

Florian Baumann, Dieter Möckel, Maurice Neumann

Bewertung elektrostatischer Entladungen im Hinblick auf Personenschutz

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Metrologie

PTB-M-11

Braunschweig, Juli 2026

Florian Baumann, Dieter Möckel, Maurice Neumann

Bewertung elektrostatischer Entladungen
im Hinblick auf Personenschutz

ISSN 2751-6598

ISBN 978-3-944659-13-8

DOI 10.7795/110.20260709

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Baumann, F., Möckel, D. und M. Neumann, 2026. *Bewertung elektrostatischer Entladungen im Hinblick auf Personenschutz*. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. PTB-Bericht M-11. ISBN: 978-3-944659-13-8. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20260709>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de

Bewertung elektrostatischer Entladungen im Hinblick auf Personenschutz

Florian Baumann, Dieter Möckel, Maurice Neumann

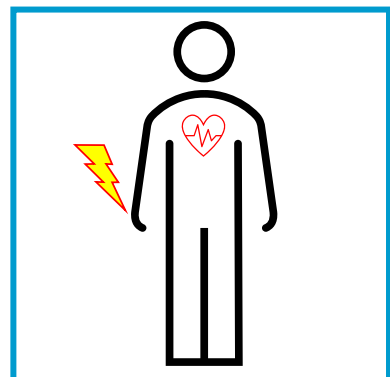
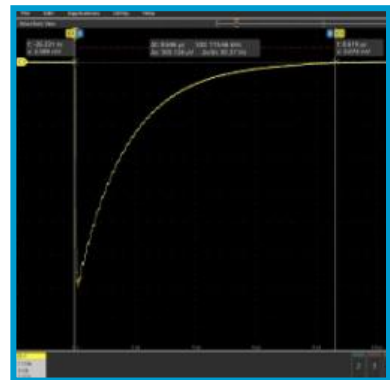
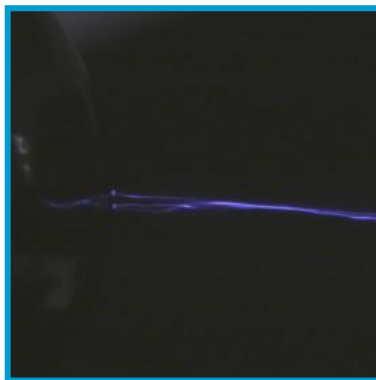
Projektbericht

PTB FV-Nr.: 37069

Laufzeit: 01.06.2023 bis 30.06.2025

Projektleiter: Dr.-Ing. Florian Baumann

Projektbearbeiter: Dr.-Ing. Florian Baumann
Dipl.-Ing. Dieter Möckel
Maurice Neumann



Kooperationspartner

Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM)

Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BG HM)

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI)

Die Autoren danken den Kooperationspartnern für die finanzielle Unterstützung.

Forschungsbegleitkreis

Dr. Florian Baumann	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Dr. Michael Beyer	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Dipl.-Ing. Dieter Möckel	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Maurice Neumann	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Dr. Carola Schierding	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Dr. Lothar Neumeister	Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM)
Dr. Christian Rückerl	Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM), (Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle, benannt vom FB ETEM)
Dipl.-Ing. Roland Knopp	Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BG HM)
Dr. Oswald Losert	Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI)
Dipl.-Ing. Dominic Martin, M.Sc, M.A.	Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI)

Kurzfassung

Die Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 727 wird im Kooperationsmodell durch das Themenfeld „Elektrostatik“ im Sachgebiet „Explosionsschutz“ des Fachbereichs (FB) „Rohstoffe und Chemische Industrie“ fortgeschrieben. Im Anhang D „Elektrischer Schlag“ sind Grenzwerte genannt, bei deren Überschreitung eine Gefährdung von Personen durch die bei elektrostatischen Entladungen übertragene Energie bzw. Ladung als möglich angesehen wird. Diese Grenzwerte wurden aus Vorläuferpapieren übernommen. Da in der TRGS 727 Grenzwerte für die Beurteilung elektrostatischer Entladungen genannt werden, erreichen das Sachgebiet entsprechende Anfragen von Anwendern. Bisherige Recherchen zur Herkunft dieser Werte erbrachten keine valide Basis für deren Ableitung. Im Zusammenhang mit der Relevanz statischer Aufladungen bei elektrostatischen Sprühsystemen wurde eine neue Beurteilungsmethode in den entsprechenden Normen veröffentlicht. Daraus leitet sich das Erfordernis ab, die Grenzwerte hinsichtlich ihrer Validität zu überprüfen und anschließend zu klären, ob sie mit der neuen Beurteilungsmethode für elektrostatische Sprühsysteme in Einklang stehen.

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung.....	7
2	Forschungszweck.....	8
3	Methodisches Vorgehen und Projektplan.....	8
4	Ergebnisse des Forschungsprojektes	9
4.1	Berechnungsgrundlagen.....	9
4.2	Werte und Grenzwerte der Personengefährdung durch elektrostatische Entladungen.....	9
4.3	Entladungen von einer Person zum leitfähigen, geerdeten Gegenstand.....	14
4.4	Theoretische Bestimmung der übertragenen Energie.....	19
4.5	Beurteilungsmethode der Personengefährdung über Pulsdauer und Körperstrom	20
4.6	Versuchsstand der PTB	24
4.6.1	Kapazitätsmessung.....	26
4.6.2	Einfluss des Typs des Koaxialkabels.....	27
4.6.3	Nachstellung der Grenzwerte von 350 mJ, 5 J und 50 μC	28
4.7	Reale Anlagen.....	31
5	Zusammenfassung.....	34
6	Literaturangaben	37
7	Anhang	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auswirkungen elektrostatischer Entladungen auf den menschlichen Körper in Abhängigkeit der Energie	12
Abbildung 2: Relaxationszeit einer Person als Funktion der Kapazität einer Person und dem Widerstand der Person gegenüber Erdpotential	14
Abbildung 3: Versuchsaufbau Messung Kapazität Person	14
Abbildung 4: Kapazität in Abhängigkeit vom Körpergewicht	17
Abbildung 5: Kapazität in Abhängigkeit von der Folien-/Sohlendicke	17
Abbildung 6: a) demontierte Messtechnik mit Stromwandler, b) Messtechnik in der Anwendung an Sprühsystem, c) Messtechnik über Dämpfungsglied mit Oszilloskop verbunden	20
Abbildung 7: Schematische Darstellung der elektrostatischen Entladung mit Spitzenstromwert und Pulsdauer [9]	21
Abbildung 8: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom zur Risikobewertung des Auftretens von Muskelreaktionen und Herzkammerflimmern bei durch elektrostatische Entladungen exponierten Personen [9]	22
Abbildung 9: Schematischer Schaltplan Versuchsstand PTB und Messtechnik	23
Abbildung 10: Beispielhafte kapazitive Entladung mit Spitzenstromwert und Spannungsänderung über Zeit für die Berechnung der Ladung bzw. Energie	25
Abbildung 11: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom in Abhängigkeit vom Widerstand, Nachstellung des Grenzwertes 350 mJ	28
Abbildung 12: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom in Abhängigkeit vom Widerstand, Nachstellung des Grenzwertes 5 J	29
Abbildung 13: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom in Abhängigkeit vom Widerstand, Nachstellung des Grenzwertes 50 μC	30
Abbildung 14: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom mit Messwerten elektrostatischer Handsprüheinrichtungen aus [28]	31
Abbildung 15: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom mit Messwerten automatischer elektrostatischer Beschichtungssysteme aus [28]	31
Abbildung 16: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom mit Messwerten eines Elektrozaengerätes aus [28]	32
Abbildung 17: Abbildungen Versuchsstand PTB	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektablaufplan	7
Tabelle 2: Werte und Grenzwerte der Energie und Ladung elektrostatischer Entladungen und deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper	8
Tabelle 3: Kapazitätswerte und Potentialdifferenzen von Personen	13
Tabelle 4: Kapazitätswerte von Personen aus [1]	13
Tabelle 5: Aufbau zwischen den Füßen und der Kupferplatte mit Angabe der Widerstandswerte	15
Tabelle 6: Gemessene Kapazitäten von Personen und mit 25 kV errechnete Energie und Ladung	16
Tabelle 7: In Abhängigkeit der Kapazität einzustellende Spannungen zur Nachstellung von Grenzwerten der Personengefährdung	24
Tabelle 8: Körperstrom, Pulsdauer und Ladung in Abhängigkeit des Koaxialkabeltyps bei Nachstellung des Grenzwertes der Ladung von 50 μC bzw. Energie von 350 mJ	26
Tabelle 9: Kapazitätswerte von Personen in Abhängigkeit vom Untergrund und Schuhen	39

1 Problemstellung

Die Exposition von Personen gegenüber elektrostatischen Entladungen muss sicherheitstechnisch bewertet werden. Wirkungen elektrostatischer Entladungen auf den menschlichen Körper reichen von der Wahrnehmung über schmerzhafte Empfindungen bis hin zur Muskelkontraktion. Durch Muskelkontraktionen können sekundäre körperliche Verletzungen entstehen, bspw. durch einen Sturz oder dem Fallenlassen eines Gegenstandes. Darüber hinaus besteht bei energiereichen Entladungen ein Risiko für das Herzkammerflimmern als potenziell tödliche Wirkung. Ergänzend ist aus der betrieblichen Praxis heraus bekannt, dass schwächere Entladungen oberhalb der Wahrnehmungsschwelle bei mehrfacher Exposition zu psychischen Belastungen führen können.

Aufladungen und möglicherweise Entladungen treten auf, wenn eine Person oder ein Gegenstand nicht geerdet ist und sich durch Prozesse der Ladungstrennung eine Potentialdifferenz aufbaut. Es ergeben sich zwei Szenarien:

- Aufgeladene und gegen Erde isolierte Person entlädt sich über geerdeten Gegenstand oder geerdete Person
- Geerdete Person berührt einen aufgeladenen und gegen Erde isolierten Gegenstand

Geräte wie elektrostatische Sprühsysteme erzeugen während des Betriebs eine Potentialdifferenz gegenüber Erdpotential.

Aussagen zur maximalen Potentialdifferenz und Kapazität einer Person weichen voneinander ab [1–4]. Anhand einer Literaturrecherche soll ermittelt werden, welche maximale Energie von einer Person theoretisch ausgehen kann und ob diese eine Gefährdung darstellt.

In einschlägiger Literatur, technischen Spezifikationen und Normen sind Grenzwerte von 350 mJ für die Energie und 50 μC für die Ladung angegeben. Bei Unterschreitung der Grenzwerte besteht keine Gefährdung von Personen durch elektrostatische Entladungen. Bisher angestellte Untersuchungen zur Herkunft der Grenzwerte, durch die im Projekt involvierten Berufsgenossenschaften BG RCI, BG HM und BG ETEM, der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und anderen Experten auf dem Gebiet der Elektrostatik, lieferten keine stichhaltige Erklärung für die Ableitung der Werte. Weiterhin dürfen Elektrozaungeräte Energieimpulse von bis zu 5 J abgeben [5]. Die Wissenslücke bezüglich der Herkunft des Grenzwertes der Entladeenergie von 350 mJ sowie die um eine Größenordnung betragende Abweichung zum Grenzwert der Elektrozaungeräte von 5 J belegt die Notwendigkeit zur Erarbeitung fundierter Kenntnisse.

Basierend auf der IEC 60479-1:2018 [6] und IEC 60479-2:2019 [7] wurde für elektrostatische Sprühsysteme in der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] eine neue Methode zur Bewertung der Personengefährdung durch elektrischen Schlag infolge elektrostatischer Entladungen veröffentlicht. Diese fordert die messtechnische Bestimmung von Körperstrom und Pulsdauer. Entgegen der fehlerbehafteten, ungenauen und lediglich theoretischen Bestimmung der Entladeenergie durch Messung der Kapazität [10–13] wird anhand der Messung im Entladepfad der tatsächlich wirksam werdende Anteil der theoretisch vorliegenden Ladung bzw. Energie bestimmt. Die neue Bewertungsmethode wird in diesem Projekt anhand von Laboraufbauten untersucht, mit dem Grenzwert der Entladeenergie von 350 mJ, 5 J und dem Grenzwert der Ladung von 50 μC verglichen und deren Anwendung an realen Sprühsystemen beschrieben.

2 Forschungszweck

Der Forschungszweck ist die Beantwortung der drei nachfolgenden Fragestellungen:

1. Personen gelten als gefährdet, wenn die Energie einer elektrostatischen Entladung 350 mJ überschreitet [2]. Kann durch eine Literaturrecherche gezeigt werden, dass dieser Wert im Vergleich zu Energiewerten, die in Untersuchungen mit einer konkreten Wirkung in Verbindung gebracht wurden, in der richtigen Größenordnung liegt?
2. Elektrostatische Entladungen können von der Person selbst erfolgen. Sind die Kapazität und das Potential einer Person ausreichend hoch für eine Gefährdung? Wird der Grenzwert der Entladeenergie von 350 mJ erreicht?
3. Überprüfung und Weiterentwicklung der messtechnischen Verfahren der Beurteilungsmethode gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] zur Messung des Körperstromes und der Pulsdauer elektrostatischer Entladungen. Ist die Beurteilungsmethode mit dem Grenzwert der Entladeenergie von 350 mJ, 5 J und der Ladung von 50 μC in Einklang zu bringen?

Ziel ist es, wissenschaftlich fundierte Grenzwerte und eine einfache Mess- und Bewertungsmethode für die Gefährdung von Personen durch elektrostatische Entladungen zu definieren.

3 Methodisches Vorgehen und Projektplan

Das methodische Vorgehen und der Projektplan ist im Projektablaufplan (Tabelle 1) zusammengefasst.

Tabelle 1: Projektablaufplan

I/2023	Vorstellung des Projekts im Fachbereich
II/2023	Konstituierung des Arbeitskreises und Beginn der Arbeiten
III/2023	Übersicht über bestehendes Datenmaterial; Entscheidung über Erfordernis von Messungen zur übertragenen Ladung
I/2024	Messaufbau, Ladungsmessungen; Vorstellung Messergebnisse
III/2024 IV/2025 ^{*A}	ggf. ergänzende Messungen; Auswertung und Bewertung der Ergebnisse
I/2025 I/2026 ^{*A}	Fertigstellung des Entwurfs Projektbericht; Bericht Normungsvorhaben IEC 60479-2
II/2025 II/2026 ^{*A}	Beschluss im Fachbereich; Veröffentlichung FB Aktuell

^{*A} Die elektrostatischen Entladungen liegen teils im μs bis ms-Bereich. Um die Amplitude möglichst gut abzubilden, wird eine hohe Abtastrate benötigt. Die daraus resultierenden Dateigrößen haben Probleme bei der Auswertung in Microsoft Excel bereitet. Ein Umstieg auf die Software Origin war notwendig. Die Einarbeitung in Origin, Erstellung der Auswertverfahren und Vergleich mit den Auswertungen in Microsoft Excel führte zur Verzögerung.

4 Ergebnisse des Forschungsprojektes

In diesem Kapitel wird zunächst auf die durchgeführte Literaturrecherche zu Werten und Grenzwerten der Energie von elektrostatischen Entladungen sowie deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper eingegangen. Ziel ist es, festzustellen, ob sich der Grenzwert der Entladeenergie von 350 mJ bestätigen lässt.

Gegenstände und vor allem elektrostatische Sprühsysteme sind in der Lage, gefährliche elektrostatische Entladungen zu erzeugen. Die zu beantwortende Fragestellung lautet, ob sich eine Person durch alltägliche Bewegung ebenfalls gefährlich auf- und entsprechend entladen kann.

