchströmungen bis hin zum Auslösen eines Kurzschlusses. Der Kurzschluss als kritischster Fall ist mit einem Leistungslichtbogen verbunden. Dieser führt in der Regel zum Tod des Vogels und kann darüber hinaus eine nicht unerhebliche Beschädigung der Bahnanlage verursachen, mitunter mit Folgeschäden durch Böschungsbrände. Eine schädigende Durchströmung liegt vor, wenn der durch die Potentialdifferenz angetriebene Strom durch den Körper eines Lebewesens so groß ist, dass nachhaltige physiologische Schädigungen durch strombedingte thermische bzw. chemische Prozesse eintreten.

Schutzziel ist somit, die Gefahr, dass der Vogel gleichzeitig verschiedene elektrische Potentiale berührt, zu minimieren. Prinzipielle Möglichkeiten zum Erreichen dieses Schutzzieles sind:

- das Vergrößern des Abstandes von Anlagenteilen verschiedenen Potentials;
- das isolierende Abdecken von Anlagenteilen eines Potentials;
- Barrieren mit abweisender Wirkung an bzw. zwischen den Potentials oder
- Anflug- bzw. Sitzgelegenheiten in ausreichendem Abstand zum zweiten Potential.

Die Gefahr für Vögel durch gleichzeitiges Berühren von Anlagenteilen unterschiedlichen Potentials in Oberleitungsanlagen der Bahn ist besonders an den im Tragwerk befindlichen Hochspannungsisolatoren gegeben. Diese gewährleisten die galvanische Trennung mittels Isolieren zwischen den leitfähigen spannungsführenden, d. h. auf Hochspannungspotential befindlichen, Bauteilen der Oberleitung und den leitfähigen, über die Masten mit Erdpotential verbundenen Teilen des Tragwerkes. Die Distanz zwischen Hochspannungs- und Erdpotential ist an den Hochspannungsisolatoren in der Regel am geringsten. Konkretes Schutzziel ist somit hier, die Gefahr des gleichzeitigen Berührens beider Potentiale an den Isolatoren zu minimieren. Zum Erreichen dieses Zieles wird durch die DB Netz AG im Neubau vornehmlich die Verlängerung der Isolatoren favorisiert. Sie sieht derzeit jedoch eine Verlängerung des Isolators nicht in jedem Fall als realisierbar an. Z. B. bestehen konstruktive bzw. anlagenbedingte Beschränkungen einer Verlängerung bei Maßnahmen zur Minimierung von Risiken in Bestandsanlagen sowie bei mit Druckkraft belasteten Isolatoren. In diesen Fällen erfolgt der Einsatz von Barrieren mit abweisender Wirkung.

Die DB Netz AG setzt dabei zunehmend Kleintierabweiser (KTA) ein, die auf dem isolierenden Teil von nicht verlängerten Hochspannungsisolatoren montiert sind. Die Wirkungsweise der eingesetzten KTA beruht auf der mechanischen Abwehr in Verbindung mit einer Abschreckwirkung durch Entladung statischer Elektrizität. Auf Grund der Abmessungen eines nicht verlängerten Isolators mit montiertem KTA

wird vornehmlich von einer Schutzwirkung für Kleinvögel und Kleintiere ausgegangen. Am KTA befindliche Elektroden laden sich ohne Berührung elektrisch auf und verursachen bei Berührung bzw. mittels Ankoppelfunke kurz vor Berührung durch den Kleinvogel einen impulsförmigen Entladestrom. Dieser Stromimpuls soll abschreckend wirken und somit einen Abflugreflex beim Kleinvogel auslösen. An Streckenabschnitten, an denen es vermehrt zu Kurzschlussereignissen kommt, werden von der DB Netz AG seit 2007 bereits mit KTA nachgerüstet. Die Basis dafür bilden über mehrere Jahre erfasste Daten zu Häufigkeit, Zeitpunkt und geographischer Lage von Kurzschlussereignissen. Von Naturschutzseite bestehen Bedenken, dass Kleinvögel bei eingesetztem KTA trotzdem zu Schaden kommen können. Damit wäre für Kleinvögel keine ausreichende Schutzwirkung gegeben. Folgende Gefährdungsszenarien werden dabei als möglich erachtet:

- Durch Berührung der Elektroden des KTAs vermindert sich die Distanz zwischen Hochspannungs- und Erdpotenzial auf die Distanz vom KTA bis zum gegenüberliegenden Ende des Isolators. Die verkürzte Isolierstrecke könnte zu erhöhten schädigenden Durchströmungen des Vogels führen.
- Besonders kritisch werden bei dieser verkürzten Isoliertrecke Verschmutzungen der Oberfläche des Isolators verbunden mit Umwelteinflüssen wie Regen, Tau und Eis gesehen. Diese könnten unter Umständen das Isoliervermögen der verbleibenden Isolierstrecke zusätzlich verringern. Das so verminderte Isoliervermögen könnte bei Berühren des KTAs durch den Vogel zu schädigenden Durchströmungen bis hin zum Kurzschluss führen.
- Die elektrostatische Aufladung der Elektroden des KTAs und damit der bei Berührung durch den Vogel fließende impulsförmige Entladestrom schreckt den Vogel möglicherweise nicht nur ab, sondern könnte physiologische Vorgänge verursachen, welche einen Absturz des Vogels mit entsprechenden Verletzungen bzw. zu Tode kommen des Vogels nach sich ziehen könnten.
- Die elektrostatische Aufladung der Elektroden des KTAs und damit der bei Berührung durch den Vogel fließende impulsförmige Entladestrom schreckt den Vogel möglicherweise nicht ab; die mechanische Abwehr ist ebenfalls wirkungslos.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Welche Durchströmungen in welcher Stärke treten bei Berühren des KTAs durch einen Kleinvogel auf?
- Wie beeinflussen Verschmutzung des Isolators und Umwelteinflüsse die Durchströmung?
- Überschreiten die Ströme die Reizschwelle von Kleinvögeln?
- Werden Kleinvögel durch die auftretenden Ströme gefährdet?
- Sind Kurzschlüsse bei Berühren des KTAs durch einen Vogel zu erwarten?

Auf Grund der fehlenden Datengrundlage zum elektrischen Verhalten des KTAs, insbesondere bei verschiedenen Umwelteinflüssen und Verschmutzungszuständen von Isolatoren, konnten diese teilweise konträren Fragestellungen bisher nicht abschließend beantwortet werden. Der Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU) lehnt daher den KTA der eingesetzten Bauart solange ab, bis ein Nachweis erbracht ist, dass Kleinvögel beim Einsatz dieser KTA keinen Schaden nehmen. Dabei geht es neben der direkten Gefährdung durch Stromschläge auch um sekundäre Verluste, etwa durch Absturz infolge Schreckwirkung.

Hieraus leitet sich der Gegenstand des Projektes ab: die experimentelle Ermittlung von Daten zum tiefen Verständnis des elektrischen Verhaltens des Systems KTA-Isolators und die Bewertung der physiologischen Wirkung der auf die Vögel einwirkenden elektrischen Kenngrößen. Das Ziel des Projektes ist, bewerten zu können, ob bei Einsatz des KTAs das Schutzziel „Verhindern einer schädigenden Durchströmung bis hin zum Kurzschluss“ gewährleistet wird.

Das Forschungsprojekt wird über die gesamte Dauer durch eine Arbeitsgruppe begleitet. Diese projektbegleitende Arbeitsgruppe (PAG) ist vom Eisenbahn-Bundesamt (EBA) initiiert und setzt sich aus Vertreterinnen und Vertretern

- des EBA,
- des BMVI-Expertennetzwerks,
- der DB Netz AG,
- der DB AG Konzernfachstelle Umwelt,
- dem NABU,
- des Institutes für Vogelforschung Wilhelmshaven und
- des Zoologischen Forschungsmuseums Alexander Koenig, Bonn

zusammen. Die PAG leistet auf Basis des breiten Fachwissens folgende maßgebliche Beiträge zum Forschungsvorhaben:

- Die kontinuierliche Konkretisierung und Schärfung der Fragestellungen.
- Die Diskussion der vorgeschlagenen Versuchsstrategie mit abschließender Festlegung der zu untersuchenden Isolatoren und KTA, den einzustellenden Verschmutzungen und Umwelteinflüssen sowie der zu verwendenden Versuchsanordnung.
- Die Diskussion der Messwerte und die Ableitung ergänzender Versuche.
- Die Diskussion der aus dem verfügbaren Fachwissen zur physiologischen Wirkung von Strömen bei Kleinvögeln vorgeschlagenen Ableitung von Schwellen zur Wahrnehmbarkeit bzw. Gefährdung mit abschließender Festlegung von Bewertungsgrenzen zur Schutzwirkung des KTAs.

Während der Projektlaufzeit erfolgten drei Treffen der PAG mit dem Forschungsnehmer, in denen die genannten Beiträge zu Zielrichtung, Untersuchungsdesign und weiterer Vorgehensweise unter Berücksichtigung der Zwischenergebnisse diskutiert und einvernehmlich festgelegt wurden.

## 2 Versuchstechnik und-durchführung

### 2.1 Parameter reale Anordnung

Die zu untersuchenden KTA kommen an Hochspannungsisolatoren in Oberleitungsanlagen in Verantwortung der DB Netz AG zum Einsatz.

Oberleitungsanlagen dienen als Bestandteil der Energieversorgung elektrischer Bahnen der Zuführung der vom elektrischen Triebfahrzeug benötigten elektrischen Energie. Die elektrische Energie wird dabei über die Fahrleitung bereitgestellt und vom Stromabnehmer des Triebfahrzeuges entnommen [3]. Die Bahnstromsysteme der DB AG werden mit Einphasenwechselstrom mit einer Frequenz von 16,7 Hz und einer Nennspannung von 15 kV betrieben. Die am Fahrzeugstromabnehmer entsprechend DIN EN 50163 [4] zugelassene höchste Dauerspannung beträgt dabei 17,25 kV. Die Rückführung der Energie erfolgt über das Gleis, auf dem sich das elektrische Triebfahrzeug befindet.

Die Oberleitungsanlagen in Verantwortung der DB Netz AG sind als Kettenwerks oberleitungen ausgeführt. Der Fahrdraht befindet sich je nach Bauart in einem Mindestabstand von 4,80 bis 6,50 m über dem Gleis und bildet dabei mit Hänger und Tragseil das Längskettenwerk. Dieses wird an bzw. zwischen den Oberleitungsmasten von Quertrageinrichtungen (quer zur Gleisrichtung) gehalten. Die Quertrageinrichtungen können als Rohrschwenkausleger, zwei- und mehrgleisiger Ausleger oder als Quertragwerk ausgeführt sein. Rohrschwenkausleger sind vornehmlich auf ein- und zweigleisigen Strecken eingebaut. In Bahnhöfen und mehr als zweigleisigen Strecken kommen Ausleger und Quertragwerke zum Einsatz [3]

Ein sicherer und zuverlässiger Betrieb einer Oberleitungsanlage ist nur möglich, wenn die in die Fahrleitung eingespeiste Energie so verlustarm wie möglich am Triebfahrzeug zur Verfügung steht. Das wird durch galvanische Trennung der spannungsführenden von den geerdeten Teilen der Oberleitungsanlage mittels Isolierens erreicht. Die dafür eingesetzten Hochspannungsisolatoren müssen somit zuverlässig das Hochspannungspotenzial vom Erdpotenzial trennen. Die Hochspannungsisolatoren sind in der Regel Bestandteil der Quertrageinrichtungen und dort je nach Bauart senkrecht, waagrecht oder schräg angeordnet (Abbildung 1). Mögliche Bauarten sind Glaskappen-, Porzellan- und Verbundisolatoren. Alle drei Bauarten sind derzeit in den Oberleitungsanlagen der DB Netz AG montiert. Glaskappen- und Porzellanisolatoren finden sich vornehmlich in Bestandsanlagen. Jegliche Neubauten werden mit Verbundisolatoren realisiert. Dominierend in den Oberleitungsanlagen der DB Netz AG sind Porzellan- und Verbundisolatoren mit steigendem Anteil der Verbundisolatoren (Aussage DB Netz AG während der Projektbesprechungen mit PAG).

Vorteile von Porzellanisolatoren sind die hohe Zug- und Druckfestigkeit sowie die hohe chemische Stabilität, welche eine gute Beständigkeit gegen äußere Einflüsse, wie z. B. UV-Strahlung, gewährleistet. Nachteile sind das relativ hohe Gewicht und die Gefahr der Verringerung des Isoliervermögens bei Befuchtung von auf der Porzellanoberfläche angelagerten Fremdschichten. Fremdschichten können je nach Einbauort des Isolators aus Industriestäuben, Salz, Pollen, Sand bestehen.

Vorteile der Verbundisolatoren sind die geringe Masse und die wasserabweisenden Eigenschaften der Oberfläche bei Benetzung mit Regen, Nebel oder Tau (Hydrophobie). Durch die Hydrophobie bildet sich auf der Oberfläche des Isolierstoffes keine geschlossene Flüssigkeitsspur. Die wasserabweisende Eigenschaft wird auch auf anhaftende Schmutzschichten des Isolators übertragen, man spricht hier vom Hydrophobietransfer. Durch den Hydrophobietransfer tritt vergleichend zum Porzellanisolator keine bzw. eine nicht so starke Verringerung des Isoliervermögens auf. Nachteile des Verbundisolators sind eine geringere Druckfestigkeit und eine teilweise geringere chemische Beständigkeit [5].



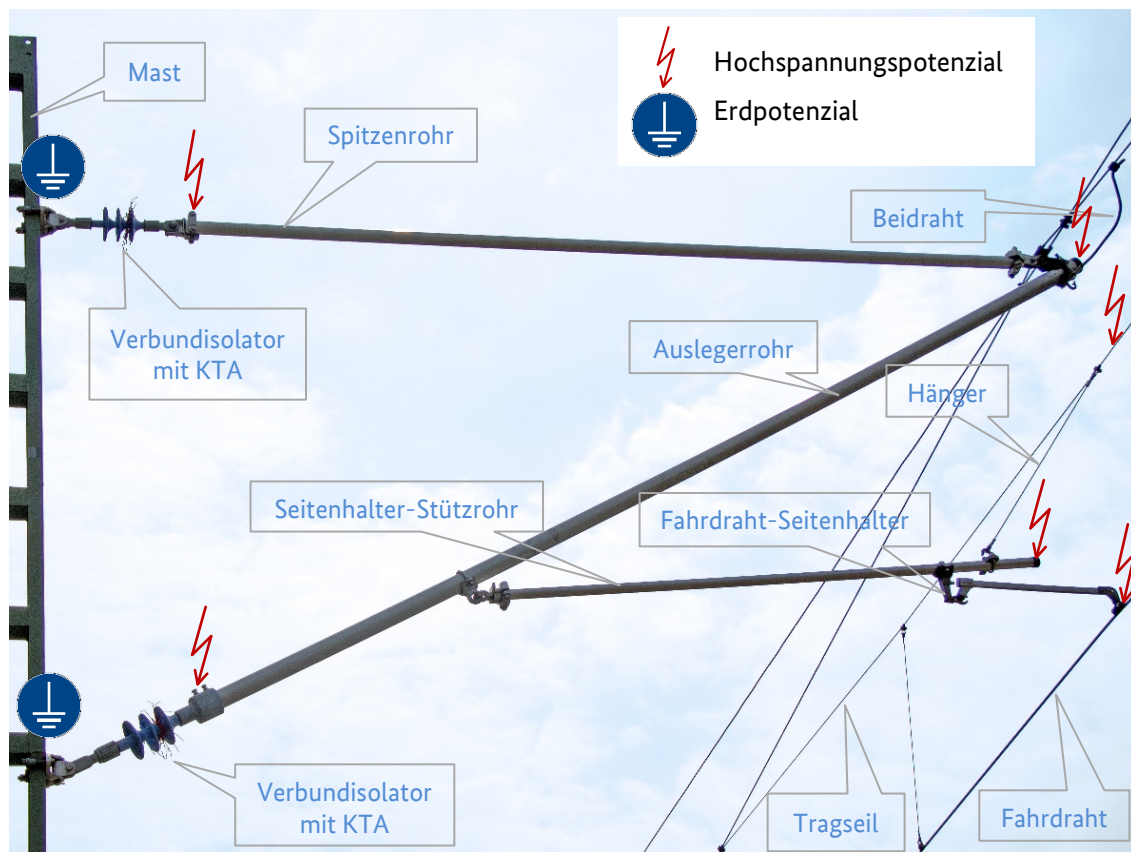


Abbildung 1: Einzelmast mit Rohrswenkauslager (Bahnhof Dresden Klotzsche – Brücke Nesselgrund)

Nutzt ein Vogel die Oberleitungsanlage als Sitzplatz, kann dieser während seines An- oder Abfluges bzw. bei Bewegungen während der Rast einen Isolator gegebenenfalls komplett oder größtenteils überbrücken. Da der Vogel keine isolierenden Eigenschaften hat, d. h. der elektrische Widerstand des Vogels ist sehr viel kleiner als der des Isolators, kann es durch die Überbrückung des Isolators zu einem Kurzschluss zwischen den geerdeten- und spannungsführenden Komponenten der Oberleitungsanlage kommen. Hierbei ist es sehr wahrscheinlich, dass der Vogel eine tödliche Durchströmung erleidet bzw. durch die thermischen Auswirkungen eines Lichtbogens geschädigt wird bzw. zu Tode kommt [6]. Ob der Vogel vornehmlich Hochspannungs- oder Erdpotential befindliche Anlagenteile anfliegt bzw. auf diesen rastet, ist zunächst unerheblich. Um eine Überbrückung des Isolators zu vermeiden, werden u. a. in der Oberleitungsanlage an den Isolatoren KTA eingesetzt. Diese sind auf dem der Hochspannung zugewandten Drittel des isolierenden Teiles des Isolators montiert (Abbildung 1). Wie bereits einleitend ausgeführt, soll der KTA bei Berührung der Elektroden durch die Entladung statischer Elektrizität eine Abschreckwirkung und somit einen Abflugreflex beim Vogel auslösen. Darüber hinaus soll eine komplette Überbrückung des Isolators durch mechanische bzw. optische „Abweisung“ verhindert werden.

Vögel, welche die Oberleitungsanlagen als Sitzplatz nutzen, sind in ihrer Art und Größe vielfältig. Außerdem können Oberleitungsmaste auch von Kleinsäugetieren beklettert werden. Größe und Art des Tieres hat Einfluss auf den elektrischen Widerstand des Tieres.

Das System Isolator-KTA ist im praktischen Betrieb unterschiedlichsten Umwelteinflüssen ausgesetzt. Eine Beeinflussung des elektrischen Verhaltens des Systems Isolator-KTA wird bei Verschmutzung des Isolators und durch Wiedereinflüsse gesehen. Die auf den Oberflächen des Isolators anhaftenden Verschmutzungen (z. B. Staub, Salz, Pollen, Vogelkot) werden als Fremdschicht bezeichnet. Verschmutzungen auf den Oberflächen von Isolatoren enthalten im Zusammenspiel mit Feuchtigkeit (z. B. Regen, Nebel, Frost) freie Ladungsträger und setzen so das Isoliervermögen des Isolators herab. Art und Stärke

der Verschmutzung ist ortsabhängig und kann regional stark voneinander abweichen. Um eine belastungsgerechte sichere Auslegung der Hochspannungsisolatoren für die Oberleitungsanlage zu gewährleisten, werden den Regionen bzw. Einsatzorten Verschmutzungsklassen mit entsprechenden Leitfähigkeiten der Fremdschicht zugeordnet. Abhängig von diesen Verschmutzungsklassen können dann Isolatoren ausgewählt werden, die diese Verschmutzung sicher beherrschen. Der Nachweis der entsprechenden Festigkeit der Isolatoren wird im Labor an Isolatoren mit künstlich aufgebracht Fremdschicht vergleichbarer Leitfähigkeit erbracht.

Die dargestellten Parameter der realen Anordnung wurden im Rahmen des Auftakttreffens zum Projekt durch die PAG diskutiert und als wesentlich bestätigt. Des Weiteren wurde der Ansatz bestätigt, durch geeignete Versuchsaufbauten, Versuchsparameter und Versuchspläne ein breites Spektrum der praktisch auftretenden Parameter und deren Einfluss auf die gestellten Fragen zu ermitteln. Die mit Projektstart vorgeschlagenen Versuchsaufbauten, Versuchsparameter und Versuchspläne wurden ebenfalls im Rahmen der Projekttreffen mit der PAG diskutiert, gemeinsam präzisiert und von der PAG bestätigt.

## 2.2 Versuchsstrategie

Ziel der Versuche ist das Ermitteln von praxisrelevanten elektrischen Größen, welche auf Vögel während des Berührens eines auf einem Isolator montierten Kleintierabweisers (KTA) einwirken können. Zur Beherrschung des Versuchsumfangs und der Parametervielfalt werden zu den jeweiligen Einflüssen praxisnahe Zustände definiert und so weit wie möglich, mittels eingeführter reproduzierbarer Versuchsmethoden (genormte oder veröffentlichte und im Konsens erarbeitete Vorgehensweisen), nachgebildet.

Als praxisrelevant, d. h. in der Praxis (Realität) die Größe der elektrischen Einwirkungen beeinflussend, werden folgende Parameter definiert:

- der Isolortyp mit zugehörigem KTA (folgend Prüfkörper genannt),
- der Zustand der Oberfläche des Prüfkörpers,
- auf den Prüfkörper wirkende Umwelteinflüsse,
- die Anordnung des Prüfkörpers im System,
- die Größe des Körperwiderstandes des Kleinvogels und
- die Sitzposition des Kleinvogels vor Annäherung an den KTA.

Die Abmessungen, das Material und die Gestaltung des **Isolators** können Einfluss auf die Höhe, der auf den Elektroden des KTAs verfügbaren Ladung und damit auf den zum Zeitpunkt der Berührung des KTAs fließenden impulsförmigen Strom haben. Des Weiteren ist die sich bei darauffolgender dauerhafter Berührung des KTAs einstellende elektrische Durchströmung des Vogels ebenfalls vom Material und den Abmessungen des Isolators abhängig. Eine besondere Abhängigkeit besteht dabei hinsichtlich des Verhaltens bei verschmutzten und/oder feuchten Isolierstoff-Oberflächen. Z. B. sind die Oberflächen von Verbundisolatoren wasserabweisend (hydrophob). Diese Eigenschaft wird auf die am Isolierstoff anhaftende Schmutzschichten übertragen. Durch diesen Hydrophobietransfer tritt vergleichend zum Porzellanisolator keine bzw. eine nicht so starke Verringerung des Isoliervermögens auf. Bei Befeuchtung eines verschmutzten Porzellanisolators hingegen kann sich eine geschlossene leitfähige Schicht ausbilden, die zu geringerem Isoliervermögen mit erhöhten Durchströmungen des Vogels und zu erhöhter Gefahr eines Überschlages führen kann.

Als repräsentativ für die in den Oberleitungen der DB Netz AG derzeit verbauten Isolatortypen werden ein Verbundisolator und ein Porzellanisolator ausgewählt. Da im Schienensystem im Neubau und bei Ersatz von defekten Isolatoren grundsätzlich nur noch Verbundisolatoren Verwendung finden, werden am Verbundisolator alle definierten Zustände und Umwelteinflüsse untersucht.

Abhängig von den für den Verbundisolator erzielten Ergebnissen werden am Porzellanisolator, als dem derzeit im Streckennetz ebenfalls häufig vorkommenden Isolator, ergänzend die als kritisch identifizierten Zustände und Umwelteinflüsse untersucht.

Zur Eingrenzung der Parametervielfalt wird je ausgewähltem Isolator ein Typ **KTA** untersucht. Der jeweils auszuwählende Typ des KTAs und dessen Montage auf dem Isolator leitet sich aus den jeweiligen Herstellerangaben ab.

Praxisrelevante **Zustände der Oberfläche** der Prüfkörper sind sauber und verschmutzt. Die Verschmutzung wird zunächst vornehmlich an für Deutschland praxisrelevanten Grenzwerten von leichter und starker Verschmutzung untersucht [7]. Zur Gewinnung darüberhinausgehender Erkenntnisse werden auch Messwerte für sehr schwere Verschmutzung ermittelt, die unter realen Bedingungen in Deutschland nicht zu erwarten sind. Diese Verschmutzungen können z. B. in Ländern mit Wüstenregionen und küstennahen Ölraffinerien oder Anlagen mit ähnlicher industrieller Verschmutzung auftreten. Diese dort möglicherweise vorkommenden sehr schweren Verschmutzungen werden in diversen Veröffentlichungen [8, 9, 10] beschrieben.

Als auf den Prüfkörper bedeutsam wirkende **Umwelteinflüsse** werden trocken, beregnet, benebelt und vereist ausgewählt (Tabelle 1).

TABELLE 1: UNTERSUCHTE PARAMETER-KOMBINATIONEN AN DEN BEIDEN ISOLATORTYPEN

Zustand der Prüfkörper	Umwelteinfluss			
	trocken	beregnet	benebelt	vereist
<b>gereinigt</b>	Verbundisolator Porzellanisolator	Verbundisolator		Verbundisolator
<b>leicht verschmutzt</b>	Verbundisolator	Verbundisolator	Verbundisolator Porzellanisolator	
<b>stark verschmutzt</b>	Verbundisolator	Verbundisolator	Verbundisolator Porzellanisolator	

Auf die Untersuchung eines gereinigten Verbundisolators bei Benebelung wurde verzichtet, da ein nichtleitfähiger Nebel aus entionisiertem Wasser verwendet wurde, welcher ausschließlich zur Befeuchtung bereits aufgetragener Verschmutzungsschichten dient. Ebenfalls wurden keine Untersuchungen an verschmutzten und gleichzeitig vereisten Isolatoren durchgeführt, da die Eisschicht eine definierte Verschmutzungsschicht mit eigener Leitfähigkeit besitzt (die Parameter sind in Kapitel 2.4.5 dargestellt).

Die Untersuchungen werden im Hochspannungslabor der TUD und im Hochspannungslabor der HSZG durchgeführt. Grundsätzlich sind Untersuchungen in einer praxisnahen Versuchsanordnung wünschenswert. Für die Umwelteinflüsse trocken und beregnet ist die praxisnahe **Anordnung des Prüfkörpers** versuchs- und anlagentechnisch in der Hochspannungshalle der TUD gut umsetzbar, da diese über entsprechende Abmessungen und eine Beregnungsanlage verfügt. Die Anordnung des Prüfkörpers erfolgt in einer Nachbildung des Spitzenrohrs eines Rohrschwenkauslegers (folgend Versuchsanordnung Ausleger waagrecht – siehe Kapitel 2.5.1 Ausleger waagrecht Abbildung 21). Diese Auswahl ist Ergebnis der Diskussion der PAG mit folgenden abschließenden Argumenten:

- Rohrschwenkausleger werden vornehmlich eingebaut und stellen den überwiegenden Anteil der Quertrageinrichtungen in den Oberleitungsanlagen.
- Der obere Bereich des Oberleitungsmastes bzw. das waagerechte Spitzenrohr sind häufiger Anflug- bzw. Sitzplatz der Vögel.

Die Untersuchungen für die Umwelteinflüsse benebelt und vereist sind nur in speziellen Prüfkammern durchführbar, da nur diese das Einstellen reproduzierbarer Benebelung bzw. Vereisung gewährleisten. Die HSZG verfügt über entsprechende Prüfkammern. Die Größe der verfügbaren Prüfkammern lässt eine Anordnung des Prüfkörpers mit waagrechttem Ausleger und den entsprechenden Abständen zu Fußboden und Wänden nicht zu. Der Versuchskörper wird in der Prüfkammer der HSZG aus Platzgründen senkrecht angeordnet (folgend Versuchsanordnung senkrecht – siehe Kapitel 2.5.2 Senkrecht in Prüfkammer Abbildung 22). Zum Vergleich beider Versuchsanordnungen erfolgen die Messungen in der Prüfkammer ebenfalls an trockenen Prüfkörpern.

Der elektrische Widerstand von Vögeln kann aufgrund ihrer körperlichen Beschaffenheit (Größe, Dichte und Art des Federkleides, Gesamtanteil des im Körper enthaltenen Wassers) variieren. Da sich Untersuchungen an lebenden bzw. toten Tieren von vornherein ausschließen, werden die Vögel durch technische Widerstände nachgebildet. Diese Widerstände verfügen über eine den Vögeln entsprechende Dimension (Größe des elektrischen Widerstandes) und werden im Folgenden als **Ersatz- bzw. Körperwiderstände** ( $R_k$ ) bezeichnet. Die Messungen werden mit vier verschiedenen Ersatzwiderständen ausgeführt. Entsprechend der Angaben in VDE-AR-N 4210 11 wurde ein Ersatzwiderstand von 5 k $\Omega$  als Standardwiderstand eines Vogelkörpers verwendet. Da der Körperwiderstand eines Vogels größenabhängig ist, wurden drei weitere niedrigere Körperwiderstände von 3; 1 und 0,5 k $\Omega$  verwendet. Dies soll gewährleisten, dass auch für deutlich kleinere Vögel und Säugetiere als den in der VDE-AR-N 4210-11 zugrunde gelegten, jedoch nicht näher klassifizierten Standard-Vogel anhand der Messungen Aussagen zur potentiellen Gefährdung getroffen werden können. Die Festlegung der Größe der Ersatzwiderstände erfolgte entsprechend der Projektvorgaben in Abstimmung mit der PAG.

Als **elektrische Größen** werden bei den Versuchen die über dem Isolator anliegende Wechselspannung und der zeitliche Verlauf des durch den Ersatzwiderstand fließenden Stromes ab dem Berühren des KTAs erfasst. Der Strom zum Zeitpunkt des Berührens ist **impulsförmig** und geht bei längerem Kontakt mit dem KTA in einen **stationären** Zustand über. Nachgebildet wird der Fall eines auf **Erdpotential sitzenden Vogels**. Die Nachbildung der Berührung wird versuchstechnisch mit einem Schalter realisiert (Abbildung 2). Der nicht versuchstechnisch erfasste Fall der Sitzposition des Vogels auf Hochspannungspotenzial mit folgender Annäherung an den KTA wird vergleichend in Kapitel 3 „Elektrische Wirkungsweise KTA“ sowie Kapitel 6 „Zusammenfassender Vergleich der Messwerte“ diskutiert.

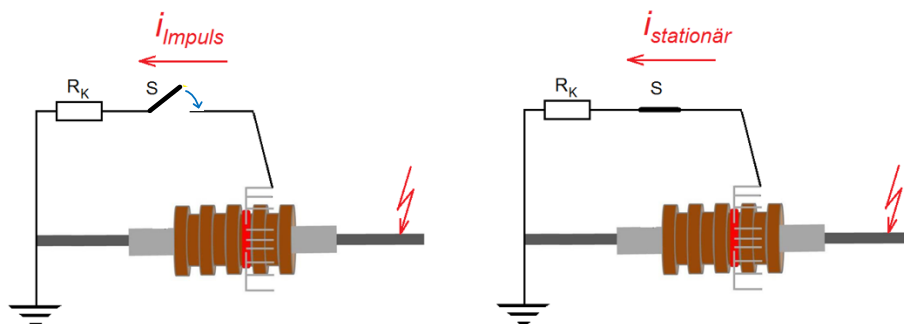


Abbildung 2: Erfasste elektrische Größen - schematisch, S: Schalter;  $R_k$ : Körperwiderstand Vogel

Folgend werden die Prüfkörper, die Versuchsanordnungen, die Messkreise mit Messwertaufbereitung, das Einstellen der Oberflächenzustände der Prüfkörper sowie die Erzeugung der Umwelteinflüsse näher erläutert.

## 2.3 Prüfkörper

### 2.3.1 Isolatoren

Die Wirksamkeit der KTA bei Berührung wird an zwei für die DB Netz AG repräsentativen Isolatortypen untersucht (Tabelle 2). Die beiden Isolatortypen wurden gemeinsam mit der PAG gewählt, da sie als Standardmodelle gelten und vermehrt im Oberleitungsnetz verbaut sind. Der Bezug der in Tabelle 2 angegebenen technischen Daten zur Konstruktion des Isolators sind in Abbildung 3 dargestellt.

TABELLE 2: TECHNISCHE DATEN PRÜFISOLATOREN

Kenngröße	Typ 1 Verbundisolator	Typ 2 Porzellanisolator
Einbaulänge (mm)	440	440
Strunkdurchmesser (mm)	30	60
Schirmdurchmesser (mm)	138	125
Kriechweg (mm)	570	485
Schirme (Anzahl)	3	5

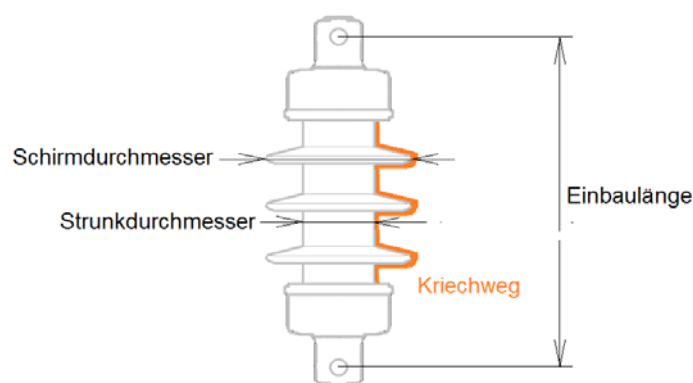


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Kenngrößen eines Isolators

Bei Typ 1 handelt es sich um Verbundisolatoren (Abbildung 4) bestehend aus einem glasfaserverstärkten Kunststoffkern umhüllt mit Hochtemperatur vernetzendem Silikon und drei Silikonschirmen mit Unterripdesign.

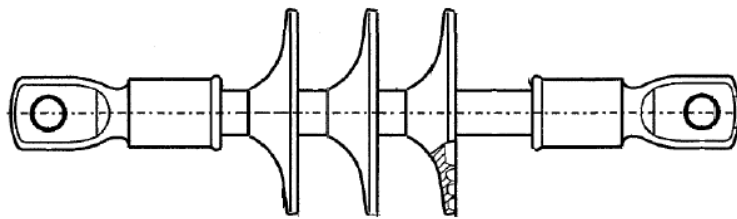


Abbildung 4: Prüfrisolator aus Verbundwerkstoff (Verbundisolator)

Typ 2 ist ein 5-schirmiger Porzellanisolator (Abbildung 5).

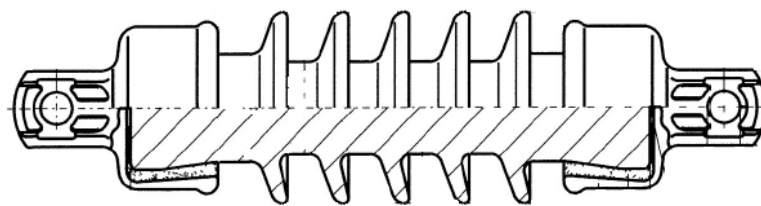


Abbildung 5: Prüfrisolator aus Porzellan

### 2.3.2 Kleintierabweiser

Für die Untersuchungen an den Prüfrisolatoren werden Kleintierabweiser (KTA) (Abbildung 6) in zwei den Isolatoren zugeordneten Varianten (Tabelle 3) verwendet.

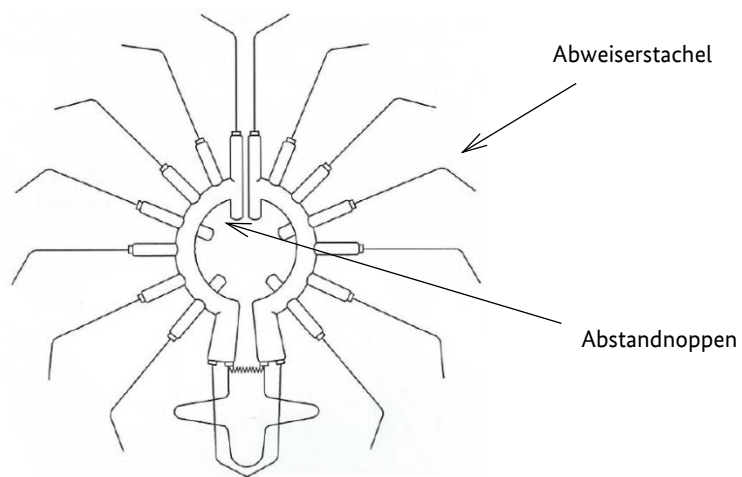


Abbildung 6: Kleintierabweiser (KTA)

Vor der Montage erfolgt bei Bedarf eine Anpassung an den Strunkdurchmesser des Isolators mittels Kürzens der Abstandsnoppen des KTAs. Der KTA wird ausgehend von der Hochspannungsseite zwischen dem Schirm 1 und 2 auf dem Isolatorstrunk montiert<sup>2</sup>. Die Spitzen der metallischen Abweiser zeigen dabei in Richtung Hochspannung.

TABELLE 3: ABMESSUNGEN KLEINTIERABWEISER

Kenngröße	KTA für Typ 1 Verbundisolator	KTA für Typ 2 Porzellanisolator
Strunkdurchmesser mit Abstandsnoppen (mm)	19 - 38	58 - 75
Strunkdurchmesser ohne Abstandsnoppen (mm)	38 - 58	-
Einbaubreite (mm)	217	270

Bei den untersuchten KTA sind konstruktionsbedingt jeweils zwei der metallischen Abweiserstacheln innerhalb des Kunststoffrings galvanisch verbunden. Somit werden bei 16 Stacheln im Betriebsfall insgesamt acht separate Elektroden elektrostatisch geladen.

Nach entsprechender Diskussion in der PAG wurde festgelegt, dass der Entladeimpuls bei Berührung von zwei nebeneinanderliegenden Elektroden erfasst werden soll. Damit wird das Berühren eines Vogels mit seinem Flügel oder einem anderen Körperteil von gleichzeitig zwei Abweiserstacheln, die zu unterschiedlichen Elektroden gehören, nachgebildet. Die dabei gleichzeitig wirkende elektrostatische Ladung von zwei galvanisch nicht verbundenen Elektroden führt zu einer höheren Durchströmung des Vogels.

Um das festgelegte gleichzeitige Berühren von zwei Elektrodenpaaren durch einen Vogel zu erfassen, wurden mittels eines Kupferleiters die Abweiserstacheln zweier nebeneinanderliegender Elektrodenpaare miteinander verbunden (Abbildung 7).



Abbildung 7: Galvanische Verbindung mittels Kupferleiter an KTA-Abweiserstacheln

<sup>2</sup> Als Schirm 1 ist dabei der Isolatorschirm definiert, welcher der Hochspannungsseite am nächsten liegt. Demensprechend ist Schirm 3 beim Verbundisolator und Schirm 5 beim Porzellanisolator der Schirm, welcher der Seite auf Erdpotential am nächsten liegt. In den schematischen Darstellungen ist die Position der KTA abweichend von der experimentellen Anordnung zwischen dem Schirm 2 und 3 dargestellt.

## 2.4 Oberflächenzustand der Prüfkörper

### 2.4.1 Vorbereitung Prüfkörper

Die Untersuchungen werden ausschließlich an neuwertigen Isolatoren durchgeführt. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Prüfkörper dieselben Ausgangsbedingungen aufweisen und somit miteinander vergleichbar sind. Alle Isolatoren werden mit Isopropanol und einem flusenfreien Tuch gereinigt und anschließend mit entionisiertem Wasser abgespült. Danach werden die Isolatoren unter den im Prüfraum vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen für mindestens 24 Stunden staubgeschützt gelagert.

### 2.4.2 Gereinigter Prüfkörper

Die Prüfkörper werden ohne weitere Behandlung der Menge der gereinigten vorbereiteten Prüfkörper entnommen, in den Versuchsaufbau eingesetzt und die Messungen bei den entsprechenden Umwelteinflüssen durchgeführt.

### 2.4.3 Zusammensetzung und Applikation der leichten und starken Verschmutzungsschicht

Zur Simulation eines sich schon länger im Gebrauch befindlichen oder emissionsexponierten Isolators wird eine artifizielle, standardisierte Verschmutzungsschicht hergestellt und appliziert. Durch das Aufbringen einer definierten künstlich erzeugten Verschmutzungsschicht ist im Vergleich zu in der Praxis natürlich verschmutzten Isolatoren die Möglichkeit gegeben, reproduzierbare und damit untereinander vergleichbare Prüfergebnisse zu erzielen. Die Verschmutzungsschicht wird dabei so eingestellt, dass die praxisrelevanten Bereiche der elektrischen Leitfähigkeit der Verschmutzungen nachgebildet werden.

Die Vorgehensweise zum Erzeugen und Aufbringen entsprechender Verschmutzungsschichten ist folgend aufgeführt.

Kapitel 4 der Technischen CIGRE Broschüre 555 [11] schlägt zur Verschmutzung von Isolatoren für labortechnische Untersuchungen eine Vorgehensweise vor, die auf die Herstellung von geeigneten Verschmutzungsschichten nach DIN EN 60507, Kapitel 6 verweist. In Anlehnung an DIN EN 60507, Kapitel 6.3 wird für die Untersuchungen eine Suspension mit einer schwachen Verschmutzung und eine Suspension mit einer starken Verschmutzung (Tabelle 4) hergestellt. Die Leitfähigkeit der Verschmutzung wird über den Salzgehalt eingestellt. Die erforderlichen Mengen wurden durch Vorversuche bestimmt.

TABELLE 4: ÜBERSICHT VERWENDETE VERSCHMUTZUNGSSUPENSIONEN (LEICHT UND STARK)

Leichte Verschmutzung	Starke Verschmutzung
1000 g Leitungswasser	1000 g Leitungswasser
20 g Hochdisperse Kieselsäure	25 g Hochdisperse Kieselsäure
0,2 g NaCl	2,5 g NaCl
Leitfähigkeit Suspension: 450 $\mu$ S/cm (bei 20°C)	Leitfähigkeit Suspension: 4,1 mS/cm (bei 20°C)



Aus der Menge der gereinigten vorbereiteten Prüfkörper wird eine entsprechende Anzahl von Prüfkörpern entnommen. Auf diese wird die Verschmutzungssuspension über das Eintauch-Verfahren in Anlehnung an DIN EN 60507 [12] aufgebracht. Dazu werden die Isolatoren mit KTA in die jeweilige Verschmutzungssuspension getaucht und unmittelbar wieder herausgezogen. (Abbildung 8).

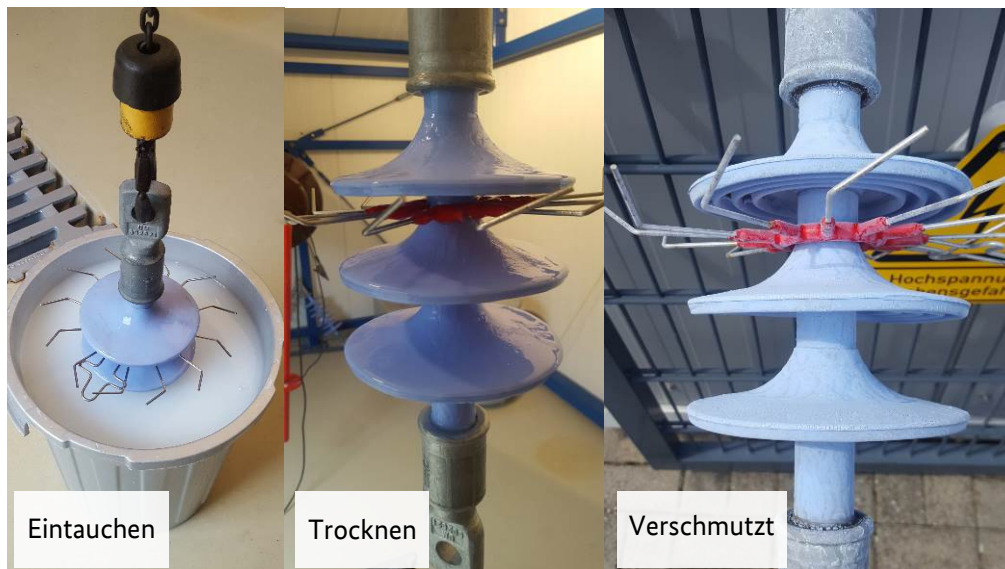


Abbildung 8: Aufbringen der Verschmutzungsschicht - Beispiel Verbundisolator

Anschließend wird die Fremdschicht getrocknet und unter den im Prüfraum vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen 24 h gelagert (Lufttemperatur 23°C bis 24°C, Luftfeuchte 45 % bis 50 % r. H.).

## 2.4.4 Bewertung der aufgetragenen Verschmutzungsschichten

Um eine Einordnung der aufgetragenen Verschmutzungsschichten in leichte und starke Verschmutzung zu ermöglichen, werden nach IEC TS 60815-1 [7] der ESDD-Wert (Equivalent salt deposit density – äquivalente Salzablagerungsdichte), der NSDD-Wert (Non-soluble material deposit density – nicht lösliche Ablagerungsdichte) und die partielle Schichtleitfähigkeit ermittelt. Der ESDD- und NSDD-Wert dienen dabei der Beurteilung des Verschmutzungsgrades, während die Messwerte der partiellen Schichtleitfähigkeit dazu dienen, die Gleichmäßigkeit der Verschmutzungsschicht zu beurteilen. Die in IEC TS 60815-1 dargestellten Bereiche von Verschmutzungen auf Isolatoren reichen von sehr leichter bis sehr starker (schwerer) Verschmutzung und wurden mithilfe weltweiter Untersuchungen an natürlich verschmutzten Isolatoren bestimmt. Erfahrungswerte und Veröffentlichungen deuten darauf hin, dass in Deutschland unter den gegebenen geografischen und industriellen Bedingungen die natürliche Verschmutzung bei spannungsbetriebenen Isolatoren im Mittel im Bereich von sehr leichter bis mittlerer Verschmutzung liegen [7]. Die in diesem Bericht untersuchten künstlich aufgetragenen Verschmutzungen werden bewusst höher gewählt, um den kritischsten Fall abzubilden.

### ESDD- und NSDD-Wert

Die Bestimmung des ESDD- und NSDD-Wertes erfolgt nach DIN IEC/TS 60815-1 [7]. Der ESDD-Wert beschreibt die löslichen Anteile in der Verschmutzungsschicht (diverse Salze wie NaCl usw.). Der NSDD-Wert beschreibt die nichtlöslichen Anteile in einer Verschmutzungsschicht (z. B. Staub, Sand, Ton usw.). Beide Werte sind in  $\text{mg}/\text{cm}^2$  angegeben.

Die Verschmutzungsschicht ist bei den zu untersuchenden Isolatoren entsprechend des oben genannten Standards als Verschmutzungsschicht A definiert. Dabei handelt es sich um eine feste Verschmutzungsschicht mit einer nichtlöslichen und einer löslichen Komponente. Bei Befeuchtung kann diese Verschmutzungsschicht leitfähig werden.

Mit einem fusselfreien Reinraumtuch und entionisiertem Wasser werden vorab ausgemessene Bereiche der Isolatoren abgewaschen (Abbildung 9). Das Tuch wird in 100 ml entionisiertem Wasser gespült, der Vorgang wird wiederholt, bis die Verschmutzungsschicht vollständig abgetragen ist.

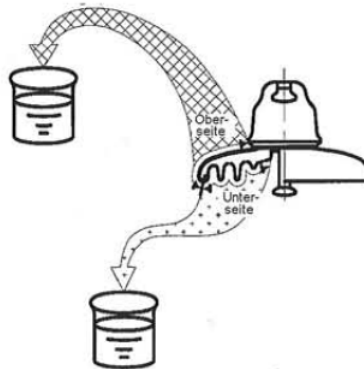


Abbildung 9: Abwaschen der verschmutzten Isolatoren [7]

Die erhaltene Suspension aus entionisiertem Wasser und Schmutzschicht wird solange gerührt, bis sich ein konstanter Volumenleitfähigkeitswert einstellt, welcher über ein Volumenleitfähigkeitsmessgerät (Mehrparameter-Messgerät 340i) der Fa. WTW GmbH erfasst wird. Mithilfe des Volumenleitfähigkeitswertes wird der ESDD ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) bestimmt.

Um das Gewicht der nichtlöslichen festen Bestandteile in der Verschmutzungsschicht zu bestimmen (NSDD in  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ), wird danach die Suspension mit einem vorgetrockneten Papierfilter für sehr feine Niederschläge gefiltert.

Die Verschmutzungskennwerte ESDD und NSDD wurden nach den Untersuchungen an Verbundisolatoren ermittelt.

Um die in Praxis in Deutschland auftretenden Grenzfälle von Verschmutzungen an den Verbundisolatoren abzudecken und zu definieren (siehe schwarze Rechtecke in Abbildung 10), wird jeweils ein Zielbereich für leichte Verschmutzung und für starke Verschmutzung festgelegt. Die für die Verbundisolatoren definierten Verschmutzungsbereiche werden anschließend für die Verschmutzung der Porzellanisolatoren verwendet.

Bei Vorversuchen ergeben sich zusätzlich Verschmutzungsschichten im Bereich der sehr schweren Verschmutzung (violett farbene Markierung in Abbildung 10). Dieser Verschmutzungsbereich liegt aber deutlich über in Deutschland in der Realität auftretenden Verschmutzungswerten. Solch hohe Verschmutzungswerte können, wie bereits ausgeführt, z. B. in Ländern mit Wüstenregionen und küstennahen Ölraffinerien auftreten. Zur Abrundung der Erkenntnisse werden die mit sehr schwerer Verschmutzung ermittelten Ergebnisse dennoch im Bericht dargestellt.

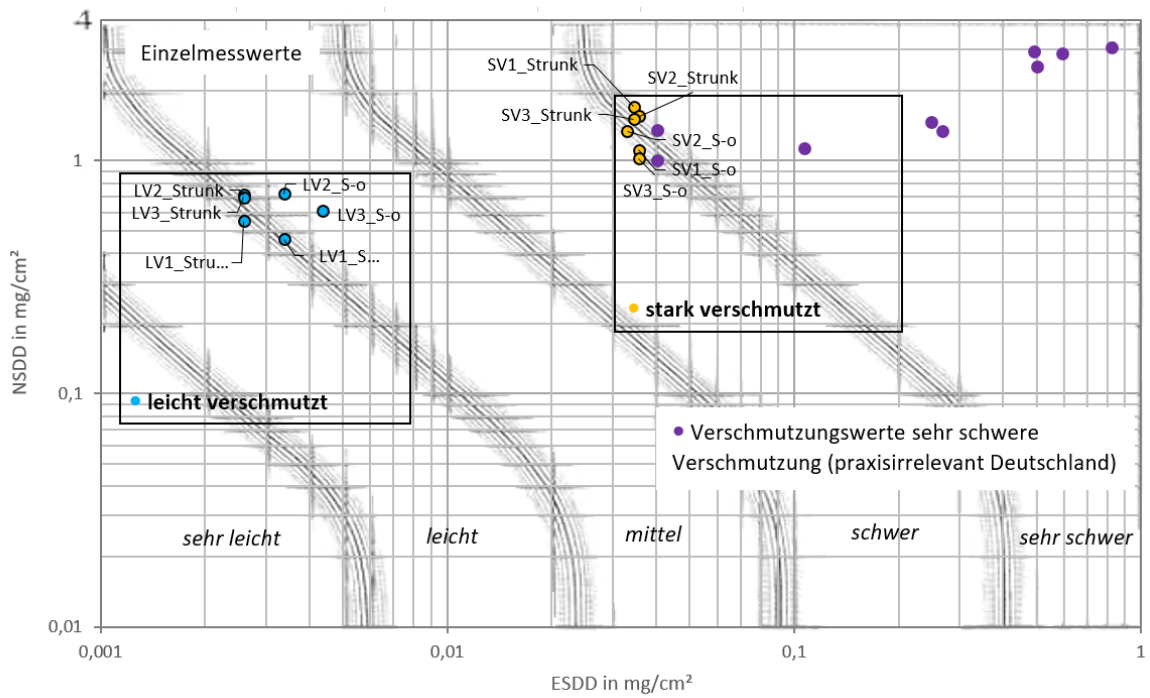


Abbildung 10: Soll- und Ist-Werte ESDD und NSDD der Prüfkörper Grunddiagramm [7] (blau = leicht verschmutzt; gelb = stark verschmutzt; violett = sehr schwere Verschmutzung)

Durch die Verwendung der Normen DIN IEC/TS 60815-1 [7] und DIN IEC/TS 60815-3 [13] kann ein Referenzwert des USCD (unified specific creepage distance) in Abhängigkeit der Verschmutzungsstufe ermittelt werden (Abbildung 11). Hierfür wird eine maximale Spannung von 18 kV, der Kriechweg des Porzellanisolators (Kriechweg = 485 mm) und der Kriechweg des Verbundisolators (Kriechweg = 570 mm) herangezogen. Über diese Werte wird jeweils der USCD Wert bestimmt.

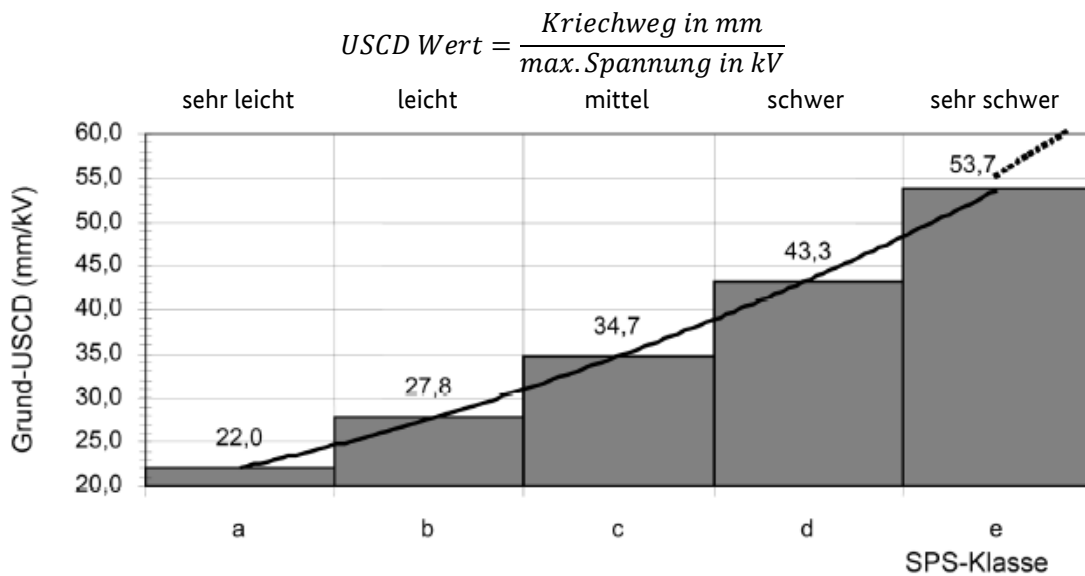


Abbildung 11: Referenzwert des USCD in Abhängigkeit der SPS (Verschmutzungsstufe) [13]

Der Porzellanisolator besitzt unter den gegebenen Parametern einen USCD von ca. 26 mm/kV und ist somit für Bereich b = leichte Verschmutzung dimensioniert worden. Der Verbundisolator besitzt unter den gegebenen Parametern einen USCD von ca. 32 mm/kV und ist somit für den Bereich c = mittlere Verschmutzung dimensioniert worden. Der Untersuchungsbereich der leichten Verschmutzung deckt einen Verschmutzungsbereich nach DIN IEC/TS 60815-1 von „sehr leicht“ bis „mittel“ ab. Der Untersuchungsbereich der starken Verschmutzung deckt einen Verschmutzungsbereich nach DIN IEC/TS 60815-1 von „schwer“ bis „sehr schwer“ ab. Somit wird mit einer leichten und einer starken Verschmutzung der Bereich, für den die Isolatoren dimensioniert sind, abgedeckt.

### Ermittlung Verschmutzungskennwerte partielle Schichtleitfähigkeit

Am Isolator können sich konstruktionsbedingt unterschiedliche Schichtdicken der Verschmutzungsschicht und damit verbunden unterschiedliche Schichtleitfähigkeiten einstellen. Um die Verteilung der Schichtdicken der Verschmutzungsschicht am Isolator beurteilen zu können, wird die Schichtleitfähigkeit partiell an den in Abbildung 12 dargestellten Positionen gemessen.

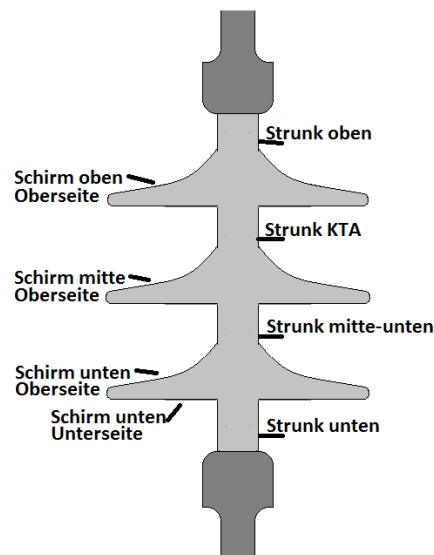


Abbildung 12: Partielle Schichtleitfähigkeit - Messpositionen am Verbundisolator

Die partielle Schichtleitfähigkeit wird mittels eines Saugstreifen-Messgerätes SLM-11 mit Streifenmesssonde (Fa. Inotas) bestimmt. Für die Messung wird das Saugstreifenpapier der Messsonde in entionisiertes Wasser getaucht und anschließend auf die zu messende Stelle des Isolators gesetzt (Abbildung 13). Das Gerät ermittelt mittels eines Messstromes den Widerstand der definierten Messfläche und berechnet daraus die partielle Schichtleitfähigkeit.



Abbildung 13: Messung Schichtleitfähigkeit

An den Schirmunterseiten und den KTA können konstruktionsbedingt keine Messungen der Schichtleitfähigkeit durchgeführt werden.

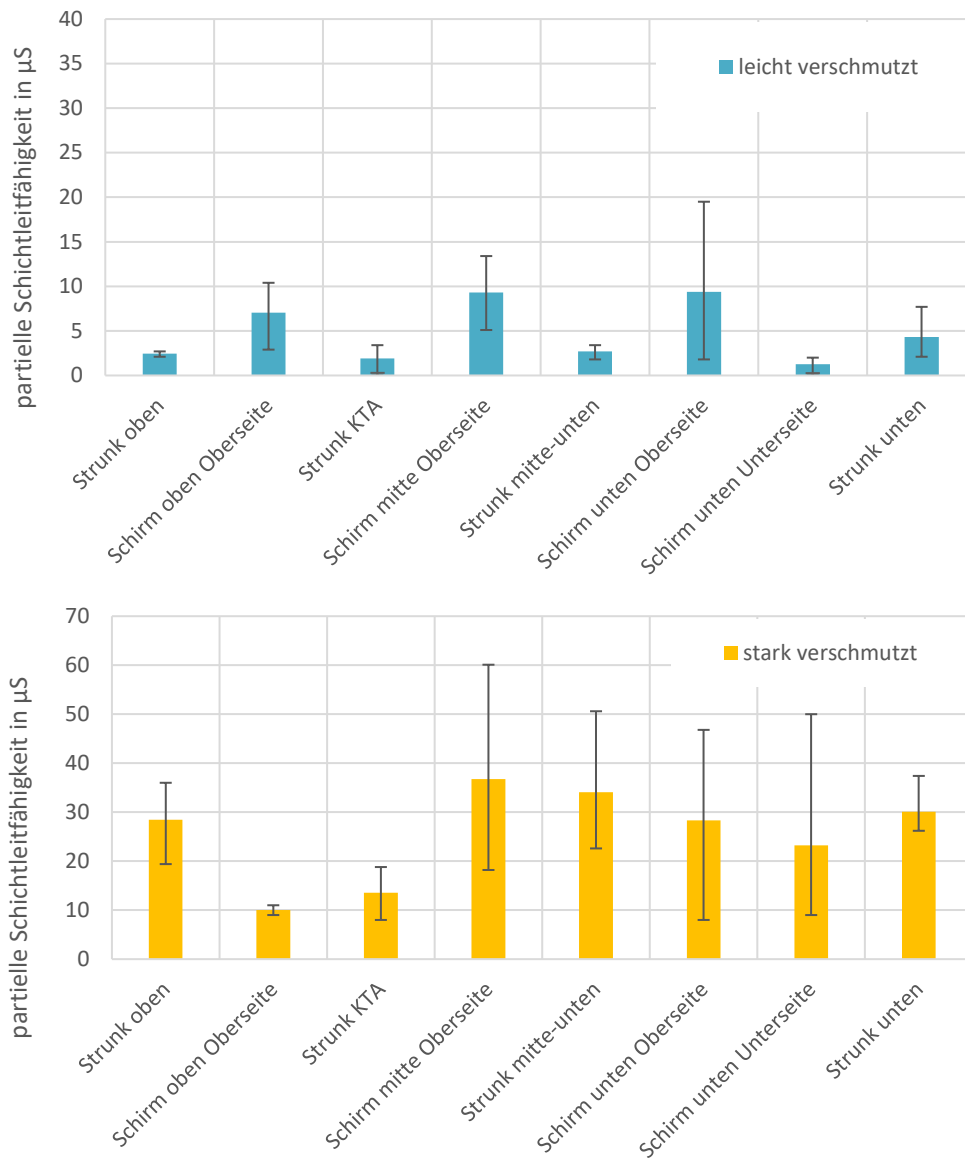


Abbildung 14: partielle Schichtleitfähigkeit an leicht (oben) und stark verschmutzten (unten) Verbundisolatoren

Aus den durchgeführten Messungen ergeben sich keine fundierten Hinweise für einen Unterschied der Schichtleitfähigkeit der Verschmutzungsschicht über den Isolatoren. Dies ist vermutlich auf die Verschmutzungsprozedur durch Eintauchen in die Suspension zurückzuführen (Abbildung 14 oben). Die Spannweiten der Messwerte überlappen sich größtenteils. Damit kann von keinem signifikanten Unterschied der Schichtleitfähigkeit der Verschmutzungsschicht über den Isolatoren ausgegangen werden.

Die Verschmutzungsverteilung bei den „stark verschmutzten“ Isolatoren zeigt kein erkennbares Muster. Die Spannweiten der Messwerte überlappen sich größtenteils (Abbildung 14 unten). Damit kann von keinem signifikanten Unterschied der Schichtleitfähigkeit über den Isolatoren ausgegangen werden. Tendenziell treten jedoch geringere Schichtleitfähigkeiten auf der Oberseite des ersten Schirmes und dem Strunkabschnitt mit dem KTA auf.

## 2.4.5 Realisierung der Umwelteinflüsse

### Trocken

Die vorbereiteten Prüfkörper werden unter den im Prüfraum vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen 24 h gelagert (Tabelle 5 und Tabelle 6). Nach Lagerung und Einbau der Prüfkörper in die Prüfanordnung wird die Messung durchgeführt.

TABELLE 5: ATMOSPHERISCHE BEDINGUNGEN – UMWELTEINFLUSS TROCKEN – TUD

	Lufttemperatur in °C	Luftdruck in kPa	relative Luftfeuchte in %
während der Lagerung	17 ... 22	99,8 ... 100,2	32 ... 48
Prüfung Verbundisolatoren	18 ... 22	98,8 ... 100,2	38 ... 42

TABELLE 6: ATMOSPHERISCHE BEDINGUNGEN – UMWELTEINFLUSS TROCKEN – HSZG

	Lufttemperatur in °C	Luftdruck in kPa	relative Luftfeuchte in %
während der Lagerung	23 ... 24	99,5 ... 100,1	45 ... 50
Prüfung Verbundisolatoren	23	100,1	47
Prüfung Porzellanisolatoren	23	100,1	46

### Berechnet

Die vorbereiteten Prüfkörper werden unter den im Prüfraum vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen 24 h gelagert (Tabelle 7).

TABELLE 7: ATMOSPHERISCHE BEDINGUNGEN – UMWELTEINFLUSS BEREGNET – TUD

	Lufttemperatur in °C	Luftdruck in kPa	relative Luftfeuchte in %
während der Lagerung	17 ... 22	99,8 ... 100,2	32 ... 48
Prüfung Verbundisolatoren	18 ... 22	98,8 ... 100,2	38 ... 42

Die Beregnung des Prüfkörpers erfolgte nach Montage in der Prüfanordnung (Abbildung 15) mittels Standard-Regen entsprechend DIN EN 60060-1 [14], Abschnitt 4.4. mit folgenden Parametern:

mittlere Regenmenge, vertikal	1,5±0,5 mm/min
mittlere Regenmenge, horizontal	1,6±0,5 mm/min
spezifischer elektrischer Widerstand des Regenwassers	100±5 Ohm
Temperatur des Regenwassers	16 °C
Vorberegnungszeit im spannungsfreien Zustand	15 min

Ergänzend zu den Vorgaben aus DIN EN 60060-1 wird am Isolator nach Augenschein eine gleichmäßige Beregnung und Benetzung eingestellt. Die Messung wird nach der Vorberegnungszeit bei fortdauernder Beregnung durchgeführt.

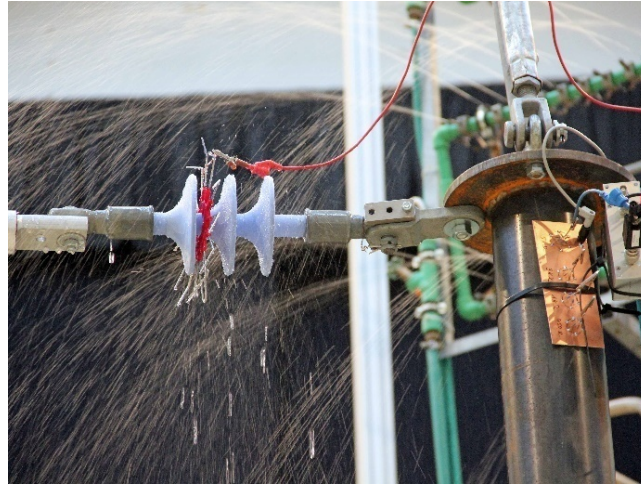


Abbildung 15: Beregnung Prüfobjekt Ausleger waagrecht

### **Benebelt**

Die Befeuchtung der Fremdschicht erfolgt mit einem in der CIGRE Technischen Broschüre 481 [15] spezifizierten Modified Clean Fog. Hierzu wird in einer Nebelkammer (Abbildung 16) der künstlich verschmutzte Isolator bei Raumtemperatur mit einem nichtleitfähigen Nebel (Clean Fog, Abbildung 17) bei folgenden Parametern benebelt:

Erzeugung des Nebels	2 Defensoren Typ 505, Fa. Defensor AG Pfäffikon
Volumen Nebelkammer	4,5 m <sup>3</sup>
Niederschlagsrate	0,03 ml/(cm <sup>2</sup> · h)
Nebelleitfähigkeit	2 μS/cm
Dauer der Benebelung im spannungsfreien Zustand	2 h

Der erzeugte Nebel führt ohne Abwaschen zu einer langsamen Durchfeuchtung der Fremdschicht. Damit wird Betauung bzw. Benebelung von Fremdschichten in der Realität nachgebildet.





Abbildung 16: Nebelkammer und Prüfanlage – Prüfobjekt senkrecht

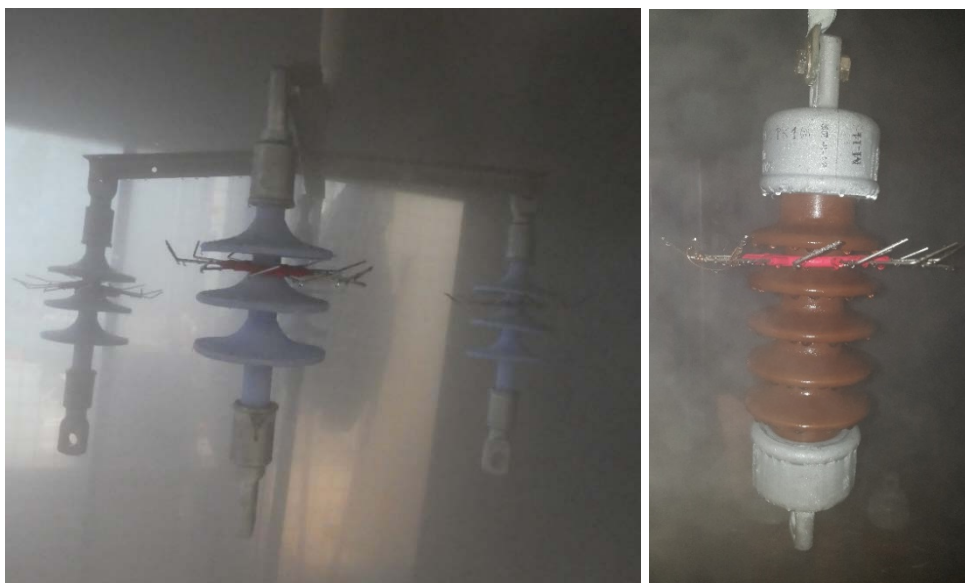


Abbildung 17: Verschmutzte Isolatoren in der Nebelkammer

Die Dauer der Nebelbelung wurde nach Augenschein des Niederschlages auf den Oberflächen der Prüfkörper auf 2 h festgelegt (Abbildung 18).



Abbildung 18: Niederschlag nach 2 h Benebelung. Am Verbundisolator bilden sich aufgrund dessen Hydrophobie vereinzelte Tröpfchen aus

Nach der Benebelung der Prüfkörper wird die Messung in der Prüfkammer durchgeführt.

Während der Messungen herrschten im Labor folgend atmosphärische Bedingungen:

Lufttemperatur	24 °C
Luftdruck	99,0 kPa

### Vereist

Um einen praxisrelevanten Eisansatz nachzubilden, wird die von der IEEE Task Force on Insulator Icing Test Methods in [16] beschriebene Herangehensweise genutzt. In dieser Veröffentlichung wird der von der IEEE Task Force gemeinsam mit der CIGRE Ice/Snow Tasks Force erarbeitete Wissensstand vorgestellt. Für Untersuchungen mit Vogelschutzarmaturen wird entsprechend [16] eine Glasur mit einem transparenten und klaren Erscheinungsbild und zylindrischem Eis vorgeschlagen. Diese Vereisung wird als die kritischste Variante klassifiziert und entsteht bei niedrigen Windgeschwindigkeiten. In folgend beschriebenen Schritten wird auf das Prüfobjekt eine nass wachsende Vereisung aufgebracht:

- Einbringen der Prüfobjekte in eine Klimakammer VC 4030 (Fa. Vötsch, Abbildung 19).
- Die Temperatur in der Klimakammer wird auf  $-15^{\circ}\text{C}$  abgesenkt.
- Kontinuierliche Besprühen der Prüfkörper
  - mit einer Niederschlagsrate von  $60 \pm 20 \text{ mm/h}$ ,
  - bei einer Wassertemperatur von  $0$  bis  $3^{\circ}\text{C}$  und
  - einer Leitfähigkeit des Wassers von  $100 \mu\text{s/cm}$  bei  $20^{\circ}\text{C}$ .
- Nach Erreichen einer Eis-Schichtdicke von  $\geq 2 \text{ mm}$  wird das Eis mindestens  $2 \text{ h}$  bei  $-15^{\circ}\text{C}$  ausgehärtet (Abbildung 20 und Abbildung 19).
- Anschließend werden die Isolatoren entnommen und innerhalb von  $1 \text{ min}$  die Messung der Ableitströme in der Prüfkammer durchgeführt.



Abbildung 19: Klimakammer VC 4020



Abbildung 20: Vereiste Isolatoren in der Klimakammer (links) und nach Beendigung der Messungen (rechts)

An der HSZG herrschten während der Prüfung folgende atmosphärische Bedingungen:

Lufttemperatur	24 °C
Luftdruck	99,2 kPa
relative Luftfeuchte	46 %.

## 2.5 Versuchsanordnungen

### 2.5.1 Ausleger waagrecht

Die Messungen am waagrechteten Ausleger werden in der Hochspannungshalle der TUD durchgeführt und umfassen den in Tabelle 8 aufgeführten Umfang.

TABELLE 8: MESSUNGEN AM WAAGERECHTEN AUSLEGER

Zustand Prüfkörper	Umwelteinfluss	
	trocken	berechnet
gereinigt	Verbundisolator	Verbundisolator
leicht verschmutzt	Verbundisolator	Verbundisolator
stark verschmutzt	Verbundisolator	Verbundisolator

Die Auslegernachbildung besteht aus dem mit einem Aluminiumrohr verbundenen Prüfkörper. Diese ist in einem an die Praxis angelehnten Abstand waagrecht über dem Hallenboden angeordnet. Prüfkörperseitig ist die Auslegernachbildung an einer geerdeten Mastnachbildung befestigt. An der gegenüberliegenden Seite der Auslegernachbildung ist eine ebenfalls waagrechte, über dem Hallenboden, jedoch im rechten Winkel zum Ausleger, angeordnete Leiternachbildung montiert (Tabelle 9, Abbildung 21). Die Leiternachbildung dient zur Spannungszuführung und bildet den Einfluss des Y-Beidrahts auf das elektrische Feld am Ausleger nach.

TABELLE 9: PARAMETER VERSUCHSANORDNUNG AUSLEGER WAAGERECHT

Abstand Auslegernachbildung - Hallenboden	gereinigt trocken:	6,0 m
	gereinigt berechnet:	5,4 m
	verschmutzt trocken und berechnet:	5,4 m
Länge Auslegernachbildung	3 m	
Durchmesser Auslegernachbildung	60 mm	
Länge Leiternachbildung	2 m	
Durchmesser Leiternachbildung	23 mm	
Länge Mastnachbildung	2,6 m	
Durchmesser Mastnachbildung	200 mm	

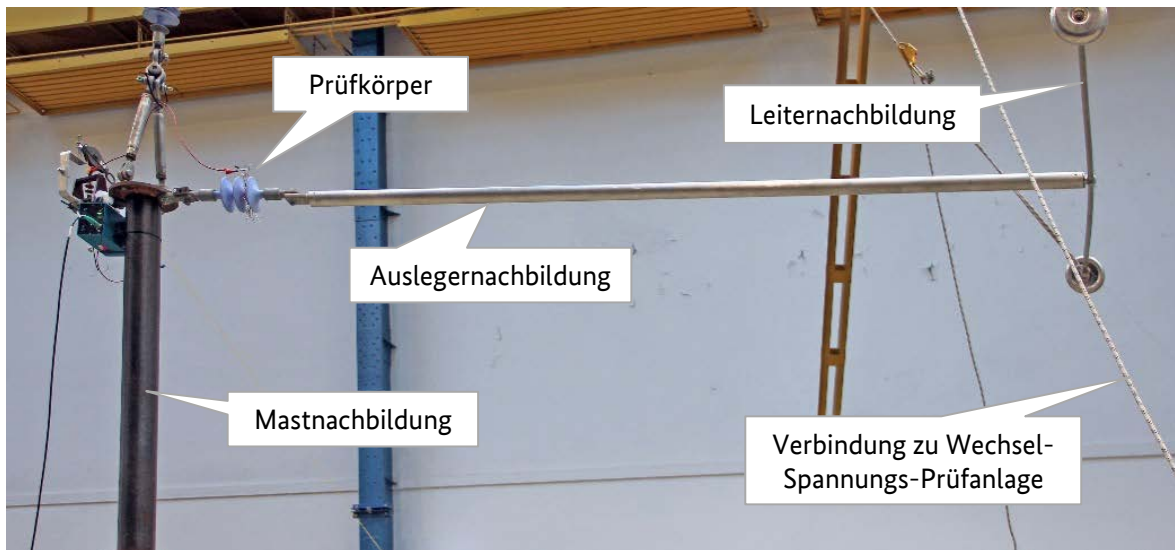


Abbildung 21: Prüfaufbau Ausleger waagrecht

## 2.5.2 Senkrecht in Prüfkammer

Die Untersuchungen in senkrechter Prüfanordnung werden an der HSZG in einer geschlossenen Prüfkammer durchgeführt und enthalten den in Tabelle 10 aufgeführten Umfang.