Des Weiteren wird die neue Beurteilungsmethode der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] beschrieben und ihre praktische Anwendung sowie ihre Vorteile gegenüber älteren Normenausgaben erläutert. Mithilfe von Messungen am Versuchsstand der PTB zur definierten Erzeugung elektrostatischer Entladungen wird die Methode getestet, weiterentwickelt und geprüft, ob diese mit den Grenzwerten der Energie und Ladung in Übereinstimmung steht. Abschließend wird auf die Anwendung der Beurteilungsmethode bei realen Anlagen eingegangen.

4.1 Berechnungsgrundlagen

Die Energie W einer elektrostatischen Ladung wird vereinfacht durch Gleichung 1 bestimmt. Es gelten die Kapazität C und die Spannung U vor der Entladung [14, 15]. Alternativ ist die Energie über das Produkt aus dem Widerstand R und dem quadratisch eingehenden und über die Zeit t integrierten Strom I zu berechnen.

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = R \int_0^{\infty} I^2(t) \cdot dt \quad 1$$

Die übertragene Ladung Q ist ebenfalls vereinfacht über die Kapazität und Spannung vor der Entladung zu bestimmen [14, 15]. Alternativ entspricht die im Entladepfad übertragene Ladung dem über die Zeit t integrierten Strom I (Gleichung 2).

$$Q = C \cdot U = \int_0^{\infty} I(t) \cdot dt \quad 2$$

4.2 Werte und Grenzwerte der Personengefährdung durch elektrostatische Entladungen

In Tabelle 2 sind Werte und Grenzwerte der Energie und Ladung der technischen Regeln, technischen Spezifikation, Normen und weiterführender Literatur und deren Aussagen zu Auswirkungen auf den menschlichen Körper zusammengefasst.

Tabelle 2: Werte und Grenzwerte der Energie und Ladung elektrostatischer Entladungen und deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper

Quelle	Werte und Grenzwerte der Energie und deren Auswirkung auf den menschlichen Körper	
DIN IEC/TR 61340-1 (VDE 0300-1):2021-08, Abschnitt 5.4 [16]	<i>Entladeenergie</i>	<i>Reaktion</i>
	<i>mJ</i>	
	<i>0,1</i>	<i>spürbar</i>
	<i>0,9</i>	<i>deutlich spürbar</i>
	<i>6,4</i>	<i>unangenehmer Schlag</i>

- DIN EN 61140 (VDE 0140-1):2016-11, Abschnitt 5.2.7 [17] *„Für eine gespeicherte Ladung zwischen gleichzeitig berührbaren leitfähigen Teilen werden nach IEC/TS 60479-2:2007, Bild 19, folgende Werte vorgeschlagen:*
– 0,5 mJ, die der Schmerzschwelle entsprechen, und
– 5 μ J, die der Wahrnehmbarkeitsschwelle entsprechen.“
- TRGS 727:2016, Abschnitt 7 und Anhang D [2] *„Die Wahrnehmungsschwelle beträgt 0,5 mJ ...“*
„Personen gelten als gefährdet, wenn entweder die übertragene Ladung 50 μ C oder die Energie 350 mJ überschreitet. Bei Personen mit Herzschrittmacher liegt der Grenzwert bei 2 mJ.“
„Entladungen von großen Gegenständen oder Einrichtungen können jedoch die Energie von 1 J übersteigen und Personen schädigen.“
- IEC TS 60079-32-1:2016, Abschnitt 12.1 und 12.2 [3] *“The discharge of static electricity through a person's body can cause an electrostatic shock. The smallest discharge energy a person can feel to or from his body is about 1 mJ. As this energy is increased variations in response are observed. Some people find 10 mJ uncomfortable due to muscular contraction, whereas others can accept several hundred mJ before they experience sharp muscular contraction. 1000 mJ, however, affects everybody severely. In incidents in which people have been rendered unconscious, the discharge energy was estimated to be several joules. Since in most situations electrostatic discharge energies are below 100 mJ, serious physiological shocks are very rare. Irrespective of whether the shock itself is harmful, the involuntary muscular reaction resulting from the shock can cause an accident leading to injury or even death through e.g. dropping of an instrument or precipitating a fall. In addition to these hazards, the electrostatic discharge that normally precedes these shocks can also ignite flammable atmospheres. Electrostatic shocks due to static electricity differ to some extent from other forms of electric shock in that they are of short duration (less than 1 ms), they normally involve high voltages (several or tens of kV), and safe/hazardous levels are expressed in terms of energy or charge, as opposed to current.”*
“Electrostatic discharges are considered to be a direct hazard to health if the discharge energy exceeds 350 mJ or the charge transferred exceeds 50 μ C. It follows that brush discharges or spark discharges from small isolated metal objects (funnels, cans, hand tools) do not cause electrostatic shocks which are directly harmful. But spark discharges from large objects and some propagating brush discharges can be harmful since the energies from both these types of discharge can exceed 1 J.”
- DIN EN 60335-2-76 (VDE 0700-76) Beiblatt 1:2016-06, Vorwort [5] Grenzwert für Elektrozaungeräte:
„Wie im siebten Spiegelstrich des Unterabschnitts 22.108 im Anhang ZAA begründet, darf ein Zaungerät mit zunehmendem Energielevel aufgrund niedriger Impedanz im Zaunkreis keinen Impuls von mehr als fünf J an eine zusätzliche Last H, die parallel liegt (Körperkontakt), abgeben, jedoch nur

während der gesamten Verzögerungszeit. Für diese Klasse von Zaungeräten mit einer hohen Ausgangsenergie (bis zu 15 J) ist es notwendig, einen menschlichen Körper, der den Zaun berührt, zu erkennen und den Ausgang zu reduzieren (falls notwendig), so dass der menschliche Körper nicht mehr als 5 J erhält. Jedoch ist es möglich, dass der Ausgang des Zaungerätes weniger als 5 J unter allen Lastbedingungen beträgt und diese Anforderung ohne Erkennungseinrichtungen erfüllt.“

Bundesgesetzblatt Jahrgang
2006 Teil 1Nr. 32, Anlage V
[18]

Grenzwert für Elektroimpulsgeräte:

Die spezifische Energie darf $5 \cdot 10^{-3} \text{ A}^2 \text{ s}$ nicht überschreiten. Bei dem in [18] angegebenen Lastwiderstand von $1000 \, \Omega$ ergibt sich nach Gleichung 1 eine Energie von 5 J.

Butterworth, G.J.,
Dowling P.D. (1981) [19]

Theoretische Energie aufgrund abgeschätzter Kapazität von Person und Feuerlöscher bei Löschvorgängen mit CO_2 :

“In this case both the appliance and its operator may acquire a potential of 20 kV or more and, if the operator contacts a grounded conductor while or shortly after discharging the extinguisher, he is likely to experience an electrostatic shock. The severity of such a shock can vary widely, from a tingling sensation to temporary paralysis of the affected limb, and is subject to individual sensitivity. Assuming a capacitance of, say, 250 pF for the operator and extinguisher together, an acquired potential of 20 kV would result in a stored energy of 0.05 J.”

Britton, L. G. (1999) [20]

„The following are typical response thresholds for capacitance sparks to the bare hand:

*0.5-2 mJ (perceptible),
1-10 mJ (various levels of discomfort),
15-25 mJ (unpleasant shock),
250 mJ (severe shock),
1-10 J (possible unconsciousness),
> 10 J (possible cardiac arrest).“*

Zusammengefasste Aussagen
von Schneider Ang (1971 mit
Nachtrag 1974) [21] in Mühlei-
sen, R.; Fischer, H.J. (1978)
[22]

Energiewerte elektrostatischer Entladungen von Hubschraubern und deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper:

*„1 mJ, Grenze der Wahrnehmbarkeit
40 mJ, leichter Schock ohne Folgen
100 mJ, kräftiger Schock ohne Folgen
500 mJ, schwerer Schock mit nachfolgenden Muskelschmerzen
800 mJ, sehr schwerer Schock mit Bewusstlosigkeit, aber noch
ohne bleibende Schäden
1000 mJ, schwerster Schock, Bewusstlosigkeit, u.U. tödlich“*

Zusammengefasste Aussagen von Douglas, D.G., Nanevicz J.E., Solak, B.J. (1974 bis 1975) [23] in Mühleisen, R.; Fischer, H.J. (1978) [22]	Energiewerte elektrostatischer Entladungen von Hubschraubern und deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper: „28 mJ, <i>schwacher Schock</i> 50 mJ, <i>Schock in den Fingern</i> 112 mJ, <i>empfindlicher Schock</i> 152 mJ, <i>Schock im Handgelenk gefühlt</i> 200 mJ, <i>Schock im Handgelenk und in den Fußknöcheln gefühlt</i> 250 mJ, <i>kräftiger Schock, nicht gefährlich</i>
Zusammengefasste Aussagen von Rogers, M.E. (1967) [24] in Mühleisen, R.; Fischer, H.J. (1978) [22]	Energiewerte elektrostatischer Entladungen von Hubschraubern und deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper: „500 mJ, <i>Grenze kontrollierter Bewegung</i> “
SSERC Bulletin 223 [25]	Energiewerte elektrostatischer Entladungen von Bandgeneratoren und deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper: „80 mJ, 1,4 μC , <i>Slight discomfort</i> 210 mJ, 2,2 μC , <i>Disagreeable Shock</i> 420 mJ, 3,2 μC , <i>Disagreeable or painful shock</i> 510 mJ, 4,0 μC , <i>Painful shock and risk of harm</i> “

Die in Tabelle 2 angegebenen Energiewerte und deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper sind in Abbildung 1 zusammengefasst. Zitate in englischer Sprache der Tabelle 2 wurden übersetzt. Es folgt eine eigene Unterteilung in drei Bereiche:

- Bis 2 mJ, gelber Bereich: Wahrnehmung erster elektrostatischer Entladungen.
- Über 2 mJ und unter 1000 mJ, orangener Bereich: Unangenehme und bei mehreren 100 mJ schwere Schocks mit Muskelkontraktionen, aus denen Folgeunfälle durch einen Sturz oder dem Fallenlassen eines Gegenstandes resultieren können. Aus der betrieblichen Praxis heraus ist bekannt, dass eine mehrfache Exposition zu psychischen Belastungen führen kann.
- 1000 mJ und höher, roter Bereich: Personengefährdungen durch Bewusstlosigkeit, Herzkammerflimmern, Herzstillstand und u.U. Tod direkt durch die elektrostatische Entladung.

Der Grenzwert der Personengefährdung von 350 mJ ist in Abbildung 1 durch eine dickere und rote Schrift hervorgehoben. Folgende Aussagen können bzgl. des Grenzwertes getroffen werden:

- Die Wahrnehmbarkeitsschwelle (gelber Bereich) ist überschritten.
- Im orangenen Bereich sind unter dem Grenzwert die Entladungen in den betroffenen Extremitäten der Person spürbar. Die Entladungen sind nicht gefährlich, werden aber als unangenehm und schmerzhaft verspürt. Effekte wie Kribbeln und eine vorübergehende Lähmung können ab 50 mJ auftreten und sind reversibel.
- Im orangenen Bereich ist über dem Grenzwert mit schweren und schmerzhaften Entladungen zu rechnen, die Muskelschmerzen, unkontrollierte Bewegungen durch starke Muskelkontraktionen, eine direkte Gefährdung der Gesundheit, Verletzungsgefahr und Bewusstlosigkeit nach sich ziehen können.

- Der rote Bereich wird unterschritten und die genannten und ggf. irreversiblen Schäden sind unwahrscheinlich.

Zusammengefasst ist der Grenzwert der Energie von 350 mJ zur Beurteilung der Personengefährdung geeignet, da er sich passend in die Auflistung der Energiewerte und deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper eingliedert (Abbildung 1). In diesem Projekt lag der Fokus auf der Untersuchung des Grenzwertes der Energie von 350 mJ. Für den Grenzwert der Ladung von 50 μC ist eine gesonderte Recherche durchzuführen.

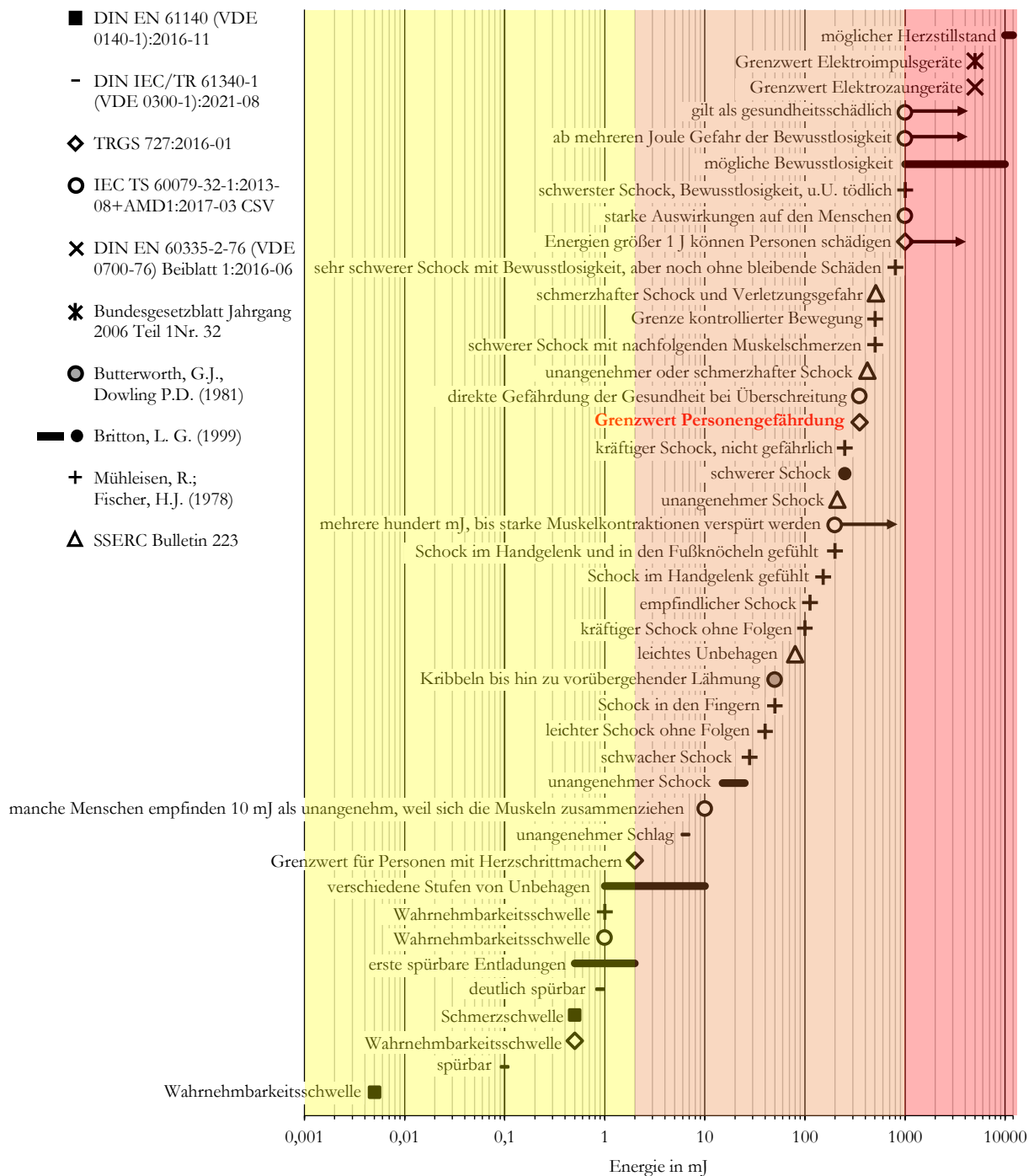


Abbildung 1: Auswirkungen elektrostatischer Entladungen auf den menschlichen Körper in Abhängigkeit der Energie

4.3 Entladungen von einer Person zum leitfähigen, geerdeten Gegenstand

Personen, die gegen Erde isoliert sind, können durch Prozesse der Ladungstrennung, wie beispielsweise das Gehen über einen Teppich, aufgeladen sein und dadurch eine Potentialdifferenz zum Erdpotential besitzen. Durch Kontakt mit einem leitfähigen geerdeten Objekt entstehen üblicherweise Funkenentladungen [4]. In Tabelle 3 sind die Kapazitätswerte und Potentialdifferenzen von Personen aus [2–4] zusammengefasst. Die Berechnung der Energie und Ladung erfolgt anhand der Gleichung 1 und Gleichung 2.