TABELLE 10: MESSUNGEN BEI SENKRECHTER EINBAULAGE INNERHALB EINER PRÜFKAMMER

Zustand Prüfkörper	Umwelteinfluss		
	trocken	benebelt	vereist
gereinigt	Verbundisolator Porzellanisolator		Verbundisolator
leicht verschmutzt	Verbundisolator	Verbundisolator Porzellanisolator	
stark verschmutzt	Verbundisolator	Verbundisolator Porzellanisolator	

Die Prüfisolatoren befinden sich in senkrechter Einbaulage. Die Prüfspannung wird mittels einer Hochspannungsdurchführung durch die Decke der Prüfkammer zugeführt (Abbildung 22).

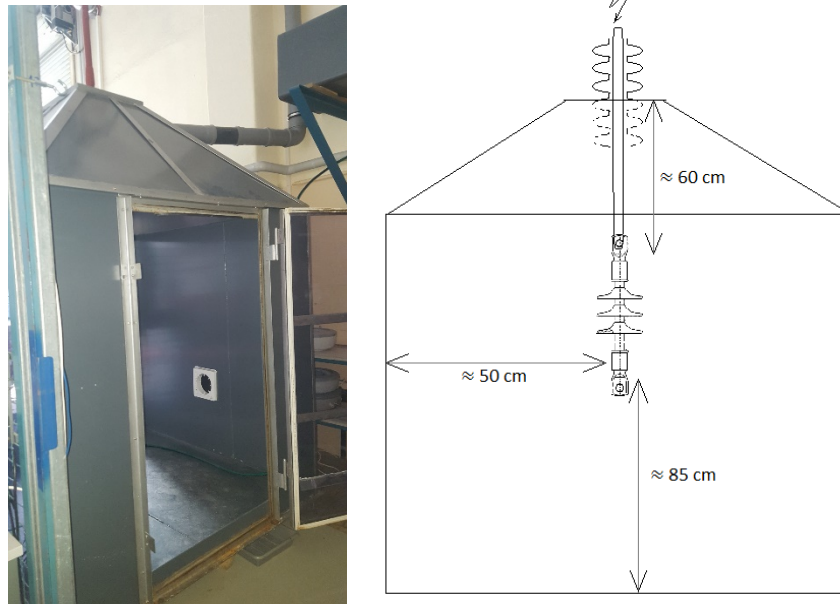


Abbildung 22: Püfkammer mit Hochspannungsdurchführung und Abmessungen

## 2.6 Messkreise

### 2.6.1 Waagerechter Ausleger

Die den waagerechten Ausleger abschließende Leiternachbildung (Abbildung 21, Seite 36) ist mit dem Hochspannungspotential einer 350-kV-/175-kVA-Wechselspannungs-Prüfanlage verbunden. Die von der Wechselspannungs-Prüfanlage bereitgestellte Prüfwechsel-Spannung entspricht DIN EN 60060-1 [14]. Sie wird mit einem kapazitiven Spannungsteiler angeschlossen an ein Scheitelwertmessgerät MU 11 (Serien-Nr. 890 334) nach DIN EN 60060-2 [17] mit einer auf die Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig rückführbaren Messunsicherheit von 1,8 % gemessen.

Der Prüfkörper besteht aus einem Verbundisolator mit entsprechend montiertem KTA. Die vier galvanisch verbundenen Abweiserstacheln des KTAs werden mittels eines Leiters mit dem Eingangskontakt eines Kalotten-Fall-Schalter verbunden (Abbildung 23).

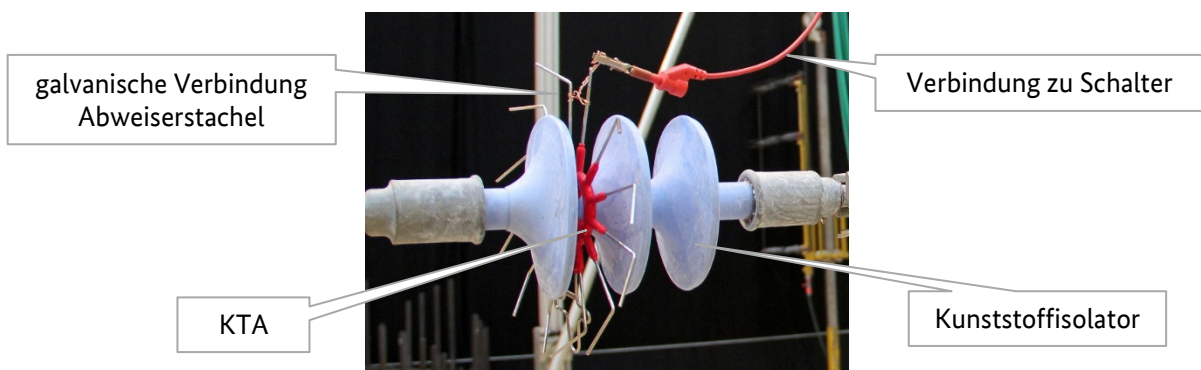


Abbildung 23: galvanische Verbindung KTA Abweiserstacheln – Ausleger waagrecht

Der Ausgangskontakt des Kalotten-Fall-Schalters ist über den Widerstand – zur Nachbildung des Körperwiderstandes der Vögel – mit Erdpotential verbunden. Das Schließen des Schalters stellt somit den fließenden Strom bei Berühren des KTAs durch einen vom Erdpotential kommenden Vogel nach.

Die Messung des **impulsförmigen Stromes** im Augenblick des Schließens des Schalters erfolgt über einen niederinduktiv aufgebauten 50- $\Omega$ -Messwiderstand. Dieser bildet in Reihe mit den jeweiligen ebenfalls niederinduktiv aufgebauten Ergänzungswiderständen 0,45 k $\Omega$ ; 0,95 k $\Omega$ ; 2,95 k $\Omega$  und 4,95 k $\Omega$  die zu untersuchenden Körperwiderstände der Vögel. Zur Vermeidung von parasitären Induktivitäten ist der Strompfad KTA – Schalter – Körperwiderstand Vogel – Erdpotential so kurz wie möglich ausgeführt (Abbildung 24).

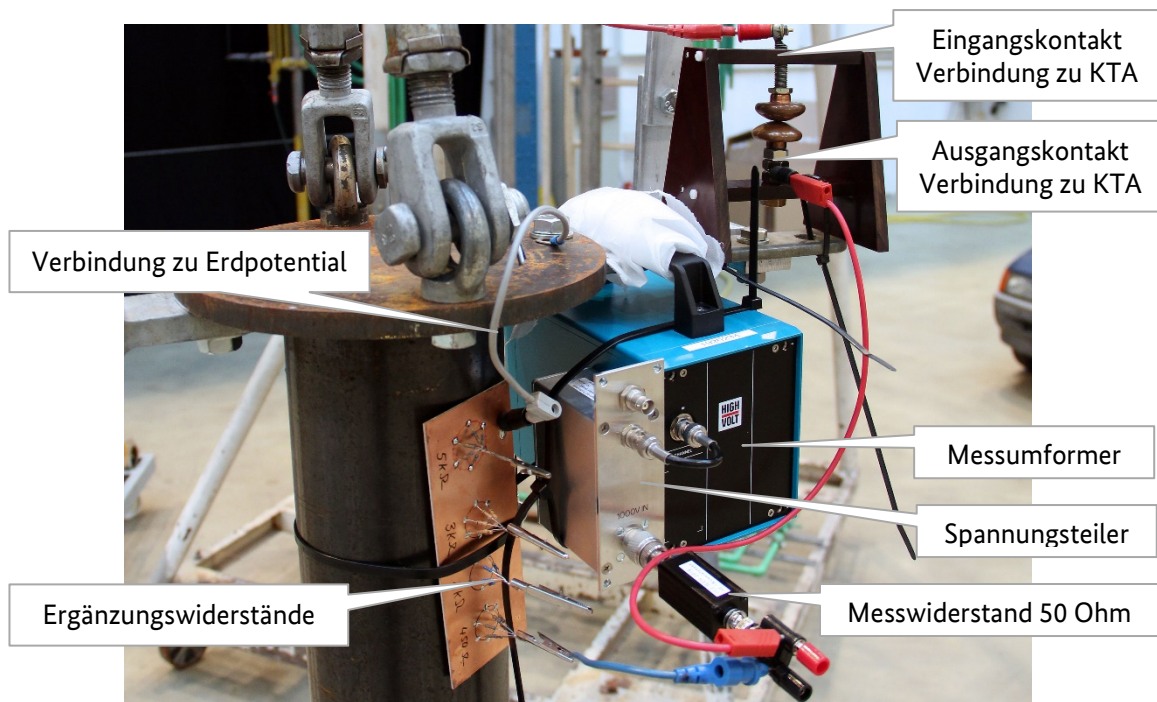


Abbildung 24: Messanordnung impulsförmiger Strom – Ausleger waagrecht

Die am Messwiderstand abgegriffene stromproportionale Spannung wird über einen Spannungsteiler 100:1 (1 M $\Omega$ ; 45 pF) auf für die Eingangsstufe des nachgeschalteten Messumformers unkritische Spannungswerte gewandelt. Der Messumformer ist Bestandteil eines Transienten-Messsystems HiRES Type OR 130-27 (HIGHVOLT Prüftechnik Dresden, Seriennummer 918384) mit einer Abtastrate von 250 MS/s. Die Verbindung zwischen Messumformer und Transienten-Messsystem ist als Lichtwellenleiter ausgeführt (Abbildung 25).

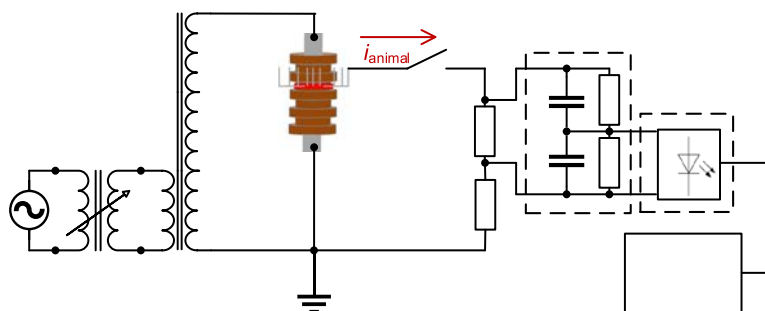


Abbildung 25: Messkreis impulsförmiger Strom schematisch – Ausleger waagrecht

Die Erfassung des **stationären Stromes** erfolgt mittels eines Ableitstrommessgerätes ASM 01 (TUD, Serien-Nr. ASM01-3) über einen im Gerät verbauten Messwiderstand von  $1\text{ k}\Omega$  (Abbildung 26). Die zu untersuchenden Körperwiderstände  $R_k$   $0,5\text{ k}\Omega$ ;  $3\text{ k}\Omega$  und  $5\text{ k}\Omega$  werden durch Reihen- bzw. Parallelschaltung des  $1\text{ k}\Omega$  Messwiderstandes ( $R_m$ ) mit am Eingang des ASM01 platzierten Ergänzungswiderständen ( $R_e$ )  $1\text{ k}\Omega$  (parallel);  $2\text{ k}\Omega$  (in Reihe) und  $4\text{ k}\Omega$  (in Reihe) realisiert. Der Körperwiderstand von  $1\text{ k}\Omega$  entspricht dem Messwiderstand des ASM01.

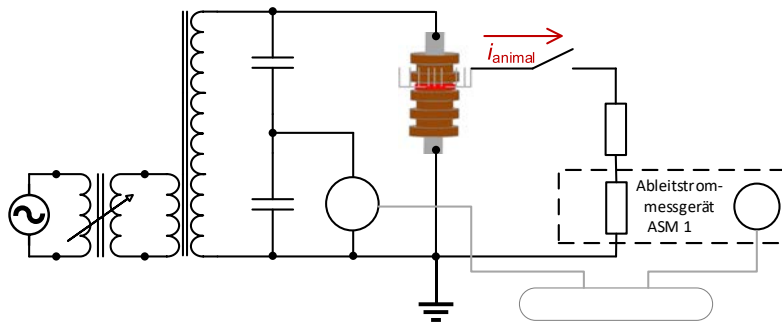


Abbildung 26: Messkreis stationärer Strom schematisch – Ausleger waagrecht

Der stationäre Strom und die speisende Spannung werden darüber hinaus mittels eines mit den Messgeräten verbundenen Datenloggers (Gwinstek Mixed-Domain Oscilloscope MDO-2204EG) quantitativ erfasst (Abbildung 27).

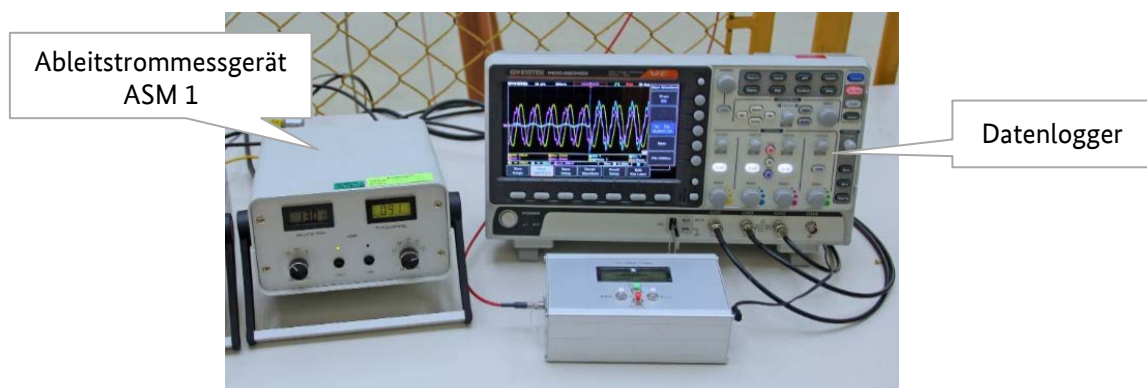


Abbildung 27: Messanordnung stationärer Strom – Ausleger waagrecht – Ableitstrommessgerät (ASM) und Datenlogger

## 2.6.2 Senkrecht in Prüfkammer

Die Prüfwechselspannung bei senkrechter Einbaulage wird mit einer  $35\text{-kV-}/4,4\text{-kVA}$ -Wechselspannungs-Prüfanlage nach DIN EN 60060-1 erzeugt. Die Prüfspannung wird über einen kapazitiven Spannungsteiler und einem Scheitelwertmessgerät MU 11 (Serien-Nr. 861204) nach DIN EN 60060-2 mit einer auf die Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig rückführbaren Messunsicherheit von  $\leq 3\%$  gemessen. Die Zuschaltung über den KTA erfolgt über einen Pneumatik-Schalter (Abbildung 28).



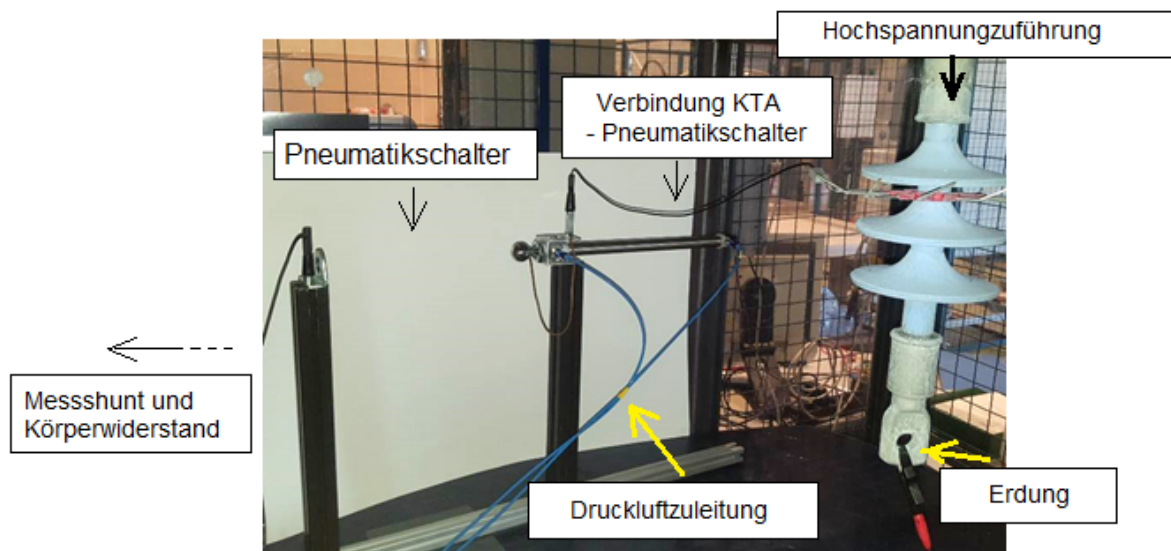


Abbildung 28: Messanordnung senkrecht in Prüfkammer

Zwei Abweiserstacheln des KTAs werden mit einem Kupferleiter verbunden, sodass insgesamt vier Abweiserstacheln galvanisch verbunden sind.

Der Strom wird über einen niederinduktiven  $10\ \Omega$  Messshunt erfasst und über einen 100:1 Tastkopf (100 MHz, 100 M $\Omega$ , 5 pF) mit einem Speicheroszilloskop der Fa. Rohde & Schwarz – RTB 2004 mit einer Abtastrate von 1,25 GS/s gespeichert (Abbildung 29). Zur Realisierung der Körperwiderstände wird der Messwiderstand jeweils durch einen niederinduktiven koaxialen Widerstand (0,49 k $\Omega$ , 0,99 k $\Omega$ , 2,99 k $\Omega$  und 4,99 k $\Omega$ ) ergänzt.

Um bei eventuellen auftretenden Überschlügen unzulässige Spannungen an der Messtechnik zu vermeiden, wird ein Gasableiter (Ansprechspannung 600 V) als Überspannungsschutz verwendet (siehe Abbildung 29 Punkt 7)

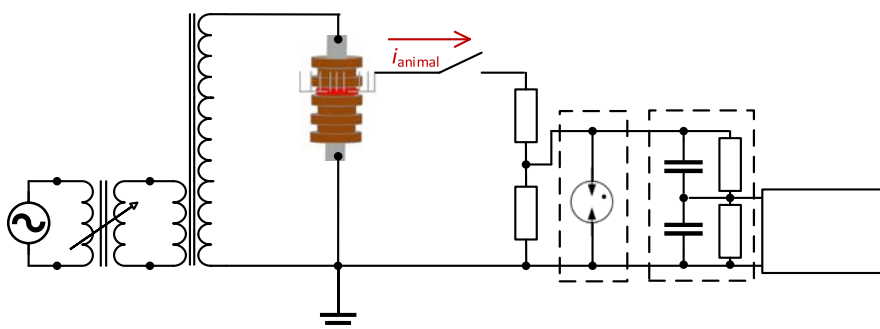


Abbildung 29: Messkreis Strom schematisch – senkrecht in Prüfkammer

### 3 Elektrische Wirkungsweise KTA

Auf Basis der Versuchsanordnung kann die elektrische Wirkungsweise eines Kleintierabweisers (KTA) unter zu Hilfenahme eines abstrahierten elektrischen Ersatzschaltbildes erklärt werden. Darüber hinaus können Abschätzungen getroffen werden, wie sich Veränderungen im Aufbau des KTAs, der Montageort bzw. die Richtung der Annäherung des Vogels an den KTA auswirken. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel folgende Betrachtungen diskutiert:

- Als Basis zur Diskussion der elektrischen Wirkungsweise wird zunächst ein vereinfachtes Ersatzschaltbild des Isolators mit KTA und Vogel erstellt (Kapitel 3.1).
- Aufbauend auf dieses Ersatzschaltbild erfolgt die Diskussion der unterschiedlichen Kontaktierungszustände:
  - Vogel vor dem Berühren des KTAs (Kapitel 3.2),
  - Vogel im Zeitpunkt der Berührung des KTAs (impulsförmige Durchströmung) (Kapitel 3.3) und
  - Vogel berührt den KTA stationär (dauerhafte Durchströmung) (Kapitel 3.4).

Diese Diskussionen werden für die Situationen

- Vogel berührt Erdpotenzial und
- Vogel berührt Hochspannungspotenzial durchgeführt.

#### 3.1 Ersatzschaltbild Isolator – KTA – Vogel

Zur Beschreibung der elektrischen Wirkungsweise eines KTAs wird, wie auch in den Versuchsanordnungen realisiert, der Vogel durch einen Körperwiderstand  $R_K$  und einen Schalter  $S$  ersetzt (Abbildung 30). Der in Abbildung 30 dargestellte Punkt der Verbindung von  $R_K$  mit dem Isolator beschreibt dabei den Rastort des Vogels. Mittels des Schalters  $S$  lassen sich die drei in der Praxis relevanten Testzustände

- Vogel vor dem Berühren des KTAs – Schalter  $S$  offen,
- Vogel zum Zeitpunkt der Berührung mit dem KTA – Schalter  $S$  im Augenblick des Schließens,
- Vogel berührt den KTA dauerhaft (stationär) – Schalter  $S$  geschlossen

erfassen. Abbildung 30 zeigt somit schematisch einen Vogel auf Erdpotential ohne Berührung des KTAs. Diese Situation wurde bei den durchgeführten Messungen als Ausgangssituation eingestellt.

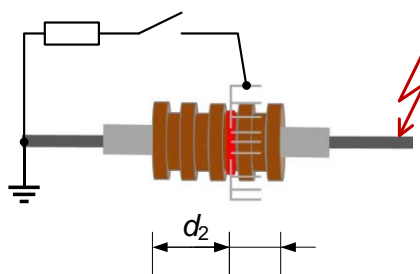


Abbildung 30: Isolator – KTA – Vogel schematisch – Darstellung der Ausgangssituation für die Messungen

Der Montageort des KTAs auf dem Isolator ist mit der Länge  $d_1$  erfasst. Die Länge des Isolators ergibt sich aus der Summe  $d_1 + d_2$ . Dabei ist, entsprechend der gängigen Praxis des Einsatzes der KTA:  $d_1 < d_2$ .

Grundsätzlich ergibt sich der Strom  $I$  aufgrund einer Potenzialdifferenz bzw. Spannung  $U$ , welche an einem Widerstand  $R$  (Ohm'sches Gesetz) bzw. einer Kapazität  $C$  anliegt.

Ein stationärer Strom  $I_R$  durch einen Widerstand  $R$  aufgrund einer Spannung  $U$  ergibt sich entsprechend

$$I_R = \frac{U}{R}$$

mit

$I_R$	Strom durch Widerstand
$U$	Spannung über Widerstand
$R$	Widerstand.

Ein stationärer Strom  $I_C$  durch eine Kapazität  $C$  aufgrund einer Spannung  $U$  ergibt sich entsprechend

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{U}{1/2\pi f C}$$

mit

$I_C$	kapazitiver Verschiebestrom
$U$	Spannung über Kapazität
$X_C$	Kapazitive Reaktanz (Blindwiderstand)
$f$	Frequenz der Spannung
$C$	Kapazität.

Für das Verständnis der elektrischen Wirkungsweise des KTAs werden dazu die wirksamen Ersatzwiderstände  $R$  und Ersatzkapazitäten  $C$  ermittelt.

Durch ein vereinfachtes kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild (Abbildung 31) werden somit der Isolator, der KTA und die umgebende Luft mit folgenden Elementen beschrieben.

▪ **Isolator**

- Kapazitäten  $C_{Iso 1}$  und  $C_{Iso 2}$

Unter der Vereinfachung der Beschreibung des Isolators als Zylinder, lassen sich die Kapazitäten des Isolierstoffes durch

$$C_{Iso} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_{Iso}}{d}$$

mit

$\epsilon_0$	Permittivität des Vakuums (elektrische Feldkonstante)
$\epsilon_r$	stoffabhängige relative Permittivität des Isolierstoffes
$A_{Iso}$	Fläche des Isolierstoffes
$d$	Länge des Isolierstoffes des Isolators

ausdrücken.

Für  $A_{Iso}$  und  $\epsilon_r$  konstant über den ganzen Isolator sowie bei entsprechender Montage des KTAs auf dem Isolator mit  $d_1 < d_2$  ergibt sich  $C_{Iso 1} > C_{Iso 2}$ .

- Widerstände  $R_{Iso 1}$ ,  $R_{Iso 2}$ ,  $R_{F 1}$  und  $R_{F 2}$

$R_{Iso 1}$  und  $R_{Iso 2}$  beschreiben die Widerstände des Isolierstoffes des Isolators. Unter der Vereinfachung der Beschreibung des Isolators als Zylinder lassen sich Widerstände des Isolierstoffes durch

$$R_{Iso} = \rho \frac{d}{A_{Iso}}$$

mit

$\rho$	spezifischer elektrischer Widerstand des Isolierstoffes
$A_{Iso}$	Fläche des Isolierstoffes
$d$	Länge des Isolierstoffes des Isolators

ausdrücken.

$R_{F1}$  und  $R_{F2}$  sind die Widerstände der Grenzfläche zwischen Isolierstoff und Luft (Fremdschichtwiderstand).

Der Fremdschichtwiderstand ist entsprechend

$$R_F = \frac{1}{\kappa_S} F = \frac{1}{\kappa_S} \frac{1}{2\pi} \int_0^{l_K} \frac{dl}{r(l)}$$

mit

$\kappa_S$	Schichtleitfähigkeit der Fremdschicht
$F$	Formfaktor des Isolators
$l_K$	Kriechweg des Isolators
$r(l)$	Radius des Isolators am Ort $l$

bestimmt.

Für  $d_1 < d_2$  sowie der Annahme, dass  $\rho$  zum Betrachtungszeit und  $A_{Iso}$  über den ganzen Isolator konstant sind, gilt  $R_{Iso1} < R_{Iso2}$ . Die Widerstände des Isolierstoffes  $R_{Iso1}$  und  $R_{Iso2}$  sind verhältnismäßig sehr groß. Damit kann der Einfluss dieser Widerstände auf die elektrische Wirkungsweise vernachlässigt werden. Aus diesem Grund werden bei den folgenden Ersatzschaltbildern diese Widerstände nicht mehr aufgeführt.

Für  $d_1 < d_2$  sowie der Annahme, dass  $\kappa_S$  zum Betrachtungszeit über den ganzen Isolator,  $F$  für Abschnitte gleicher Länge und  $A_{Iso}$  konstant sind, gilt  $R_{F1} < R_{F2}$ .

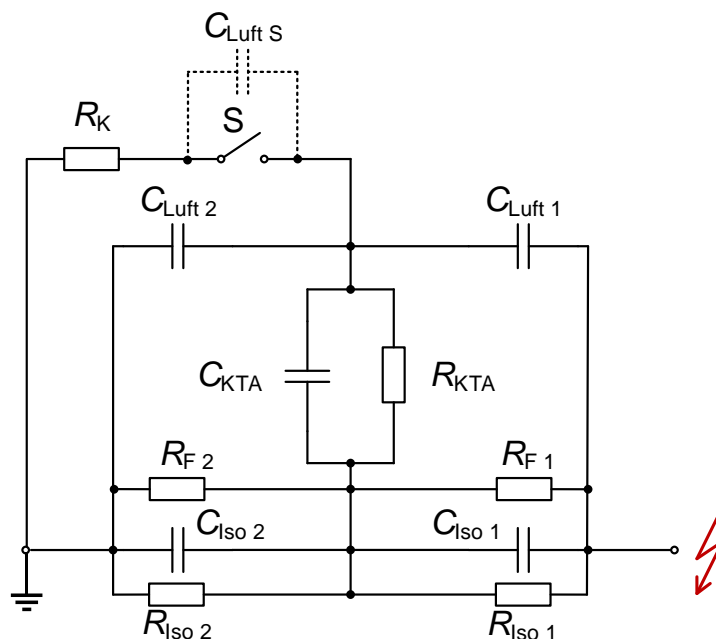


Abbildung 31: Vereinfachtes kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild Isolator – KTA – Vogel hergeleitet aus Abbildung 30

▪ **KTA**

- Kapazität  $C_{KTA}$

Die kapazitive Kopplung des KTAs zum Isolator kann bei Vernachlässigung der Stützknoppen als Reihenschaltung der Kapazität des Luftspaltes zwischen Isolator-Oberfläche und Kunststoffring des KTAs sowie der Kapazität des Kunststoffringes beschrieben werden. Unter Annahme von geometrischen Vereinfachungen (Abbildung 32) gilt näherungsweise:

$$C_{KTA \text{ Ring}} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{a \sum_{s=1}^n s}{d_3}$$

und

$$C_{KTA \text{ Luft}} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{a \sum_{s=1}^n s}{d_4}$$

mit

$\epsilon_0$	Permittivität des Vakuums (elektrische Feldkonstante)
$\epsilon_r$	stoffabhängige relative Permittivität ( $\epsilon_r \approx 1$ für Luft)
$a$	Breite der Elektroden des KTAs im Kunststoff
$s$	Länge der Elektroden des KTAs im Kunststoff
$d_3$	Abstand Elektroden – Innenfläche Kunststoffring
$d_4$	Abstand Innenfläche Kunststoffring – Isolator Oberfläche.

Auf Grund der Reihenschaltung gilt  $C_{KTA} < C_{KTA \text{ Luft}}$ . Und auf Grund der größeren Permittivität des Kunststoffes gilt  $C_{KTA \text{ Luft}} < C_{KTA \text{ Ring}}$ . Bei komplettem Aufliegen des Kunststoffringes auf dem Isolator entfällt  $C_{KTA \text{ Luft}}$  und es gilt  $C_{KTA} = C_{KTA \text{ Ring}}$ .

- Widerstand  $R_{KTA}$

$R_{KTA}$  ist die Zusammenfassung der parallel liegenden ohmschen Widerstände des Kunststoffringes und der Grenzfläche zwischen Kunststoff und Luft (Fremdschichtwiderstand). Der wirksame Widerstand des Kunststoffringes ist von der Geometrie des Ringes und dem spezifischen elektrischen Widerstand des Kunststoffes abhängig.

Der Fremdschichtwiderstand wird – entsprechend der wirksamen Länge und Breite eines Kriechweges auf der Kunststoffoberfläche des KTAs – von der Oberfläche des Isolators zu den Elektroden sowie der Leitfähigkeit der Fremdschicht bestimmt.

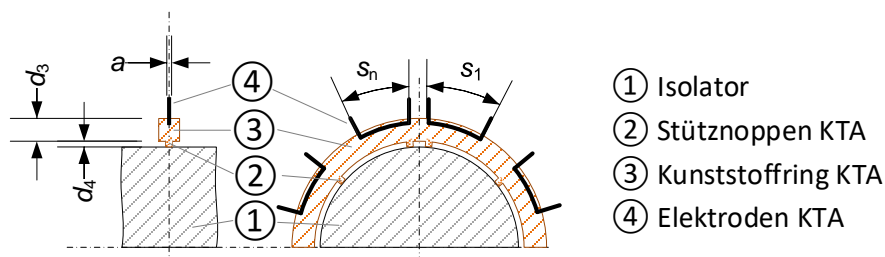


Abbildung 32: Kopplung KTA – Isolator geometrisch vereinfacht

▪ **Luft**

- Kapazitäten  $C_{Luft 1}$ ,  $C_{Luft 2}$  und  $C_{Luft s}$

Unter der Vereinfachung der Beschreibung der zwischen den Elektroden befindlichen Luft als Zylinder, lassen sich die Kapazitäten der Luft durch

$$C_{Luft} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_{Luft}}{d}$$

mit

$\epsilon_0$	Permittivität des Vakuums (elektrische Feldkonstante)
$\epsilon_r$	stoffabhängige relative Permittivität ( $\epsilon_r \approx 1$ für Luft)
$A_{\text{Luft}}$	Fläche der Luft (Fläche des Zylinders um Isolator)
$d$	Länge des Isolierstoffes des Isolators

ausdrücken.

Für  $A_{\text{Luft}}$  und  $\epsilon_r$  konstant über den ganzen Isolator sowie bei entsprechender Montage des KTAs auf dem Isolator mit  $d_1 < d_2$  ergibt sich  $C_{\text{Luft } 1} > C_{\text{Luft } 2}$ .

Die Größe von  $C_{\text{Luft } S}$  ist von der Größe der Schaltkontakte und deren Abstand abhängig.

- Widerstände Luft

Auf Grund des geringen Leitwertes von Luft sind die Widerstände der Luft sehr hoch. In den betrachteten Bereichen hat damit der Widerstand der Luft einen äußerst geringen Einfluss auf die Ströme. Diese werden von den entsprechenden Kapazitäten dominiert. Aus diesem Grund sind die Widerstände von vornherein nicht im Ersatzschaltbild aufgeführt.

## 3.2 Vogel vor dem Berühren des KTAs

### 3.2.1 Vogel auf Erdpotential

Bei gereinigtem und trockenem Isolator sind die Widerstände  $R_{F1}$ ,  $R_{F2}$  und  $R_{KTA}$  groß gegenüber den kapazitiven Reaktanzen  $X_{C_{\text{Iso } 1}}$ ,  $X_{C_{\text{Iso } 2}}$  und  $X_{C_{\text{KTA}}}$ . Damit sind die Ströme  $i_{R F}$  und  $i_{R KTA}$  für die Betrachtung dieses Zustandes vernachlässigbar (Abbildung 33).

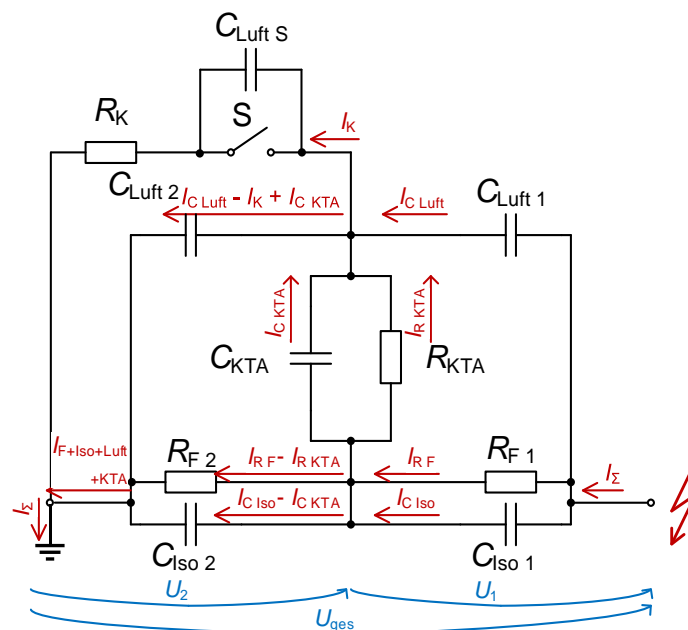


Abbildung 33: Vereinfachtes kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild – stationäre Ströme vor Berühren KTA

Die Größe und Richtung von  $I_{C_{\text{KTA}}}$  ist von den Verhältnissen  $C_{\text{Luft } 1}/C_{\text{Luft } 2}$  und  $C_{\text{Iso } 1}/C_{\text{Iso } 2}$  abhängig. Unter der in 3.1 vereinfachend getroffenen Annahme, die Kapazitäten als Zylinder zu betrachten, gilt  $C_{\text{Luft } 1}/C_{\text{Luft } 2} = C_{\text{Iso } 1}/C_{\text{Iso } 2}$  mit  $I_{C_{\text{KTA}}} = 0$ . Weiterhin wird auf Grund von  $R_K \ll X_{C_{\text{Luft } S}}$  die Größe des sich einstellenden Stromes  $I_k$  von  $X_{C_{\text{Luft } S}}$  bestimmt. Für diesen Fall gilt für die Spannungen

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_{Iso\ 2} + C_{Luft\ 2} + C_{Luft\ S}}{C_{Iso\ 1} + C_{Luft\ 1}}$$

Auf Grund  $C_{Iso\ 2} + C_{Luft\ 2} \gg C_{Luft\ S}$  kann vereinfachend angenommen werden

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{C_{Iso\ 2} + C_{Luft\ 2}}{C_{Iso\ 1} + C_{Luft\ 1}} = \frac{d_1}{d_2}$$

Damit ist die sich einstellende Spannungsverteilung, d. h. das am KTA abgreifbare Potential, vom Montageort des KTAs abhängig und für  $d_1 < d_2$  gilt  $U_1 < U_2$ .

In realen Anordnungen wird auf Grund von im Ersatzschaltbild nicht dargestellter parasitärer Kapazitäten  $C_{Luft\ 1}/C_{Luft\ 2} \neq C_{Iso\ 1}/C_{Iso\ 2}$  mit  $I_{C\ KTA} > 0$  und  $U_1/U_2 \neq d_1/d_2$  sein. Besonderen Einfluss haben dabei parasitäre Kapazitäten zwischen dem Isolator und weiteren Teilen auf Erdpotential. Diese parasitären Kapazitäten erhöhen maßgeblich  $C_{Luft\ 2}$ . Es gilt jedoch weiterhin bei  $d_1 < d_2$  ist  $U_1 < U_2$ . Darüber hinaus wird  $I_{C\ KTA}$  klein bleiben.

Bei Verschmutzung und Befeuchtung bzw. Vereisung des Isolators und des KTAs sind die Ströme durch  $R_{F\ 1}$ ,  $R_{F\ 2}$  und  $R_{KTA}$  nicht mehr vernachlässigbar. Das führt zu einer Erhöhung von  $I_{Iso+Luft}$  und gegebenenfalls zu einem veränderten Verhältnis  $U_1/U_2$ . Auch hier ist davon auszugehen, dass bei  $d_1 < d_2$  weiterhin  $U_1 < U_2$  gilt.

Der  $R_k$  durchfließende Strom vor dem Berühren des KTAs ergibt sich in allen Fällen aus

$$I_K = \frac{U_2}{X_{C\ Luft\ S}} = \frac{U_2}{1/2\pi f C_{Luft\ S}}$$

Vergleichend folgt  $I_k \ll I_{C\ Luft}$  wegen  $C_{Luft\ S} \ll C_{Luft\ 2}$  mit  $X_{C\ Luft\ S} \gg X_{C\ Luft\ 2}$ .