Tabelle 3: Kapazitätswerte und Potentialdifferenzen von Personen

Quelle	Kapazität in pF	Methodik der Personenaufladung	Potential in kV	Energie in mJ	Ladung in μC
[4]	75 (Kind 20 kg)	Bandgenerator bis 200 kV	bis 40 ^{*B}	60,0	3,0
[4]	75 (Kind 20 kg)	Bewegung	bis 25	23,4	1,9
[4]	bis 200	Bandgenerator bis 200 kV	bis 40 ^{*B}	160,0	8,0
[4]	bis 200	Bewegung	bis 25	62,5	5,0
[2]	bis 200	-	12	14,4	2,4
[3]	150	-	20	30,0	3,0

^{*B} Begrenzung des Potentials aufgrund von Koronaentladungen bspw. an den Haaren [4]

Die in [1] aufgeführten Kapazitätsmessungen an Personen werden in Tabelle 4 zusammengefasst. Unter Annahme des maximal möglichen Potentials durch Bewegung von 25 kV [4] (siehe Tabelle 3) wurden die Energie- und Ladungswerte errechnet.

Tabelle 4: Kapazitätswerte von Personen aus [1]

Material Schuhsohle	Kapazität in pF	Potential in kV	Energie in mJ	Ladung in μC
Gummi	51 bis 330	25	103,1	8,3
Aus mehreren Komponenten	100 bis 240	25	75,0	6,0
Rohkautschuk	80 bis 160	25	50,0	4,0
Leder	140 bis 1100	25	343,8	27,5

Beim Tragen von Schuhen mit Ledersohlen kann die Kapazität einer Person gegenüber dem leitfähigen Boden bis zu 1100 pF betragen. Damit wurden Energien nahe dem Grenzwert von 350 mJ errechnet. Entscheidend ist der Widerstand der Sohle und die davon abhängige Relaxationszeit. Die Relaxationszeit τ beschreibt den Wert, bei dem sich die Kapazität einer Person C über den Widerstand R auf ca. 37 % des Ausgangszustandes entladen hat (Gleichung 3) [14].

$$\tau = R \cdot C \quad 3$$

Die Relaxationszeiten einer aufgeladenen Person werden als Funktion des Widerstands der Person gegenüber Erdpotential und der Kapazität einer Person in Abbildung 2 dargestellt. Neue, dicke und trockene Ledersohlen können einen Widerstand R von bis zu $10^9 \Omega$ aufweisen [1]. Dieser Wert beschreibt laut TRGS 727 [2] den Übergang von ableitfähig zu isolierend. Potentialdifferenzen gegenüber Erdpotential werden sich beim Tragen von Ledersohlen in ca. 1 s oder geringerer

Dauer relaxieren. Ableitfähiges Schuhwerk ist aufgrund kleiner Relaxationszeiten ein wirksames Mittel, um gefährlich hohe Potentiale zu vermeiden.

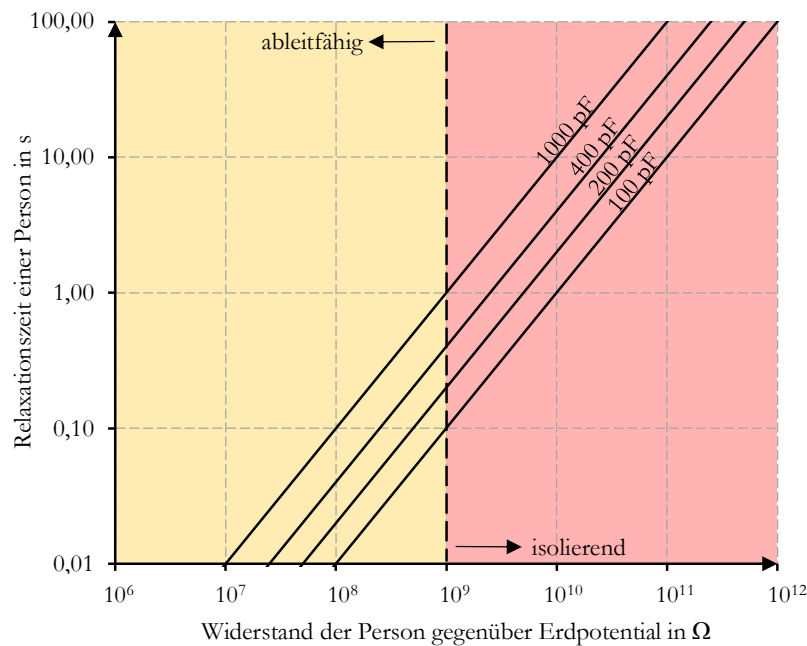


Abbildung 2: Relaxationszeit einer Person als Funktion der Kapazität einer Person und dem Widerstand der Person gegenüber Erdpotential

Aus den in [1] angestellten Untersuchungen geht der Einfluss des Körpergewichtes der Person und der Sohlendicke auf die Kapazität einer Person nicht hervor. Aus diesem Grund wurden im Zuge dieses Projektes Messungen der Kapazität von acht Personen durchgeführt.

Aufbau: Genutzt wurde das kalibrierte LCR-Meter U1733C des Herstellers Agilent mit der Messfrequenz 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz und 100 kHz. Es besitzt im genutzten Kapazitätsbereich von 20 pF bis 2000 pF eine Messunsicherheit von $(360 \pm 10) \cdot 10^{-6}$ pF. Am LCR-Meter ist eine Kugelelektrode aus Metall mit einem Durchmesser von 60 mm angeschlossen (Abbildung 3). Diese Elektrode wird während der Messung von der Testperson fest in der rechten Hand gehalten. Die Testperson steht auf einer quadratischen 2 mm starken Kupferplatte mit einer Kantenlänge von 500 mm. Die Kupferplatte ist mit dem Gegenpol des LCR-Meters verbunden. Der Aufbau zwischen den Füßen und der Kupferplatte variierte und ist in Tabelle 5 aufgeführt.

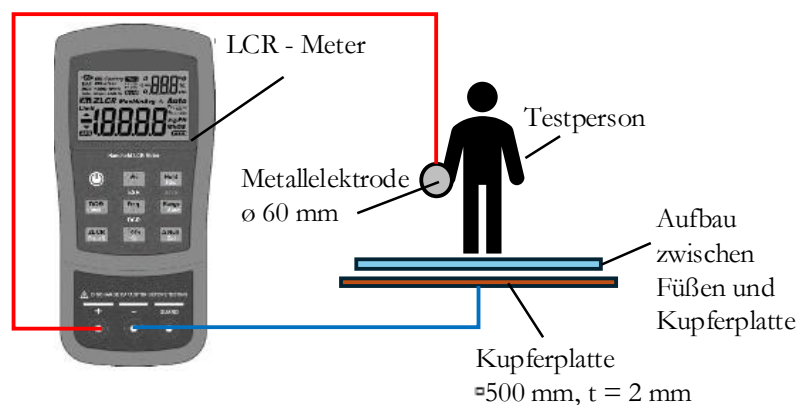


Abbildung 3: Versuchsaufbau Messung Kapazität Person

Gemessen wurde der Widerstand mit dem kalibrierten Teraohmmeter Megger MIT 1025 in Verbindung mit der Messelektrode Probe Model 890. Die Messunsicherheit beträgt $\pm 15\%$. In Abhängigkeit der Prüfspannung ergeben sich Messbereichsendwerte. Wird dieser erreicht, zeigt das Messgerät das Symbol $>$ an.

Die 0,2 mm und 0,4 mm dicke Low Density Polyethylen (LDPE) Folie repräsentiert das Barfußgehen einer Person auf einer dünnen Folie, die geerdet hinterlegt ist. Die 1,6 mm LDPE Folie repräsentiert das Gehen in Barfußschuhen auf einem geerdeten Untergrund.

Tabelle 5: Aufbau zwischen den Füßen und der Kupferplatte mit Angabe der Widerstandswerte


Füße
 +

Material	Widerstand bei 500 V	Widerstand bei 1000 V	Widerstand bei 2500 V	Widerstand bei 5000 V	Widerstand bei 10000 V
0,2 mm LDPE Folie	$> 1 \text{ T}\Omega$	$> 2 \text{ T}\Omega$	$> 5 \text{ T}\Omega$	$> 10 \text{ T}\Omega$	5,9 T Ω bis 17,5 T Ω
0,4 mm LDPE Folie	$> 1 \text{ T}\Omega$	$> 2 \text{ T}\Omega$	$> 5 \text{ T}\Omega$	$> 10 \text{ T}\Omega$	$> 20 \text{ T}\Omega$
1,6 mm LDPE Folie	$> 1 \text{ T}\Omega$	$> 2 \text{ T}\Omega$	$> 5 \text{ T}\Omega$	$> 10 \text{ T}\Omega$	$> 20 \text{ T}\Omega$
Sicherheitsschuhe UVEX Gr. 41 ESD	214 M Ω	167 M Ω	104 M Ω	53,7 M Ω	19,55 M Ω
Anzugschuhe 30 mm	Keine Messung, um Schuhe nicht zu beschädigen. Typischerweise liegen die Werte im isolierenden Bereich.				
Sportschuhe 25 mm					
Sportschuhe 20 mm					
Sportschuhe 35 mm					

+

Kupferplatte

Durchführung der Kapazitätsmessung: Folgende fünf Schritte erfolgten je Messwert:

1. Messfrequenz am LCR-Meter wählen
2. Kabel ausrichten, die Elektrode noch nicht in die Hand nehmen
3. Die Kapazität des Messaufbaus am LCR-Meter nullsetzen
4. Kugelelektrode in die Hand nehmen
5. Messung starten und Frequenz, Kapazität, D-Wert, Q-Wert und Phasenwinkel¹ notieren

Ergebnisse: In Tabelle 6 sind die gemessenen Kapazitätswerte der Personen aufgeführt, bei denen eine Abweichung vom Phasenwinkel von unter $\pm 10\%$ und ein D-Wert von unter 0,1 vorliegt. Alle Messergebnisse sind Anhang A zu entnehmen. Unter der Annahme des maximal möglichen Potentials durch Bewegung von 25 kV [4] wurden die Energie- und Ladungswerte errechnet. Die Kombination aus stark ladungserzeugenden Prozessen und isolierendem Schuhwerk ist zu vermeiden und wird nicht betrachtet.

¹ Bei einem idealen Kondensator beträgt der Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom 90° . Beim Ein- und Ausschalten sowie bei Wechselspannung entstehen in Kondensatoren dielektrische Verluste in Form von Wärme. Der daraus resultierende Verlustwinkel bewirkt eine Abweichung vom Phasenwinkel. Der Tangens dieses Verlustwinkels wird als Verlustfaktor (D-Wert) bezeichnet. Dessen Kehrwert ist der Gütefaktor (Q-Wert) [4].

Tabelle 6: Gemessene Kapazitäten von Personen und mit 25 kV errechnete Energie und Ladung

Material zwischen Füßen und Kupferplatte	Kapazität in pF	Energie in mJ	Ladung in μC
Person E, Gewicht 50,9 kg, Größe 1,55 m			
0,4 mm LDPE Folie	1192,2 bis 1274,3	398,2	31,9
1,6 mm LDPE Folie	329,3 bis 349,2	109,1	8,7
Person Z, Gewicht 52,5 kg, Größe 1,64 m			
0,4 mm LDPE Folie	1100,3 bis 1109,4	346,7	27,7
1,6 mm LDPE Folie	333,4 bis 337,0	105,3	8,4
Person F, Gewicht 73,8 kg, Größe 1,73 m			
0,2 mm LDPE Folie	2003 bis 2050	640,6	51,3
0,4 mm LDPE Folie	1208,3 bis 1237,9	386,8	30,9
1,6 mm LDPE Folie	382,9 bis 402,7	125,8	10,1
Turnschuhe 25 mm Sohle	75,6 bis 102,7	32,1	2,6
Turnschuhe 35 mm Sohle	73,1 bis 100,3	31,3	2,5
Anzugschuhe 30 mm Sohle hinten, 1,2 cm vorn	99,1 bis 108,3	33,8	2,7
Sicherheitsschuhe UVEX Gr. 41 ESD	103,6	32,4	2,6
Person M, Gewicht 75,0 kg, Größe 1,71 m			
0,4 mm LDPE Folie	1286,6 bis 1295,5	404,8	32,3
1,6 mm LDPE Folie	420,7 bis 450,4	140,8	11,3
Turnschuhe 20 mm Sohle	94,5 bis 103,8	32,4	2,6
Turnschuhe 30 mm Sohle	105,0 bis 129,7	40,5	3,2
Sicherheitsschuhe UVEX Gr. 41 ESD	93,8 bis 103,1	32,2	2,6
0,4 mm LDPE Folie + Sicherheitsschuhe UVEX Gr. 41 ESD	94,4 bis 104,5	32,7	2,6
Person X, Gewicht 100,5 kg, Größe 1,75 m			
0,4 mm LDPE Folie	1266,1 bis 1376,9	430,3	34,4
1,6 mm LDPE Folie	395,9 bis 444,8	139,0	11,1
Person Y, Gewicht 106,1 kg, Größe 1,89 m			
0,4 mm LDPE Folie	1821,8 bis 1920,3	600,1	48,0
1,6 mm LDPE Folie	472,2 bis 506,7	158,3	12,7
Person H, Gewicht 117,2 kg, Größe 1,72 m			
0,4 mm LDPE Folie	829,9 bis 955,8	298,7	23,9
1,6 mm LDPE Folie	258,6 bis 301,4	94,2	7,5
Person L, Gewicht 145,1 kg, Größe 1,86 m			
0,4 mm LDPE Folie	1644,7 bis 1830,8	571,9	45,8
1,6 mm LDPE Folie	498,5 bis 528,6	163,6	13,2

Diskussion: Anhand der durchgeführten Kapazitätsmessungen ist tendenziell ein Anstieg der Kapazität mit dem Körpergewicht zu erkennen (Abbildung 4). Mit zunehmender Folien-/Sohlendicke reduziert sich der Einfluss.

In Abbildung 5 ist die Kapazität in Abhängigkeit der Folien-/Sohlendicke dargestellt. Im **Bereich der Folien** wurden Kapazitäten von über 2000 pF gemessen. Der Grenzwert der Energie von 350 mJ wird mit über 600 mJ überschritten. Der Grenzwert der Ladung von 50 µC wird nur bei der 0,2 mm dicken LDPE Folie mit 51,3 µC überschritten. Alle den Grenzwert überschreitenden Werte sind in Tabelle 6 **rot** markiert.

Trägt die Person **Schuhe**, sind Kapazitäten wie in [2–4] angegeben zu erwarten und die Grenzwerte werden eingehalten. Bei ableitfähigen Schuhen wie Sicherheitsschuhe oder Lederschuhe können diese Kapazitäten nicht wirksam werden, da sich Potentialdifferenzen gegenüber Erdpotential im ms-Bereich relaxieren.

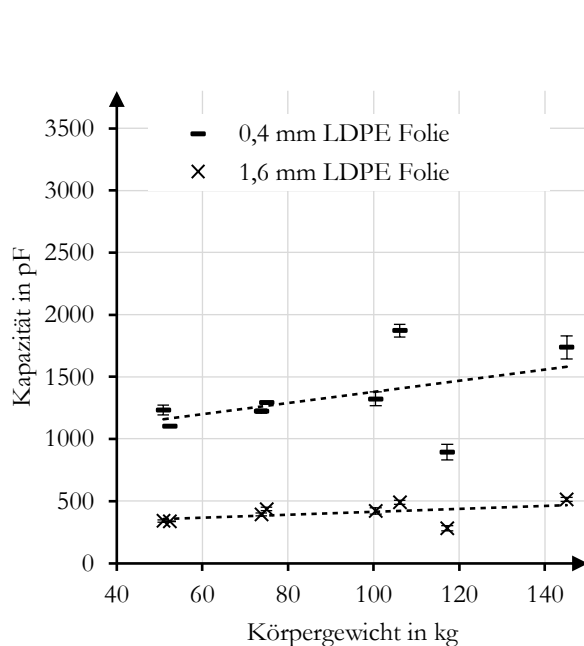


Abbildung 4: Kapazität in Abhängigkeit vom Körpergewicht

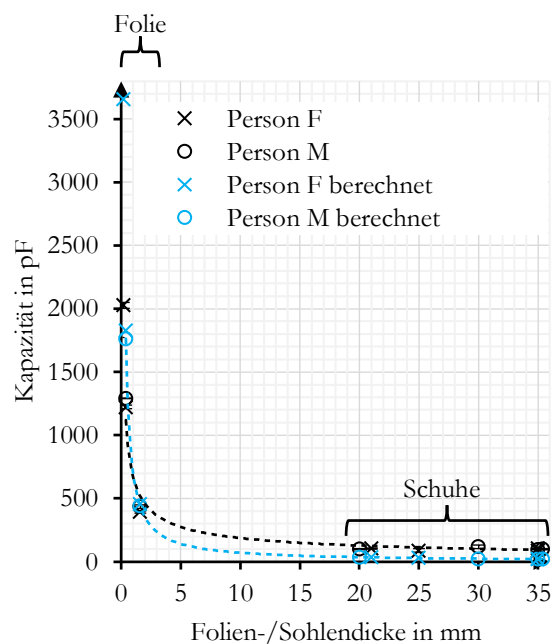


Abbildung 5: Kapazität in Abhängigkeit von der Folien-/Sohlendicke

Die Fläche eines Fußes beträgt 172,9 cm² bei Person M und 179,7 cm² bei Person F. Anhand dieser Fläche A , der Dicke der Folie oder Schuhsohle s und der abgeschätzten Permittivität ε des Dielektrikums ist die Kapazität C zu berechnen (Gleichung 4) [15]. Die Fläche eines Fußes ist mit zwei zu multiplizieren.

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{s} \quad 4$$

Die Permittivität ist nach Gleichung 5 zu berechnen [14]. Die Materialien der Sohlen konnten nicht genau bestimmt werden. Es wird wie bei der LDPE Folie eine Permittivität ε_r von 2,3 angenommen [14]. Für die elektrische Feldkonstante ε_0 gilt $8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ [14].

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad 5$$

Die Berechnungen mit der 0,2 mm und 0,4 mm dicken LDPE Folie ergeben zu hohe und die Berechnungen mit den Schuhsohlendicken zu kleine Kapazitätswerte. Eine gute Übereinstimmung ergibt sich bei einer Foliendicke von 1,6 mm. Der Grund für die Abweichungen wird nicht weiter

untersucht. Entscheidend ist, dass der Trend der Berechnung und Messung bereits ab einer Dicke von 1,6 mm unkritische Werte der Kapazität, in Bezug auf den Grenzwert der Energie und Ladung, ergeben.

Zusammenfassung:

- Barfuß auf einer 0,2 mm und 0,4 mm dicken Folie, die geerdet hinterlegt ist, können Kapazitätswerte von über 2000 pF auftreten. Mit einer Potentialdifferenz der Person gegenüber Erde von 25 kV, die durch alltägliche Bewegungen auftreten können, sind grenzwertüberschreitende Energien von über 350 mJ und Ladungen von über 50 μC theoretisch möglich.
- Die Relaxationszeit ist abhängig vom Widerstand der Person gegenüber Erdpotential. Leder-sohlen sind wie Sicherheitsschuhe ableitfähig. Hohe Kapazitäten im Bereich von 1000 pF werden sich in unter einer Sekunde entladen.
- Die Kapazität einer Person erhöht sich mit kleinerer Sohlendicke und tendenziell mit höherem Körpergewicht. Folien-/Sohlendicken ab 1,6 mm führen zu keiner Überschreitung der Grenzwerte der Energie und Ladung.
- In der TRGS 727:2016 [2] steht: „Der typische Wert für die gespeicherte Energie einer Person beträgt 10 mJ und der höchste zu erwartende Wert 15 mJ“. Die Werte der TRGS 727:2016 [2] erscheinen zu gering. Eine Person, die sich beim Aussteigen aus einem Auto auflädt, kann bereits eine Energie von rund 26 mJ abgeben [7]. Bei einer Potentialdifferenzen von Personen gegenüber Erdpotential von 25 kV (erzeugt durch Bewegung) [4], ergeben die Kapazitätswerte von Personen
 - der Tabelle 3 Energien bis 62,5 mJ [2–4],
 - der Tabelle 4, die der Ledersohlen aufgrund des zu geringen Widerstandes ausgenommen, Energien von bis zu 103,1 mJ [1],
 - der Tabelle 6 bei realen Schuhen Energien von bis zu 40,5 mJ, bei der 1,6 mm dicken LDPE Folie 163,6 mJ, bei der 0,4 mm dicken LDPE Folie 600,1 mJ und bei der 0,2 mm dicken LDPE Folie 640,6 mJ.

Die Nutzung der 0,2 mm und 0,4 mm dicken LDPE Folie bildet fiktive „Worst-Case“ Situationen ab. Die 1,6 mm dicke LDPE Folie simuliert das Tragen von Barfußschuhen und bildet den kritischsten Realfall ab. Mit 163,6 mJ wird der Grenzwert der Entladeenergie von 350 mJ unterschritten. Es ist nicht zu erwarten, dass von einer Person ausgehende elektrostatische Entladungen die Person selbst oder andere Personen gefährden.

4.4 Theoretische Bestimmung der übertragenen Energie

Die Entladeenergie von 350 mJ wird als Grenzwert der Personengefährdung durch elektrischen Schlag infolge elektrostatischer Entladungen in den Normen elektrostatischer Sprühsysteme:

- mit flüssigen Beschichtungsstoffen
 - DIN EN 50176:2010 [13]²
 - DIN EN 50348:2010 [10]
- mit Beschichtungspulvern
 - DIN EN 50177:2010 [12]
- mit Flock
 - DIN EN 50050-3:2014 [26]
 - DIN EN 50223:2015 [11]

² Alte Ausgabe. Ersetzt durch DIN EN 50176:2025 [9].

angegeben. Folgende Anmerkungen dienen dem Anwender der Normen als einzige Hilfestellung für die Bestimmung der Entladeenergie:

"Die Entladeenergie W kann mit folgender Gleichung berechnet werden: $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$. Wenn Widerstände, Halbleiter oder Flüssigkeitsleiter vorhanden sind, ergibt die Berechnung von W zu hohe Werte. Alternativ kann die Entladeenergie durch Messung bestimmt werden." [10–13]

„Prüfung des elektrischen Systems auf Einhaltung der Grenzwerte der maximalen Entladeenergie von 350 mJ durch Messung der Ausgangshochspannung U und der Kapazität C und Berechnung der Energie nach der Formel $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$.“ [26]

Die Durchführung zur Bestimmung der Kapazität ist normativ nur in der DIN EN 50050-3:2014 [26] beschrieben. Dort wird gefordert die höchste gemessene Kapazität anzuwenden. Da dies nicht korrekt sein muss, sind die in [27, 28] formulierten Probleme bei der Bestimmung der Entladeenergie durch Messung der Kapazität zu betrachten:

- *„Die kritischste Messposition ist unbekannt.*
- *Keine konsequente Betrachtung des Verlustfaktors (D-Wert) und/ oder Phasenwinkels.*
- *Die erforderliche Messfrequenz ist unbekannt, daher erfolgen Messungen bei unterschiedlichen Messfrequenzen.*
- *„Worst-Case“-Betrachtung durch die maximal gemessene Kapazität und die maximal einstellbare Spannung.*
- *Es ist nicht bekannt, welcher Teil der Anlagenkapazität bei einer Entladung wirksam wird.*
- *Die tatsächlich vorliegenden Gegebenheiten beim elektrischen Schlag werden nicht erfasst.“* [27]

Gemessene Kapazitätswerte können unrealistische Größen liefern und entsprechen nicht zwangsläufig den tatsächlich vorliegenden Gegebenheiten der in Betrieb befindlichen Sprühsysteme. Eine Einhaltung des Grenzwertes der Entladeenergie von 350 mJ durch Messung der Kapazität hat zur Folge, dass Sprühsysteme in ihrer Spannung begrenzt werden und dadurch die Effizienz und die Funktionalität reduziert wird.

Aufgrund dieser Probleme wird in den Normenausgaben DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] die Bestimmung der Entladeenergie nicht mehr genannt. Alternativ wird zur Bewertung der Personengefährdung durch elektrostatische Entladungen die messtechnische Bestimmung des Körperstromes und der Pulsdauer beschrieben (siehe Kapitel 4.5).

4.5 Beurteilungsmethode der Personengefährdung über Pulsdauer und Körperstrom

Die Personengefährdung durch elektrischen Schlag infolge elektrostatischer Entladungen, ausgehend von elektrostatischen Sprühsystemen, ist zu beurteilen. Wie in DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] gefordert, ist dafür der Körperstrom und die Pulsdauer messtechnisch zu ermitteln. Entgegen der analytischen Bestimmung der Entladeenergie durch Messung der Kapazität (siehe Kapitel 4.4) wird anhand der Messung im Entladepfad der tatsächlich wirksam werdende Anteil der Energie bzw. Ladung bestimmt.

Die Entladungen werden von unter Hochspannung stehenden Gegenständen, wie einem Sprühsystem (11), zu einer Kugelelektrode (1) mit einem Durchmesser von 25 mm ausgelöst (Abbildung 6). Die Kugelelektrode ist über ein induktionsarmes Verbindungskabel (8) mit einem Querschnitt $A \geq 6 \text{ mm}^2$ und über einen induktionsarmen Hochspannungswiderstand von $500 \text{ } \Omega$ (7) mit ausreichender elektrischer Festigkeit (z. B. $U_{\text{max}} = 40 \text{ kV}$, $P = 3 \text{ W}$) mit dem Erdpotential verbunden. Der Anwender der Messtechnik wird durch die aus isolierenden PVC-U gefertigten Abstandshülse (2), dem Isolationsring (5) und dem Handgriff (6) vor der Exposition elektrostatischer Entladungen geschützt.



Abbildung 6: a) demontierte Messtechnik mit Stromwandler, b) Messtechnik in der Anwendung an Sprühsystem, c) Messtechnik über Dämpfungsglied mit Oszilloskop verbunden

Die Stromänderung im Entladepfad induziert eine Spannung im Stromwandler (3). Diese ist proportional zur Stromstärke und durch den Faktor des Stromwandlers F_{CT} umzurechnen. Zwischen dem Stromwandler und dem Oszilloskop (10) wird ein doppelt abgeschirmtes Koaxialkabel (4) mit einer Grenzfrequenz von $\geq 500 \text{ MHz}$ angeschlossen, um die Spannung über die Zeit zu messen. Das Oszilloskop muss den Anforderungen von $\geq 1 \text{ GS/s}$, einer Bandbreite von $\geq 300 \text{ MHz}$, einer Unsicherheit der Gleichstromverstärkung von $\leq 2 \%$ und einer Stabilität der Zeitbasis, bezogen auf den Zeitintervall von 1 ms , von $\leq 20 \text{ ppm}$ entsprechen. Der Wellenwiderstand der elektrischen Komponenten der Messtechnik muss 50Ω betragen.

Bei energiereichen Entladungen ist ein Dämpfungsglied (9) zu nutzen und dessen Faktor F_{AT} zu beachten. Der Spitzen Spannungswert $U_{C(p)}$, bzw. Spitzenstromwert $I_{C(p)}$ der kapazitiven elektrostatischen Entladung ist zu ermitteln und durch $\sqrt{6}$ in den Körperstrom (Effektivwert) $I_{B \text{ rms}}$ umzurechnen (Gleichung 6).

$$I_{B \text{ rms}} = \frac{F}{\sqrt{6}} \cdot I_{C(p)} = \frac{F \cdot U_{C(p)} \cdot F_{AT}}{\sqrt{6} \cdot F_{CT}} \quad 6$$

Der Herzstromfaktor F beschreibt das Maß der Gefährdung einer Körperdurchströmung. Der Stromweg, Herzstromfaktor und Widerstand sind in Abhängigkeit des Sprühsystems definiert:

- Elektrostatische Handsprüheinrichtungen nach DIN EN 50059:2025 [8]:
 - Stromweg: Hand-zu-beiden Füßen; Beide Hände-zu-beiden Füßen; Hand-zu-Hand
 - Herzstromfaktor: „Der Strompfad „Hand-zu-beiden Füßen“, welcher für dieses Dokument relevant ist, ist aus Sicherheitsgründen $F = 1,0$. Der reguläre Strompfad „Hand zu Hand“ für handgehaltene Einrichtungen würde einen niedrigeren Faktor ergeben.“ [8]
 - Widerstand: 500Ω
- Automatische elektrostatische Beschichtungssysteme nach DIN EN 50176:2025 [9]:
 - Stromweg: Hand-zu-beiden Füßen; Beide Hände-zu-beiden Füßen; Hand-zu-Hand
 - Herzstromfaktor: 1,0
 - Widerstand: „Der Widerstand des verwendeten niederinduktiven Widerstands 500Ω ist der Widerstand für den Strompfad „Hand-zu-Hand“ und geringer als der niedrigste Widerstand für den Strompfad „Hand-zu-beiden-Füßen“ mit $50 k\Omega$. Aufgrund des möglichen Strompfades „Hand-zu-Hand“ im Störfall und aus sicherheitstechnischen Gründen wird der $500\text{-}\Omega$ -Widerstand verwendet.“ [9]

Die für andere Stromwege geltenden Herzstromfaktoren und Widerstände sind [6, 29] zu entnehmen. Das Startkriterium der Pulsdauer t_i ist der Beginn der stärksten Einfachentladung. Das Endkriterium ist 5 % des Spitzenstromwertes (Abbildung 7).