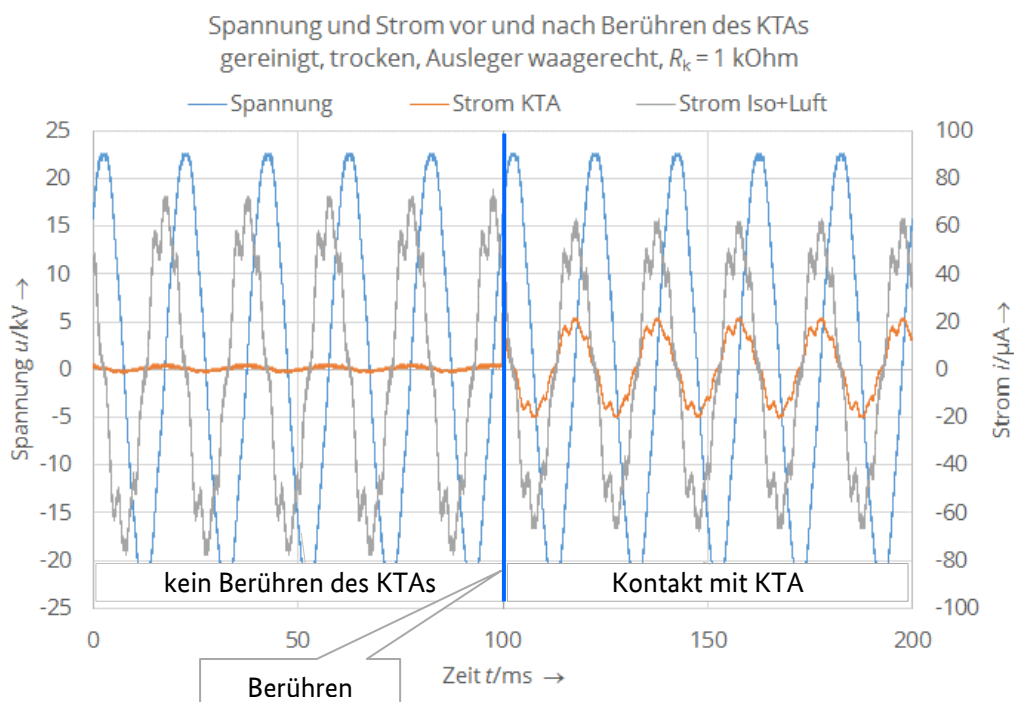


Abbildung 34: Spannung und Strom vor und nach Berühren des KTAs

Eine orientierende Messung am sauberen, trockenen Isolator mit Erfassen der Spannung sowie der Ströme  $I_{\text{Iso+Luft}}$  und  $I_k$  bestätigt die Annahme eines sehr kleinen  $I_k$  sowie die Dominanz der kapazitiven Ströme (Abbildung 34). D. h. die Ströme eilen der Spannung um nahezu  $90^\circ$  voraus. Mit zunehmender Annäherung des Vogels an die Elektroden des KTAs vergrößert sich  $C_{\text{Luft S}}$  und damit auch  $I_k$ .

### 3.2 Vogel auf Hochspannungspotential

Im Fall der Annäherung des Vogels vom Hochspannungspotential liegen  $C_{\text{Luft S}}$  und  $R_K$  parallel zu  $C_{\text{Luft 1}}$ . Der  $R_K$  durchfließende Strom ergibt sich dann aus

$$I_K = \frac{U_1}{X_{C_{\text{Luft S}}}} = \frac{U_1}{1/2\pi f C_{\text{Luft S}}}$$

Da sich das Verhältnis  $U_1/U_2$  nicht wesentlich ändert, ist wegen  $U_1 < U_2$  – bei gleichem angenommenen Abstand des Vogels zum KTA –  $I_k$  kleiner als bei der Annäherung von Erdpotential.

## 3.3 Vogel zum Zeitpunkt des Berührens des KTAs (impulsförmige Durchströmung)

### 3.3.1 Vogel auf Erdpotential

Unmittelbar bei Berühren des KTAs durch den Vogel, im Ersatzschaltbild zum Zeitpunkt des Schließens des Schalters, erfolgt über  $R_K$  ein Ladungsausgleich zwischen den von  $R_K$  kontaktierten Elektroden der Kapazitäten (Abbildung 35).

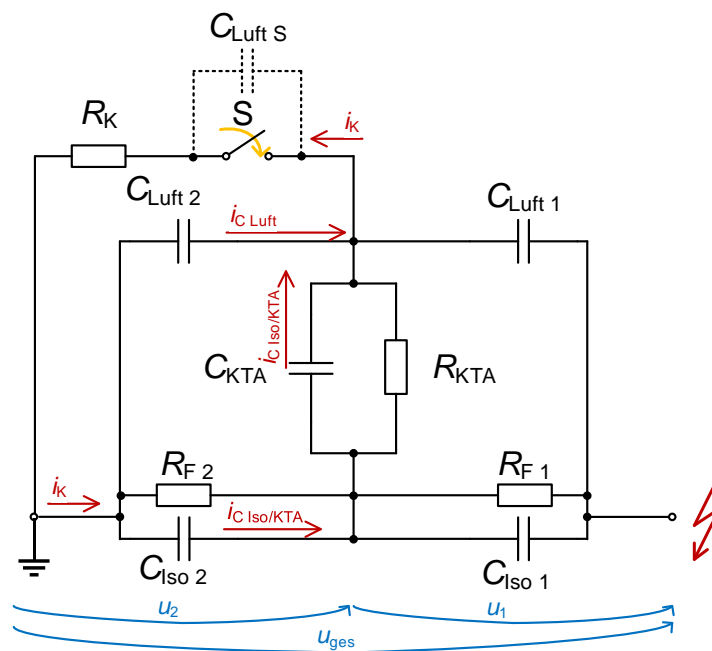


Abbildung 35: Vereinfachtes kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild – impulsförmiger Strom bei Berühren KTA



Die von einem von Erdpotential kommenden Vogel kontaktierten Kapazitäten sind  $C_{Luft 2}$  parallel zu der Reihenschaltung  $C_{Iso 2}$  mit  $C_{KTA}$ . Als resultierende Kapazität ergibt sich in diesem Fall

$$C_{res E} = C_{Luft 2} + \frac{C_{Iso 2} \cdot C_{KTA}}{C_{Iso 2} + C_{KTA}} = C_{Luft 2} + C_{Iso 2 KTA}$$

mit grob aus den Dimensionen der Prüfkörper abgeschätzten Verhältnis

$$C_{Iso 2 KTA} \approx 0,1 \cdot C_{Luft 2}$$

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  des Berührens ist die auf den Elektroden vorhandene Ladung

$$Q_{res E}(t_0) = u_2(t_0) \cdot C_{res E}$$

Die Größe der vorhandenen Ladung ist somit von der resultierenden Kapazität und des zum Zeitpunkt des Berührens herrschenden Augenblickswertes der oszillierenden Wechselspannung  $u_2(t_0)$  abhängig. Bei Berühren im Spannungsmaximum (Scheitelwert der sinusförmigen Wechselspannung) ist die Ladung somit am größten.

Der Ladungsausgleich verursacht einen impulsförmigen Strom  $i_K$  durch  $R_K$ . Dieser steigt zum Zeitpunkt des Berührens theoretisch unendlich schnell an und nimmt bestimmt von der Zeitkonstante

$$\tau_E = R_K \cdot C_{res E}$$

mit exponentiellem Verlauf ab. Die Spannung  $u_2(t)$  verringert sich entsprechend

$$u_2(t) = i_K(t) \cdot R_K$$

proportional zu  $i_K(t)$ . Da die am System anliegende Spannung  $u_{ges}(t)$  durch die Umladung nicht beeinflusst wird, steigt  $u_1(t)$  entsprechend

$$u_{ges}(t) = u_1(t) + u_2(t)$$

an.

Bei Verschmutzung und Befeuchtung bzw. Vereisung des Isolators und des KTAs kann sich einerseits abhängig von der Dicke und der Permittivität der Fremd- bzw. Eisschicht  $C_{res E}$  erhöhen, welche eine Erhöhung des Stromes  $i_K(t)$  bedeutet. Andererseits kann es auch hier zu einer Veränderung des Verhältnisses  $U_1/U_2$  kommen. Wird davon ausgegangen, dass der Vogel vom Erdpotential ausgehend den KTA berührt, dann gilt folglich: wenn  $U_1 > U_2$  dann sinkt der Strom  $i_K(t)$  und wenn  $U_1 < U_2$  dann steigt der Strom  $i_K(t)$ .

### 3.3.2 Vogel auf Hochspannungspotential

Unter Verwendung der Abschätzungen

$$C_{Iso 2 KTA} \approx 0,1 \cdot C_{Luft 2} \text{ und } C_{Iso 1 KTA} \approx 0,1 \cdot C_{Luft 1}$$

lassen sich die Ladungen zum Zeitpunkt  $t = 0$  des Berührens des KTAs für den Vogel von Erdpotential (E) kommend mit

$$\begin{aligned} Q_{res E}(t_0) &\approx 1,1 C_{Luft 2} \cdot u_{ges}(t_0) \frac{d_2}{d_1 + d_2} = 1,1 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d_2} \cdot u_{ges}(t_0) \frac{d_2}{d_1 + d_2} \\ &= 1,1 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d_1 + d_2} \cdot u_{ges}(t_0) \end{aligned}$$

und für den Vogel von Hochspannungspotential (HS) kommend mit

$$\begin{aligned} Q_{res HS}(t_0) &\approx 1,1 C_{Luft 1} \cdot u_{ges}(t_0) \frac{d_1}{d_1 + d_2} = 1,1 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d_1} \cdot u_{ges}(t_0) \frac{d_1}{d_1 + d_2} \\ &= 1,1 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d_1 + d_2} \cdot u_{ges}(t_0) \end{aligned}$$

bestimmen. Für  $A$  und  $\varepsilon_r$  konstant über den ganzen Isolator (Annahme zur Abschätzung: homogene Anordnung) ergeben sich nahezu unabhängig vom Montageort des KTAs für beide Situationen die gleiche wirksame Ladung. Die Höhe der umgesetzten Ladung und damit auch des übertragenen Energieimpulses auf den Vogel ist dementsprechend unabhängig davon, ob sich das Tier auf dem Hochspannungs- oder Erdpotential während der Berührung mit dem KTA befindet.

Die Parameter des sich ergebenden Stromimpulses sind jedoch vom Montageort des KTAs abhängig. Für den vorliegenden Fall mit  $d_1 < d_2$  gilt  $C_{res HS} > C_{res E}$  und daraus folgend  $\tau_{HS} > \tau_E$ . Hieraus ergibt sich bei Berührung des KTAs vom Erdpotential aus ein höherer Spitzenwert des Stromimpulses gegenüber der Annäherung vom Hochspannungspotential.

## 3.4 Vogel berührt den KTA (stationäre Durchströmung)

### 3.4.1 Vogel auf Erdpotential

Nach erfolgtem Ladungsausgleich stellt sich bei weiter anhaltendem Kontakt des Vogels mit dem KTA ein neuer stationärer Zustand ein, bei welchem ein konstanter Stromfluss durch den Vogel auftritt.

Bei gereinigtem, trockenem Isolator sind die Widerstände  $R_{F 1}$ ,  $R_{F 2}$  und  $R_{KTA}$  groß gegenüber den kapazitiven Reaktanzen  $X_{C Iso 1}$ ,  $X_{C Iso 2}$  und  $X_{C KTA}$ . Damit sind die Ströme  $I_{R Iso}$  und  $I_{R KTA}$  für die Betrachtung dieses Zustandes vernachlässigbar (Abbildung 36).

Der stationäre Strom  $I_k$  ist größer als vor dem Berühren (Abbildung 34) und wird

$$I_K = \frac{U_{ges}}{R_K + \frac{X_{C Luft 1}(X_{C Iso 1} + X_{C KTA})}{X_{C Luft 1} + X_{C Iso 1} + X_{C KTA}}}$$

mit

$$R_K \ll \frac{X_{C Luft 1}(X_{C Iso 1} + X_{C KTA})}{X_{C Luft 1} + X_{C Iso 1} + X_{C KTA}}$$

von den Reaktanzen dominiert.

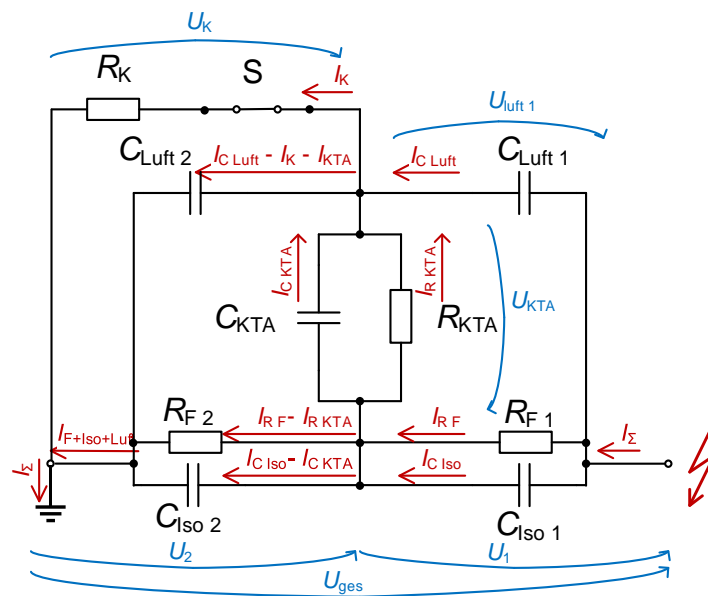


Abbildung 36: Vereinfachtes kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild – stationäre Ströme bei längerem Kontakt mit KTA

Die Spannung  $U_K$  ergibt sich entsprechend aus

$$U_K = I_K \cdot R_K$$

und die Spannung  $U_{Luft 1}$  aus

$$U_{Luft 1} = U_{ges} - U_K = U_1 + U_{KTA}$$

mit

$$U_K \ll U_{Luft 1}$$

Bei Verschmutzung und Befeuchtung bzw. Vereisung des Isolators und des KTAs sind die Ströme durch  $R_{F 1}$ ,  $R_{F 2}$  und  $R_{KTA}$  nicht mehr vernachlässigbar und führen zu einer weiteren Erhöhung von  $I_K$ . Je leitfähiger eine Verschmutzungsschicht ist, desto größer wird hierbei der durch den Vogel fließende Strom.

### 3.4.2 Vogel auf Hochspannungspotential

Bei längerem Kontakt mit dem KTA eines auf Hochspannungspotential befindlichen Vogels wird der Strom  $I_k$  maßgeblich durch  $C_{Luft 2}$ ,  $C_{Iso 2}$ ,  $R_{F 2}$ ,  $C_{KTA}$  und  $R_{KTA}$  bestimmt. Wegen  $C_{Luft 1} > C_{Luft 2}$  mit  $X_{C_{Luft 1}} < X_{C_{Luft 2}}$ ;  $C_{Iso 1} > C_{Iso 2}$  mit  $X_{C_{Iso 1}} < X_{C_{Iso 2}}$  und  $R_{F 1} < R_{F 2}$  ist in diesem Fall der stationäre Strom über  $R_K$  kleiner als bei erdseitigem Kontakt.

## 4 Messergebnisse

### 4.1 Versuchsdurchführung

Nach entsprechender Realisierung der Oberflächenzustände, Einstellung der Umwelteinflüsse und Einbau in die Versuchsanordnung werden die Prüfobjekte mit einer Prüfwechselspannung von 16 kV und einer Frequenz von 50 Hz belastet. Die beanspruchende Spannung von 16 kV wurde seitens der DB Netz AG als höchste an der Oberleitung auftretende Spannung benannt. Die Frequenz von 50 Hz ergibt sich aus den zur Verfügung stehenden Prüfanlagen. Eine Diskussion des Unterschiedes der bei 50 Hz gemessenen Ströme zu den sich bei 16,7 Hz einstellenden Strömen enthält Kapitel „6 Zusammenfassender Vergleich der Messwerte“.

Mittels Schließen des Schalters in der Messanordnung werden der impulsförmige Strom im Augenblick des Zuschaltens und der sich danach einstellende stationäre Strom über den Körperwiderstand der Vögel  $R_K$  gemessen. Dabei wird der Schalter für eine Mindestkontaktzeit von 30 s geschlossen gehalten.

Jede der in Tabelle 11 aufgeführten Testreihe umfasst drei Testobjekte.

TABELLE 11: ÜBERSICHT TESTREIHEN

Testreihe Nr.	Prüfkörper	Zustand Oberfläche	Umwelt	Versuchsanordnung	Widerstände in kOhm
1.1	Verbundisolator	gereinigt	trocken	senkrecht Prüfkammer	0,5; 1; 3; 5
1.2			trocken	Ausleger waagrecht	
1.3			beregnet		
1.4			vereist	senkrecht Prüfkammer	
2.1	Verbundisolator	leicht verschmutzt	trocken	senkrecht Prüfkammer	0,5; 1; 3; 5
2.2			trocken	Ausleger waagrecht	
2.3			beregnet		
2.4			benebelt	senkrecht Prüfkammer	
3.1	Verbundisolator	stark verschmutzt	trocken	senkrecht Prüfkammer	0,5; 1; 3; 5
3.2			trocken	Ausleger waagrecht	
3.3			beregnet		
3.4			benebelt	senkrecht Prüfkammer	

Testreihe Nr.	Prüfkörper	Zustand Oberfläche	Umwelt	Versuchs-anordnung	Widerstände in kOhm
4.1	Verbund-isolator	sehr schwer verschmutzt	trocken	senkrecht Prüfkammer	0,5; 1; 3; 5
4.2			trocken	Ausleger waagrecht	
4.3			beregnet		
4.4			benebelt	senkrecht Prüfkammer	
5.1	Porzellan-isolator	gereinigt	trocken	senkrecht Prüfkammer	0,5; 1; 3; 5
5.2		leicht verschmutzt	benebelt	senkrecht Prüfkammer	
5.3		stark verschmutzt	benebelt	senkrecht Prüfkammer	

## 4.2 Stromkennwerte

### 4.2.1 Definition impulsförmiger Strom

Gemessen wird der impulsförmige Strom (Abbildung 37 und Abbildung 38) beim Schließen des Pfades KTA –  $R_K$  (Zuschalten) mittels Schalter S. Aus diesem Wert wird die resultierende elektrische Ladung  $Q$  und elektrische Energie  $E$  berechnet.

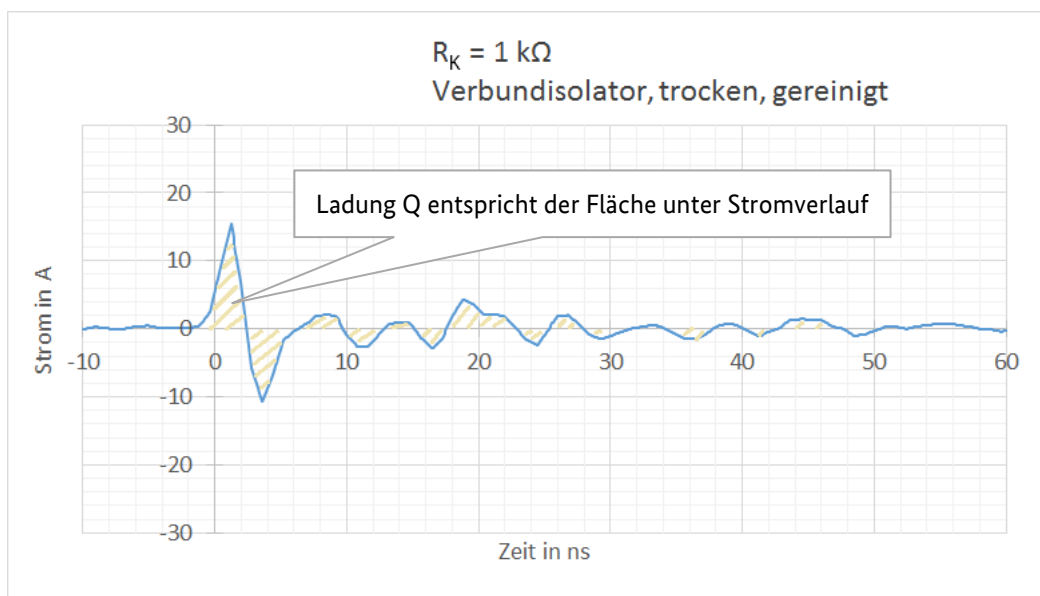


Abbildung 37: Beispiel impulsförmiger beim Schließen des Pfades über den KTA – Messung HSZG

Die elektrische Ladung  $Q$  und die elektrische Energie  $E$  werden mittels der Software Matlab unter Nutzung folgender Beziehung berechnet:

$$Q = \int |i(t)| \cdot dt$$

$$E = R \cdot \int i(t)^2 \cdot dt$$

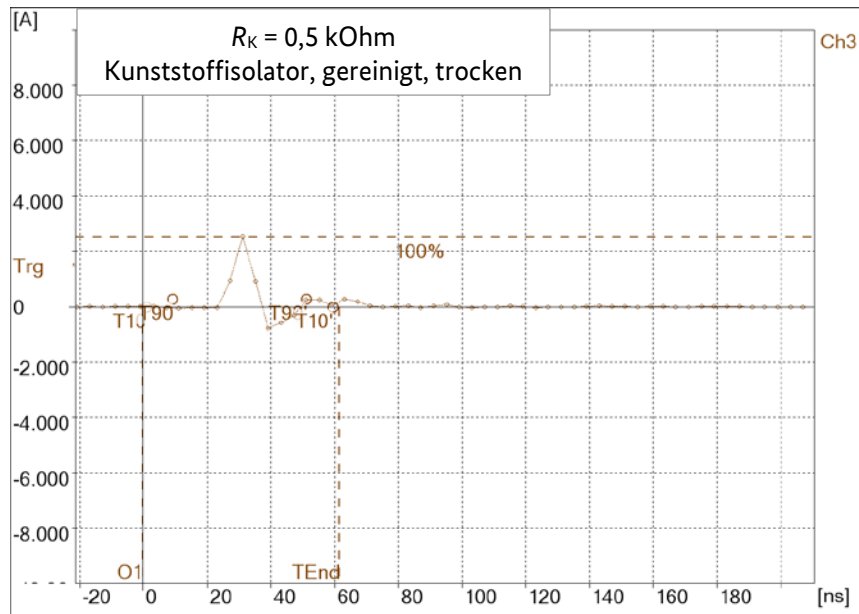


Abbildung 38: Beispiel impulsförmiger Strom beim Schließen des Pfades über den KTA – Messung TUD

## 4.2.2 Definition stationärer Strom

Ausgewertet wird der Effektivwert des stationären Stromes (Abbildung 39), der sich nach Schließen des Schalters S einstellt.

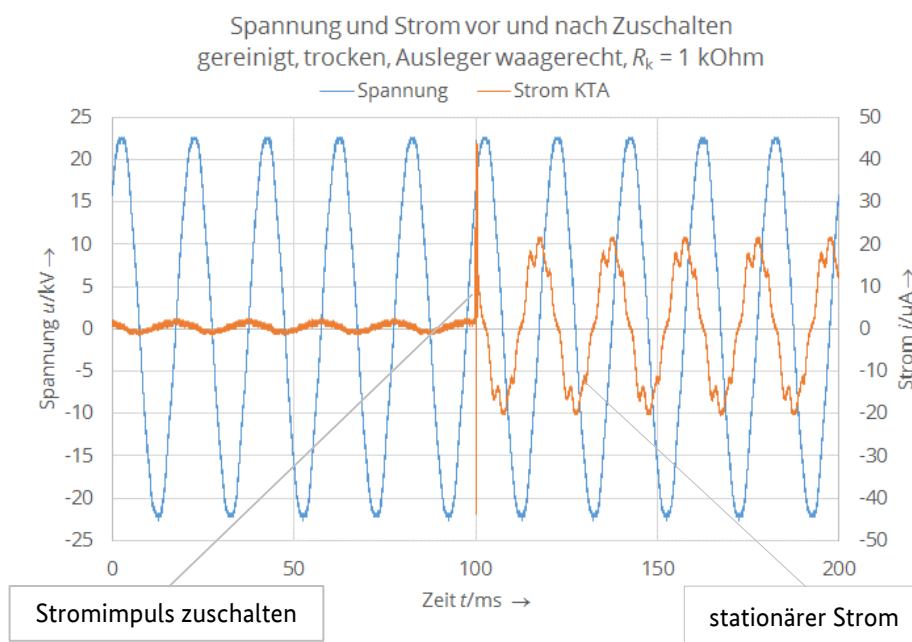


Abbildung 39: Spannung und Strom vor und nach Zuschalten KTA

## 4.3 Messergebnisse Impulswerte an Verbundisolatoren

### 4.3.1 Oberfläche: gereinigt

Bei den folgenden Untersuchungen werden die Verbundisolatoren vor dem Versuchsbeginn entsprechend der im Kapitel 2.4.1 beschriebenen Vorgehensweise gereinigt und konditioniert. Ausgewertet wird die umgesetzte Ladung und der Energieimpuls bei erdseitiger Berührung des KTAs über verschiedene Körperwiderstände unter diversen Umwelteinflüssen.

TABELLE 12: TEST 1.1 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR GEREINIGT, TROCKEN, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	95	100	92	1450	1000	2200
1	72	115	46	4500	4700	2500
3	53	58	90	7800	12500	14000
5	180	119	98	8300	34000	17500

TABELLE 13: TEST 1.2 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR GEREINIGT, TROCKEN, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	59	33	91	77	19	159
1	57	31	68	88	33	170
3	62	33	31	331	121	138
5	24	9	35	94	291	201

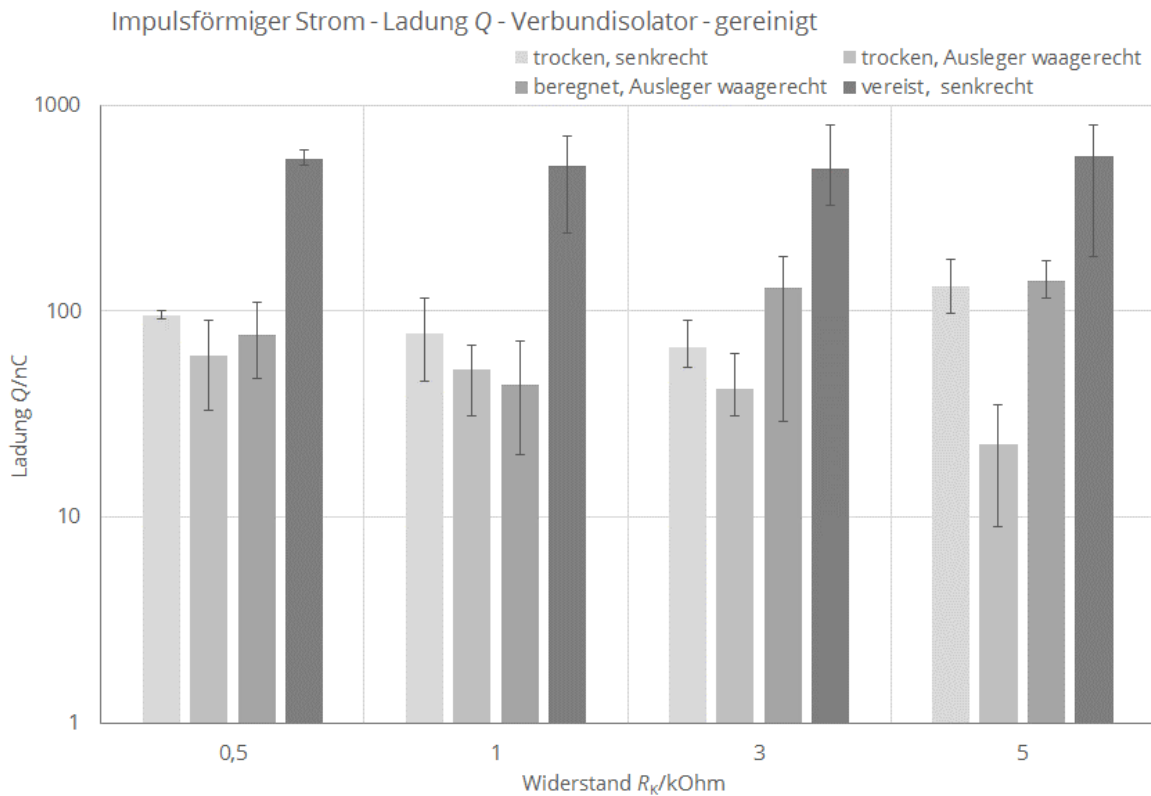
TABELLE 14: TEST 1.3 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR GEREINIGT, BEREGNET, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	75	47	110	83	52	189
1	72	20	41	138	19	54
3	176	29	183	1801	66	2043
5	176	116	129	3234	1548	1738

TABELLE 15: TEST 1.4 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR GEREINIGT, VEREIST, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	540	610	510	12500	15500	12000
1	710	575	240	40000	265000	4100
3	800	360	325	130000	28000	21500
5	710	185	800	205000	12800	215000

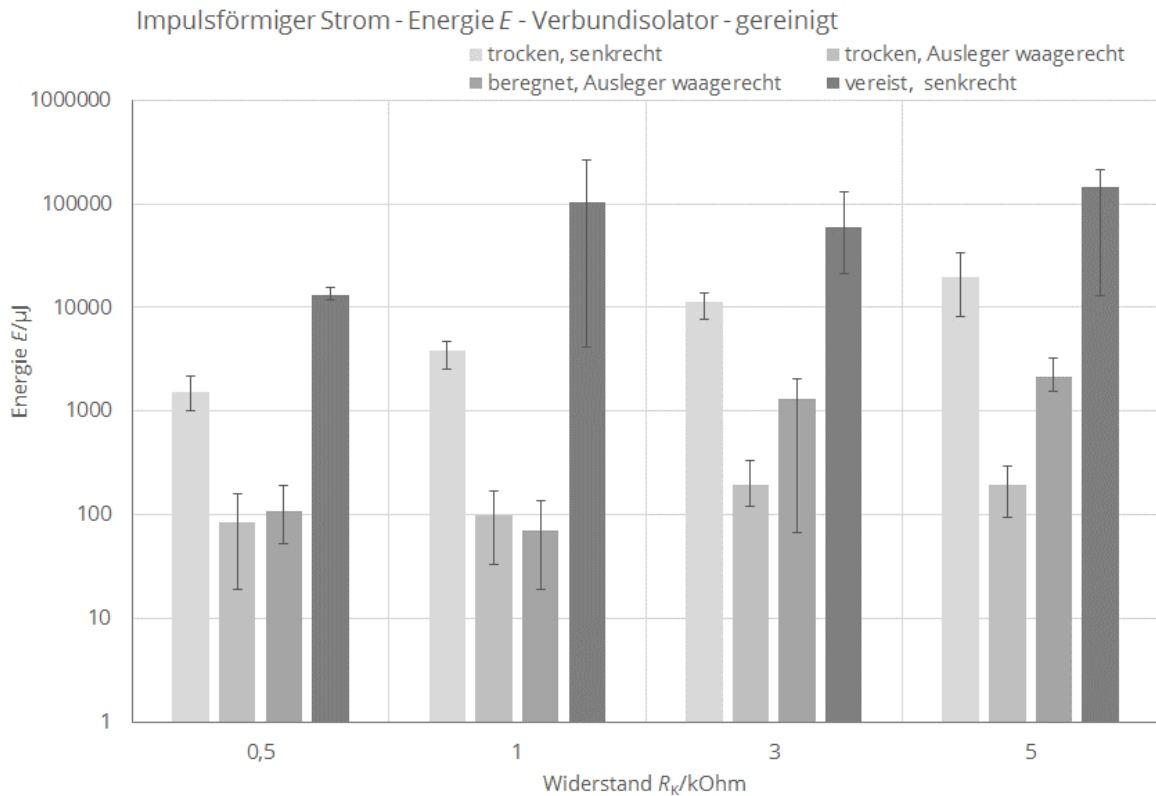
Dargestellt sind die Mittelwerte aus den jeweils drei durchgeführten Messungen mit den dazugehörigen Spannweiten (maximaler und minimaler Wert; grafische Darstellung der Mittelwerte siehe Abbildung 40 und Abbildung 41).

Abbildung 40: Verbundisolator – gereinigt – Ladung  $Q$  bei Zuschalten  $R_k$ 

Interpretation der Ladungswerte des impulsförmigen Stromes:

- Die Maximalwerte streuen abhängig von Zeitpunkt des Zuschaltens sehr stark (Schaltzeitpunkt innerhalb der Sinusspannungswelle bestimmt den abzuführenden Ladungswert).
- Eine Abhängigkeit der Ladung vom Widerstand bzw. vom Oberflächenzustand ist nicht klar abzuleiten.
- Die größten Ladungsimpulse treten bei den vereisten Verbundisolatoren auf und befinden sich im Bereich von 200 nC bis 800 nC.



Abbildung 41: Verbundisolator – gereinigt – Energie  $E$  bei Zuschalten  $R_k$ 

Interpretation der Energiewerte des impulsförmigen Stromes:

- Es sind tendenziell höhere Energien bei höheren Körperwiderständen zu beobachten. Die Mittelwerte der Energien liegen jedoch teilweise innerhalb der Spannweiten anderer Körperwiderstände.
- Die höchsten Energiewerte treten bei den vereisten Isolatoren im Bereich von 10 mJ bis 200 mJ auf.
- Im berechneten Zustand treten Energien bis etwa 3,2 mJ auf.
- Der Vergleich „trocken senkrecht“ und „trocken waagrecht“ zeigt, dass die Energiewerte bei der senkrechten Anordnung deutlich höher liegen. Dies ist jedoch nicht durch die Anordnung zu erklären, sondern aufgrund der beiden Prüflabore. Die Untersuchungen an der HSZG wurden bei einer höheren Messwert-Abtastrate durchgeführt, wodurch tendenziell auch höhere Maximal-Stromwerte gemessen wurden. Bei der Berechnung der Energie geht der Stromwert quadratisch in die Berechnung ein, wodurch bereits kleine Unterschiede im gemessenen Strom einen vergleichsweise großen Einfluss auf die berechnete Energie (Erhöhung) zur Folge haben. Bei Betrachtung der Ladung sind nur geringe Unterschiede erkennbar. Anhang 13.1 enthält jeweils ein Beispiel des Stromverlaufs bei senkrechter Anordnung an der HSZG und bei waagrechtem Ausleger an der TUD.

### 4.3.2 Oberfläche: leicht verschmutzt

Bei den folgenden Untersuchungen werden die Verbundisolatoren vor dem Versuchsbeginn entsprechend der im Kapitel 2.4.3 beschriebenen Vorgehensweise leicht verschmutzt. Ausgewertet wird die umgesetzte Ladung und der Energieimpuls bei erdseitiger Berührung des KTAs über verschiedene Körperwiderstände unter diversen Umwelteinflüssen.

TABELLE 16: TEST 2.1 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, TROCKEN, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	115	64	100	900	280	680
1	40	45	52	22	280	400
3	65	83	38	1700	2800	580
5	98	140	92	7200	2800	580

TABELLE 17: TEST 2.2 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, TROCKEN, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	34	35	26	22	24	12
1	27	33	39	23	35	50
3	51	45	50	306	235	139
5	53	70	32	318	850	158

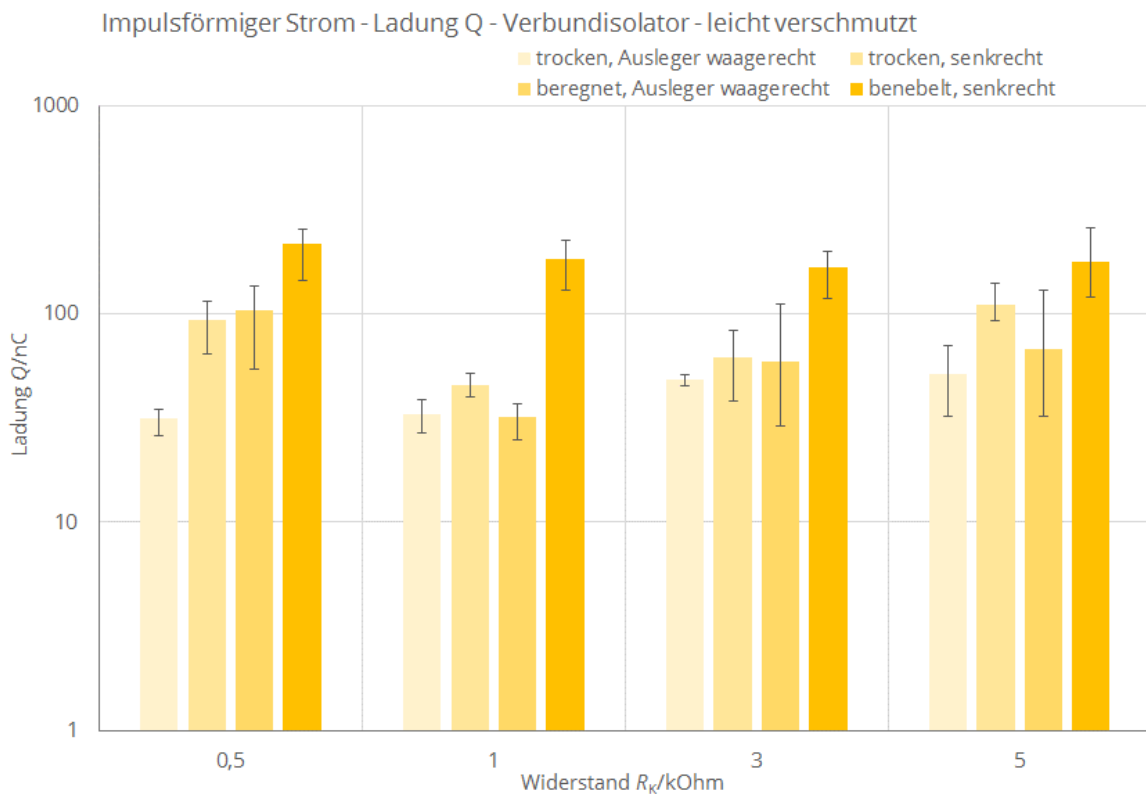
TABELLE 18: TEST 2.3 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, BEREGNET, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	136	122	54	254	286	65
1	34	25	37	58	20	43
3	29	112	35	71	1198	105
5	32	110	40	136	1921	180

TABELLE 19: TEST 2.4 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, BENEBELT, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

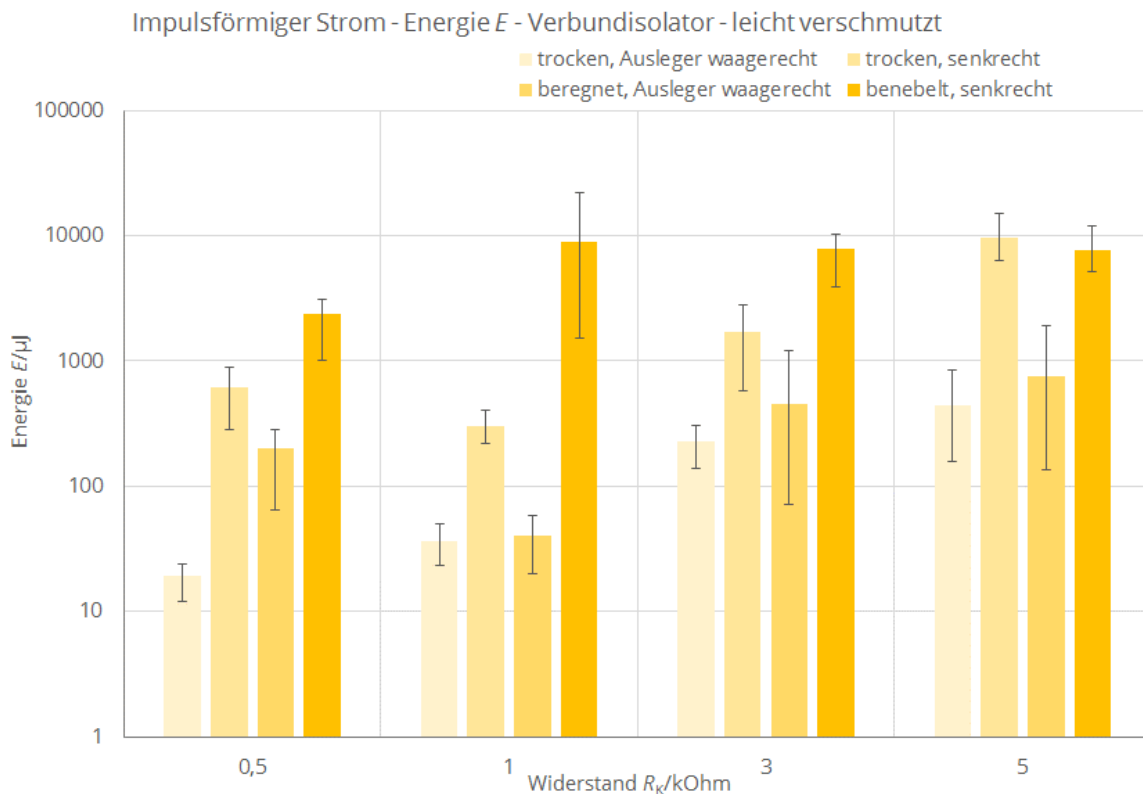
Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	255	145	250	3000	1000	3100
1	190	130	225	3200	1500	22000
3	200	183	118	10200	9200	3850
5	120	155	260	5500	12000	5200

Dargestellt sind die Mittelwerte aus den jeweils drei durchgeführten Messungen mit den dazugehörigen Spannweiten (maximaler und minimaler Wert; grafische Darstellung der Mittelwerte siehe Abbildung 42 und Abbildung 43).

Abbildung 42: Verbundisolator – leicht verschmutzt – Ladung  $Q$  bei Zuschalten  $R_k$ 

Interpretation der Ladungswerte des impulsförmigen Stromes:

- Die Maximalwerte streuen abhängig von Zeitpunkt des Zuschaltens sehr stark (Schaltzeitpunkt innerhalb der Sinusspannungswelle bestimmt den abzuführenden Ladungswert).
- Eine Abhängigkeit der Ladung vom Widerstand bzw. vom Oberflächenzustand ist nicht klar abzuleiten.
- Die größten Ladungsimpulse treten bei den leicht verschmutzten und benebelten Verbundisolatoren auf und befinden sich im Bereich von 100 nC bis 250 nC.

Abbildung 43: Verbundisolator – leicht verschmutzt – Energie  $E$  bei Zuschalten  $R_K$ 

Interpretation der Energiewerte des impulsförmigen Stroms:

- Es sind tendenziell höhere Energien bei höheren Körperwiderständen zu beobachten. Die Mittelwerte der Energien liegen jedoch teilweise innerhalb der Spannweiten anderer Körperwiderstände.
- Die höchsten Energiewerte treten bei den leicht verschmutzten, benebelten Isolatoren auf und liegen im Bereich von 1 mJ bis 20 mJ.
- Im beregneten Zustand treten Energien bis etwa 2 mJ auf.
- Der Vergleich „trocken senkrecht“ und „trocken waagrecht“ zeigt, dass die Energiewerte bei der senkrechten Anordnung deutlich höher liegen. Dies ist jedoch nicht durch die Anordnung zu erklären, sondern aufgrund der beiden Prüflabore. Die Untersuchungen an der HSZG wurden bei einer höheren Messwertabtastrate durchgeführt, wodurch tendenziell auch höhere Maximal-Stromwerte gemessen wurden. Bei der Berechnung der Energie geht der Stromwert quadratisch in die Berechnung ein, wodurch bereits kleine Unterschiede im gemessenen Strom einen vergleichsweise großen Einfluss auf die berechnete Energie (Erhöhung) zur Folge haben. Bei Betrachtung der Ladung sind nur geringe Unterschiede erkennbar. Anhang 13.2 enthält jeweils ein Beispiel des Stromverlaufs bei senkrechter Anordnung an der HSZG und bei waagrechttem Ausleger an der TUD.

### 4.3.3 Oberfläche: stark verschmutzt

Bei den folgenden Untersuchungen werden die Verbundisolatoren vor dem Versuchsbeginn entsprechend der im Kapitel 2.4.3 beschriebenen Vorgehensweise stark verschmutzt. Ausgewertet wird die umgesetzte Ladung und der Energieimpuls bei erdseitiger Berührung des KTAs über verschiedene Körperwiderstände unter diversen Umwelteinflüssen.

TABELLE 20: TEST 3.1 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, TROCKEN, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	78	195	120	400	2500	1000
1	90	35	165	1050	175	3600
3	90	33	93	3500	430	3300
5	90	67	140	6000	2100	12500

TABELLE 21: TEST 3.2 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, TROCKEN, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	99	114	78	217	225	85
1	79	88	94	202	252	280
3	48	35	80	150	100	1035
5	110	40	87	1465	288	922

TABELLE 22: TEST 3.3 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, BEREGNET, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	132	33	26	248	23	10
1	52	227	203	66	842	974
3	281	218	136	4327	2759	2066
5	41	67	141	290	598	2275

TABELLE 23: TEST 3.4 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – VERBUNDISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, BENEBELT, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	320	300	280	4400	4050	3700
1	245	390	275	4800	12000	6200
3	400	365	480	41000	33000	55000
5	325	210	320	45000	17000	39000

Dargestellt sind die Mittelwerte aus den jeweils drei durchgeführten Messungen mit den dazugehörigen Spannweiten (maximaler und minimaler Wert, grafische Darstellung der Mittelwerte siehe Abbildung 44 und Abbildung 45).

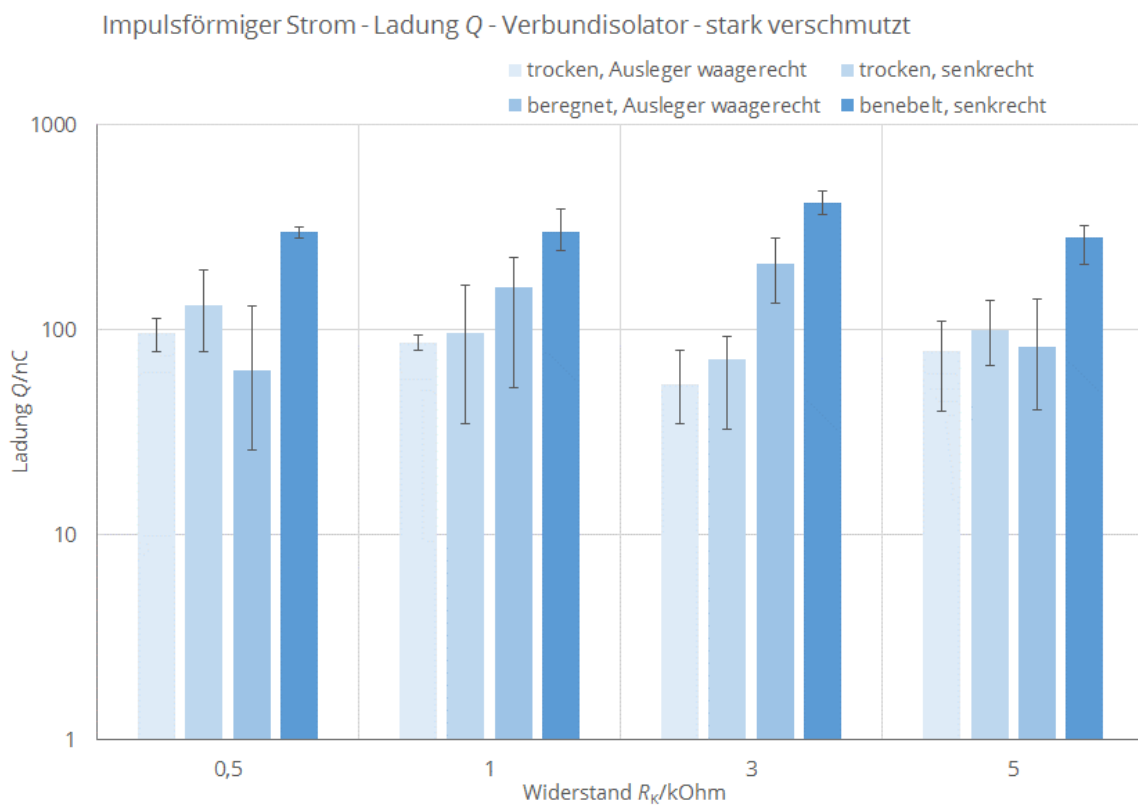
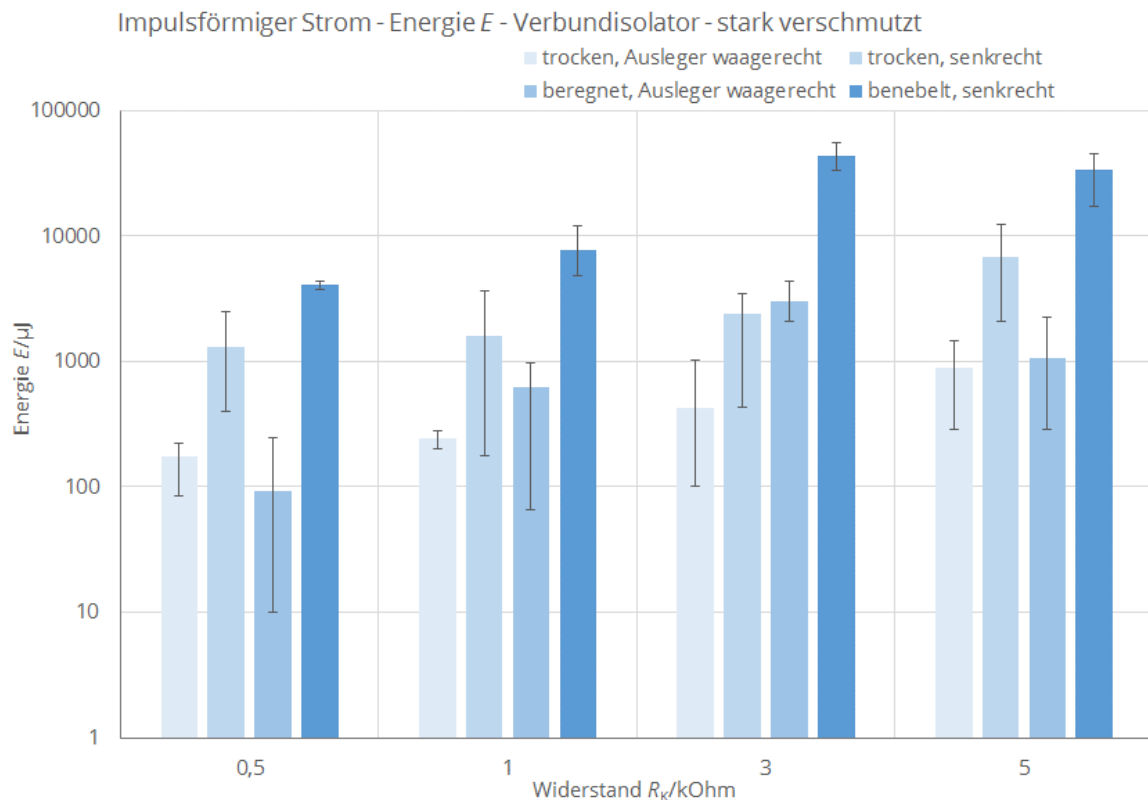


Abbildung 44: Verbundisolator – stark verschmutzt – Ladung  $Q$  bei Zuschalten  $R_k$

- Die Maximalwerte streuen abhängig von Zeitpunkt des Zuschaltens sehr stark (Schaltzeitpunkt innerhalb der Sinusspannungswelle bestimmt den abzuführenden Ladungswert).
- Eine Abhängigkeit der Ladung vom Körperwiderstand bzw. vom Oberflächenzustand ist nicht klar abzuleiten.
- Die größten Ladungsimpulse treten bei den stark verschmutzten und benebelten Verbundisolatoren auf und befinden sich im Bereich von 200 nC bis 600 nC.

Abbildung 45: Verbundisolator – stark verschmutzt – Energie  $E$  bei Zuschalten  $R_k$ 

- Es sind tendenziell höhere Energien bei höheren Körperwiderständen zu beobachten. Die Mittelwerte der Energien liegen jedoch teilweise innerhalb der Spannweiten anderer Körperwiderstände.
- Die höchsten Energiewerte treten bei den stark verschmutzten, benebelten Isolatoren auf und liegen im Bereich von 7 mJ bis 70 mJ.
- Im beregneten Zustand treten Energien bis etwa 10 mJ auf.
- Der Vergleich „trocken senkrecht“ und „trocken waagrecht“ zeigt, dass die Energiewerte bei der senkrechten Anordnung deutlich höher liegen. Dies ist jedoch nicht durch die Anordnung zu erklären, sondern aufgrund der beiden Prüflabore. Die Untersuchungen an der HSZG wurden bei einer höheren Messwert-Abtastrate durchgeführt, wodurch tendenziell auch höhere Maximal-Stromwerte gemessen wurden. Bei der Berechnung der Energie geht der Stromwert quadratisch in die Berechnung ein, wodurch bereits kleine Unterschiede im gemessenen Strom einen vergleichsweise großen Einfluss auf die berechnete Energie (Erhöhung) zur Folge haben. Bei Betrachtung der Ladung sind nur geringe Unterschiede erkennbar. Anhang 13.3 enthält jeweils ein Beispiel des Stromverlaufs bei senkrechter Anordnung an HSZG und bei waagrechtem Ausleger an der TUD.

## 4.4 Messergebnisse Stationäre Ströme bei Verbundisolatoren

### 4.4.1 Oberfläche: gereinigt

Bei den folgenden Untersuchungen werden die Verbundisolatoren vor dem Versuchsbeginn entsprechend der im Kapitel 2.4.1 beschriebenen Vorgehensweise gereinigt und konditioniert. Ausgewertet wird der stationäre Strom, welcher sich bei dauerhafter erdseitiger Berührung mit dem KTA über verschiedene Körperwiderstände unter diversen Umwelteinflüssen einstellt.

TABELLE 24: TEST 1.1 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR GEREINIGT, TROCKEN, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	35	30	30
1	28	30	34
3	35	28	33
5	30	20	33

TABELLE 25: TEST 1.2 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR GEREINIGT, TROCKEN, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	13	13	13
1	13	13	13
3	13	13	13
5	13	13	13



TABELLE 26: TEST 1.3 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR GEREINIGT, BEREGNET, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwider- stand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	62	24	70
1	50	22	340
3	32	23	114
5	18	27	20

TABELLE 27: TEST 1.4 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR GEREINIGT, VEREIST, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwider- stand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	84	115	160
1	88	102	233
3	84	92	255
5	82	92	312

- Die Messergebnisse an den gereinigten Verbundisolatoren zeigen eine Abhängigkeit vom Umwelteinfluss.
- Eine Abhängigkeit des  $R_k$  auf den stationären Strom ist nicht zu erkennen.
- Die Untersuchungen an den trockenen, gereinigten Isolatoren zeigen geringe Spannweiten und liegen im Bereich von 12  $\mu A$  bis 36  $\mu A$ .
- Große Streuungen in den Messwerten sind bei den berechneten und vereisten Verbundisolatoren zu beobachten.
- Die Werte für den stationären Strom bei gereinigten, berechneten Verbundisolatoren liegen im Bereich von 18  $\mu A$  bis 340  $\mu A$ .
- Die Werte für den stationären Strom bei gereinigten, vereisten Verbundisolatoren liegen im Bereich von 82  $\mu A$  bis 312  $\mu A$ .

## 4.4.2 Oberfläche: leicht verschmutzt

Bei den folgenden Untersuchungen werden die Verbundisolatoren vor dem Versuchsbeginn entsprechend der im Kapitel 2.4.3 beschriebenen Vorgehensweise leicht verschmutzt. Ausgewertet wird der stationäre Strom, welcher sich bei dauerhafter erdseitiger Berührung mit dem KTA über verschiedene Körperwiderstände unter diversen Umwelteinflüssen einstellt.

TABELLE 28: TEST 2.1 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, TROCKEN, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwider- stand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	38	32	113
1	35	37	120
3	30	33	109
5	23	32	53

TABELLE 29: TEST 2.2 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, TROCKEN, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwider- stand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	12	-	-
1	12	-	-
3	12	-	-
5	12	-	-

TABELLE 30: TEST 2.3 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, BEREGNET, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwider- stand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	30	26	23
1	23	26	22
3	25	28	23
5	23	30	22

TABELLE 31: TEST 2.4 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, BENEBELT, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwider- stand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	61	81	84
1	60	78	88
3	63	79	76
5	60	78	80

- Die Messergebnisse an den leicht verschmutzten Verbundisolatoren zeigen eine Abhängigkeit vom Umwelteinfluss.
- Eine Abhängigkeit des  $R_k$  auf den stationären Strom ist nicht zu erkennen.
- Die Untersuchungen an den trockenen, leicht verschmutzten liegen im Bereich von 12  $\mu A$  bis 120  $\mu A$ .
- Die Werte für den stationären Strom bei leicht verschmutzten, beregneten Verbundisolatoren liegen im Bereich von 22  $\mu A$  bis 30  $\mu A$ .
- Die Werte für den stationären Strom bei leicht verschmutzten, benebelten Verbundisolatoren liegen im Bereich von 60  $\mu A$  bis 90  $\mu A$ .

### 4.4.3 Oberfläche: stark verschmutzt

Bei den folgenden Untersuchungen werden die Verbundisolatoren vor dem Versuchsbeginn entsprechend der im Kapitel 2.4.3 beschriebenen Vorgehensweise stark verschmutzt. Ausgewertet wird der stationäre Strom, welcher sich bei dauerhafter erdseitiger Berührung mit dem KTA über verschiedene Körperwiderstände unter diversen Umwelteinflüssen einstellt.

TABELLE 32: TEST 3.1 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, TROCKEN, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	53	64	53
1	42	17	39
3	13	35	34
5	38	35	44

TABELLE 33: TEST 3.2 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, TROCKEN, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	13	-	-
1	12	-	-
3	13	-	-
5	13	-	-

TABELLE 34: TEST 3.3 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, BEREGNET, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	34	28	57
1	31	38	55
3	30	36	46
5	27	34	43

TABELLE 35: TEST 3.4 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, BENEBELT, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwider- stand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	59	64	61
1	42	16	42
3	6	34	35
5	35	35	46

- Die Messergebnisse an den stark verschmutzten Verbundisolatoren zeigen eine Abhängigkeit vom Umwelteinfluss.
- Eine Abhängigkeit des  $R_k$  auf den stationären Strom ist nicht zu erkennen.
- Die Untersuchungen an den trockenen, stark verschmutzten Verbundisolatoren liegen im Bereich von 12  $\mu A$  bis 64  $\mu A$ .
- Die Werte für den stationären Strom bei stark verschmutzten, berechneten Verbundisolatoren liegen im Bereich von 27  $\mu A$  bis 57  $\mu A$ .
- Die Werte für den stationären Strom bei stark verschmutzten, benebelten Verbundisolatoren liegen im Bereich von 6  $\mu A$  bis 64  $\mu A$ .

#### 4.4.4 Oberfläche: sehr schwer verschmutzt

Bei den folgenden Untersuchungen werden die Verbundisolatoren vor dem Versuchsbeginn in Anlehnung an der im Kapitel 2.4.3 beschriebenen Vorgehensweise sehr schwer verschmutzt. Ausgewertet wird der stationäre Strom, welcher sich bei dauerhafter erdseitiger Berührung mit dem KTA über verschiedene Körperwiderstände unter diversen Umwelteinflüssen einstellt. Der Isolatorzustand „sehr schwer“ verschmutzt befindet sich deutlich über den in Deutschland üblichen auftretenden Verschmutzungskennwerten an Isolatoren. Es ist jedoch denkbar, dass solch eine extreme Verschmutzung in Ländern mit küstennahen Standorten mit gleichzeitiger stark verschmutzender Industrie vorkommt. Die Untersuchung an den sehr schwer verschmutzten Isolatoren war kein Bestandteil der durchzuführenden Untersuchung, wurde aber der Vollständigkeit mit dargestellt.

TABELLE 36: TEST 4.1 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR SEHR SCHWER VERSCHMUTZT, TROCKEN, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	53	45	46
1	42	46	39
3	39	41	42
5	41	43	46

TABELLE 37: TEST 4.2 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR SEHR SCHWER VERSCHMUTZT, TROCKEN, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	11	-	-
1	11	-	-
3	11	-	-
5	11	-	-

TABELLE 38: TEST 4.3 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR SEHR SCHWER VERSCHMUTZT, BEREGNET, AUSLEGER WAAGERECHT, MESSORT: TUD

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	29	70	-
1	26	56	Überschlag
3	28	59	-
5	27	58	Überschlag

TABELLE 39: TEST 4.4 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – VERBUNDISOLATOR SEHR SCHWER VERSCHMUTZT, BENEBELT, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	Bei diesen Untersuchungen kam es zu Überschlägen zwischen Hochspannungsarmatur und KTA		
1			
3			
5			

- Die Untersuchungen an den sehr schwer verschmutzten Isolatoren sind im Gebiet Deutschland nicht praxisrelevant, ein derart hoher Verschmutzungswert gilt weltweit als Extrembedingung [8]. Die untersuchten Isolatoren sind entsprechend der Berechnung aus Kapitel 2.4.4 für maximal eine mittlere Verschmutzung ausgelegt. Das zuverlässige Betriebsverhalten der Isolatoren in den Oberleitungsanlagen der DB Netz AG lässt darauf schließen, dass in der Regel in Deutschland die mittlere Verschmutzung nicht überschritten wird.
- Bei trockenen sehr schwer verschmutzten Verbundisolatoren fließt ein sehr geringer stationärer Strom im Bereich von 11  $\mu A$  bis 53  $\mu A$ .
- Bei Durchfeuchtung der sehr schweren Verschmutzungsschicht durch Regen kommt es bei Berührung des KTAs teilweise zu Überschlägen zwischen dem KTA und der Hochspannungsarmatur des Isolators.
- Bei Durchfeuchtung der sehr schweren Verschmutzungsschicht durch Nebel kommt es bei Berührung des KTAs zu Überschlägen zwischen dem KTA und der Hochspannungsarmatur des Isolators.

## 4.5 Messergebnisse Impulswerte an Porzellanisolatoren

An den Porzellanisolatoren werden drei verschiedene Untersuchungen an der HSZG durchgeführt:

- Porzellanisolator, gereinigt – trocken, senkrechte Einbaulage innerhalb Prüfkammer
- Porzellanisolator, leicht verschmutzt – benebelt, senkrechte Einbaulage innerhalb Prüfkammer
- Porzellanisolator, stark verschmutzt – benebelt, senkrechte Einbaulage innerhalb Prüfkammer

Ausgewertet werden die umgesetzte Ladung und der Energieimpuls bei erdseitiger Berührung des KTAs über verschiedene Körperwiderstände unter den genannten Isolatorzuständen und Umwelteinflüssen.

TABELLE 40: TEST 5.1 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – PORZELLANISOLATOR GEREINIGT, TROCKEN, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	150	105	123	2150	1000	1450
1	115	160	165	2600	4600	4500
3	155	150	118	14000	12500	7800
5	148	190	95	17500	35000	8600

TABELLE 41: TEST 5.2 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – PORZELLANISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, BENEBELT, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

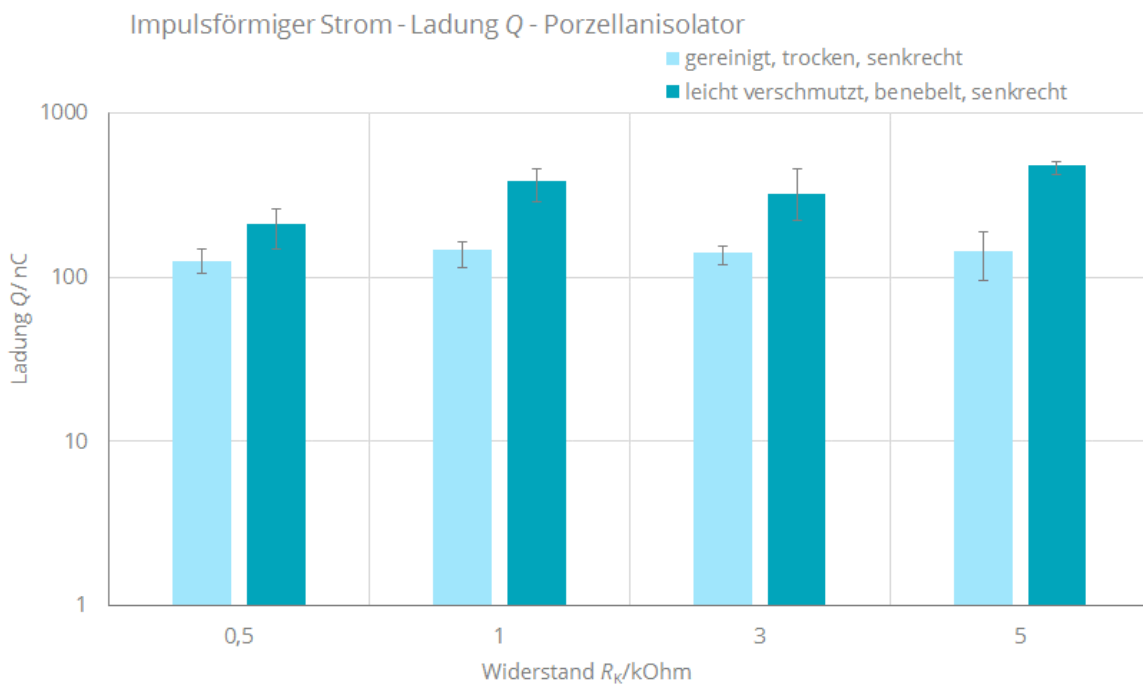
Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	260	150	220	3900	1200	2000
1	410	460	290	23000	26000	9400
3	460	220	290	85000	1000	33000
5	420	510	510	105000	160000	150000



TABELLE 42: TEST 5.3 – LADUNG  $Q$  UND ENERGIE  $E$  – PORZELLANISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, BENEBELT, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Ladung $Q$ in nC			Energie $E$ in $\mu J$		
	1	2	3	1	2	3
0,5	Bei diesen Untersuchungen kam es zu Überschlagen zwischen Hochspannungsarmatur und KTA					
1						
3						
5						

Dargestellt sind die Mittelwerte aus den jeweils drei durchgeführten Messungen mit den dazugehörigen Spannweiten (maximaler und minimaler Wert, grafische Darstellung der Mittelwerte siehe Abbildung 46 und Abbildung 47).

Abbildung 46: Porzellanisolator – Ladung  $Q$  bei Zuschalten  $R_k$ 

- Die Maximalwerte streuen abhängig vom Zeitpunkt des Zuschaltens sehr stark (Schaltzeitpunkt innerhalb der Sinusspannungswelle bestimmt den abzuführenden Ladungswert).
- Eine Abhängigkeit der Ladung vom Körperwiderstand bzw. vom Oberflächenzustand ist nicht klar abzuleiten.
- Die größten Ladungsimpulse treten bei den leicht verschmutzten und benebelten Verbundisolatoren auf und befinden sich im Bereich von 150 nC bis 550 nC.
- Bei den stark verschmutzten und benebelten Porzellanisolatoren konnten keine Messungen durchgeführt werden, da es bei dieser Konstellation zum Überschlagen zwischen Hochspannungsarmatur und geerdetem KTA kam.

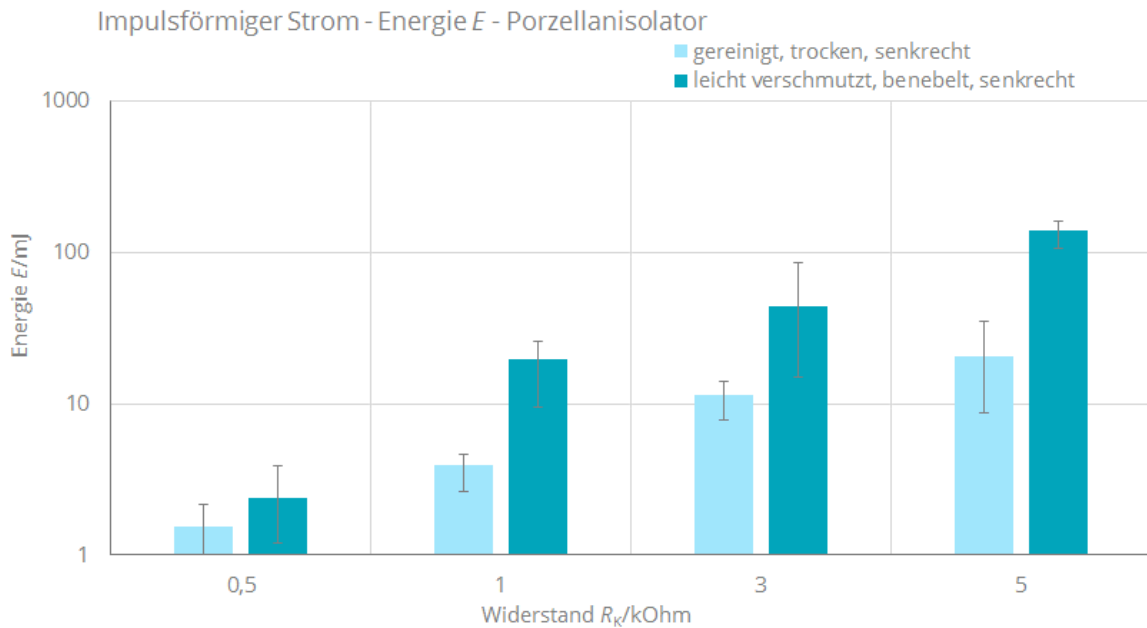


Abbildung 47: Porzellanisolator – Energie  $E$  bei Zuschalten  $R_k$

- Es sind tendenziell höhere Energien bei höheren Körperwiderständen zu beobachten.
- Die höchsten Energiewerte treten bei den leicht verschmutzten benebelten Porzellanisolatoren auf und liegen im Bereich von 2 mJ bis 160 mJ auf.
- Bei den stark verschmutzten und benebelten Porzellanisolatoren konnten keine Messungen durchgeführt werden, da es bei dieser Konstellation zum Überschlag zwischen kontaktiertem KTA und Hochspannungsarmatur des Isolators kam.

## 4.6 Messergebnisse stationäre Ströme bei Porzellanisolatoren

Neben den Messungen der Impulswerte wurden die stationären Ströme, welche sich bei dauerhafter erdseitiger Berührung mit dem KTA über verschiedene Körperwiderstände unter diversen Umwelteinflüssen einstellt, ausgewertet.

TABELLE 43: TEST 5.1 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – PORZELLANISOLATOR GEREINIGT, TROCKEN, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in k $\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	8	11	15
1	40	36	24
3	16	20	12
5	10	15	20

TABELLE 44: TEST 5.2 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – PORZELLANISOLATOR LEICHT VERSCHMUTZT, BENEBELT, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	4101	5515	5798
1	5515	5020	5798
3	5515	4738	4879
5	5728	4808	5091

TABELLE 45: TEST 5.3 – STATIONÄRER STROM  $I_{STAT}$  – PORZELLANISOLATOR STARK VERSCHMUTZT, BENEBELT, SENKRECHT, MESSORT: HSZG

Körperwiderstand $R_k$ in $k\Omega$	Stationärer Strom $I_{stat}$ in $\mu A$		
	1	2	3
0,5	Bei diesen Untersuchungen kam es zu Überschlagen zwischen Hochspannungsarmatur und KTA		
1			
3			
5			

- Die Messergebnisse an den gereinigten, trockenen und leicht verschmutzten, benebelten Porzellanisolatoren zeigen eine Abhängigkeit vom Umwelteinfluss und Isolatorzustand.
- Eine Abhängigkeit des  $R_k$  auf den stationären Strom ist nicht zu erkennen.
- Die Werte für den stationären Strom bei gereinigten, trockenen Porzellanisolatoren liegen im Bereich von 8  $\mu A$  bis 40  $\mu A$ .
- Die Werte für den stationären Strom bei leicht verschmutzten, benebelten Porzellanisolatoren liegen im Bereich von 4,1 mA bis 5,8 mA. Diese sind im Vergleich zum trockenen Zustand um ein Vielfaches erhöht. Ursache ist hierfür der fehlende Hydrophobietransfer auf die Fremdschicht. Bei Benebelung bildet sich deshalb eine geschlossene leitfähige Schicht auf der Oberfläche der Porzellanisolatoren.
- Bei den stark verschmutzten und benebelten Porzellanisolatoren konnten keine Messungen durchgeführt werden, da es bei dieser Konstellation zum Überschlag zwischen Hochspannungsarmatur und geerdetem KTA kam.

# 5 Grenz- und Richtwerte für Vögel und Kleintiere bei elektrischer Durchströmung

## 5.1 Einleitung

Aus den theoretischen Betrachtungen (Kapitel 3) und aus den Messwerten (Kapitel 4) müssen in Bezug auf die Belastung von Vögeln und Kleintieren bei elektrischer Durchströmung am KTA drei grundsätzliche Szenarien unterschieden werden:

1. **Durchströmung mit impulsförmigem Strom** durch Abfuhr der Ladung am KTA zum Zeitpunkt des Berührens des KTAs durch den Vogel oder das Kleintier

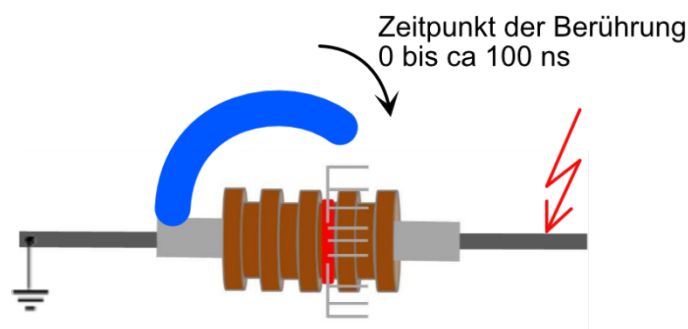


Abbildung 48: Durchströmung mit impulsförmigem Strom beim Schließen des Schalters (Vogel bzw. Kleintier ist mit Bogen angedeutet)

2. **Durchströmung mit stationärem Strom** bei kontinuierlicher Berührung des KTAs durch den Vogel oder das Kleintier (Zeitbereich ms)

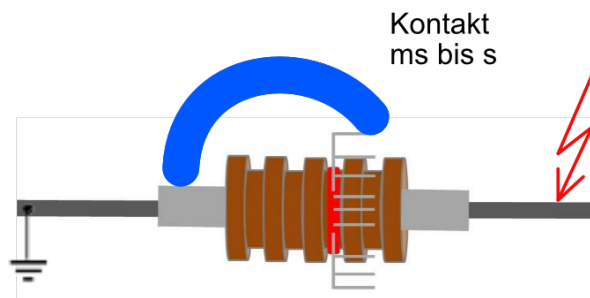


Abbildung 49: Durchströmung mit stationärem Strom bei dauerhaftem Kontakt (Vogel bzw. Kleintier ist mit Bogen angedeutet)

3. **Lichtbogen als Folge eines Überschlages** und Durchströmung zwischen Hochspannungskontakt und Erde (sogenannter Erdschluss) auf den Vogel oder das Kleintier (Zeitbereich ms)

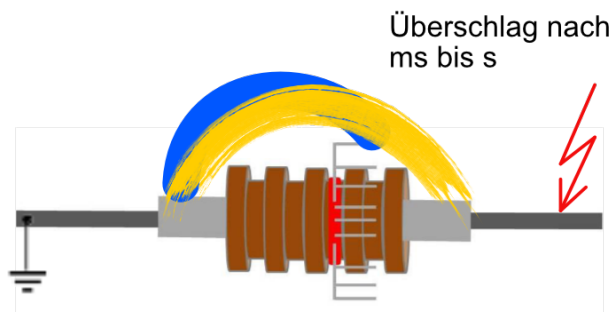


Abbildung 50: Überschlag am KTA (Vogel bzw. Kleintier ist mit Bogen angedeutet)

Das dritte Szenario mit der Durchströmung bzw. mit direkten Auswirkungen eines Lichtbogens auf einen Vogel bzw. ein Kleintier führt neben den elektrischen Auswirkungen, insbesondere aufgrund der thermischen Auswirkungen, zur direkten Schädigung des Lebewesens. Das Eintreten dieses Szenarios sollte verhindert werden. Eine Betrachtung von Grenz- und Richtwerten für dieses Szenario ist nicht zielführend (vgl. Kapitel 1).

Zur Beurteilung der Messwerte werden für die jeweiligen dargestellten Szenarien folgende Werte im Rahmen dieses Projektes definiert:

- **Referenzwert Reizschwelle:** Der „Referenzwert Reizschwelle“ beschreibt einen Stromwert, ab welchem das Tier eine biologische Wirkung spüren kann. Stromwerte, welche diesen Wert unterschreiten, sind aufgrund biologischer Wirkmechanismen nicht spürbar.
- **Grenzwert Gefährdung:** Wird der „Grenzwert Gefährdung“ überschritten, kann davon ausgegangen werden, dass der Vogel aufgrund des elektrischen Schlages direkt oder indirekt zu Schaden kommt.