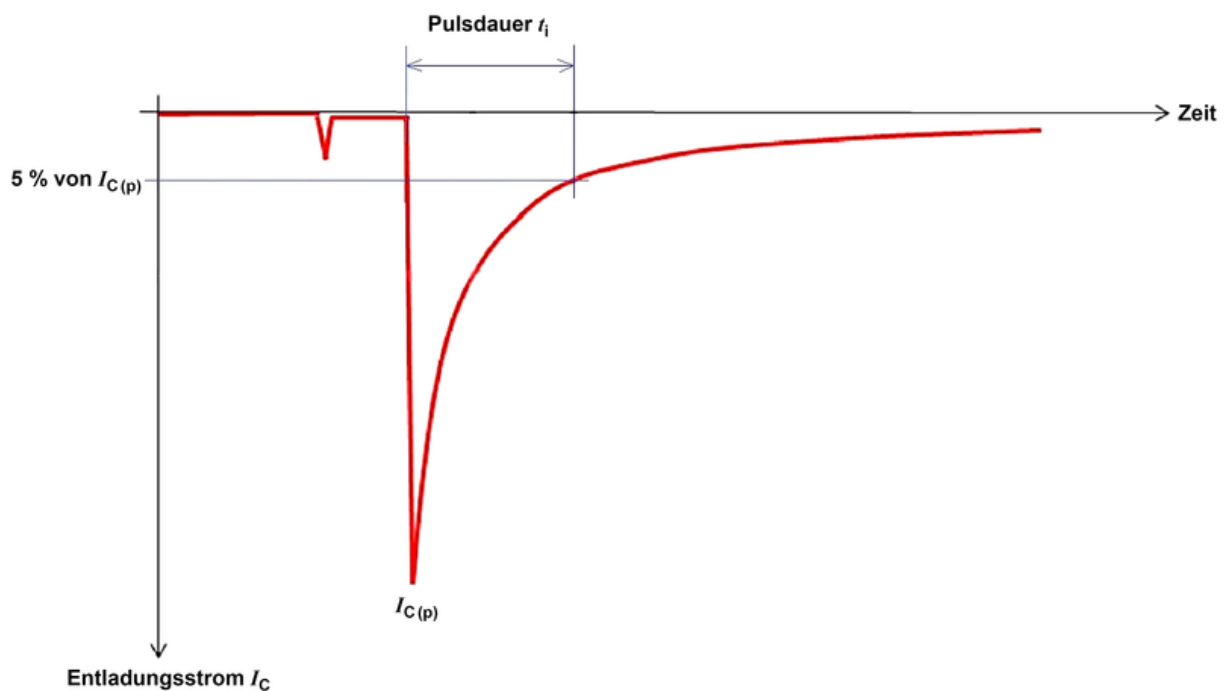


Abbildung 7: Schematische Darstellung der elektrostatischen Entladung mit Spitzenstromwert und Pulsdauer [9]

Die messtechnisch ermittelten Größen Körperstrom und Pulsdauer sind in das Diagramm zur Risikobewertung des Auftretens von Muskelreaktionen und Herzkammerflimmern bei durch elektrostatische Entladungen exponierten Personen einzutragen (Abbildung 8). Anmerkung aus DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9]: „Die Bereiche I bis III basieren auf den Bereichen DC-2 bis DC-4 nach IEC 60479-1:2018 und wurden für kürzere Pulsdauern extrapoliert.“ Ergänzend basiert die Abgrenzung von Bereich II zu Bereich III auf der Kurve C₁ zur Wahrscheinlichkeit des Risikos des Herzkammerflimmerns der IEC 60479-2:2019 [7] und wurde ebenfalls für kürzere Pulsdauern extrapoliert.

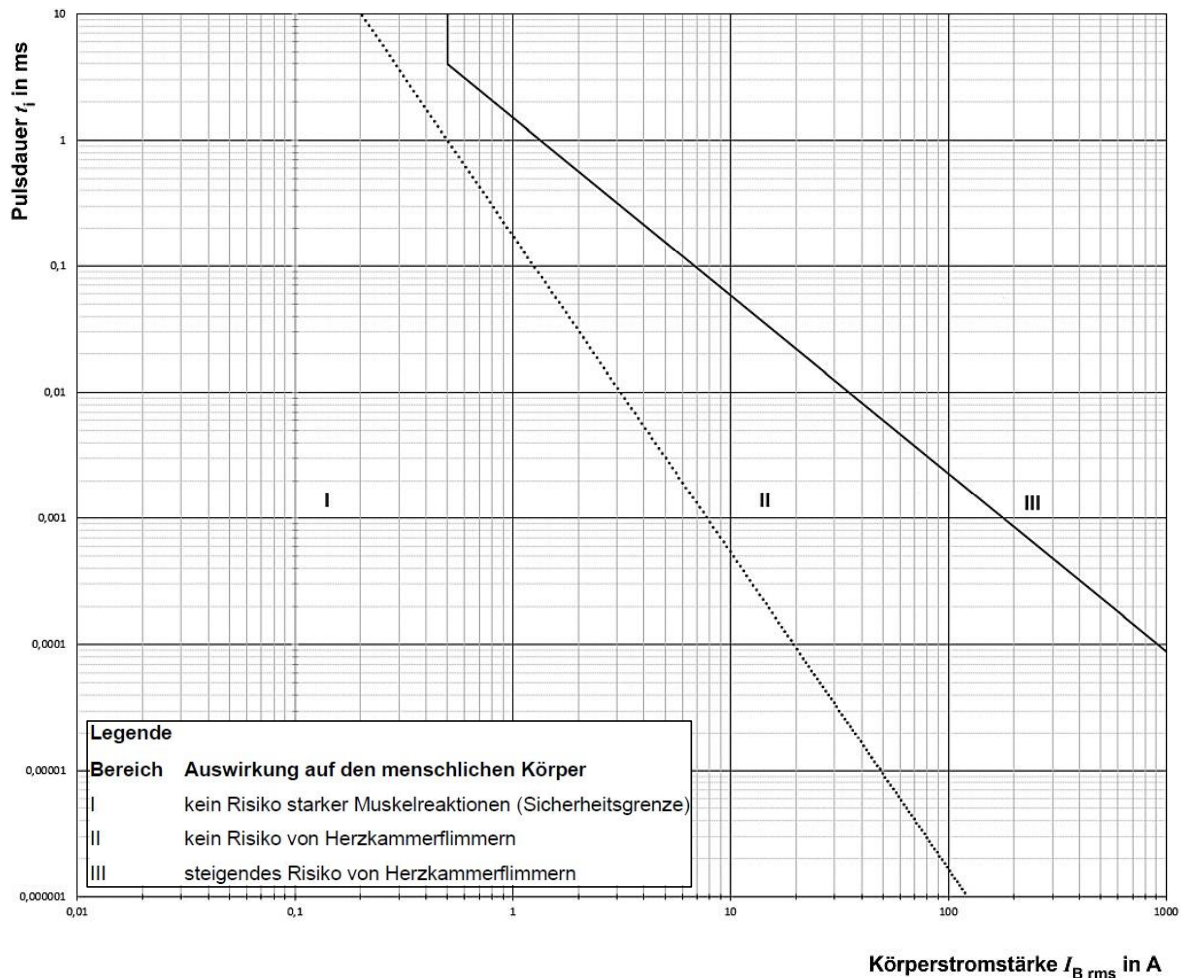


Abbildung 8: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom zur Risikobewertung des Auftretens von Muskelreaktionen und Herzkammerflimmern bei durch elektrostatische Entladungen exponierten Personen [9]

Elektrostatische Entladungen von Sprühsystem zu Personen erfolgen im Fehlerfall. Es ist zu unterscheiden zwischen:

- Elektrostatische Handsprüheinrichtungen gemäß DIN EN 50059:2025 [8]: Elektrostatische Entladungen dürfen zu keiner starken Muskelreaktion führen. Die Gefahr des Herzkammerflimmers ist auszuschließen. Körperstrom und Pulsdauer müssen im Bereich I liegen.
- Automatische elektrostatische Beschichtungssysteme gemäß DIN EN 50176:2025 [9]: Die Maßnahmen werden je nach Typ (L-1, L-2 oder L-3) getroffen.
 - Beim Typ L-1 liegt keine Gefährdung durch zündfähige Entladungen vor. Daraus resultierend besteht keine Gefährdung durch elektrischen Schlag infolge elektrostatischer Entladungen.
 - Beim Typ L-2 dürfen elektrostatische Entladungen zu keiner starken Muskelreaktion führen. Die Gefahr des Herzkammerflimmers ist auszuschließen. Körperstrom und Pulsdauer müssen im Bereich I liegen.
 - Beim Typ L-3 liegt eine Gefährdung durch elektrischen Schlag infolge elektrostatischer Entladungen vor. Körperstrom und Pulsdauer liegen im Bereich II oder Bereich III. Als Maßnahme gilt, dass vor dem Betreten der Anlagenbereiche die Hochspannung abzuschalten und das Sprühsystem zu entladen ist.

Informationen zur Typeinteilung, Maßnahmen und Prüfung sind [8, 9] zu entnehmen.

4.6 Versuchsstand der PTB

Die Gleichspannungsquelle FUG HCN 140 M – 35000 erzeugt eine Spannung von bis zu 35 kV. Anhand der kalibrierten Kombination aus Spannungsteiler PTB120 (Teilerfaktor 12000:1) mit dem Multimeter KEYSIGHT 34465 A wird die Spannung mit einer erweiterten Messunsicherheit von $1,2 \cdot 10^{-5}$ V/V gemessen (Abbildung 9). Zwischen Spannungsteiler und Kondensator/-batterie wird ein dotiertes Hochspannungskabel des Herstellers Schnier vom Typ-50028 genutzt. Es besitzt einen Kunststoffleiter mit (140 ± 70) k Ω /m [30]. Wie in [27, 28] nachgewiesen, bewirkt dieses Hochspannungskabel eine Abkopplung von Kapazitäten im Falle einer elektrostatischen Entladung. Dadurch ist sichergestellt, dass während der Entladung nur die Kapazität des Kondensators bzw. der Kondensatorbatterie wirksam wird und nicht die des gesamten Aufbaus. Die Kondensatoren der Kondensatorbatterie vom Typ HG 250 der Firma Plastic Capacitors besitzen einen D-Wert $< 0,6$ %, sind induktionsarm und geeignet für die Erzeugung elektrostatischer Entladungen [31]. Zwischen der Kondensatorbatterie und der fest montierten $\varnothing$ 25 mm Kugelelektrode der Funkenstrecke wird ein Hochspannungskabel mit Kupferleiter genutzt. Die $\varnothing$ 25 mm Kugelelektrode der Messtechnik (siehe Kapitel 4.5) wird angenähert, bis eine elektrostatische Entladung erfolgt. Für den in dieser Arbeit genutzten Stromwandler CT-D 0.5 gilt 4,0 A/V in 50 Ω [32]. Er besitzt eine vom Hersteller angegebene [32] und in [28] überprüfte Messunsicherheit von $\pm 0,5$ %. Es wurden die in Abbildung 9 aufgeführter Hochspannungswiderstände vom Typ HVR 968.2 des Herstellers Metallux AG genutzt. Diese sind niederinduktiv und für Hochspannungsimpulse geeignet [33]. Mit einem Bereich von 125 Ω bis 50 k Ω werden die vom Stromweg abhängigen Körperwiderstände [6, 29] und das Tragen von ableitfähigen Sicherheitsschuhen abgebildet. Das kalibrierte Oszilloskop Tektronix Inc. MS054 C013474 erfüllt die Anforderungen der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9]. Abbildungen vom Versuchsstand sind Anhang B zu entnehmen.

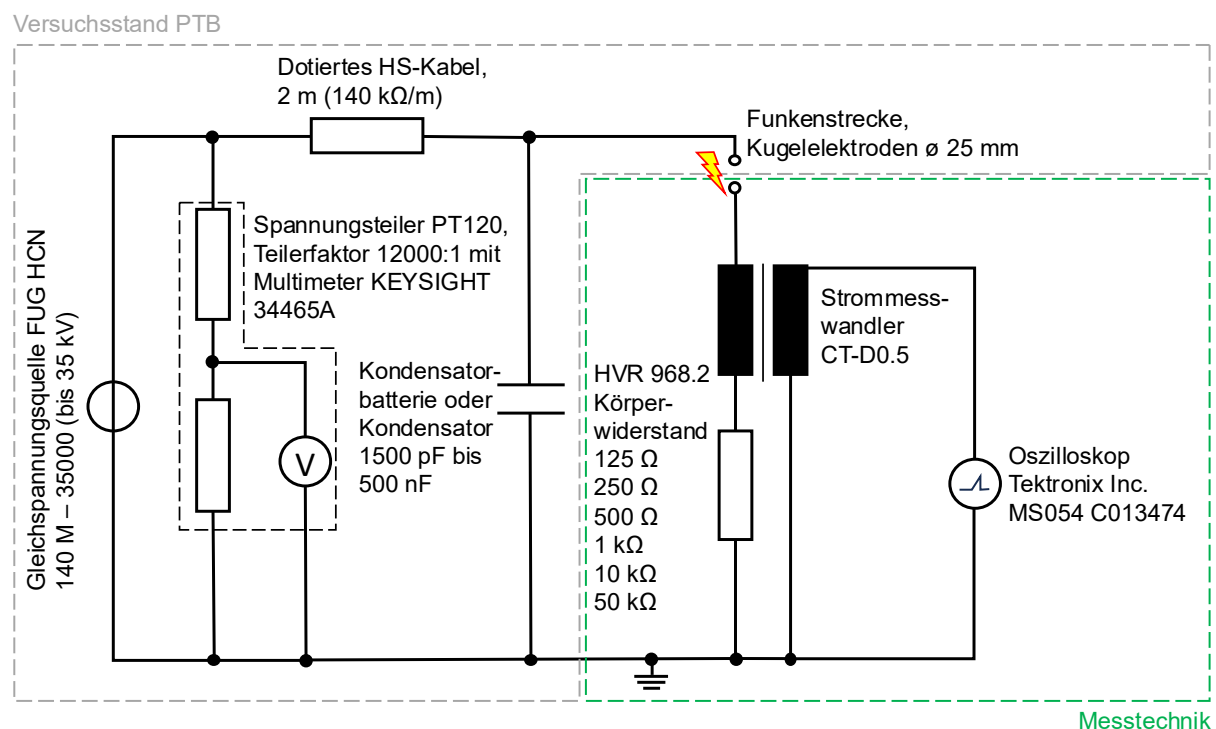


Abbildung 9: Schematischer Schaltplan Versuchsstand PTB und Messtechnik

Am Versuchsstand der PTB wurden die Grenzwerte der Personengefährdung in Hinsicht auf elektrostatische Entladungen von 350 mJ, 5 J und 50 μC durch Einstellung der Kapazität und Spannung nachgestellt (Tabelle 7). Bei den in Tabelle 7 angegebenen Kapazitäten handelt es sich um die Angaben des Herstellers. Fertigungsbedingte Abweichungen und die Erhöhung der Kapazität durch leitfähige Komponenten wie Hochspannungskabel, Kontakte und der Kugelelektrode werden durch Messung der Kapazität beachtet. Die Spannung wird der gemessenen Kapazität angepasst, um dem einzustellenden Grenzwert von 350 mJ, 5 J oder 50 μC zu entsprechen.

Durch Anwendung der Beurteilungsmethode der Personengefährdung über die Messung von Pulsdauer und Körperstrom der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] bei diesen Grenzwerten, wird festgestellt, ob diese vergleichbar sind.

Pro Messpunkt wurden zehn elektrostatische Entladungen gemessen. In Kombination mit den untersuchten Widerstandsgrößen wurden über 700 Messungen durchgeführt.