In weiterer Folge wird sich daher bei der Ermittlung von Grenz- und Reizwerten bei Durchströmungen auf die Szenarien 1 (Durchströmung mit impulsförmigem Strom) und 2 (Durchströmung mit stationärem Strom) konzentriert.

## 5.2 Vorgehensweise zur Ermittlung der Referenz- und Grenzwerte

Um für die Szenarien

- **Szenario 1: Durchströmung mit impulsförmigem Strom** durch Abfuhr der Ladung am KTA im Zeitpunkt der Berührung des KTAs durch den Vogel oder das Kleintier (Impulsdauer einige 10 ns)
- **Szenario 2: Durchströmung mit stationärem Strom** bei kontinuierlicher Berührung des KTAs durch den Vogel oder das Kleintier (Zeitbereich ms bis s)

die geeigneten Richt- und Grenzwerte zu ermitteln wurde, folgendes Konzept verfolgt:

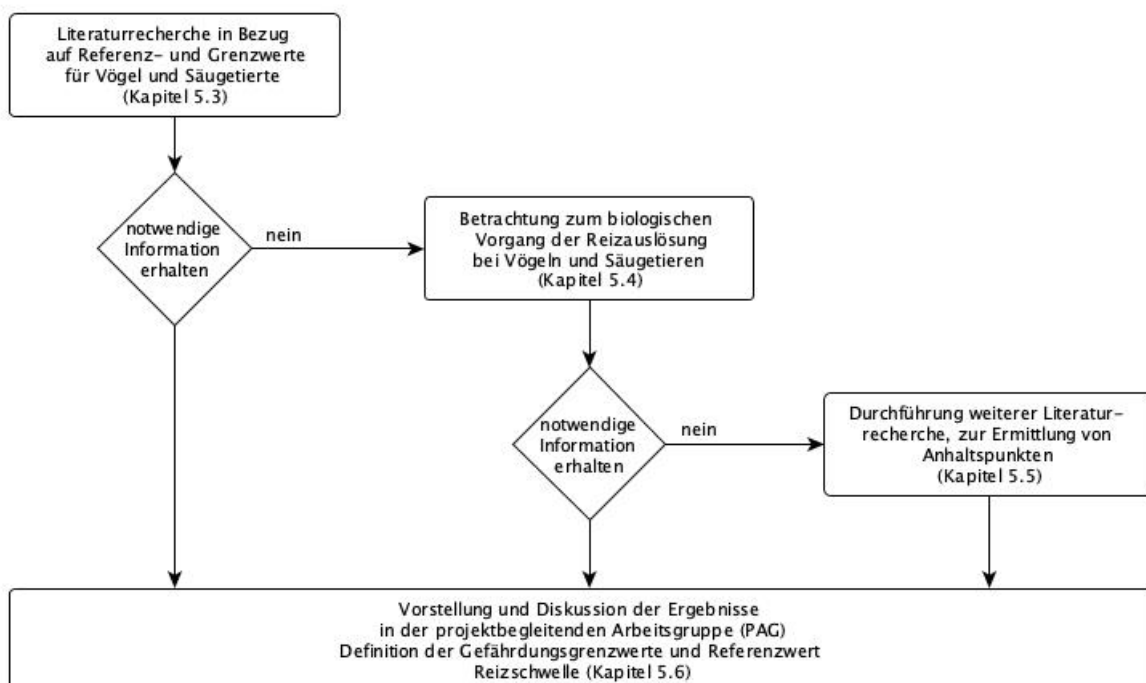


Abbildung 51: Vorgehensweise zur Ermittlung von Richt- und Grenzwerten

## 5.3 Ergebnis der Literaturrecherche

Zur Beantwortung der Fragestellungen zu den Gefährdungs- und Reizschwellen bei Durchströmungen wurde in folgenden fachspezifischen E-Journals recherchiert:

- Journal of Comparative Physiology A
- Journal of Comparative Physiology B
- Journal of Neurophysiology
- Journal of Applied Physiology
- European Journal of Applied Physiology
- Behavioural Neuroscience
- Behavioural Ecology and Sociobiology

- Nature
- Science
- Scientific American

Als Suchbegriffe dienten u. a. nervous thresholds, receptor thresholds, dendrites, receptor channel proteins, intracellular shunts, intracellular drains, intracellular conductance und ähnliche, jeweils gekoppelt an „general“ oder „birds“ oder „mammals“ sowie die jeweiligen deutschen Bezeichnungen, wo anwendbar. Ebenfalls wurden unter Bezug auf das Verhalten mit oben genannten und ähnlichen Begriffen wie response to electric stimuli in receptors, reflex thresholds in birds/mammals/general) und Thresholds for shortening reactions/reflexes wieder für „general“, „birds“ und „mammals“ gesucht. Zur Recherche wurden u. a. Scirus, BASE und DBIS genutzt.

Ferner wurden die folgenden Lehrbücher, jeweils in der neuesten Ausgabe, teilweise zusätzlich auch ältere, hinzugezogen: Klinker & Silbernagl: Lehrbuch der Physiologie [18]; Eckert, Randall, Augustine: Tierphysiologie [19]; Campbell & Reece: Biology [20].

Grundsätzlich zeigte sich bei der Literaturrecherche, dass für den Fall einer Durchströmung bei Kontakt mit Stromleitungen kein verwendbares Material zu Reizschwellen- und Gefährdungsgrenzwerten für den Bereich Vögel und kleine Säugetiere vorliegt. Es gibt Untersuchungen anderer Art, die sich mit Tieren aus dem wässrigen Milieu befassen, deren Ergebnisse sind jedoch nicht auf Vögel an Stromleitungen übertragbar: Im Wasser baut jede aktive Leitung, also ein Neuron und/oder ein Muskel, ein elektrisches Feld auf, welches von den im Wasser lebenden Tieren in den allermeisten Fällen mittels hochspezifischer Rezeptoren auch perzipiert wird (z. B. Mormyriden, Gymnotiden, andere elektrosensitive Tiere, auch Amphibien im Wasser). Diese Ergebnisse sind in keiner Weise auf in der Luft lebende Tiere übertragbar. Die Analyse der Ergebnisse bezüglich Tiere im Wasser konzentriert sich vornehmlich auf die Erkennung von Magnet- und elektrischen Feldern als Mittel für die Elektroortung und -kommunikation sowie die Empfindlichkeit der Rezeptoren wie den Lorenzinischen Ampullen.

Bei der Betrachtung von normativen Situationen und entsprechenden Anwendungsregeln in der elektrotechnischen Anwendung kann für die Durchströmung mit stationärem Strom ein Gefährdungsgrenzwert für Ableitströme für Abdeckungen beim Vogelschutz erkannt werden. Dieser liegt bei 2 mA (VDE-AR-N 4210-11) [1].

## 5.4 Betrachtung zum biologischen Vorgang der Reizauslösung bei Vögeln und Säugetieren

Das Wirkprinzip der Kleintierabweiser (KTA) beruht auf einer Entladung statischer Elektrizität, welche infolge einer Berührung der Abweiserstacheln durch Körperteile des Tiers (Flügel, Federn, Schnabel, Nase, etc.) ausgelöst wird [21]. Diese Entladung löst über die Reflexketten im Tier einen Fluchtreflex aus, der dazu führt, dass sich dieses Ereignis im Gehirn des Tiers fest verankert und somit auch einen Schutz vor weiteren Ereignissen dieser Art in der Zukunft darstellt: Taucht die Situation am Ort erneut auf, an dem das Tier einen elektrostatischen Schlag erhalten hat oder die Situation wiederholt sich an einem Ort, der diesem sehr ähnlich ist, meidet das Tier diesen. Dies erkennt man jederzeit am Verhalten von Tieren, seien es Nutztiere, Nutzgeflügel oder ebenso auch Wildtiere, die hinter Elektrozäunen leben: Sie gehen dicht heran, vermeiden aber jeden direkten Kontakt mit den Litzen<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Eine Litze ist ein dünner, flexibler, metallischer Leiter – in diesem Anwendungsfall ohne Isolation.

Aus diesem Grund werden die biologischen Hintergründe zur Auslösung eines Reflexes infolge eines elektrostatischen Schlages bei einem Säugetier betrachtet. Festzuhalten ist, dass das generelle Erregungsschema eines Rezeptors und eines Axons im Tierreich grundsätzlich gleich ist. Die im Folgenden beschriebenen neuronalen Prozesse sind im Tierreich (z. B. Vögel, Säugetiere, wirbellose Tiere) identisch [20, 22].

Die grundlegenden Mechanismen sind wie folgt zu beschreiben [18, 23]:

Jegliche schnelle Informationsvermittlung in einem Tier, egal auf welcher systematischen Stufe, erfolgt über Neurone = Nervenzellen. Jedes Neuron ist gleich aufgebaut, egal, wo und wie es im Zentralnervensystem eingesetzt wird: Es besteht aus einem reizaufnehmenden Teil, den Dendriten, dem Zellkörper, dem Soma und einem reizweiterleitenden Teil, dem Axon. Die Reizweiterleitung an andere Zellen erfolgt über Synapsen. Dies kann sowohl eine elektrische als auch chemische Synapse sein. Letztere arbeiten mit Transmitterstoffen wie Adrenalin. Bei einer elektrischen Synapse besteht ein direkter Kontakt zwischen z. B. Neuron und Muskel. Grundlage aller Informationsvermittlung durch Neurone ist die elektrische Leitung.

Jedes Neuron verfügt im Zellinneren über ein bestimmtes elektrisches Potential, welches im Wesentlichen durch die elektrisch positiv oder negativ geladenen Ionen von Natrium, Kalium und Chloriden sowie die überwiegend negativ geladenen größeren Proteinmoleküle im Inneren der Zelle bestimmt wird. Die Mengenverhältnisse der Ionen im Zellinneren bestimmen das Potential im Inneren. Im äußeren Umfeld der Neurone befindet sich Zellflüssigkeit, die ebenfalls die genannten Ionen von Natrium, Kalium und Chloride gelöst enthält, aber in einem komplett anderen Mengenverhältnis, sodass das Außenpotential im Neuron ein anderes ist als das im Neuron befindliche. Das Neuron wird von einer Zellmembran umgeben, die verhindert, dass sich Stoffe von innen und außen vermischen. Damit dies gelingt, ist jede Zellmembran eine Lipid-Doppelmembran, die komplett undurchlässig ist für jede Form von Molekül, Protein, Fett oder Zucker. Es entsteht durch die unterschiedlichen Potentiale innen und außen ein Potentialgefälle über die Membran. Dies beträgt in einer tierischen Nervenzelle ca. -75 mV.

Der Ionen- oder Stofftransport durch die Membran kann auf verschiedenen Wegen stattfinden. In der hier vorliegenden Untersuchung interessiert nur der „elektrische“ Weg. In der Lipid-Doppelmembran sitzen hochspezifische Moleküle, teilweise sehr komplex gebaute Proteine, die als Kanalproteine bezeichnet werden und einen Ionenaustausch zwischen innen und außen ermöglichen. Im Ruhefall, d. h. Innenpotential ist vorhanden, Außenpotential ebenso = Ruhepotential ist eingestellt, halten die Kanalproteine das Ruhepotential konstant, indem sie genauso viele Ionen durchlassen, wie zur Aufrechterhaltung des Ruhepotentials in einer lebenden Zelle notwendig sind. Wird von außen ein elektrischer Reiz angelegt, öffnen sich die Kanalproteine und ein Ionenaustausch zwischen innen und außen setzt ein. Infolgedessen fließt in der Zelle ein elektrischer Strom. Um die Kanalproteine zu öffnen, bedarf es einer Abweichung vom Ruhepotential, d. h. einer Depolarisierung von ca. +20 mV oder mehr. Erst dann können sich die Kanalproteine öffnen, die Nervenzelle „feuern“ und ein Aktionspotential über das Axon zur Synapse und weiter an die nächste Zelle oder Muskel senden. Die gleiche Reaktion kann durch einen elektrostatischen Impuls, der von außen einwirkt, ausgelöst werden.

Schutzreflexe, wie sie bei Berührung des KTAs ausgelöst werden sollen, sind die schnellsten Reflexe im Tierreich. Auslöser ist ein Reiz, der über den Dendriten (reizaufnehmender Teil eines Neurons) an einem Rezeptor über dessen Axon direkt ins Rückenmark weitergeleitet und dort auf eine zweite Nervenzelle geschaltet wird. Diese Nervenzelle aktiviert innerhalb von Millisekunden die Muskeln im Körper, die das Tier vom Gefahrenort schnellstmöglich wegbewegen. Die Entladung des Rezeptoraxons mündet also in einen meist monosynaptischen Reflexbogen im Rückenmark, der die unmittelbar auftretende Fluchtantwort auslöst. Eine „Kopie“ des aufgenommenen Reizes geht vom Rückenmark an das zentrale Nervensystem (Gehirn). Während der unmittelbare Reflex dafür sorgt, dass das Tier bzw. das Körperteil schnellstmöglich aus der Gefahrenzone kommen, sorgt die „Kopie“ im Gehirn dafür, dass das Tier sich



erinnert. Grundlegend ist hier, dass der Reiz zu einer hinreichend großen Depolarisierung und damit zu einer Abweichung vom Ruhepotential führt. Exakt das macht der elektrostatische Reiz: Ein Tier aufschrecken, den Fluchtreflex auslösen, ohne das Tier zu verletzen, und eine Kopie des Reizes im Gedächtnis ablegen für die Zukunft [18, 23]. Elektrische Weidezäune folgen genau diesem Wirkprinzip: Einen elektrostatischen oder elektrischen Störreiz setzen, der einen Fluchtreflex auslöst und parallele Abspeicherung im Gehirn.

Eine direkte Überführung und Umrechnung zwischen den dargelegten Ansprechwerten der Membran (Spannung in mV) in einen Ansprechstrom (in z. B. mA) oder in eine Ansprechladung (in z. B.  $\mu\text{C}$ ) ist für Kleinvögel und Kleintiere aus der Literatur nicht ersichtlich. Daher sind Untersuchungsergebnisse und Veröffentlichungen unter Angabe von elektrischen Ladungs- und Energiewerten heranzuziehen.

In [24] wurden Untersuchungen an Herzen von Hunden und Schildkröten durchgeführt. Es konnten Reaktionen bei einer Einwirkdauer von 1  $\mu\text{s}$  bei den untersuchten Hunden etwa bei 1  $\mu\text{C}$  und bei den untersuchten Schildkröten bei etwa 10  $\mu\text{C}$  festgestellt werden. Für beide Werte zeigt sich eine asymptotische Annäherung an einen minimalen Ladungswert. Bei Ableitung der gewonnenen Messergebnisse in Bezug auf eine Durchströmung bei 16,7 Hz (Dauer der Halbwelle 29,9 ms) kann ein Scheitelwert für den Strom von 1 mA bei Hunden und 0,5 mA bei Schildkröten (wiederum Reaktion bei Messungen am Herzen) erkannt werden. Da diese Untersuchungen direkt am Herzen durchgeführt wurden, sind die Ergebnisse nur bedingt auf eine Berührung durch äußere Körperteile eines Vogels oder Kleinsäugetiers übertragbar.

In [25] wurden insbesondere Ziegen, Schafe und Schweine bei impulsförmiger Durchströmung untersucht. Die Durchströmungsdauer lag bei den kürzesten Impulsen bei 0,175 ms und die umgesetzte Ladung bei 0,15 mC. Es kam zu einem kurzen, kräftigen Zusammenzucken der Tiere mit anschließender Abwehrbewegung. Im EKG zeigten sich jedoch keine wesentlichen Auffälligkeiten. Auf Grund der in [25] verwendeten Impulsdauern und Ladungsgrößen liefern die Ergebnisse für die vorliegende Fragestellung keine zusätzlichen bzw. dienlichen Informationen zur Ermittlung eines Gefährdungsgrenzwertes bzw. eines Referenzwertes Reizschwelle bei impulsförmiger Durchströmung.

## 5.5 Weitergehende Literaturrecherche zur Ermittlung von Anhaltspunkten für Reiz- und Gefährdungsschwellen

### 5.5.1 Einleitung

Referenzwerte für die Reizschwelle bei impulsförmiger Durchströmung und bei stationärer Durchströmung sowie ein Grenzwert für eine Gefährdung bei impulsförmiger Durchströmung konnten im Rahmen der umfassenden Literaturrecherche (vgl. Kapitel 5.3) und aus der Betrachtung der biologischen Grundlagen (vgl. Kapitel 5.4) letztendlich nicht erkannt und somit nicht unmittelbar abgeleitet werden (Als Gefährdungsgrenzwert bei stationärer Durchströmung wurde ein Wert von 2 mA (siehe Kapitel 5.3) ermittelt).

Aus diesem Grund wurde in folgenden angrenzenden Gebieten recherchiert, um gegebenenfalls über Analogiebeziehungen oder aus Erfahrungsberichten Anhaltswerte für die noch offenen Referenz- bzw. Grenzwerte ableiten zu können.

- Erfahrungsberichte aus zoologischen Gärten und von Gelegeschutzmaßnahmen mit elektrischen Weidezaungeräten  
Motivation: In den Berichten werden Hinweise zur Ableitung von Gefährdungsgrenzwerten erwartet, da diese Anlagen zur Abschreckung, nicht aber zur Schädigung der Lebewesen führen sollen.
- Analogiebeziehungen zum Menschen  
Motivation: Aufgrund der vergleichbaren Funktion der Membrane beim menschlichen Körper kann ggf. auf Untersuchungsergebnisse und Normen beim Menschen zurückgegriffen werden.

## 5.5.2 Anwendung eines Ladungs- und Energieimpulses in zoologischen Gärten und bei Gelegeschutzmaßnahmen

Elektrische Tierzäune nutzen zur abschreckenden Reizauslösung kurze Stromimpulse. Der Einsatz von Weidezaungeräten in der Tierhaltung unterliegt dem Tierschutzgesetz und hier insbesondere § 1 TierSchG, die die „Verhinderung von vermeidbaren Schmerzen und Leiden an Tieren ohne vernünftigen Grund“ fordern. Dies ist von den Herstellern der Weidezaungeräte zu berücksichtigen und wird durch die Zulassungsbehörden geprüft. Zur Ableitung von Referenz- und Grenzwerten bei impulsförmigem Strom mittels Analogiebeziehungen werden folgend die normative sowie die Erfahrungslage bei der Anwendung von elektrischen Tierzäunen untersucht.

### Ergebnis zur normativen Lage

In DIN EN 60335-2-76 (VDE 0700-76):2015-08 [26] wird ein elektrischer Tierzaun wie folgt definiert: Elektrischer Tierzaun ist ein Elektrozaun, der verwendet wird, um Tiere innerhalb des Zauns zu halten oder um Tiere von einem bestimmten Bereich fernzuhalten.

Nach DIN EN 60335-2-76 (VDE 0700-76): 2015-08 Anhang BB.1 werden Anforderungen an Elektrotierzäune definiert, die zum Abschrecken von Vögeln, zum Einzäunen von Haustieren oder zum Trainieren von Tieren wie Kühen (Kuhtrainer) bestimmt sind. Diese sollten nur aus Elektrozaungeräten mit niedriger Leistung versorgt werden, womit noch eine ausreichende und sichere Wirkung erzielt wird.

Entsprechend DIN EN 60335-2-76 (VDE 0700-76): 2015-08 Anhang A.3 müssen Elektrozaungeräte bei Bemessungsspannung mit einer 500-Ω-Last folgende Ausgangseigenschaften einhalten:

- Die Impulswiederholrate darf 1 Hz nicht überschreiten.
- Die Impulsdauer des Impulses darf 10 ms nicht überschreiten.
- Bei Elektrozaungeräten darf der Energieimpuls 5 J nicht überschreiten.

### Ergebnis zu Erfahrungen aus zoologischen Gärten

In Zoos in den USA, Kanada, Deutschland etc. werden in Teilen von Volieren und Gehegen Absperrungen mit künstlichen Pflanzen, Ästen, Bäumen und Blättern – zum Teil in Kombination mit handelsüblichen Weidezaungeräten – durchgeführt. Dabei werden die Objekte mit Litzen von normalen Weidezaungeräten umspinnen. Die Litzen<sup>4</sup> werden an handelsübliche Weidezaungeräte angeschlossen, entweder batteriebetriebene oder solche, die extern versorgt werden. Die Höhe der Impulsspannung (z. B. nach [27] 7,8 - 11,5kV) und der Impulsladung (z. B. nach [27] 0,8 - 4,7J) hängt vom Einsatzgebiet ab.

---

<sup>4</sup> Eine Litze ist ein dünner, flexibler, metallischer Leiter – in diesem Anwendungsfall ohne Isolation.

Typische Werte für Impulswerte von gebräuchlichen Weidezaunanlagen für Geflügel wurden aus [27] entnommen:

- VOSS.farming "DELTA 5" - 230V Weidezaungerät	11,3 kV; 4,7 Joule
- VOSS.farming "TESLA 7" - 230V Weidezaungerät	11,3 kV; 4,7 Joule
- VOSS.farming "impuls V30" - 230V Weidezaungerät	9,5 kV; 1,3 Joule
- VOSS.farming "impuls V50" - 230V Weidezaungerät	10,0 kV; 2,6 Joule
- VOSS.farming "impuls V70" - 230V Weidezaungerät	11,5 kV; 4,0 Joule
- VOSS.PET fenci M09 - 230V Weidezaungerät	9,5 kV; 0,8 Joule
- VOSS.PET "NV 1200 Pet Control" - 230 V	7,8 kV; 1,2 Joule

Vögel, Säugetiere, Reptilien etc. berühren in der Regel nur einmal eine Litze und speichern vermutlich diese unangenehme Erfahrung, welches zum Fluchtreflex führte, ab. Beispielweise ist auf landwirtschaftlich genutzten Weiden aber auch in durch Weidezaunanlagen geschützten Bereichen in Zooanlagen (Gehege, Volieren) zu beobachten, dass Tier mitunter unmittelbar neben dem elektrifizierten Weidezaun weiden, ihn aber nicht berühren. Mitunter ist hierbei die Schnauze von Säugetieren z. B. von Rindern oder Antilopen sehr dicht aber immer mit einigen Zentimetern oder Millimetern Sicherheitsabstand zum Weidezaun, wenn sie dort Gras abweiden. Dies bedeutet, dass sie den Weidezaun als Gehege- bzw. Reviergrenze erkennen und respektieren.

Diesen Effekt der Markierung der Reviergrenze durch den Weidezaun machen sich Zoos und Wildtierhaltungen seit vielen Jahren zu Nutze und arbeiten bis heute damit. Hierzu ist festzuhalten, dass neben vielen anderen Aspekten auch der Einsatz und die Gestaltung von Gehege- und Volierenbegrenzungen durch die EU-Zoorichtlinie (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 9. 4. 1999L 94/24 Richtlinie 1999/22/EG des Rates vom 29. März 1999 über die Haltung von Wildtieren in Zoos) geregelt sind. Die EU-Zoorichtlinie ist im Bundesnaturschutzgesetz § 42 umgesetzt und verbindlich. Darüber hinaus ist sie in den einzelnen Landesnaturschutzgesetzen verankert. Sie umfasst auch das Tierschutzgesetz und hier besonders TierSchG § 11, der mit den Mindestnormen für die Haltung von Wildtieren ebenfalls die Gehegebegrenzungen etc. beinhaltet. Dadurch ist in zweifacher Hinsicht sichergestellt, dass Gehegebegrenzungen und Volieren nicht dem TierSchG §§ 1, 2 und 11 widersprechen. Für die Überwachung der Einhaltung sind die unteren Naturschutzbehörden und der Amtstierarzt gemeinsam verantwortlich. Sie sind bereits bei der Planung solcher Absperrungen durch die Wildtierhaltungen bzw. deren Architekten im Vorfeld einzubeziehen und ggf. bedarf der Einsatz ihrer Genehmigung. Eine der jüngsten Anlagen, die so geschützt wird, befindet sich im Zoo Leipzig: Die Südamerika Anlage, welche im Mai 2018 eröffnete. Das Equipment, wie elektrifiziertes Gras und Elektrobambus, findet sich bei etlichen Anbietern, auch in anderen Teilen Deutschlands, wieder. Als Anschluss dienen handelsübliche Weidezaungeräte, wie sie auch von Landwirten eingesetzt werden. Der elektrostatische Schreckreflex wird durch einen intervallgesteuerten Spannungsimpuls mit begrenzter Ladung im Weidegerät erzeugt. Es wird davon ausgegangen, dass die Nutzung einer elektrischen Zaunanlage in einer neu errichteten zoologischen Anlage den aktuellen Anforderungen entspricht und deshalb nur betrieben werden darf, wenn die eingesetzte Lösung ein äußerst geringes Schädigungspotenzial aufweist.

Im Rahmen dieses Projektes wurde seitens des Eisenbahn-Bundesamtes eine Umfrage unter ca. 100 zoologischen Gärten in Deutschland durchgeführt, wovon 37 zoologische Gärten eine Rückmeldung gegeben haben. In 38 % der an der Befragung teilgenommenen zoologischen Gärten (14 zoologische Gärten) werden elektrische Tierzäune verwendet, wobei bei 6 zoologischen Gärten bereits über 15 Jahre Erfahrungen vorliegen. Drei zoologische Gärten gaben Unfälle mit Verletzungen oder Tod von Vögeln in Verbindung mit der Verwendung von elektrischen Tierzäunen an. Aus den Antworten geht nicht hervor, ob der elektrische Impuls direkt zu dieser Schädigung geführt hat oder die Schädigung durch Ursachen, wie z. B. Kollision der Tiere mit dem Zaun, Wartungsfehler o.ä., verursacht wurde. Drei zoologische Gärten teilten in Erfahrungskommentaren mit, dass es bei der Verwendung von elektrischen Tierzäunen aufgrund der Größe der elektrischen Entladung zu einem Abschrecken ohne Schädigung der Tiere komme [28].

## Ergebnis Erfahrungen bei Geflügel- und Weidezaunanlagen

In weiterer Folge wurden Erfahrungsberichte von Gelegeschutzmaßnahmen nach Ladungshinweisen ausgewertet, und zwar „Gelegeschutzmaßnahmen beim großen Brachvogel 2016“ [29] und „Untersuchung zur Prädation im Zusammenhang mit dem Artenschutzprogramm „Gemeinschaftlicher Wiesenvogelschutz“ [30]. Für dieses Projekt ist besonders die Bewertung des Gefährdungspotenzials aus den Erfahrungsberichten von Gelegeschutzmaßnahmen von hoher Bedeutung, da zu schützende Vögel aber auch Kleinsäugetiere mit Elektrotierzäunen in Kontakt standen und stehen und eine qualitative Beobachtung erfolgte. Die Angaben aus den Erfahrungsberichten erfolgen mit direkten Zitaten aus den Literaturstellen.

Der Veröffentlichung [30] konnten dabei detaillierte Hinweise entnommen werden:

*„Im Börmer Koog und im Meggerkoog wurde erprobt, ob mit Elektrozaun eingezäunte Wiesenvogelgelege erfolgreich von den Vögeln ausgebrütet werden können. Es kam ein handelsüblicher Elektrokükengeflügelzaun zum Einsatz. Die sechs untersten Litzen hatten in der Senkrechten und Waagerechten einen Abstand von 5,9 cm. Die nächsten fünf Litzen waren jeweils 11,8 cm voneinander entfernt. Die letzte Litze hatte einen Abstand von 23,5 cm. Insgesamt war der Zaun 112 cm hoch und ein Element mit mehreren spitz zulaufenden Plastikstäben 50 m lang. Lediglich die Bodenlitze führte keinen Strom, alle übrigen leiteten diesen.“ [...] „Je nach Zaunlänge kamen ein bis zwei Weidezaungeräte mit dem Namen Hot Shock A50 zum Einsatz. Mit einer Nasszelle von 80-100 Ah ausgestattet, wird dieses Gerät in der allgemeinen Praxis nicht nur zum Rückhalten von Schafen und Geflügel genutzt, sondern auch zur Abwehr von Wildtieren eingesetzt. ...“ ( [30] Seite 7)*

Anmerkung der Autoren: Das Gerät Hot Shock A50 hat eine Ausgangsenergie von 3,0 Joule bei 11 kV<sup>5</sup> [31].

*„In den ersten drei Untersuchungsjahren wurde die Stromversorgung ausgeschaltet, wenn der Schlupf der ersten Küken anstand.“ [...] „Daraufhin wurde auf das Ausschalten des Weidezaungerätes verzichtet. Direktbeobachtungen belegen, dass die Küken den Zaun unbeschadet passieren.“ ( [30] Seite 12)*

*„Elektrozäune kommen sowohl in Europa und als auch in Amerika zum Schutz von Bodenbrütern zum Einsatz, wie die Studien von Smith et al. (2011) und Gibbons et al. (2007) zeigen. Smith et al. (2011) fassten die in 6555 Artikeln dargestellten Ergebnisse zu diesem Thema zusammen. Die Autoren kommen ebenfalls zum Schluss, dass die Auszäunung eine effektive, aber kostenintensive Methode ist. Nachteile sind dabei, dass sie nur gegen Bodenprädatoren einen Schutz darstellt und sehr wartungsanfällig ist. Gibbons et al. (2007) kommen zu ähnlichen Ergebnissen.“ ( [30] Seite 25f).*

Aus den Berichten kann abgeleitet werden, dass handelsübliche Elektrotierzäune für Gelegeschutzmaßnahmen erfolgreich eingesetzt werden und keine Gefährdungen an den zu schützenden Vögeln und den abzuwehrenden Kleinsäugetieren dokumentiert wurden. Nach den Berichten wird ein Einsatz von Elektrotierzäunen für Schutzmaßnahmen empfohlen.

---

<sup>5</sup> Das Gerät hotShock A300 ist das Nachfolgegerät zum A50.

### 5.5.3 Reizschwellen und Grenzwerte beim Menschen

Auf Grund der Vergleichbarkeit der neuronalen Prozesse bei z. B. Vögeln, Säugetieren, wirbellosen Tieren [20, 22] wurden zusätzlich bzw. zur Vervollständigung der Daten Reizschwellen und Grenzwerte Gefährdung für den Menschen bei Durchströmung ermittelt.

Entsprechend der Veröffentlichung [32] liegen die Reizschwellen beim Menschen bei einer Impulsdauer von 1  $\mu$ s im Bereich von 7,5 mA und im 50 Hz Bereich bei ca. 0,4 mA. Für den Menschen werden im Bereich der Untersuchungen von elektrostatischen Entladungen eine Empfindlichkeit bei etwa 2000 V bei einer Entladeenergie von etwa 0,5 mJ (Kapazität 330 pF) angegeben [33]. Entsprechend des Human Body Models (HBM) [34] entspricht dies etwa einem Scheitelwert des Impulsstromes von 10 A (bei 1 ns Anstiegszeit, Rückenhalbwertszeit 50 ns).

In IEC 60479-2:2019 [33] werden Referenzwerte zur Reizschwelle und zu schmerzhaften Empfindungen für den Menschen bei impulshafter Durchströmung angegeben. Die entsprechenden kapazitiven Verhältnisse liegen in der untersuchten Anordnung beim KTA bei kleiner 100 pF und somit außerhalb der Angaben dieser Norm. Die Ladungswerte liegen für den Referenzwert Reizschwelle zwischen 0,4 – 1  $\mu$ C und für den Referenzwert des schmerzhaften Empfindens bei 8  $\mu$ C. Entsprechend des Zusammenhangs

$$Q = C \cdot U$$

mit Ladung  $Q$  in C (Coloumb oder Ampere - Sekunden), Kapazität  $C$  in F (Farad) und Spannung  $U$  in V (Volt).

Die in der Kapazität gespeicherte Energie kann mit

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2} = I^2 \cdot R \cdot t_{\text{Impuls}}$$

mit Energie  $E$  in J (Joule) berechnet werden.

Bei einer abgeschätzten Kapazität der Anordnung von etwa 50 pF würde sich mit den obigen Annahmen und der Extrapolation des Diagramms folgende Referenzwerte ergeben:

- Referenzwert Reizschwelle bei impulsförmiger Durchströmung bei 50 pF beim Menschen:
  - Ladung: 0,4 – 1  $\mu$ C
  - Ladespannung an 50 pF: 8 ... 20 kV
  - Gespeicherte Energie an 50 pF: 1,6 ... 10 mJ
- Referenzwert schmerzhaftes Empfinden bei impulsförmiger Durchströmung bei 50 pF beim Menschen:
  - Ladung: 8  $\mu$ C
  - Ladespannung an 50 pF: 160 kV
  - Gespeicherte Energie an 50 pF: 640 mJ

In DIN VDE 0105-100:2015-10 Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 100: Allgemeine Festlegungen [35] wird im Abschnitt 6.3 darauf hingewiesen, dass keine besonderen Maßnahmen zum Schutz von Menschen notwendig sind, wenn die elektrische Energie unter 350 mJ beträgt. Somit kann für Menschen eine Gefährdungsschwelle bei Kurzzeitbeanspruchung bei 350 mJ [35] angegeben werden.

## 5.6 Fazit: Festlegung der Referenz- und Grenzwerte

Zur Beurteilung der Messwerte wurden folgende Werte definiert (siehe Kapitel 5.1):

- **Referenzwert Reizschwelle:** Der „Referenzwert Reizschwelle“ beschreibt einen Stromwert, ab welchem das Tier eine biologische Wirkung spüren kann. Stromwerte, welche diesen Wert unterschreiten, sind aufgrund biologischer Wirkmechanismen nicht spürbar.
- **Grenzwert Gefährdung:** Wird der „Grenzwert Gefährdung“ überschritten, kann davon ausgegangen werden, dass der Vogel aufgrund des elektrischen Schlages direkt oder indirekt zu Schaden kommt.

Dabei werden folgende Szenarien unterschieden (siehe Kapitel 5.1):

1. **Durchströmung mit impulsförmigem Strom** durch Abfuhr der Ladung am KTA im Zeitpunkt der Berührung des KTAs durch den Vogel oder Kleintiers. Der Impuls ist gekennzeichnet durch einen sehr geringen Zeitbereich von einigen 10 ns.
2. **Durchströmung mit stationärem Strom** bei kontinuierlicher Berührung des KTAs durch den Vogel oder das Kleintier. Dieser Wert zeichnet sich durch einen höheren Zeitbereich beginnend im ms-Bereich aus.

Entsprechend wurden die folgend aufgeführten **Referenzwerte Reizschwelle** und **Grenzwerte Gefährdung** aus den in den Kapiteln 5.2 bis 5.5 dargestellten Erkenntnissen abgeleitet, intensiv in der PAG diskutiert und abschließend durch die PAG bestätigt.

- Der **Referenzwert Reizschwelle** bei **Durchströmung mit impulsförmigem Strom** kann nicht festgelegt werden. Wie in der Literaturstudie intensiv dargestellt worden ist, sind die biologischen Vorgänge untersucht und verstanden. Es gibt nach der Literaturstudie, Herstellung von Analogiebeziehungen und der intensiven Diskussion in der PAG keine belastbare Grundlage, um einen Referenzwert zur Reizschwelle festzulegen. Eine Übertragung von Hinweisen beim Menschen ist aufgrund der voraussichtlich deutlich unterschiedlichen Kontaktfläche nicht zielführend.
- Der **Referenzwert Reizschwelle** bei **Durchströmung mit stationärem Strom** wurde nach Herstellung von Analogiebeziehungen und der intensiven Diskussion in der PAG auf einen Effektivwert von 500  $\mu\text{A}$  festgelegt. Dieser Wert orientiert sich an den in der Literatur, z. B. Untersuchungen am Menschen [32], Untersuchungen am Herz von Hunden [24], angegebenen Werten.
- Der **Grenzwert Gefährdung** bei **Durchströmung mit impulsförmigem Strom** von 1 Joule wurde unter Berücksichtigung der technischen Daten von Geflügelweidezäunen, der Erfahrungsberichte und der normativen Vorgaben festgelegt. Bei einem Gefährdungs-Grenzwert von 1 Joule, welcher bei 20% des maximalen normativen Wertes für elektrische Tierzäune [26] und bei einem Drittel der bei Gelegeschutzmaßnahmen verwendeten Geräten [30] liegt, kann davon ausgegangen werden, dass keine Schädigung des Tiers stattfindet.
- Der **Grenzwert Gefährdung** bei **Durchströmung mit stationärem Strom** orientiert sich an dem Ableitstrom für Abdeckungen beim Vogelschutz und liegt bei 2 mA (VDE-AR-N 4210-11) [1].

Eine Zusammenfassung der Grenzwerte Gefährdung und der Referenzwerte Reizschwelle ist in Tabelle 46 dargestellt.

TABELLE 46: ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG VON GRENZWERT GEFÄHRDUNG UND REFERENZWERT REIZSCHWELLE

	Art der Durchströmung	
	impulsförmiger Strom (wenige 10 ns)	stationärer Strom (ms bis s)
<b>Referenzwert Reizschwelle</b>	unbekannt	500 $\mu$ A
<b>Grenzwert Gefährdung</b>	1 Joule	2 mA

## 6 Zusammenfassender Vergleich der Messwerte

### 6.1 Einleitung und einführende Betrachtungen

Alle Messwerte wurden mit einer 50-Hz-Wechselspannung sowie modellhafter Annäherung des Vogels von Erdpotenzial ermittelt. Für den Vergleich der Messwerte mit den aufgeführten Referenz- und Grenzwerten (vgl. Kapitel 5) wird folgend ein möglicher Einfluss der Frequenz sowie der Berührungsposition (hochspannungs- oder erdseitig) des Vogels auf die Messwerte diskutiert.