Tabelle 7: In Abhängigkeit der Kapazität einzustellende Spannungen zur Nachstellung von Grenzwerten der Personengefährdung

Kapazität in pF	U in kV für 350 mJ	U in kV für 5 J	U in kV für 50 μC
1500	21,6	Kondensatorbatterie ist auf 25 kV begrenzt	
2500	16,7		20,0
3500	14,1		14,3
5000	11,8		10,0
7000	10,0		7,1
9500	8,6		5,3
10000	8,4	31,6	5,0
12000	7,6	-	4,2
15000	-	25,8	Spannung unter 3,5 kV. Messung nur mit Kontakt möglich
20000	5,9	22,4	
40000	4,2	15,8	
500000		4,5	

Die theoretische Bestimmung der Ladung bzw. Energie nach Gleichung 1 (linker Teil) und Gleichung 2 (linker Teil) vor der elektrostatischen Entladung erfolgt durch die Messung nachfolgender Größen:

- Kapazität der Kondensatorbatterie bzw. des Kondensators in Verbindung mit leitfähigen Komponenten wie Hochspannungskabel, Kontakte und Elektroden (siehe Kapitel 4.6.1)
- An der Kondensatorbatterie bzw. am Kondensator und Funkenstrecke anliegenden Hochspannung

Mit dem Oszilloskop werden nachfolgende Größen der elektrostatischen Entladung messtechnisch erfasst:

- Meas 1: Spitzenspannungswert für die Berechnung des Körperstromes (Abbildung 10)

- Meas 2: Area bzw. Integral der Spannungsänderung über die Zeit für die Berechnung der Energie (Gleichung 1, rechter Teil) und Ladung (Gleichung 2, rechter Teil). Die Berechnung der Ladung ist beispielhaft in Abbildung 10 beschrieben.
- Die Pulsdauer wurde durch Nutzung der Rohdaten in der Software ORIGIN berechnet.

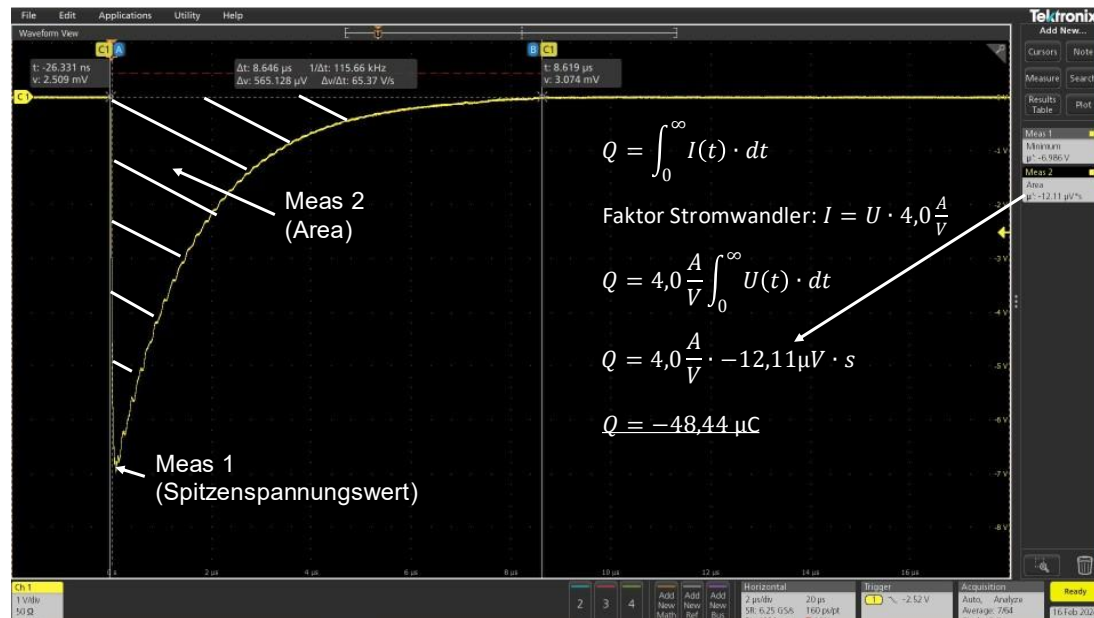


Abbildung 10: Beispielhafte kapazitive Entladung mit Spitzenstromwert und Spannungsänderung über Zeit für die Berechnung der Ladung bzw. Energie

Die Ladung der in Abbildung 10 angestellten Berechnung liegt mit $48,44 \mu\text{C}$ leicht unter dem eingestellten theoretischen Wert von $50 \mu\text{C}$. Grund dafür sind bspw. die Verluste durch Wärme. Leicht höhere Werte können durch Rauschen oder einem leichten Schwingen der Kurve auftreten.

4.6.1 Kapazitätsmessung

Im Falle einer elektrostatischen Entladung ist die Kapazität als komplexe Größe zu betrachten. Die Kapazität setzt sich aus einem Real- und Imaginärteil zusammen. Mittels der LCR-Messbrücke U1722C vom Hersteller Agilent [34] ist die Kapazität C_{gemessen} und der Verlustfaktor (D-Wert, Erläuterung siehe Kapitel 4.3) in Abhängigkeit der Frequenz von 100 Hz bis 100 kHz zu bestimmen.

Im Falle kapazitiver Entladungen ist es ungenügend die Kapazität des Kondensators bzw. die der Parallelschaltung mehrerer Kondensatoren (Kondensatorbatterie) $C_{\text{Kondensator}}$ zu betrachten. Anhand der LCR-Messbrücke ist die Systemkapazität C_{System} zu messen. Sie setzt sich aus der Kapazität des Kondensators und der Kapazität leitfähiger Komponenten $C_{x1...n}$ wie Hochspannungskabel, Kontakte und Elektroden zusammen (Gleichung 7).

$$C_{\text{System}} = C_{\text{Kondensator}} + C_{x1} \dots C_{xn} \quad 7$$

Das in dieser Arbeit genutzte dotierte Hochspannungskabel des Herstellers Schnier vom Typ-50028 besitzt einen Kunststoffleiter mit $(140 \pm 70) \text{ k}\Omega/\text{m}$ [30]. Wie in [27, 28] nachgewiesen, bewirkt dieses Hochspannungskabel eine Abkopplung von Kapazitäten im Falle einer elektrostatischen Entladung (siehe Kapitel 4.6). Um zu vermeiden, dass diese abgekoppelten Kapazitäten bei der Messung der Kapazität mittels einer LCR-Messbrücke auftreten, ist wie folgt vorzugehen:

<https://doi.org/10.7795/110.20260709>

1. Dotiertes Hochspannungskabel und dahinter geschaltete Komponenten wie Spannungsteiler und Gleichspannungsquelle trennen. Betrachtung ausgehend von der Funkenstrecke bis zur Kondensatorbatterie bzw. Kondensator.
2. Messfrequenz am LCR-Meter wählen
3. Kabel und Komponenten des Systems nicht mehr verändern.
4. Kabel der LCR-Messbrücke in Messposition bringen. Eine Änderung der Kabel ändert die Kapazität des Systems.
5. LCR-Messbrücke mit Erdpotential verbinden.
6. LCR-Messbrücke Nullsetzen, um die Kapazität des Messaufbaus auszugleichen.
7. Positiven Kontakt der LCR-Messbrücke mit der Funkenstrecke verbinden und Kapazitätsmessung starten. Frequenz, Kapazität, D-Wert, Q-Wert und Phasenwinkel notieren.

In Abhängigkeit der gemessenen Kapazität ist die Spannung anzupassen, um den gewünschten Grenzwert einzustellen.

4.6.2 Einfluss des Typs des Koaxialkabels

Bestandteil der Untersuchungen in [28] waren

- die Unsicherheitsbeiträge und Einsatzgrenzen der Stromwandler und Dämpfungsglieder,
- die Verlegung des Massekabels im Stromwandler,
- die Positionierung des Stromwandler vor oder hinter dem Widerstand
- der Einfluss des Typs des Massekabels.

Die Erkenntnisse sind bei der Erstellung der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] eingeflossen. Die Untersuchung des Einflusses des Typs des Koaxialkabels zwischen Stromwandler und Oszilloskop wurde in [28] nicht vorgenommen. In diesem Projekt wurde ein Vergleich zwischen drei verschiedenen Typen von Koaxialkabeln durchgeführt:

- Koaxialkabel RG 58/U mit einer Dämpfung von 118,00 dB/100 m
- Koaxialkabel RG 213/U mit einer Dämpfung von 58,50 dB/100 m
- Koaxialkabel Aircom Premium mit einer Dämpfung von 21,85 dB/100 m [35].

Mit einer Kapazität von 3596 pF und einer Hochspannung von 13,95 kV wird gleichzeitig der Grenzwert der Ladung von 50 μC und der Grenzwert der Energie von 350 mJ nachgestellt. Es wurden zehn Entladungen gemessen. Die messtechnisch bestimmten Größen Körperstrom, Pulsdauer, Ladung bzw. Energie und deren Abweichungen sind in Abhängigkeit des genutzten Typs des Koaxialkabels in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Körperstrom, Pulsdauer und Ladung in Abhängigkeit des Koaxialkabeltyps bei Nachstellung des Grenzwertes der Ladung von 50 μC bzw. Energie von 350 mJ

Nachstellung 50 μC	$I_{B\text{ rms}}$ in A	t_i in μs	Q in μC
RG 58/U	$-4,47 \pm_{0,01}^{0,01}$	$5,40 \pm_{0,02}^{0,05}$	$-49,79 \pm_{0,09}^{0,11}$
RG 213/U	$-4,27 \pm_{0,03}^{0,03}$	$5,39 \pm_{0,02}^{0,01}$	$-47,65 \pm_{0,27}^{0,29}$
Aircom Premium	$-4,43 \pm_{0,04}^{0,03}$	$5,42 \pm_{0,00}^{0,00}$	$-49,75 \pm_{0,37}^{0,31}$

Nachstellung 350 mJ	$I_{B\text{ rms}}$ in A	t_i in μs	W in mJ
RG 58/U	$-4,49 \pm_{0,05}^{0,02}$	$5,46 \pm_{0,10}^{0,05}$	$-351,23 \pm_{0,95}^{0,45}$
RG 213/U	$-4,35 \pm_{0,01}^{0,01}$	$5,37 \pm_{0,00}^{0,00}$	$-338,14 \pm_{0,89}^{1,06}$
Aircom Premium	$-4,41 \pm_{0,01}^{0,00}$	$5,42 \pm_{0,01}^{0,01}$	$-345,88 \pm_{0,45}^{0,39}$

Die beste Übereinstimmung mit der Ladung von 50 μC und der Energie von 350 mJ ergibt das Koaxialkabel des Typs RG 58/U. Weiterhin sind die Werte des Körperstroms, der Pulsdauer und der Ladung bzw. Energie bei Nutzung des Koaxialkabels vom Typ RG 58/U im Vergleich zu den anderen Typen annähernd gleich oder größer. Daraus folgt, dass bei Anwendung der Messtechnik und Nutzung des Koaxialkabels RG 58/U die für eine sicherheitstechnische Bewertung kritischsten Werte gemessen werden.

Nachteilig beim Koaxialkabel vom Typ RG 213/U und Aircom Premium ist zusätzlich der größere Durchmesser im Vergleich zum Typ RG 58/U. Das daraus resultierende höhere Gewicht und die höhere Steifigkeit erschweren die Handhabung und belasten unnötig die BNC-Kontakte.

Zusammengefasst wird das Koaxialkabel RG 58/U für weitere Messungen genutzt. Die Abweichungen der theoretisch eingestellten gegenüber der messtechnisch ermittelten Ladung und Energie beträgt unter 1 %. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird bei nachfolgenden Diagrammen auf die Angabe von Fehlerbalken verzichtet.

4.6.3 Nachstellung der Grenzwerte von 350 mJ, 5 J und 50 μC

Dieses Kapitel beinhaltet die Messergebnisse zur Pulsdauer und zum Körperstrom der Beurteilungsmethode der Personengefährdung gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9], die am Versuchsstand der PTB zur Nachstellung der Grenzwerte von 350 mJ, 5 J und 50 μC durchgeführt wurden.

Es können für den jeweiligen Grenzwert folgende Erkenntnisse zusammengefasst werden:

Allgemein:

- Eine Erhöhung der Kapazität und Reduzierung der Spannung erhöht die Pulsdauer und reduziert den Körperstrom.
- Ein größerer Körperwiderstand erhöht die Pulsdauer und reduziert den Körperstrom.

Grenzwert 350 mJ:

- Anhand von Gleichung 1 und dem Grenzwert von 350 mJ wurden die theoretischen Geraden der Pulsdauer über den Körperstrom für den in der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] geforderten Widerstand von 500 Ω und für 1 k Ω berechnet (Abbildung 11). Die Berechnung stimmt mit den Messwerten überein und bestätigt somit die erfolgreiche Nachstellung der 350 mJ am Versuchsstand der PTB.
- Die 350 mJ liegen im Bereich II (Abbildung 11). Bei elektrostatischen Handsprüheinrichtungen gemäß DIN EN 50059:2025 [8] müssen die Pulsdauer und der Körperstrom im Bereich I liegen. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben ist die Energie von 350 mJ als Grenzwert der Personengefährdung geeignet. Schwere und schmerzhaftes Entladungen, Muskelschmerzen, unkontrollierte Bewegungen durch starke Muskelkontraktionen, eine direkte Gefährdung der

Gesundheit, Verletzungsgefahr, Bewusstlosigkeit, Herzkammerflimmern, Herzstillstand und u.U. Tod werden bei Unterschreitung vermieden.

- Der Bereich I unterschreitet den Grenzwert von 350 mJ und ist somit als konservativ zu betrachten. Diese Aussage bezieht sich auf den in der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] geforderten Widerstand von 500 Ω . Der Bereich I gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] kann als Beurteilungsmethode für die Gefährdung von Personen durch elektrostatische Entladungen genutzt werden, um starke Muskelreaktionen und das Risiko von Herzkammerflimmern sicher zu vermeiden.