#### Stationäre Durchströmung

Bei trockenem, sauberem Prüfobjekt sind die Ströme wie in Kapitel 2.4 beschrieben, ausschließlich von den Reaktanzen  $X_c$  abhängig. Eine Reaktanz ist bei konstanter Kapazität umgekehrt proportional zur Frequenz (siehe Kapitel 3.1). Bei 16,7 Hz sind Reaktanzen somit ca. dreimal größer als bei 50 Hz und die Ströme würden ca. 1/3 des gemessenen Stromes betragen. Mit zunehmender Verschmutzung bzw. bei Beregnung und Vereisung nehmen, wie in Kapitel 3.4 ausgeführt, die resistiven Ströme durch  $R_F$  und  $R_{KTA}$  zu. Diese Ströme sind von der Frequenz unabhängig (siehe Kapitel 3.1, Ohmsches Gesetz). Damit ergäbe sich bei 16,7 Hz je nach resistivem Anteil der Fremdschicht ein resultierender Strom zwischen 1/3 und 1 des gemessenen Stromes bei 50 Hz. Bei Kontakt des Vogels vom Hochspannungspotential wäre der Strom  $I_K$  kleiner als der gemessene Strom  $I_K$  (siehe Abschnitt 3.4.2). **Die gemessenen stationären Ströme betrachten somit die (für den Vogel) ungünstigsten Fälle.**

#### Impulsförmige Durchströmung

Maßgeblich ist die im Moment der Zuschaltung (der Berührung) des KTAs verfügbare elektrische Ladung, welche über das Lebewesen durch Berührung abgeleitet wird. Da diese von der Potenzial- und Ladungsaufteilung zum Zuschaltzeitpunkt bestimmt wird und der Vorgang der Umladung im Zeitbereich einiger 10 ns erfolgt, **ist ein Einfluss der Frequenz nicht gegeben** (siehe Abschnitt 3.3). Bei Kontakt des Vogels vom Hochspannungspotential verändert sich im Vergleich zum erdseitigen Kontakt die abführbare Ladung nicht (siehe Abschnitt 3.3.2). Die aus den gemessenen Strömen ermittelten Ladungen und Energien bei Impulsbelastung sind somit für beide Potenzial-Standorte des Vogels relevant.

### 6.2 Gegenüberstellung der Messwerte zu den Referenz- und Grenzwerten

In Tabelle 47 ist dokumentiert, bei welchen Versuchskonstellationen (Art Prüfisolator, Isolatorzustand und Umwelteinfluss) die gesetzten **Referenzwerte Reizschwelle** bzw. **Grenzwerte Gefährdung** durch die gemessenen stationären Ströme bzw. den aus den gemessenen impulsförmigen Strömen ermittelten Energien unter- bzw. überschritten werden.



TABELLE 47: ÜBERSICHT ÜBERSCHREITUNG REFERENZ- UND GRENZWERTE

ISOLATO- RART	ISOLATOR- ZUSTAND	UMWELT	REFER- ENZWERT REIZSCHWELLE	GRENZWERT GEFÄHRDUNG	
			Stationäre Durchströmung	Stationäre Durchströmung	Impulsförmige Durchströmung
			Zeitbereich der Durchströmung ms bis s	Zeitbereich der Durchströmung ms bis s	Zeitbereich der Durchströmung einige 10 ns
Verbund	gereinigt	trocken	unterschritten	unterschritten	unterschritten
		beregnet	unterschritten	unterschritten	unterschritten
		vereist	unterschritten	unterschritten	unterschritten
Verbund	leicht verschmutzt	trocken	unterschritten	unterschritten	unterschritten
		beregnet	unterschritten	unterschritten	unterschritten
		benebelt	unterschritten	unterschritten	unterschritten
Verbund	stark verschmutzt	trocken	unterschritten	unterschritten	unterschritten
		beregnet	unterschritten	unterschritten	unterschritten
		benebelt	unterschritten	unterschritten	unterschritten
Porzellan	gereinigt	trocken	unterschritten	unterschritten	unterschritten
		benebelt	<b>überschritten</b>	<b>überschritten</b>	unterschritten
		benebelt	<b>überschritten</b>	<b>überschritten</b>	<b>unbekannt<sup>6</sup></b>

<sup>6</sup> Bei stark verschmutzten, benebelten Porzellanisolatoren kam es nach Anlegen der Prüfspannung zu Überschlägen zwischen KTA und Hochspannungsarmatur. Daher konnten keine Messkurven aufgezeichnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass alle Grenzwerte bei dieser Konstellation überschritten werden.

## 6.3 Verbundisolator

### 6.3.1 Zusammenfassende Betrachtung Gefährdung bei Berührung (impulsförmige Durchströmung)

Für den untersuchten Verbundisolator kann für alle Isolatorzustände festgestellt werden, dass die messtechnisch am Körperwiderstand ermittelten Energien unterhalb des Grenzwertes Gefährdung von 1 J liegen.

**Bei den untersuchten Verbundisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei den untersuchten Isolatorzuständen und Umweltbedingungen (oder vergleichbaren und eingeschlossenen Isolatorzuständen und Umweltbedingungen) sind keine Gefährdungen durch impulsförmige Durchströmung (im Augenblick der Berührung) von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren zu erwarten.**

### 6.3.2 Zusammenfassende Betrachtung Gefährdung bei längerer Berührung (stationäre Durchströmung)

Für den untersuchten Verbundisolator kann für alle Isolatorzustände festgestellt werden, dass die messtechnisch am Körperwiderstand ermittelten Ströme unterhalb des Grenzwertes Gefährdung von 2 mA liegen. Dies ist auf die hydrophoben Eigenschaften von Verbundisolatoren zurückführbar. Bei Benetzung der Kunststoffoberfläche entsteht keine geschlossene Feuchtigkeitsschicht, sondern es bilden sich vereinzelte Tröpfchen aus, wodurch der Strom im Vergleich zu einer durchgängig benetzten Oberfläche stark gemindert wird. Dieser Effekt tritt ebenfalls bei verschmutzten Verbundisolator-Oberflächen auf, da die Verschmutzungsschicht aufgrund des Hydrophobietransfers ebenfalls eine wasserabweisende Wirkung annimmt [5].

**Bei den untersuchten Verbundisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei den untersuchten Isolatorzuständen und Umweltbedingungen (oder vergleichbaren und eingeschlossenen Isolatorzuständen und Umweltbedingungen) sind keine Gefährdungen durch stationäre Durchströmung (Berührung im Bereich ms bis s) von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren zu erwarten.**

### 6.3.3 Zusammenfassende Betrachtung Referenzwert Reizschwelle bei Berührung (impulsförmige Durchströmung)

Es konnte kein Referenzwert für die Reizschwelle bei impulsförmiger Durchströmung ermittelt werden. Aus diesem Grund kann auf Basis der Messwerte keine Aussage über eine Auslösung der Rezeptoren getroffen werden. Damit kann nicht abschließend geklärt werden, ob Kleinvögel bei Berührung der KTA reagieren. Hierzu wird der offene Forschungsbedarf zur Feststellung der physiologischen Reizschwelle für die Auslösung eines Fluchtreflexes im Kapitel 8 dargelegt.

### 6.3.4 Zusammenfassende Betrachtung Referenzwert Reizschwelle bei längerer Berührung (stationäre Durchströmung)

Für den untersuchten Verbundisolator kann für alle Isolatorzustände festgestellt werden, dass die messtechnisch am Körperwiderstand ermittelten Ströme unterhalb des festgelegten Referenzwertes der Reizschwelle von 500  $\mu$ A liegen.

Bei den untersuchten Verbundisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei den untersuchten Isolatorzuständen und Umweltbedingungen (oder vergleichbaren und eingeschlossenen Isolatorzuständen und Umweltbedingungen) ist bei einer stationären Durchströmung (Berührung im Bereich ms bis s) von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren davon auszugehen, dass keine Reizauslösung stattfindet.

## 6.4 Porzellanisolator

### 6.4.1 Zusammenfassende Betrachtung Gefährdung bei Berührung (impulsförmige Durchströmung)

Für den untersuchten Porzellanisolator kann für die Isolatorzustände gereinigt und leicht verschmutzt (bei Durchfeuchtung mit Nebel) festgestellt werden, dass die messtechnisch am Körperwiderstand ermittelten Energien unterhalb des Grenzwertes Gefährdung von 1 J liegen. Eine Bewertung des stark verschmutzten, benebelten Porzellanisolators ist aufgrund des spontanen Überschlags nicht möglich.

Bei den untersuchten Porzellanisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei den untersuchten Isolatorzuständen gereinigt und leicht verschmutzt (bei Umweltbedingung Durchfeuchtung mit Nebel) oder vergleichbaren und eingeschlossenen Isolatorzuständen und Umweltbedingungen sind keine Gefährdungen durch impulsförmige Durchströmung (im Augenblick der Berührung) von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren zu erwarten.

Bei den untersuchten Porzellanisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei den untersuchten Isolatorzuständen stark verschmutzt (bei Umweltbedingung Durchfeuchtung mit Nebel) oder vergleichbaren und eingeschlossenen Umweltbedingungen ist eine Gefährdung und Schädigung durch die elektrischen und thermischen Auswirkungen des Überschlags (Kurzschluss) auch von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren zu erwarten.

### 6.4.2 Zusammenfassende Betrachtung Gefährdung bei längerer Berührung (stationäre Durchströmung)

Für den untersuchten Porzellanisolator kann für die Isolatorzustände gereinigt, trocken festgestellt werden, dass die messtechnisch am Körperwiderstand ermittelten Ströme unterhalb des Grenzwertes Gefährdung von 2 mA liegen. Für den untersuchten Porzellanisolator kann für die Isolatorzustände leicht verschmutzt bei Umweltbedingung Durchfeuchtung mit Nebel festgestellt werden, dass die messtechnisch am Körperwiderstand ermittelten Ströme oberhalb des Grenzwertes Gefährdung von 2 mA liegen. Beim stark verschmutzten Porzellanisolator kommt es zum spontanen Überschlag mit einem stromstarken Lichtbogen, wobei ein Vogel neben der elektrischen auch einer thermischen Schädigung ausgesetzt sein würde.

Bei den untersuchten Porzellanisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei den untersuchten Isolatorzuständen gereinigt trocken oder vergleichbaren und eingeschlossenen Isolatorzuständen und Umweltbedingungen sind keine Gefährdungen durch stationäre Durchströmung (Berührung im Bereich ms bis s) von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren zu erwarten.

Bei den untersuchten Porzellanisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei den untersuchten Isolatorzuständen leicht verschmutzt bei Umweltbedingung Durchfeuchtung mit Nebel oder vergleichbaren und eingeschlossenen Isolatorzuständen und Umweltbedingungen sind Gefährdungen durch stationäre Durchströmung (Berührung im Bereich ms bis s) von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren zu erwarten.

Bei den untersuchten Porzellanisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei dem untersuchten Isolatorzustand stark verschmutzt (bei Umweltbedingung Durchfeuchtung mit Nebel) oder vergleichbaren und eingeschlossenen Umweltbedingungen ist eine Gefährdung und Schädigung durch die elektrischen und thermischen Auswirkungen des Überschlags (Kurzschluss) von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren zu erwarten.

### 6.4.3 Zusammenfassende Betrachtung Referenzwert Reizschwelle bei Berührung (impulsförmige Durchströmung)

Auf Basis der Literaturstudie konnten keine Referenzwerte für die Reizschwelle ermittelt werden. Aus diesem Grund kann auf Basis der Messwerte keine Aussage über eine Auslösung der Rezeptoren getroffen werden.

### 6.4.4 Zusammenfassende Betrachtung Referenzwert Reizschwelle bei längerer Berührung (stationäre Durchströmung)

Für den untersuchten Porzellanisolator kann für die Isolatorzustände gereinigt trocken festgestellt werden, dass die messtechnisch am Körperwiderstand ermittelten Ströme unterhalb des festgelegten Referenzwertes der Reizschwelle von 500  $\mu\text{A}$  liegen. Es ist davon auszugehen, dass keine Reizauslösung aufgrund der elektrischen Durchströmung ausgelöst wird. Bei der untersuchten „leichten“ Verschmutzung bei gleichzeitiger Durchfeuchtung durch Nebel ist der Referenzwert Reizschwelle aber auch die Gefährdungsschwelle überschritten. Beim Porzellanisolator mit starker Verschmutzung kommt es zum spontanen Überschlag mit einem stromstarken Lichtbogen, wobei ein Vogel neben der elektrischen auch einer thermischen Schädigung ausgesetzt sein würde.

Bei den untersuchten Porzellanisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei dem untersuchten Isolatorzustand gereinigt trocken ist bei stationärer Durchströmung (Berührung im Bereich ms bis s) von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren davon auszugehen, dass keine Reizauslösung auftritt.

Bei den untersuchten Porzellanisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und bei dem untersuchten Isolatorzustand leicht verschmutzt sowie der Umweltbedingung Durchfeuchtung mit Nebel (oder vergleichbaren und eingeschlossenen Umweltbedingungen) ist bei stationärer Durchströmung (Berührung im Bereich ms bis s) von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren davon auszugehen, dass der Grenzwert Gefährdung von 2 mA überschritten wird.

Bei den untersuchten Porzellanisolatoren (oder vergleichbaren Typen) und dem untersuchten Isolatorzustand stark verschmutzt sowie der Umweltbedingung Durchfeuchtung mit Nebel (oder vergleichbaren und eingeschlossenen Umweltbedingungen) kommt es zu einem spontanen Überschlag. Der Überschlag kann eine Gefährdung und Schädigung durch die elektrischen und thermischen Auswirkungen auch für Kleinvögel und Kleinsäugetiere darstellen.

## 6.5 Weitere Betrachtungen aus Beobachtungen

Die ermittelten Ergebnisse decken sich mit Beobachtungen von Mitarbeitern der DB Netz AG. Es soll beobachtet worden sein, dass Rabenvögel mit den KTA auf Isolatoren „gespielt“ haben, indem sie diese mit dem Schnabel hin und her drehten, ohne dass Flucht- oder Vermeidungsverhalten ausgelöst wurde<sup>7</sup>.

Ornithologen zufolge verringern Vögel ihr Flugverhalten bei extremen Wetterbedingungen (dichter Nebel, Starkregen, massiver Schneefall u. ä.) und bevorzugen es dann, in Bodennähe zu verharren. Bei diesen Witterungsbedingungen wird beobachtet, dass die Vögel eher Deckung suchen, als sich exponiert aufzuhalten. Betrachtet man das seltene Auftreten solcher extremen Wetterverhältnisse zusammen mit dem zu beobachtenden Vermeidungsverhalten in solchen Situationen, so muss geschlussfolgert werden, dass die Gefahr sich unter solchen Wetterbedingungen einem Lichtbogen o. ä. auszusetzen, sehr gering ist. Im Einzelfall kann ein solches Verhalten der Vögel natürlich nicht in Gänze ausgeschlossen werden.

---

<sup>7</sup> Mündliche Aussage während der Projekttreffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss beim EBA in Bonn

## 7 Anwendungsempfehlungen

### 7.1 Allgemeine Hinweise

Der KTA (Abbildung 52) wird ausgehend von der Hochspannungsseite bei Verbundisolatoren zwischen den Schirmen 1 und 2 auf dem Isolatorstrunk montiert<sup>8</sup>. Die Spitzen der metallischen Abweiser zeigen dabei in Richtung Hochspannung.

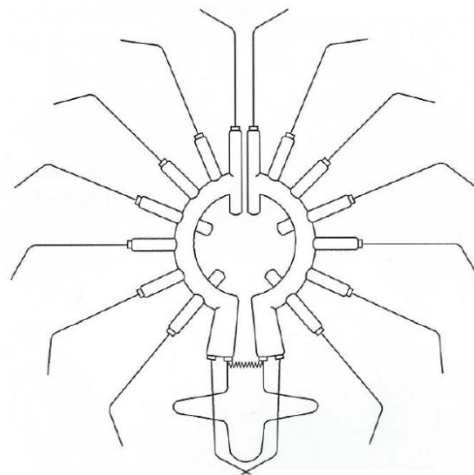


Abbildung 52: Kleintierabweiser (KTA)

Die Montage eines KTAs ist somit das Anbringen einer zusätzlichen Komponente auf freiem Potential auf einer Teilstrecke des Kriechwegs (Abbildung 53).



Abbildung 53: Isolator mit KTA schematisch

---

<sup>8</sup> Schirm 1 ist dabei definiert, als der Isolatorschirm, welcher der Hochspannungsseite am nächsten liegt. Demensprechend wäre Schirm 3 beim Verbundisolator und Schirm 5 beim Porzellanisolator der Schirm, welcher der Seite auf Erdpotential am nächsten liegt.

Das System KTA-Isolator kann im Vergleich zum Isolator ohne KTA bereits im Nennbetrieb, d. h. der Betrieb ohne Berücksichtigung von Kleinvögeln bzw. Kleintieren, veränderte elektrische Eigenschaften aufweisen. Die Auswirkungen auf das Betriebsverhalten mit entsprechenden Prüfungen waren kein Bestandteil des Projektes und es können hierzu im Rahmen dieser Anwendungsempfehlungen keine Hinweise gegeben werden. Aus diesem Grund sollten vor Einsatz immer Bauartprüfungen an einem System Isolator mit KTA durchgeführt werden, um die Auswirkungen des montierten KTAs auf das elektrische Verhalten des Isolators einschätzen zu können.

Im Rahmen dieses Projektes wurden ausschließlich die Auswirkungen auf Kleinvögel und Kleintiere bei Berührung des KTAs untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Positionierung des KTAs am Strunk ohne Berührung von Schirmen durchaus eine Schwierigkeit darstellt, welche im labortechnischen Umfeld gelöst werden konnte. Bei Einfluss von äußeren Einflüssen (insbesondere mechanische Vibrationen) kann es im Betrieb gegebenenfalls zur Verschiebung des KTAs bis hin zur Berührung von Schirmen durch die Elektroden kommen. Dies führt zur Änderung des Kriechweges zwischen KTA und den Armaturen des Isolators und somit wiederum zur Änderung des Betriebsverhaltens des Systems Isolator mit KTA. Die Häufigkeit dieses Verhaltens in Realbedingungen konnte im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht werden. Es sind gegebenenfalls konstruktive Lösungen zu suchen, die eine exaktere und stabilere Positionierung des KTAs zwischen den Schirmen sicherstellen.

## 7.2 Anwendungsempfehlung zum untersuchten System

### 7.2.1 Verbundisolator

Die KTA wurden an gereinigten, leicht und stark verschmutzten Verbundisolatoren (einem Typ) bei verschiedenen Umwelteinflüssen wie trocken, beregnet, benebelt und vereist untersucht.

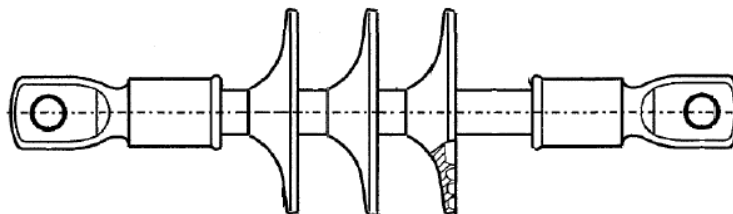


Abbildung 54: Prüfisolator aus Verbundwerkstoff (Verbundisolator)

Die Untersuchungen führten zu folgenden Erkenntnissen für den Verbundisolator:

- Gefährdung von Vögeln und Kleintieren:
  - Unter Beachtung der für das Versorgungsgebiet der DB Netz AG zu erwartenden Verschmutzungs- und Umweltbedingungen konnte keine Überschreitung der Grenzwerte für Gefährdung bei der Berührung des KTAs (impulsförmiger Durchströmung) und bei langzeitiger Berührung (stationärer Durchströmung) ermittelt werden.
  - Das Ergebnis zur stationären Durchströmung ist erwartungsgemäß, da es aufgrund der hydrophoben Eigenschaft (u. a. Hydrophobietransfer) von Verbundisolatoren zu keiner geschlossenen leitfähigen Verschmutzungsschicht auf der Isolierstoff-Oberfläche kommt. Beim Benetzen mit Flüssigkeit entstehen vereinzelt Tropfen, die keine Verbindung zueinander haben bzw. aufbauen. Deshalb ist im Vergleich zu einer geschlossenen benetzten Verschmutzungsschicht der Stromfluss viel geringer.

- Überschreitung der Reizschwelle von Vögeln und Kleintieren:
  - Aus der Literatur konnte kein Richtwert der Reizschwelle für impulsförmige Durchströmung abgeleitet werden. Damit ist nicht feststellbar, ob bei Berührung der KTA durch Vögel oder Kleintiere die Reizschwelle überschritten und ein Abwehrreiz ausgelöst wird.
  - Die Reizschwelle bei stationärer Durchströmung ist unterschritten, sodass davon ausgegangen werden muss, dass der KTA bei längerer Berührung durch Vögel oder Kleintiere keine Reize durch eine elektrische Durchströmung auslöst.

Da auf Basis der in diesem Projekt durchgeführten Betrachtungen und Untersuchungen keine Gefährdung von Kleinvögeln und Kleintieren erkannt werden konnte, kann die Anwendung des KTAs an dem untersuchten Verbundisolatortyp (oder vergleichsweise Bauweise) und den untersuchten Verschmutzungs- und Umweltzuständen empfohlen werden. Die mögliche Wirkungsweise (Reizwirkung) bleibt jedoch ungeklärt. Hierzu bedarf es weiterer Forschung (siehe weiterer Forschungsbedarf).

## 7.2.2 Porzellanisolator

Die KTA wurden an gereinigten, bei Umwelteinfluss trocken und leicht verschmutzten sowie stark verschmutzten Porzellanisolator (einem Typ) bei Umwelteinfluss benebelt untersucht.

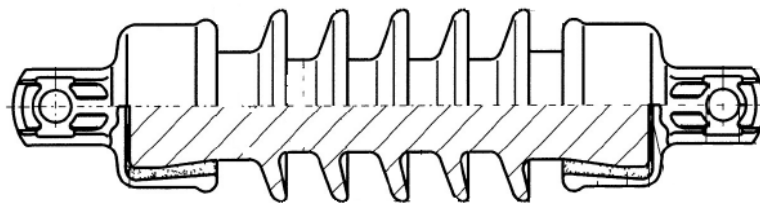


Abbildung 55: Prüfisolator aus Porzellan

Die Untersuchungen führten zu folgenden Erkenntnissen für den Porzellanisolator:

- Gefährdung von Kleinvögeln und Kleintieren:
  - Bei gereinigten und trockenen Porzellanisolatoren konnte keine Überschreitung der Grenzwerte für Gefährdung bei der Berührung des KTAs (impulsförmiger Strom) und bei langzeitiger Berührung (stationärer Strom) ermittelt werden.
  - Bei durch Nebel durchfeuchteten, leicht verschmutzten Porzellanisolatoren konnte keine Überschreitung der Grenzwerte für Gefährdung bei der Berührung des KTAs (impulsförmiger Strom) ermittelt werden. Bei langzeitiger Berührung (stationärer Strom) kommt es zu einer Überschreitung des Grenzwertes.
  - Bei stark verschmutzten Porzellanisolatoren erfolgte ein Überschlag zwischen KTA und Hochspannungsarmatur, welcher eine direkte Schädigung des Vogels oder Kleintiers zur Folge hat.
- Überschreitung der Reizschwelle von Kleinvögeln und Kleintieren:
  - Aus der Literatur konnte kein Richtwert der Reizschwelle für impulsförmige Durchströmung abgeleitet werden. Damit ist nicht feststellbar, ob bei Berührung der KTA durch Vögel oder Kleintiere die Reizschwelle überschritten und ein Abwehrreiz ausgelöst werden.
  - Die Reizschwelle ist bei stationärer Durchströmung bei gereinigten und trockenem Porzellanisolator unterschritten. Es ist deshalb davon auszugehen, dass der KTA bei längerer Berührung durch Vögel oder Kleintiere keine Reize auf Basis der elektrischen Durchströmung auslöst.



- Die Reizschwelle ist bei stationärer Durchströmung bei leicht verschmutzten und durch Nebel durchfeuchteten Porzellanisolator überschritten. Es kommt aber auch zur Überschreitung des Gefährdungsgrenzwertes, sodass von einer elektrischen Gefährdung des Vogels oder Kleinsäugetieres ausgegangen werden muss.
- Bei einem benebelten, stark verschmutzten Porzellanisolator ist aufgrund des spontanen Überschlages keine Ermittlung der Überschreitung der Reizschwelle möglich und auch nicht notwendig.

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnis, dass es bei den untersuchten Szenarien mit Porzellanisolatoren ausschließlich bei gereinigter, trockener Oberfläche zu keiner Gefährdung von Kleinvögeln und Kleinsäugetieren kommt und dieses Verschmutzungs-Szenario in der Praxis kaum oder nur in Ausnahmefällen auftreten wird, kann auf Basis dieser Untersuchungen für diesen Porzellanisolator (oder vergleichbaren Typen) die Anwendung von den untersuchten KTA nicht empfohlen werden.

## 7.3 Lösungsansätze zur Erhöhung der Wirksamkeit

Aus den durchgeführten Untersuchungen und den physiologischen Betrachtungen können folgende weitere Aspekte betrachtet werden:

### 7.3.1 Vergrößerung der elektrischen Wirkung bei impulsförmiger Durchströmung bei Kontakt

Die abgeführten elektrischen Ladungen bei Kontakt am KTA (impulsförmige Durchströmung) liegen deutlich unterhalb von 500 nC (Ausnahme vereister Isolator). Ein verlässlicher Referenzwert für Reizschwellen für Vögel und Kleintiere konnte auch durch intensive Literaturstudie und die Herstellung von Analogiebeziehungen nicht ermittelt werden. Die physiologischen Randbedingungen sind hierzu noch zu klären (vgl. Kapitel 8). Sollten weiterführende Untersuchungen zum Ergebnis kommen, dass die im Projekt ermittelten umgesetzten elektrischen Ladungen nicht zum Auslösen eines Reizes ausreichen, könnte eine Erhöhung der abführbaren Ladung bei impulsförmiger Durchströmung in Erwägung gezogen werden.

Die abführbare elektrische Ladung könnte mit folgenden Maßnahmen erhöht werden:

- Erhöhung der Anzahl der verbundenen Elektroden am untersuchten KTA;
- Vergrößerung der Fläche der metallischen Elektrode (Erhöhung der effektiven Breite);
- Vergrößerung des beschriebenen Außendurchmessers der Elektroden (Erhöhung der aufgespannten Fläche).

Bei den vorgeschlagenen Maßnahmen sind die Auswirkungen auf die betrieblichen Eigenschaften des Isolators (insbesondere bei Vergrößerung der Elektroden und der aufgespannten Fläche), wie

- Änderung des Verhaltens bei Verschmutzung;
- Änderung des Verhaltens bei Beregnung;
- Änderung des Schwingungsverhaltens und
- Einhaltung von Abständen zu Fremdpotenzialen

zu prüfen.

Die Position des KTAs auf den Isolator hat auf die impulsförmige Durchströmung (Ladungsmenge) einen geringen Einfluss.

### 7.3.2 Verringerung der Gefährdung durch einen möglichen Überschlag bei Kontakt bei Porzellanisolatoren

Bei den Untersuchungen zeigt sich, dass bei den Porzellanisolatoren bei Berührung des KTAs ein Überschlag zwischen KTA und Hochspannungselektrode des Isolators erfolgt. Zur Reduktion dieser Gefährdung sind folgende Maßnahmen möglich:

- Nutzung von längeren Porzellanisolatoren und Positionierung des KTAs im größeren Abstand zur Hochspannungselektrode. Es wird empfohlen, die Funktion und das Verhalten bei starker Verschmutzung durch Versuche nachzuweisen.
- Austausch von Porzellanisolatoren mit Verbundisolatoren und Nutzung eines KTAs.

### 7.3.3 Reduktion der Möglichkeit des Überbrückens der Isolationsstrecke

Die Gefährdung von Kleinvögeln und Kleintieren entsteht durch die (teilweise) Überbrückung der Isolierstrecke und der daraus folgenden Gefährdung durch einen zu hohen Körperstrom oder einen Überschlag. Folgende Maßnahmen können dies reduzieren:

- Durch Einsatz von längeren Isolatoren (vorzugsweise Verbundisolatoren) kann das Überbrücken der Isolierstrecke reduziert werden. (vgl. DB Netz AG bei Neubau)
- Einsatz von isolierenden Scheibenbarrieren auf den isolierenden Teil des Isolators (z. B. Ringgitter nach VDE-Anwendungsregel) als mechanisches und möglicherweise optisches Abweisungselement. Die Anbringung der Scheibenbarriere auf einem Isolator verändert das elektrische und mechanische Verhalten des Isolators maßgeblich. Aus diesem Grund sollten die Bauartprüfungen des Isolators mit Scheibenbarriere durchgeführt werden.

## 8 Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen der Literaturrecherche konnte nicht geklärt werden, ab welcher Strom-, Energie- bzw. Ladungsschwelle bei impulsförmigem Strom eine Reizauslösung bzw. Fluchtreflexauslösung beim Vogel bzw. Kleintier stattfindet.

Da die Untersuchungen zur elektrostatischen Abwehr ergeben haben, dass bei Verbundisolatoren und trockenen, gereinigten Porzellanisolatoren die Auslöseschwelle für den Fluchtreflex vermutlich nicht erreicht wird, bleibt die Frage zur Wirkungsweise des KTAs weiterhin offen. Es werden daher die folgenden Möglichkeiten für weitergehende Forschungstätigkeiten abgeleitet:

### **Die optische Wirksamkeit der KTA**

Ein möglicher Ansatz ist, dass die Vögel den KTA als Hindernis für ihren Anflug erkennen und somit eine optische Abschreckwirkung gegeben ist. Dabei ist wissenschaftlich davon auszugehen, dass die Unterschiede in der Anatomie der Augen zwischen Vögeln und Säugetieren hierbei eine Rolle spielen könnten. Viele Vögel besitzen im Vergleich zu Säugetieren zwei Sehgruben<sup>9</sup>, wodurch eine deutlich erhöhte Sehschärfe einhergeht [36]. Gestützt wird die Vermutung durch zwei andere wichtige Unterschiede: Säugetiere haben drei Typen Photorezeptoren: Rot, Grün und Blau. Vögel haben zusätzlich einen vierten Rezeptortyp für UV-Strahlung und zusätzlich farbige Öltröpfchen in den Zapfen ihrer Retina, die es den Vögeln vermutlich ermöglicht, andere Farbwelten zu registrieren [37]. Ihr optischer Sinn und ihre optischen Fähigkeiten unterscheiden sich daher drastisch von denen eines Menschen. Daher ist davon auszugehen, dass der bessere optische Sinn der Vögel es ihnen ermöglicht, den KTA zwar nicht als potenzielle Gefahr, jedoch als Hindernis auf dem Isolator sehr gut wahrzunehmen und entsprechend zu reagieren. Sie könnten den KTA als Hindernis beim Anflug mit beabsichtigtem Aufbaumen wahrnehmen und den Anflug abbrechen – ein Verhalten, das mit den Beobachtungen der DB Netz AG korrespondieren würde.

Es wird empfohlen, die Farbigkeit der KTAs dahingehend zu prüfen, ob durch eine veränderte Farbgebung die Wahrnehmung als Hindernis verbessert oder verstärkt werden könnte.

Daher wird im Falle weiterer Untersuchungen vorgeschlagen, sich vornehmlich auf die optische Abschreckwirkung von KTA im spannungslosen Zustand mittels Verhaltensbeobachtung von Vögeln zu konzentrieren. Dies kann u. a. auf präparierten Masten in Wildgehegen oder in geschlossenen Vogelvolieren durchgeführt werden. In Abgrenzung zu Tierversuchen im Sinne des Tierschutzgesetzes (TierSchG §§1 und 2; §§ 5 ff) stellen die hierfür notwendigen Beobachtungen keine Tierversuche im Sinne des TierSchG, sondern reine Verhaltensbeobachtungen dar.

In weiterer Folge können zu einer Beobachtung des Verhaltens von Kleinvögeln und Kleintieren eine Vor- und Nachher-Untersuchung bei Bahnstrecken mit geplanter KTA Ausrüstung durchgeführt werden. Dazu sollten über den Zeitraum von einem Jahr jeweils vor Anbringen und nach der Anbringung von KTAs systematische Aufsammlungen von Schlagopfern durchgeführt werden, wie sie z. B. an Windenergieanlagen „erprobt“ sind. Zudem eignen sich „Wildtierkameras“ gut für Verhaltensbeobachtungen.

---

<sup>9</sup> Die Fovea centralis (lateinisch für „mittige Grube“) oder **Sehgrube**, eine im Zentrum des sogenannten Gelben Flecks (Macula lutea) gelegene Einsenkung der Netzhaut (Retina), ist der Bereich des schärfsten Sehens.

### **Feststellen der physiologischen Reizschwelle für die Auslösung eines Fluchtreflexes**

Auf Grund der nicht recherchierbaren Reizschwelle für die Fluchtantwort eines Vogels oder Kleinsäugetiers auf einen elektrostatischen Reiz ist es grundsätzlich möglich mit Hilfe eines spezialisierten Physiologielabors diese Reizschwelle im Tierversuch festzustellen. Liegen Tierversuche im Sinne des TierSchG §§ 1, 2, 5 ff und insbesondere § 7a sowie § 8 TierSchG vor, bedarf es der vorherigen Genehmigung durch die zuständigen Behörden. Dies bedeutet u. a. das Einsetzen einer Ethikkommission und die permanente Überwachung durch Dritte. Insbesondere § 8 (6.1) TierSchG fordert eine klare Aussage zum zu erwartenden Nutzen eines solchen Versuchs.

### **Sektion von Totfunden an den Strecken der DB Netz AG**

Um sicher zu stellen, dass bei Streckenbegehungen an Masten und unter den Leitungen tot aufgefundene Tiere (Vögel, Kleinsäugetiere) tatsächlich dem Stromtod oder anderen Verletzungen zum Opfer gefallen sind, sollten solche Totfunde dokumentiert (Fundort, Datum, Uhrzeit, Abstand zum nächsten Mast und dessen Isolatorotyp) und umgehend an das nächste Landesuntersuchungsamt oder Naturkundemuseum mit der Bitte um Sektion unter Beachtung eines möglichen Stromtods gegeben werden. Solche Sektionen würden Klarheit über das Ausmaß der Unfälle von Kleinsäugetieren und Vögeln an den Oberleitungsanlagen schaffen<sup>10</sup> und damit einen weiteren wichtigen Baustein für die Einschätzung der aktuellen Gefährdungslage an Bahnstrecken darstellen.

---

<sup>10</sup> Es muss darauf hingewiesen werden, dass dabei auch Totfunde gesammelt werden könnten, deren Zustand aufgrund fortschreitender Verwesung, insbesondere im Sommer, für eine Untersuchung durch die Landesuntersuchungsämter schwierig werden könnte.