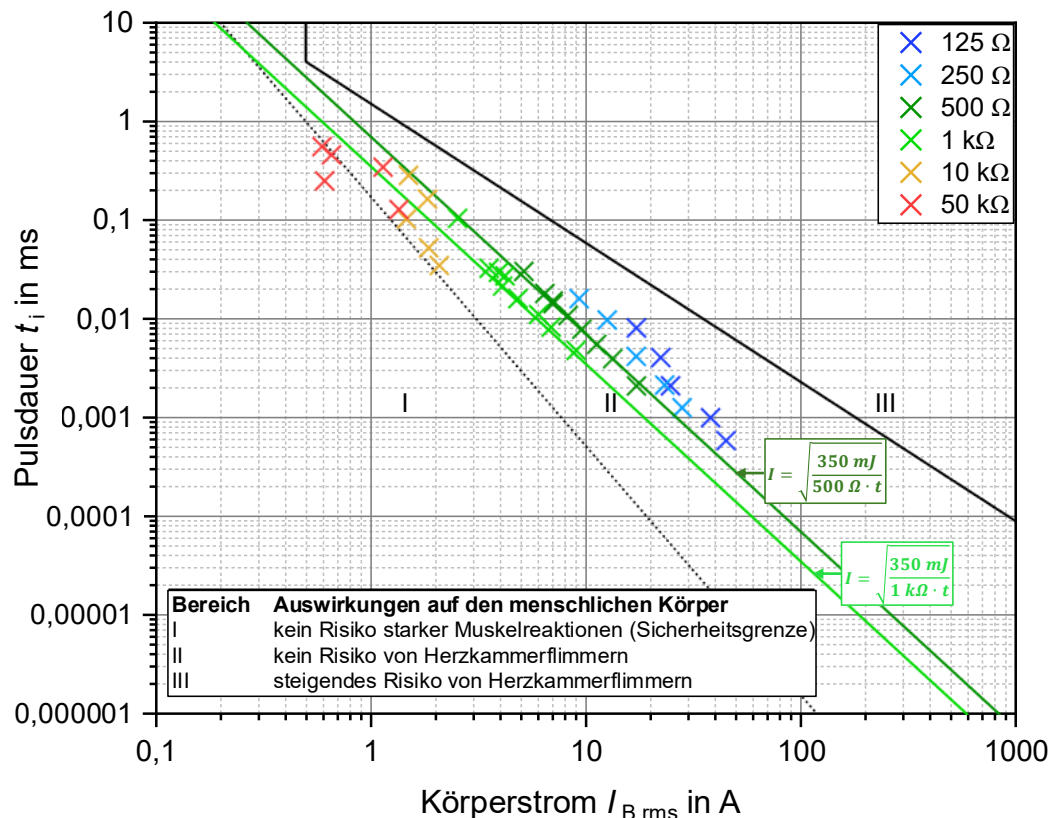


Abbildung 11: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom in Abhängigkeit vom Widerstand, Nachstellung des Grenzwertes 350 mJ

Grenzwert 5 J:

- Anhand von Gleichung 1 und dem Grenzwert von 5 J wurde die theoretische Gerade der Pulsdauer über den Körperstrom für den in der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] geforderten Widerstand von 500 Ω und für 1 k Ω berechnet (Abbildung 12). Die Berechnung stimmt mit den Messwerten überein und bestätigt somit die erfolgreiche Nachstellung der 5 J am Versuchsstand der PTB.
- Elektroaun- und Elektroimpulsgeräte müssen gemäß [5, 18] den Grenzwert der Energie von 5 J einhalten. Folglich sind unterhalb der 5 J-Geraden der Widerstandswerte starke Muskelreaktionen zu erwarten. Die Gefahr von Herzkammerflimmern besteht jedoch üblicherweise nicht. Im Bereich der Pulsdauer von 0,1 ms bis 0,01 ms wechseln die 5 J-Geraden mit abnehmender Pulsdauer vom Bereich III in den Bereich II. Wenn die 5 J-Geraden im Bereich III liegen, ist die Beurteilungsmethode gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] als konservativ zu betrachten. Befinden sich die 5 J-Geraden im

Bereich II, so lässt die Beurteilungsmethode gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] Energien von über 5 J zu. Es gilt zu diskutieren, ob die Begrenzung zwischen Bereich II und Bereich III der 5 J-Geraden anzupassen ist.

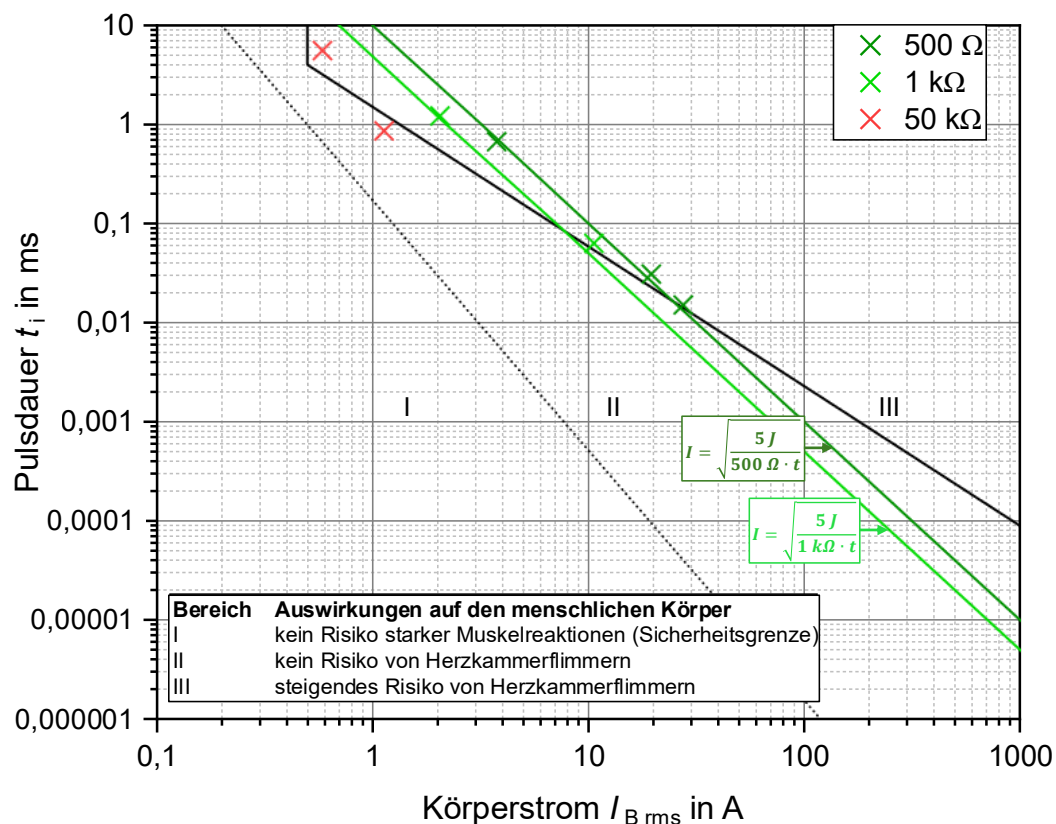


Abbildung 12: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom in Abhängigkeit vom Widerstand, Nachstellung des Grenzwertes 5 J

Grenzwert 50 μC :

- Für den in der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] geforderten Widerstand von 500 Ω wurde die Trendlinie der Messergebnisse der Nachstellung von 50 μC eingezeichnet (Abbildung 13). Aufgrund der Steigung wird in Abhängigkeit von Spannung und Kapazität der Bereich I, Bereich II und theoretisch bei höheren Widerständen der Bereich III erreicht.
- Bei Einhaltung von Bereich I gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] und unterhalb der in Abbildung 13 eingezeichneten Trendlinie wird der Grenzwert der Ladung von 50 μC unterschritten. Die Trendlinie liegt in weiten Teilen über einer Pulsdauer von 0,1 ms. Aufgrund der Vielzahl durchgeführter sicherheitstechnischer Bewertungen von elektrostatischen Beschichtungssystemen kann die Aussage getroffen werden, dass elektrostatische Entladungen mit einer Pulsdauer von über 0,1 ms von diesen Systemen untypisch sind (siehe auch Abbildung 14 und Abbildung 15).

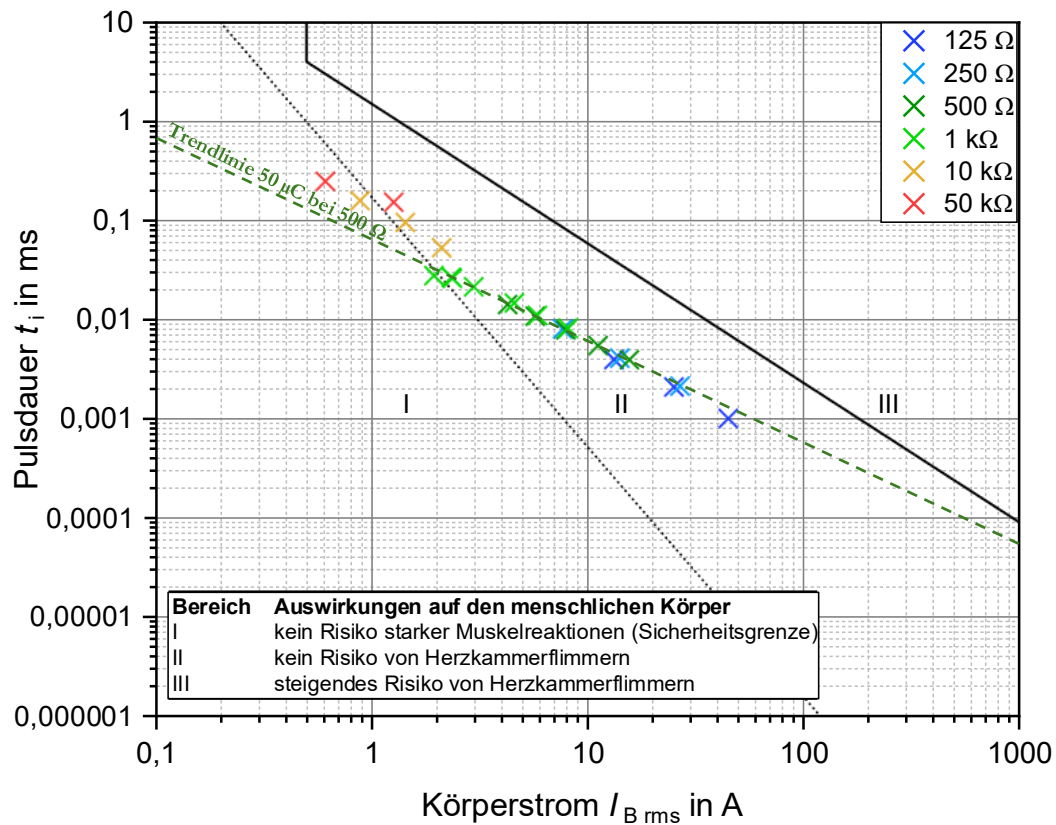


Abbildung 13: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom in Abhängigkeit vom Widerstand, Nachstellung des Grenzwertes 50 μC

4.7 Reale Anlagen

Die in [27, 28] durchgeführten Messungen an realen Anlagen werden mit der neuen Beurteilungsmethode gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] betrachtet. Das Ziel besteht darin, zu prüfen, ob die Beurteilungsmethode auf elektrostatische Handsprüheinrichtungen, automatische elektrostatische Beschichtungssysteme und Elektrozaungeräte anwendbar ist.

Elektrostatische Handsprüheinrichtungen und automatische elektrostatische Beschichtungssysteme:

- Die in [28] untersuchten elektrostatischen Handsprüheinrichtungen liegen im Bereich I und entsprechen den Anforderungen der DIN EN 50059:2025 [8] (Abbildung 14). Der Grenzwert der Energie von 350 mJ und der Grenzwert der Ladung von 50 μC werden unterschritten. Bei elektrostatischen Entladungen zu Personen besteht keine Gefahr von starken Muskelreaktionen und Herzkammerflimmern.
- Die in [28] untersuchten automatischen elektrostatischen Beschichtungssysteme liegen mit ihren Maximalwerten im Bereich II (Abbildung 15). Der Grenzwert der Energie von 350 mJ und der Grenzwert der Ladung von 50 μC werden überschritten. Bei elektrostatischen Entladungen zu Personen besteht eine Gefahr von starken Muskelreaktionen. Die Gefahr von Herzkammerflimmern besteht jedoch nicht. Es sind die Maßnahmen für den Typ L-3 der DIN EN 50176:2025 [9] zu gewährleisten (siehe Kapitel 4.5).
- Die Messungen bestätigen die Anwendbarkeit und Sicherheit der neuen Beurteilungsmethode gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9].

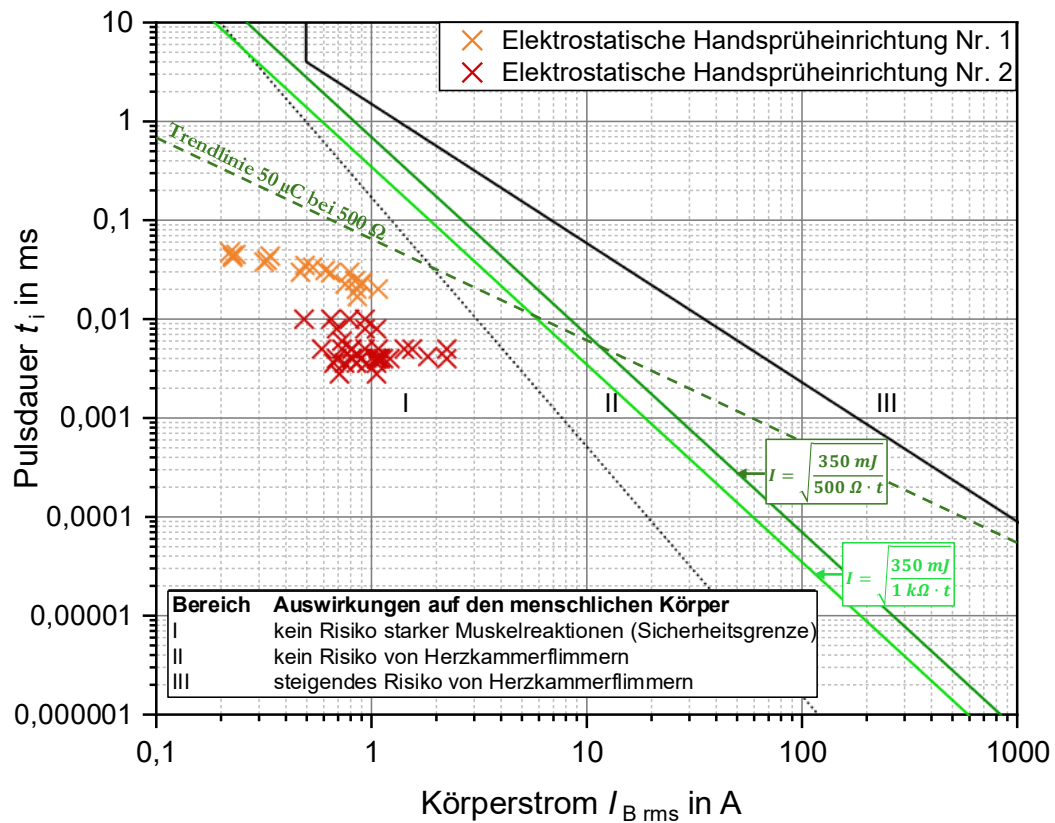


Abbildung 14: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom mit Messwerten elektrostatischer Handprüheinrichtungen aus [28]

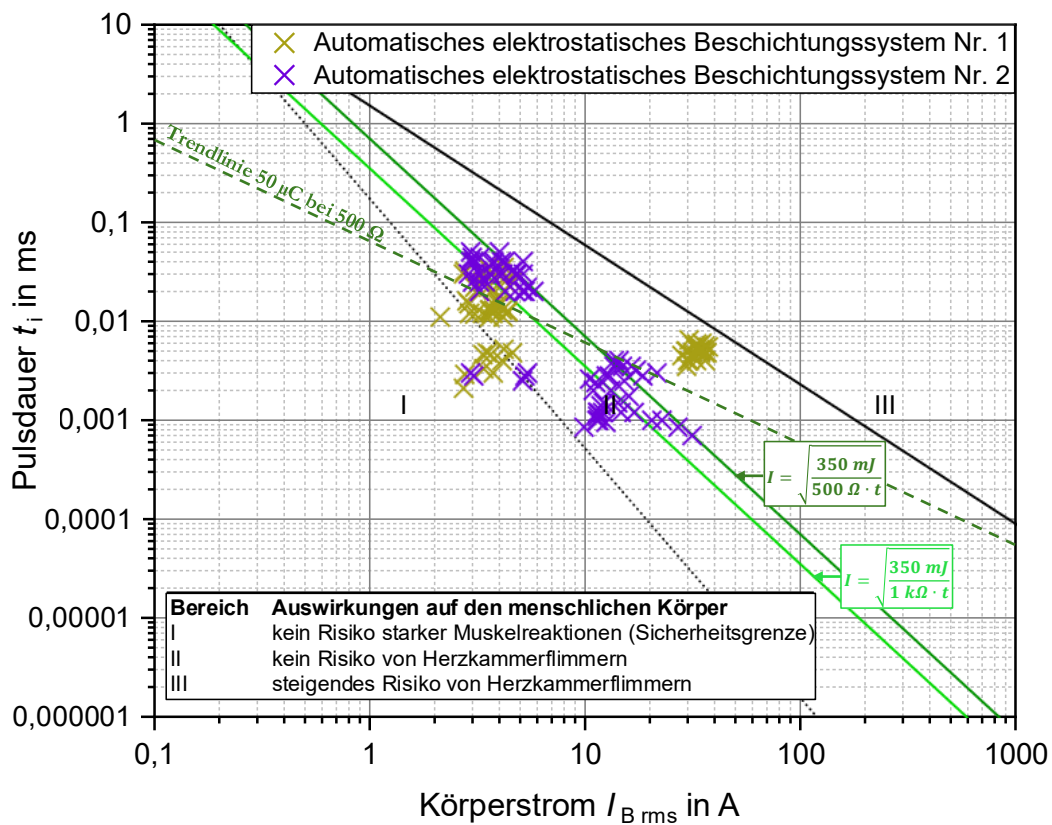


Abbildung 15: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom mit Messwerten automatischer elektrostatischer Beschichtungssysteme aus [28]