## 9 Abkürzungen und Formelzeichen

### Abkürzungen

BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BNatSchG	Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz)
bzw.	Beziehungsweise
ca.	Circa
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DZSF	Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EKG	Elektrokardiogramm
ESDD	Equivalent salt deposit density, äquivalente Salzablagerungsdichte, Anteil lösliche Bestandteile einer Verschmutzungsschicht
EU	Europäische Union
Fa.	Firma
ggf.	Gegebenenfalls
HBM	Human Body Model
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
IEC	International Electrotechnical Commission
IEC TS	International Electrotechnical Commission – Technical Specification
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KTA	Kleintierabweiser
NABU	Naturschutzbund Deutschland e.V.
NaCl	Natriumchlorid
NSDD	Non-soluble material deposit density, nicht lösliche Ablagerungsdichte, Anteil nichtlösliche Bestandteile einer Verschmutzungsschicht
PAG	projektbegleitende Arbeitsgruppe
r. H.	Relative Humidity, relative Luftfeuchtigkeit
S	Schalter
TierSchG	Tierschutzgesetz
TUD	Technische Universität Dresden
u. a.	unter anderem
USA	Vereinigte Staaten von Amerika

USCD	Unified specific creepage distance, vereinheitlichter spezifischer Kriechweg
usw.	und so weiter
UV	Ultra Violett
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

### Formelzeichen

$a$	Breite der Elektroden KTA im Kunststoff (in m)
$A_{\text{Iso}}$	Fläche des Isolierstoffzylinders (in m <sup>2</sup> )
$A_{\text{Luft}}$	Fläche der Luft (in m <sup>2</sup> )
$C$	Kapazität (in F)
$C_{\text{Iso}}$	Kapazität des Isolierstoffes des Isolators (in F)
$C_{\text{Iso } 1}$	Kapazität des Isolierstoffes des Isolators von Hochspannungspotenzial bis Montageort KTA (in F)
$C_{\text{Iso } 2}$	Kapazität des Isolierstoffes des Isolators von Erdpotenzial bis Montageort KTA (in F)
$C_{\text{Iso } 1 \text{ KTA}}$	Resultierende Kapazität aus $C_{\text{Iso } 1}$ und $C_{\text{KTA}}$ (in F)
$C_{\text{Iso } 2 \text{ KTA}}$	Resultierende Kapazität aus $C_{\text{Iso } 2}$ und $C_{\text{KTA}}$ (in F)
$C_{\text{KTA}}$	Resultierende Kapazität KTA auf Isolator (in F)
$C_{\text{KTA Luft}}$	Kapazität Luftspalt KTA - Isolator (in F)
$C_{\text{KTA Ring}}$	Kapazität Kunststoffring KTA (in F)
$C_{\text{Luft}}$	Kapazität der den Isolator umgebenden Luft (in F)
$C_{\text{Luft } S}$	Kapazität der Luft zwischen den Kontakten des Schalters (in F)
$C_{\text{Luft } 1}$	Kapazität der den Isolator umgebenden Luft von Hochspannungspotenzial bis Montageort KTA (in F)
$C_{\text{Luft } 2}$	Kapazität der den Isolator umgebenden Luft von Erdpotenzial bis Montageort KTA (in F)
$C_{\text{res } E}$	Resultierende Kapazität zwischen Erdpotenzial und Montageort des KTAs (in F)
$C_{\text{res } HS}$	Resultierende Kapazität zwischen Hochspannungspotenzial und Montageort des KTAs (in F)
$d$	Länge des Isolierstoffes des Isolators (in mm)
$d_1$	Länge des Isolierstoffes des Isolators von Hochspannungspotenzial bis Montageort KTA (in m)
$d_2$	Länge des Isolierstoffes des Isolators von Erdpotenzial bis Montageort KTA (in m)
$d_3$	Abstand Elektroden KTA – Innenfläche Kunststoffring KTA (in m)
$d_4$	Abstand Innenfläche Kunststoffring KTA - Oberfläche Isolator (in m)

$E$	Elektrische Energie (in J)
$f$	Frequenz (in Hz)
$F$	Formfaktor des Isolators (in 1/m)
$I$	Strom (in A)
$I_C$	Kapazitiver Verschiebestrom (in A)
$I_{C\ KTA}$	Kapazitiver Verschiebestrom über KTA (in A)
$I_{C\ Luft}$	Kapazitiver Verschiebestrom Luft (in A)
$I_{C\ Luft\ S}$	Kapazitiver Verschiebestrom Luft über den Kontakten des Schalters (in A)
$I_{Iso+Luft}$	Resultierender Strom Isolator, Fremdschicht und Luft (in A)
$I_K$	Strom durch den Körperwiderstand $R_k$ (in A)
$i_k(t)$	Strom durch den Körperwiderstand $R_k$ in Abhängigkeit von der Zeit (in A)
$I_R$	Strom durch einen Widerstand, resistiver Strom (in A)
$I_{R\ F}$	Resistiver Strom Fremdschicht (in A)
$I_{R\ KTA}$	Resistiver Strom KTA (in A)
$I_{stat}$	Stationärer Strom (in A)
$l_K$	Kriechweg des Isolators (in m)
$Q$	Elektrische Ladung (in C)
$Q_{res\ E}(t_0)$	Elektrische Ladung zum Zeitpunkt des Berührens des KTA von Erdpotenzial (in C)
$Q_{res\ HS}(t_0)$	Elektrische Ladung zum Zeitpunkt des Berührens des KTA von Hochspannungspotenzial (in C)
$r(l)$	Radius des Isolators am Ort $l$
$R$	Widerstand (in $\Omega$ )
$R_F$	Fremdschichtwiderstand des Isolators, Widerstand der Grenzfläche zwischen Isolierstoff und Luft (in $\Omega$ )
$R_{F\ 1}$	Fremdschichtwiderstand des Isolators von Hochspannungspotenzial bis Montageort KTA (in $\Omega$ )
$R_{F\ 2}$	Fremdschichtwiderstand des Isolators von Erdpotenzial bis Montageort KTA (in $\Omega$ )
$R_{Iso}$	Widerstand des Isolierstoffes des Isolators (in $\Omega$ )
$R_{Iso\ 1}$	Widerstand des Isolierstoffes des Isolators von Hochspannungspotenzial bis Montageort KTA (in $\Omega$ )
$R_{Iso\ 2}$	Widerstand des Isolierstoffes des Isolators von Erdpotenzial bis Montageort KTA (in $\Omega$ )
$R_K$	(Ersatz-) Körperwiderstand Vogel (in $\Omega$ )
$R_{KTA}$	Resultierender Widerstand KTA (in $\Omega$ )
$s$	Länge der Elektroden im Kunststoff (in m)
$t$	Zeit (in s)
$t_{impuls}$	Zeitdauer eines Impulses (in s)

$t_0$	Zeit bei Berühren des KTA (in s)
$U$	Elektrische Spannung (in V)
$U_{ges}$	Spannung über dem Isolierstoff des Isolators (in V)
$u_{ges}(t)$	Spannung über dem Isolierstoff des Isolators in Abhängigkeit von der Zeit (in V)
$u_{ges}(t_0)$	Spannung über dem Isolierstoff des Isolators zum Zeitpunkt des Berührens des KTA (in V)
$U_k$	Spannung über dem Körperwiderstand $R_k$ (in V)
$U_{Luft 1}$	Spannung über Hochspannungspotenzial und Elektroden KTA (in V)
$U_1$	Spannung über Hochspannungspotenzial und Montageort KTA (in V)
$u_1(t)$	Spannung über Hochspannungspotenzial und Montageort KTA in Abhängigkeit von der Zeit (in V)
$U_2$	Spannung über Erdpotenzial und Montageort KTA (in V)
$u_2(t)$	Spannung über Erdpotenzial und Montageort KTA in Abhängigkeit von der Zeit (in V)
$u_2(t_0)$	Spannung über Erdpotenzial und Montageort KTA zum Zeitpunkt des Berührens des KTA (in V)
$X_C$	Kapazitive Reaktanz, Blindwiderstand (in $\Omega$ )
$X_{C Iso 1}$	Kapazitive Reaktanz des Isolierstoffes des Isolators von Hochspannungspotenzial bis Montageort KTA (in $\Omega$ )
$X_{C Iso 2}$	Kapazitive Reaktanz des Isolierstoffes des Isolators von Erdpotenzial bis Montageort KTA (in $\Omega$ )
$X_{C KTA}$	Kapazitive Reaktanz des KTA (in $\Omega$ )
$X_{C Luft S}$	Kapazitive Reaktanz der Luft zwischen den Kontakten des Schalters (in $\Omega$ )
$X_{C Luft 1}$	Kapazitive Reaktanz der den Isolator umgebenden Luft von Hochspannungspotenzial bis Montageort KTA (in $\Omega$ )
$X_{C Luft 2}$	Kapazitive Reaktanz der den Isolator umgebenden Luft von Erdpotenzial bis Montageort KTA (in $\Omega$ )
$\epsilon$	Permittivität (in As/(Vm))
$\epsilon_0$	Permittivität des Vakuums, elektrische Feldkonstante ( $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/(Vm))
$\epsilon_r$	stoffabhängige relative Permittivität eines Isolierstoffes
$\rho$	spezifischer elektrischer Widerstand des Isolierstoffes ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )
$K_S$	Schichtleitfähigkeit der Fremdschicht (in S)
$T_E$	Entladezeitkonstante $R_k$ und $C_{res E}$
$T_{HS}$	Entladezeitkonstante $R_k$ und $C_{res HS}$



# 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einzelmast mit Rohrschwenkauslager (Bahnhof Dresden Klotzsche – Brücke Nesselgrund) .....	17
Abbildung 2: Erfasste elektrische Größen – schematisch, S – Schalter; $R_K$ – Körperwiderstand Vogel .....	20
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Kenngrößen eines Isolators.....	21
Abbildung 4: Prüfisolator aus Verbundwerkstoff (Verbundisolator) .....	22
Abbildung 5: Prüfisolator aus Porzellan.....	22
Abbildung 6: Kleintierabweiser (KTA).....	22
Abbildung 7: Galvanische Verbindung mittels Kupferleiter an KTA-Abweiserstacheln .....	23
Abbildung 8: Aufbringen der Verschmutzungsschicht - Beispiel Verbundisolator .....	25
Abbildung 9: Abwaschen der verschmutzten Isolatoren [7] .....	26
Abbildung 10: Soll- und Ist-Werte ESDD und NSDD der Prüfkörper Grunddiagramm [7].....	27
Abbildung 11: Referenzwert des USCD in Abhängigkeit der SPS (Verschmutzungsstufe) [13].....	27
Abbildung 12: Partielle Schichtleitfähigkeit – Messpositionen am Verbundisolator.....	28
Abbildung 13: Messung Schichtleitfähigkeit.....	29
Abbildung 14: partielle Schichtleitfähigkeit an leicht und stark verschmutzten Verbundisolatoren.....	30
Abbildung 15: Berechnung Prüfobjekt Ausleger waagrecht .....	32
Abbildung 16: Nebelkammer und Prüfanlage – Prüfobjekt senkrecht .....	33
Abbildung 17: Verschmutzte Isolatoren in der Nebelkammer .....	33
Abbildung 18: Niederschlag nach 2 h Benebelung. Am Verbundisolator bilden sich aufgrund dessen Hydrophobie vereinzelt Tröpfchen aus .....	34
Abbildung 19: Klimakammer VC 4020.....	35
Abbildung 20: Vereiste Isolatoren in der Klimakammer und nach Beendigung der Messungen.....	35
Abbildung 21: Prüfaufbau Ausleger waagrecht.....	37
Abbildung 22: Prüfkammer mit Hochspannungsdurchführung und Abmessungen .....	38
Abbildung 23: galvanische Verbindung KTA Abweiserstacheln – Ausleger waagrecht.....	38
Abbildung 24: Messanordnung impulsförmiger Strom – Ausleger waagrecht .....	39
Abbildung 25: Messkreis impulsförmiger Strom schematisch – Ausleger waagrecht.....	39
Abbildung 26: Messkreis stationärer Strom schematisch – Ausleger waagrecht .....	40
Abbildung 27: Messanordnung stationärer Strom – Ausleger waagrecht – Ableitstrommessgerät (ASM) und Datenlogger .....	40
Abbildung 28: Messanordnung senkrecht in Prüfkammer .....	41
Abbildung 29: Messkreis Strom schematisch – senkrecht in Prüfkammer .....	41
Abbildung 30: Isolator – KTA – Vogel schematisch – Darstellung der Ausgangssituation für die Messungen.....	42

Abbildung 31: Vereinfachtes kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild Isolator – KTA – Vogel hergeleitet aus Abbildung 30 .....	44
Abbildung 32: Kopplung KTA – Isolator geometrisch vereinfacht .....	45
Abbildung 33: Vereinfachtes kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild – stationäre Ströme vor Berühren KTA.....	46
Abbildung 34: Spannung und Strom vor und nach Berühren des KTAs.....	47
Abbildung 35: Vereinfachtes kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild – impulsförmiger Strom bei Berühren KTA.....	48
Abbildung 36: Vereinfachtes kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild – stationäre Ströme bei längerem Kontakt mit KTA.....	51
Abbildung 37: Beispiel impulsförmiger beim Schließen des Pfades über den KTA – Messung HSZG .....	53
Abbildung 38: Beispiel impulsförmiger Strom beim Schließen des Pfades über den KTA – Messung TUD .....	54
Abbildung 39: Spannung und Strom vor und nach Zuschalten KTA.....	54
Abbildung 40: Verbundisolator – gereinigt – Ladung $Q$ bei Zuschalten $R_K$ .....	56
Abbildung 41: Verbundisolator – gereinigt – Energie $E$ bei Zuschalten $R_K$ .....	57
Abbildung 42: Verbundisolator – leicht verschmutzt – Ladung $Q$ bei Zuschalten $R_K$ .....	59
Abbildung 43: Verbundisolator – leicht verschmutzt – Energie $E$ bei Zuschalten $R_K$ .....	60
Abbildung 44: Verbundisolator – stark verschmutzt – Ladung $Q$ bei Zuschalten $R_K$ .....	62
Abbildung 45: Verbundisolator – stark verschmutzt – Energie $E$ bei Zuschalten $R_K$ .....	63
Abbildung 46: Porzellanisolator – Ladung $Q$ bei Zuschalten $R_K$ .....	73
Abbildung 47: Porzellanisolator – Energie $E$ bei Zuschalten $R_K$ .....	74
Abbildung 48: Durchströmung mit impulsförmigem Strom beim Schließen des Schalters (Vogel bzw. Kleintier ist mit Bogen angedeutet).....	76
Abbildung 49: Durchströmung mit stationärem Strom bei dauerhaftem Kontakt (Vogel bzw. Kleintier ist mit Bogen angedeutet).....	76
Abbildung 50: Überschlag am KTA (Vogel bzw. Kleintier ist mit Bogen angedeutet).....	77
Abbildung 51: Vorgehensweise zur Ermittlung von Richt- und Grenzwerten.....	78
Abbildung 52: Kleintierabweiser (KTA) .....	94
Abbildung 53: Isolator mit KTA schematisch .....	94
Abbildung 54: Prüfolator aus Verbundwerkstoff (Verbundisolator) .....	95
Abbildung 55: Prüfolator aus Porzellan.....	96
Abbildung 56: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – gereinigt, trocken – Position: Ausleger waagrecht; Messort: TUD.....	115
Abbildung 57: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – gereinigt, trocken – Position: senkrecht; Messort: HSZG.....	115
Abbildung 58: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – leicht verschmutzt, trocken – Position: Ausleger waagrecht; Messort: TUD.....	116

Abbildung 59: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – leicht verschmutzt, trocken – Position: senkrecht; Messort: HSZG .....	116
Abbildung 60: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – stark verschmutzt, trocken – Position: Ausleger waagrecht; Messort: TUD.....	117
Abbildung 61: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – stark verschmutzt, trocken – Position: senkrecht; Messort: HSZG .....	117

# 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchte Parameter-Kombinationen an den beiden Isolatorarten .....	19
Tabelle 2: Technische Daten Prüfisolatoren .....	21
Tabelle 3: Abmessungen Kleintierabweiser .....	23
Tabelle 4: Übersicht verwendete Verschmutzungssuspensionen (Leicht und stark) .....	24
Tabelle 5: atmosphärische Bedingungen – Umwelteinfluss Trocken – TUD .....	31
Tabelle 6: atmosphärische Bedingungen – Umwelteinfluss Trocken – HSZG .....	31
Tabelle 7: atmosphärische Bedingungen – Umwelteinfluss beregnet – TUD .....	31
Tabelle 8: Messungen am waagerechten Ausleger .....	36
Tabelle 9: Parameter Versuchsanordnung Ausleger waagrecht .....	36
Tabelle 10: Messungen bei senkrechter Einbaulage innerhalb einer Prüfkammer .....	37
Tabelle 11: Übersicht Testreihen .....	52
Tabelle 12: Test 1.1 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator gereinigt, trocken, senkrecht, Messort: HSZG .....	55
Tabelle 13: Test 1.2 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator gereinigt, trocken, Ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	55
Tabelle 14: Test 1.3 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator gereinigt, beregnet, Ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	55
Tabelle 15: Test 1.4 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator gereinigt, Vereist, senkrecht, Messort: HSZG .....	56
Tabelle 16: Test 2.1 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator leicht verschmutzt, trocken, senkrecht, Messort: HSZG .....	58
Tabelle 17: Test 2.2 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator leicht verschmutzt, trocken, Ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	58
Tabelle 18: Test 2.3 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator leicht verschmutzt, beregnet, Ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	58
Tabelle 19: Test 2.4 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator leicht verschmutzt, benebelt, senkrecht, Messort: HSZG .....	59
Tabelle 20: Test 3.1 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator stark verschmutzt, trocken, senkrecht, Messort: HSZG .....	61
Tabelle 21: Test 3.2 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator stark verschmutzt, trocken, Ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	61
Tabelle 22: Test 3.3 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator stark verschmutzt, beregnet, Ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	61
Tabelle 23: Test 3.4 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Verbundisolator stark verschmutzt, benebelt, senkrecht, Messort: HSZG .....	62
Tabelle 24: Test 1.1 – stationärer Strom $I_{\text{stat}}$ – Verbundisolator gereinigt, trocken, senkrecht, Messort: HSZG .....	64

Tabelle 25: Test 1.2 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator gereinigt, trocken, Ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	64
Tabelle 26: Test 1.3 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator gereinigt, beregnet, Ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	65
Tabelle 27: Test 1.4 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator gereinigt, vereist, senkrecht, Messort: HSZG.....	65
Tabelle 28: Test 2.1 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator leicht verschmutzt, trocken, senkrecht, Messort: HSZG .....	66
Tabelle 29: Test 2.2 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator leicht verschmutzt, trocken, Ausleger waagrecht, Messort: TUD.....	66
Tabelle 30: Test 2.3 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator leicht verschmutzt, beregnet, ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	66
Tabelle 31: Test 2.4 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator leicht verschmutzt, benebelt, senkrecht, Messort: HSZG .....	67
Tabelle 32: Test 3.1 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator stark verschmutzt, trocken, senkrecht, Messort: HSZG .....	68
Tabelle 33: Test 3.2 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator stark verschmutzt, trocken, Ausleger waagrecht, Messort: TUD.....	68
Tabelle 34: Test 3.3 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator stark verschmutzt, beregnet, ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	68
Tabelle 35: Test 3.4 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator stark verschmutzt, benebelt, senkrecht, Messort: HSZG .....	69
Tabelle 36: Test 4.1 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator sehr schwer verschmutzt, trocken, senkrecht, Messort: HSZG .....	70
Tabelle 37: Test 4.2 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator sehr schwer verschmutzt, trocken, Ausleger waagrecht, Messort: TUD.....	70
Tabelle 38: Test 4.3 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator sehr schwer verschmutzt, beregnet, ausleger waagrecht, Messort: TUD .....	71
Tabelle 39: Test 4.4 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Verbundisolator sehr schwer verschmutzt, benebelt, senkrecht, Messort: HSZG .....	71
Tabelle 40: Test 5.1 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Porzellanisolator gereinigt, trocken, senkrecht, Messort: HSZG.....	72
Tabelle 41: Test 5.2 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Porzellanisolator leicht verschmutzt, benebelt, senkrecht, Messort: HSZG .....	72
Tabelle 42: Test 5.3 – Ladung $Q$ und Energie $E$ – Porzellanisolator stark verschmutzt, benebelt, senkrecht, Messort: HSZG .....	73
Tabelle 43: Test 5.1 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Porzellanisolator gereinigt, trocken, senkrecht, Messort: HSZG.....	74
Tabelle 44: Test 5.2 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Porzellanisolator leicht verschmutzt, benebelt, senkrecht, Messort: HSZG .....	75
Tabelle 45: Test 5.3 – stationärer Strom $I_{stat}$ – Porzellanisolator stark verschmutzt, benebelt, senkrecht, Messort: HSZG .....	75

Tabelle 46: Zusammenfassende Darstellung von Grenzwert Gefährdung und Referenzwert Reizschwelle.....	87
Tabelle 47: Übersicht Überschreitung Referenz- und Grenzwerte .....	89

## 12 Quellenverzeichnis

- [1] VDE-AR-N 4210-11 Anwendungsregel, Vogelschutz an Mittelspannungsfreileitungen, 2011-08.
- [2] Bundesnaturschutzgesetz, Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (BNatSchG) vom 29. Juli 2009, BGBl. S. 2542.
- [3] Lothar Fendrich; Wolfgang Fengler, Handbuch Eisenbahninfrastruktur, 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Vieweg, ISBN 978-3-662-56061-7, 2019.
- [4] EN 50163; DIN EN 50163:2005-07; VDE 0115-102:2005-07; VDE 0115-102:2005-07, Bahnanwendungen - Speisespannungen von Bahnnetzen; Deutsche Fassung EN 50163:2004, 2005.
- [5] Christiane Bär, Bewertung dynamischer Hydrophobieigenschaften polymerer Isolierstoffe mit dem Dynamischen Tropfen-Prüfverfahren unter Wechsel- und Gleichspannungsbeanspruchung, Dissertation, München: TuD press, ISBN 978-3-95908-072-9, 2016.
- [6] Dieter Haas, Bernd Schürenberg, Stromtod von Vögeln - Grundlagen und Standards zum Vogelschutz an Freileitungen, Ökologie der Vögel, ISSN 0173-0711, 2008.
- [7] DIN IEC/TS 60815-1:2016, Auswahl und Bemessung von Hochspannungsisolatoren für die Anwendung unter Verschmutzungsbedingungen - Teil 1: Begriffe, Informationen und allgemeine Grundlagen, 2016.
- [8] M. R. Shariati, A. R. Moradian, M. Rezaei and S. J. A. Vaseai, Providing the Pollution Map in South West Provinces of Iran Based on DDG Method, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.
- [9] Rui Zhang, Guangya Wu, Tian Yuan, Analysis on natural contamination characteristics of UHV AC post porcelain insulator, China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2016) Xi'an, 10-13 Aug, 2016, 2016 .
- [10] Johnny Wardman, Thomas Wilson, Pat Bodger, Volcanic Ash Contamination: Limitations of the Standard ESDD Method for Classifying Pollution Severity, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 2; April 2013.
- [11] Cigre Brochure TB 555, TB 555 Artificial Pollution Test for Polymer Insulators: Results of Pound Robin test.

- [12] DIN EN 60507:2014-09 Fremdschichtprüfungen an Hochspannungs-Isolatoren aus Keramik und Glas zur Anwendung in Wechselspannungssystemen.
- [13] DIN IEC/TS 60815-3:2016-10, Auswahl und Bemessung von Hochspannungsisolatoren für die Anwendung unter Verschmutzungsbedingungen - Teil 3: Polymerisolatoren für Wechselspannungssysteme, 2016.
- [14] DIN EN 60060-1 (VDE 0432-1:2011-10 ) Hochspannungs-Prüftechnik - Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen.
- [15] Cigre working group B2.21, Cigre Brochure 481, Guide for the Assessment of Composite Insulators in the Laboratory after their Removal from Service, 2011.
- [16] IEEE Task Force, M. Farzaneh et. al, Insulator Icing Test Methods and Procedures A Position Paper Prepared by the IEEE Task Force on Insulator Icing Test Methods, IEEE Transactions on Power delivery, Vol. 18, No. 4, 2003.
- [17] DIN EN 60060-2 (VDE 0432-2:2011-10 ), Hochspannungs-Prüftechnik - Teil 2: Messsysteme.
- [18] Rainer Klinke; Stefan Silbernagel, Lehrbuch der Physiologie, Stuttgart: Thieme, ISBN-10: 3137960045, 2005.
- [19] Roger Eckert; David Randell; George Augustine, Tierphysiologie, Thieme Georg Verlag, ISBN-10: 3136640020, 2000.
- [20] Jane B. Reece, Lisa A. Urry, Michael L. Cain, Steven A. Wasserman, Peter V. Minorsky, Campbell Biology, San Francisco: Pearson Education; ISBN 0-201-75054-6, 2005.
- [21] „3mdeutschland.de,“ [Online]. Available: [https://www.3mdeutschland.de/3M/de\\_DE/energie-de/stories/ganze-story/?storyid=06ccaafe-f257-463e-bd7d-f8b639768c2d](https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/energie-de/stories/ganze-story/?storyid=06ccaafe-f257-463e-bd7d-f8b639768c2d). [Zugriff am 18.12.2019].
- [22] Jan-Peter Hildebrandt, Horst Bleckmann, Uwe Homberg, Penzlin - Lehrbuch der Tierphysiologie, 8. Auflage, Springer Verlag, ISBN 978-3-642-55368-4, 2015.
- [23] Schmidt, R.F., 3. Auflage: Neuro- und Sinnesphysiologie, Springer Verlag ISBN 978-3-662-22216-4, 1998.
- [24] J.A. Pearce, J.D. Bourland, W. Neilsen, L.A. Geddes, M. Voelz, „Myocardial stimulation with ultrashort duration current pulses,“ *Pacing and Clinical Electrophysiology*, 1982, ISSN 1540-8159.



- [25] Peter Osypka, Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier. Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen, Dissertation, Fakultät Maschinenwesen - Technische Hochschule Carola Wilhelmina Braunschweig, 01.07.1963.
- [26] DIN EN 60335-2-76 (VDE 0700-76): 2015-08, Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Teil 2-76: Besondere Anforderungen für Elektrozaungeräte, 2015.
- [27] „weidezaun.info,“ VOSS GmbH & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.weidezaun.info/tierart/gefluegel.html>. [Zugriff am 18.12.2019].
- [28] Umfrage des DZSF in 100 Zoos/Tierparks, Thema: "Verwendung und Erfahrung von Elektrozäunen/ elektrischen Schutzzäunen", November 2019.
- [29] N. Meyer; H. Jeromin, Gelegeschutzmaßnahmen beim großen Brachvogel 2016 - Endbericht, Michael-Otto-Institut im NABA, Bergenhausen, 2016.
- [30] H. Jeromin; K. Jeromin; R. Blohm; H. Militzer, Untersuchung zur Prädation im Zusammenhang mit dem Artenschutzprogramm "Gemeinschaftlicher Wiesenvogelschutz" Endbericht, Michael-Otto-Institut im NABU, 2013.
- [31] Betriebsanweisung hotShock 300 - vom Hersteller angefordert, <https://agrar.horizont.com/de/weidezaungeraet-hotshock-a300.html>, 2017.
- [32] N. Leitgeb, Machen elektromagnetische felder krank?, Springer Wien New York, 2000.
- [33] IEC 60479-2: 2019-05, Effects of current on human beings and livestock Part 2: Special aspects, 2019.
- [34] NSI/ESDA-JEDEC JS-001-2010: , Electrostatic Discharge Sensitivity Testing - Human Body Model, 2010.
- [35] DIN VDE 0105-100:2015-10, Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 100: Allgemeine Festlegungen, 2015.
- [36] T. Birkhead, Die Sinne der Vögel, Springer Spektrum, ISBN 978-3-662-45117-5, 2015.
- [37] M. R. Graham, Through birds' eyes: inside into avian sensory ecology, Springer, J Ornithol (2012) 153 (Suppl 1):S23–S48, 2012.
- [38] Int. electrotechnical Commission: Alternating Current Disconnectors and Earthing Switches, International Std. IEC 60129, 1984.

- [39] Leistungsbeschreibung für die Vergabe der Forschungsprojektes "Ermittlung der Vogelschutzwirksamkeit von Animal Guards", PROJEKTNUMMER: 2018-U-10-1217: Eisenbahn Bundesamt, 2018.
- [40] R. Fox; S. W. Lehmkuhle; D.H. Westendorf, Falcon visual activity, Science Vol 192, Issue 4236, pp 263-265, 1976.
- [41] „IEV Wörterbuch,“ [Online]. Available: <https://www2.dke.de/de/Online-Service/DKE-IEV/Seiten/IEV-Woerterbuch.aspx>. [Zugriff am 07 04 2020].
- [42] DIN EN 62217, Hochspannungs-Polymerisolatoren für Innenraum- und Freiluftanwendung - Allgemeine Begriffe, Prüfverfahren und Annahmekriterien, 2013.
- [43] P. Berthold, Vogelzug. Eine aktuelle Gesamtübersicht., WBG, ISBN 978-3-534-23215-4, 2017.

## 13 Anhänge

### 13.1 Beispiel Strommesswerte gereinigt, trocken Vergleich TUD und HSZG

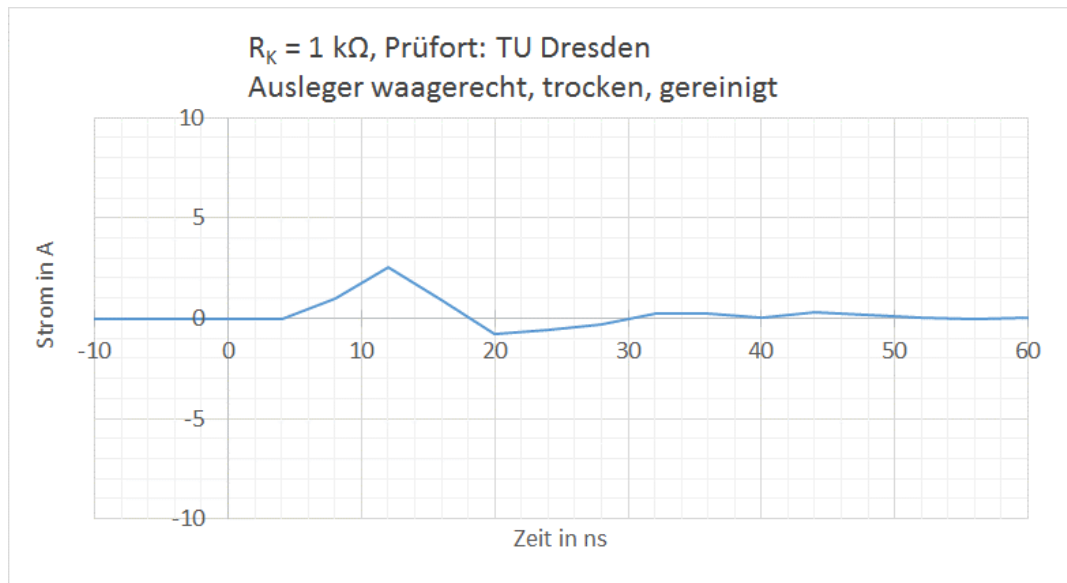


Abbildung 56: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – gereinigt, trocken – Position: Ausleger waagrecht; Messort: TUD

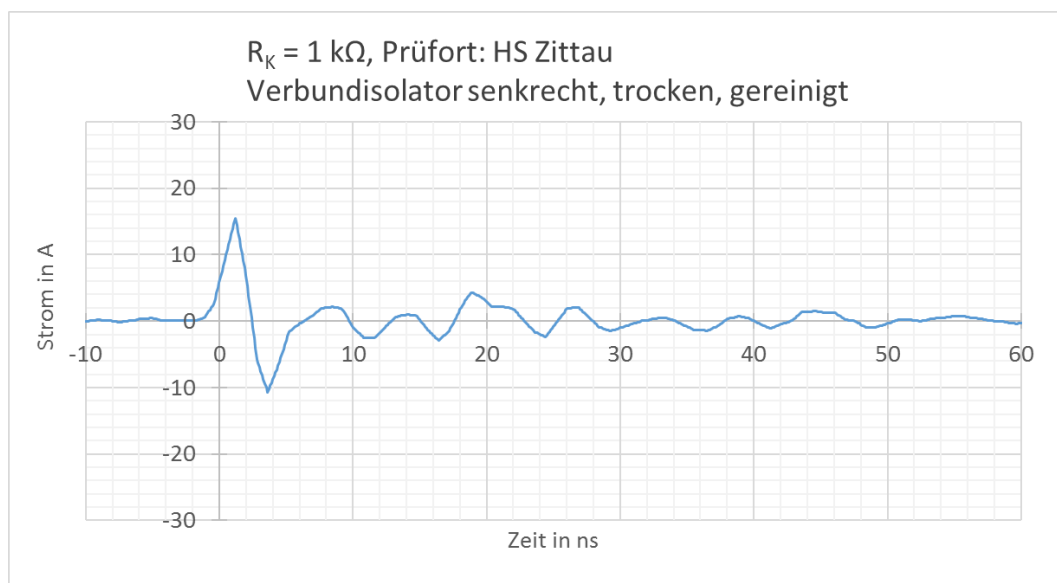


Abbildung 57: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – gereinigt, trocken – Position: senkrecht; Messort: HSZG

## 13.2 Beispiel Strommesswerte leicht verschmutzt, trocken Vergleich TUD und HSZG

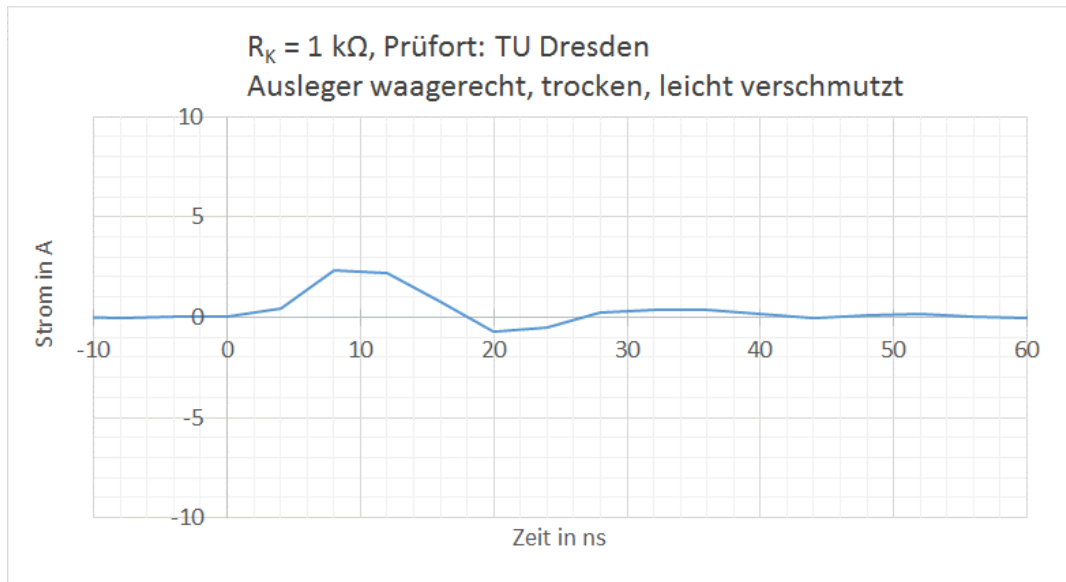


Abbildung 58: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – leicht verschmutzt, trocken – Position: Ausleger waagrecht; Messort: TUD

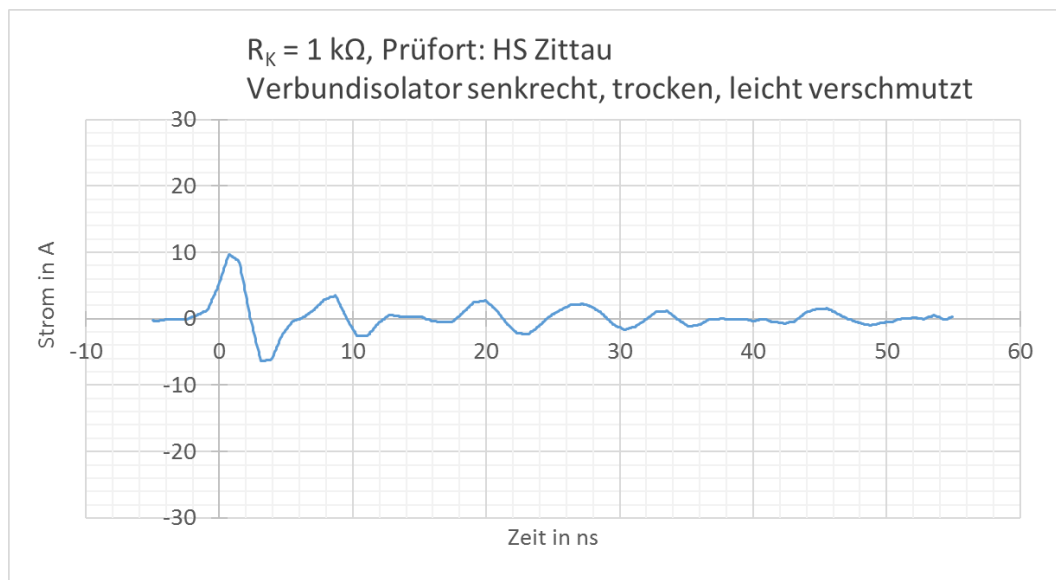


Abbildung 59: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – leicht verschmutzt, trocken – Position: senkrecht; Messort: HSZG

### 13.3 Beispiel Strommesswerte stark verschmutzt, trocken Vergleich TUD und HSZG

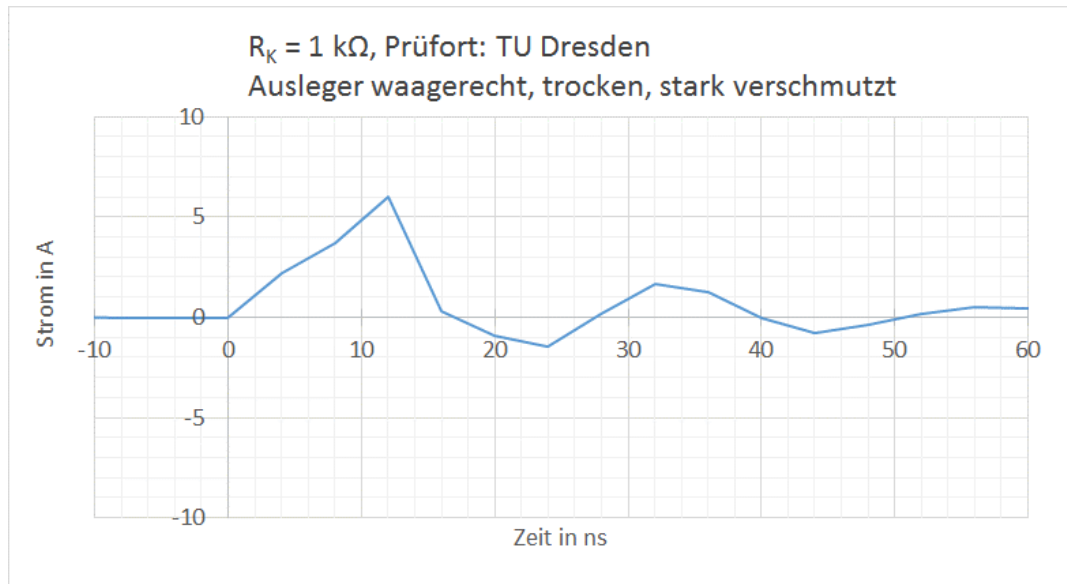


Abbildung 60: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – stark verschmutzt, trocken – Position: Ausleger waagrecht; Messort: TUD

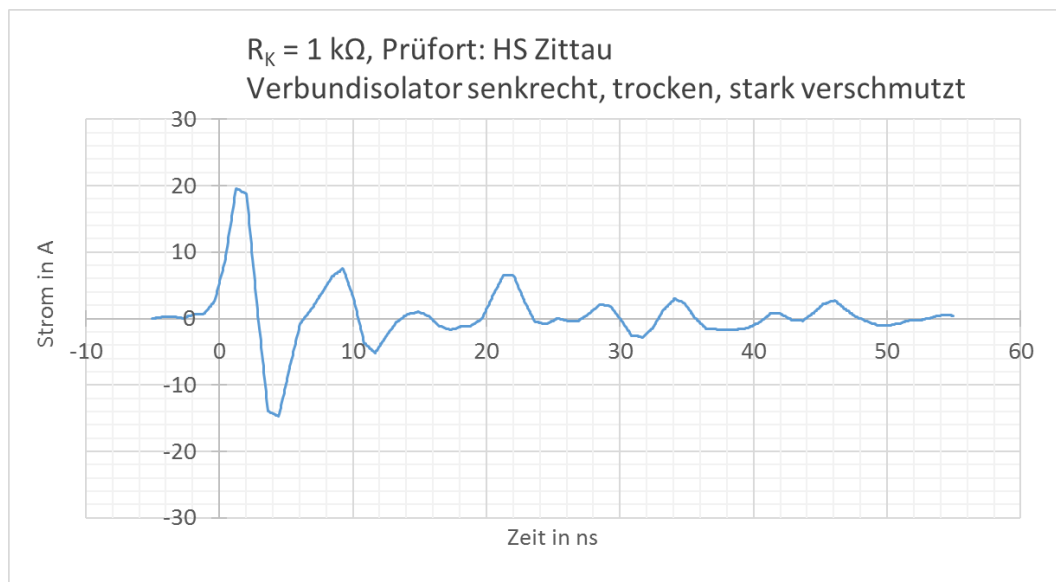


Abbildung 61: Impuls-Stromverlauf Verbundisolator – stark verschmutzt, trocken – Position: senkrecht; Messort: HSZG