Elektrozaungerät:

- Das in [28] untersuchte Elektrozaungerät hat eine Energie von 2 J. Messungen wurden am Elektrozaun und an der Anschlussklemme des Gerätes durchgeführt. Die Messwerte liegen im Bereich II (Abbildung 16). Es wurde eine Messung an der Anschlussklemme des Gerätes mit einer Testperson durchgeführt. Bei einem Strompfad von Hand zu Hand überschreiten 5 % der Population lebender Personen eine Gesamtkörperimpedanz von 575 Ω und 95 % eine Gesamtkörperimpedanz von 1050 Ω nicht [6]. Auf dieser Grundlage ist davon auszugehen, dass der Grenzwert der Energie von 350 mJ (siehe Gerade für 500 Ω und 1 k Ω in Abbildung 16) aufgrund der Gesamtkörperimpedanz der Testperson erreicht oder überschritten wurde. Die Testperson hat eine starke Muskelreaktion verspürt. Anhand der Messungen wird bestätigt, dass im Bereich II der neuen Beurteilungsmethode gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] und bei Überschreitung der 350 mJ und 50 μ C mit starken Muskelreaktionen zu rechnen ist. Eine Gefahr von Herzkammerflimmern besteht nicht.

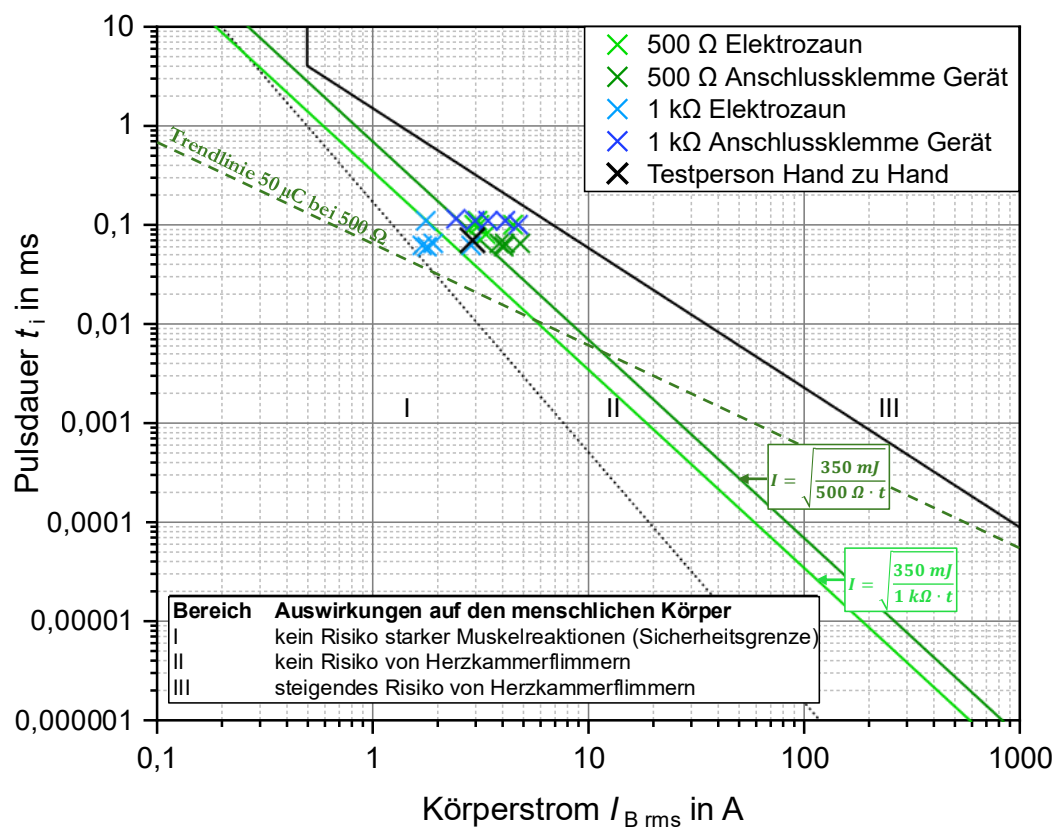


Abbildung 16: Diagramm Pulsdauer über Körperstrom mit Messwerten eines Elektrozaungerätes aus [28]

5 Zusammenfassung

Im Folgenden werden die in Kapitel 2 formulierten Forschungsfragen erörtert, beantwortet und ggf. offene Diskussionspunkte benannt.

1. Personen gelten als gefährdet, wenn die Energie einer elektrostatischen Entladung 350 mJ überschreitet [2]. Kann durch eine Literaturrecherche gezeigt werden, dass dieser Wert im Vergleich zu Energiewerten, die in Untersuchungen mit einer konkreten Wirkung in Verbindung gebracht wurden, in der richtigen Größenordnung liegt?

Ja! In Kapitel 4.2 werden die Werte und Grenzwerte der Energie der technischen Regeln, technischen Spezifikation, Normen und weiterführender Literatur und deren Aussagen zu Auswirkungen auf den menschlichen Körper zusammengefasst und in Abbildung 1 entsprechend sortiert. Die Energie von 350 mJ als Grenzwert der Personengefährdung gliedert sich passend in diese Zusammenfassung ein. Bei Einhaltung werden schwere und schmerzhaft Entladungen, Muskelschmerzen, unkontrollierte Bewegungen durch starke Muskelkontraktionen, eine direkte Gefährdung der Gesundheit, Verletzungsgefahr, Bewusstlosigkeit, Herzkammerflimmern, Herzstillstand und u.U. Tod vermieden. Zusammenfassend ist, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, die Energie von 350 mJ als Grenzwert der Personengefährdung geeignet.

2. Elektrostatische Entladungen können von der Person selbst erfolgen. Sind die Kapazität und das Potential einer Person ausreichend hoch für eine Gefährdung? Wird der Grenzwert der Entladeenergie von 350 mJ erreicht?

Nein! Typische Werte der Energie elektrostatischer Entladungen einer Person liegen im Bereich von 10 mJ bis 15 mJ [2]. Theoretisch sind sogar Energien von über 100 mJ möglich (siehe Kapazitätsmessungen in Kapitel 4.3). Die dafür notwendige Potentialdifferenz gegenüber dem Erdpotential entsteht durch alltägliche Bewegungen [4]. All diese Energiewerte unterschreiten den Grenzwert der Personengefährdung von 350 mJ. Der Grenzwert von 2 mJ für Personen mit Herzschrittmachern [2] wird jedoch überschritten. Dieser Wert ist auch als Wahrnehmbarkeitsschwelle bekannt (siehe Kapitel 4.2). Laut TRGS 727 [2] sind Personen mit Herzschrittmachern im Alltag demnach dauerhaft gefährdet, sobald eine elektrostatische Entladung spürbar ist. Elektrostatische Entladungen lassen sich im Alltag jedoch nicht vermeiden. Der Grenzwert von 2 mJ sollte daher überdacht werden.

Zusammenfassend ist nicht zu erwarten, dass von einer Person ausgehende elektrostatische Entladungen die Person selbst oder andere Personen gefährden. Personen, die einen Herzschrittmacher tragen, sind gesondert zu bewerten.

3. Überprüfung und Weiterentwicklung der messtechnischen Verfahren der Beurteilungsmethode gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] zur Messung des Körperstromes und der Pulsdauer elektrostatischer Entladungen. Ist die Beurteilungsmethode mit dem Grenzwert der Entladeenergie von 350 mJ, 5 J und der Ladung von 50 µC in Einklang zu bringen?

350 mJ, Ja! Der Bereich I unterschreitet den Grenzwert von 350 mJ und ist somit als konservativ zu betrachten (siehe Kapitel 4.6.3, Abbildung 11). Diese Aussage bezieht sich auf den in der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] geforderten Widerstand von 500 Ω . Der Bereich I gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] kann als Beurteilungsmethode für die Gefährdung von Personen durch elektrostatische Entladungen genutzt werden, um starke Muskelreaktionen und das Risiko von Herzkammerflimmern sicher zu vermeiden.

5 J, Ja und Nein! Elektrozaun- und Elektroimpulsgeräte müssen den Grenzwert von 5 J einhalten [5, 18]. Diese Geräte gelten nicht als tödlich. Unterhalb der 5 J-Geraden der Widerstandswerte (siehe Kapitel 4.6.3, Abbildung 12) sind starke Muskelreaktionen zu erwarten. Herzkammerflimmern ist jedoch nicht zu befürchten. Im Bereich der Pulsdauer von 0,1 ms bis 0,01 ms wechseln die 5 J-Geraden mit abnehmender Pulsdauer vom Bereich III in den Bereich II. Liegen die 5 J-Geraden im Bereich III, ist die Beurteilungsmethode gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] als konservativ zu betrachten. Liegen die 5 J-Geraden im Bereich II, so lässt die Beurteilungsmethode gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] Energien von über 5 J zu. Es gilt zu diskutieren, ob die Begrenzung zwischen Bereich II und Bereich III der 5 J-Geraden anzupassen ist.

50 μ C, Ja! Aufgrund der durch Messungen bei 50 μ C bestimmten Steigung wird in Abhängigkeit von Spannung und Kapazität der Bereich I bzw. II erreicht (siehe Kapitel 4.6.3, Abbildung 13). Bei höheren Widerständen wird theoretisch der Bereich III erreicht. Bei Einhaltung von Bereich I gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] und unterhalb der in Abbildung 13 eingezeichneten Trendlinie wird der Grenzwert der Ladung von 50 μ C unterschritten. Die Trendlinie liegt in weiten Teilen über einer Pulsdauer von 0,1 ms. Aufgrund der Vielzahl durchgeführter sicherheitstechnischer Bewertungen von elektrostatischen Beschichtungssystemen kann die Aussage getroffen werden, dass elektrostatische Entladungen mit einer Pulsdauer von über 0,1 ms von diesen Systemen untypisch sind (siehe auch Abbildung 14 und Abbildung 15).

Die in der DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] beschriebene Messtechnik der Beurteilungsmethode wurde in [27, 28] und in diesem Projekt in die Praxis umgesetzt (siehe Kapitel 4.5). Dies gibt zukünftigen Anwendern eine Orientierung für den Nachbau und die Auslegung der elektrischen Komponenten.

Am Versuchsstand der PTB kann die theoretisch vorliegende Energie und Ladung durch Messung der Kapazität und Spannung genau bestimmt werden (siehe Kapitel 4.6.1). Die Übereinstimmung dieser theoretischen Werte mit der durch Nutzung der Messtechnik gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] im Entladepfad messtechnisch bestimmten Energie bzw. Ladung ist gegeben (siehe Kapitel 4.6.3). Aufgrund dieser Übereinstimmung ist der Versuchsstand der PTB zur Funktionsprüfung und zum Plausibilitätscheck der Messtechnik der Beurteilungsmethoden gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] geeignet.

Um den Einfluss der Koaxialkabel auf die Messung zu untersuchen, wurden drei Typen von Koaxialkabeln genutzt (siehe Kapitel 4.6.2). Das Koaxialkabel vom Typ RG 58/U hat sich aus Gründen der besten Übereinstimmung mit den theoretischen Werten von Energie und Ladung sowie der Handhabbarkeit als besonders geeignet herausgestellt.

Die gemessenen Kapazitätswerte realer Anlagen liefern unrealistische Größen und entsprechen nicht den Gegebenheiten der tatsächlich in Betrieb befindlichen Sprühsysteme [27, 28]. Probleme bei der Messung der Kapazität sind dem Kapitel 4.4 zu entnehmen. Eine Einhaltung des Grenzwertes der Entladeenergie von 350 mJ durch Messung der Kapazität hat zur Folge, dass Sprühsysteme in ihrer Spannung begrenzt werden und dadurch die Effizienz und die Funktionalität reduziert wird [27, 28].

Aufgrund dieser Probleme wird zur Bewertung der Personengefährdung durch elektrischen Schlag infolge elektrostatischer Entladungen alternativ die messtechnische Bestimmung des Körperstroms und der Pulsdauer gemäß DIN EN 50059:2025 [8] und DIN EN 50176:2025 [9] genutzt. Die Anwendbarkeit und Sicherheit wurde anhand von Messungen an elektrostatischen Handsprüheinrichtungen und automatischen elektrostatischen Beschichtungssystemen bestätigt (siehe Kapitel 4.7). Durch Messungen am Elektrozaungerät, wobei speziell auf den Versuch mit der Testperson hinzuweisen ist, wurde bestätigt, dass im Bereich II mit starken Muskelkontraktionen zu rechnen ist (siehe Kapitel 4.7).

Die Messtechnik wird fortlaufend bei Prüfungen durch die PTB an weiteren elektrostatischen Sprühsystemen angewandt und ggf. weiterentwickelt.

6 Literaturangaben

- [1] BRUNDRETT, G. W.: *A review of the factors influencing electrostatic shocks in the offices*. In: *Journal of Electrostatics* 2 (1977), Nr. 4, S. 295–315
- [2] TECHNISCHE REGEL FÜR GEFAHRSTOFFE: *Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen* (TRGS 727). Ausgabe 8/2016, (2016), (GMBI 2016 S. 256-314 [Nr. 12-17] (v. 26.04.2016); Berichtigt: GMBI 2016 S. 623 [Nr. 31] (v. 29.07.2016))
- [3] TECHNICAL SPECIFICATION IEC TS 60079-32-1:2013+AMD1:2017 CSV: *Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance*. Edition 1.1 2017-03. Berlin : VDE-Verlag
- [4] SCHUBERT, W. ; LÜTTGENS, G.: *Praxislexikon statische Elektrizität*. Tübingen : expert, 2022
- [5] DIN EN 60335-2-76 (VDE 0700-76) BEIBLATT 1:2016-06: *Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke*. Berlin : Beuth-Verlag
- [6] IEC 60479-1:2018-12: *Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects*. Berlin : VDE-Verlag
- [7] IEC 60479-2:2019-05: *Effects of current on human beings and livestock - Part 2: Special aspects*. Berlin : VDE-Verlag
- [8] DIN EN 50059 (VDE 0745-200):2025-10: *Elektrostatische Handsprüheinrichtungen für nichtentzündbare flüssige Beschichtungsstoffe*. Berlin : DIN Media
- [9] DIN EN 50176 (VDE 0147-101):2025-10: *Automatische elektrostatische Beschichtungssysteme für entzündbare flüssige Beschichtungsstoffe*. Berlin : DIN-Media
- [10] DIN EN 50348 (VDE 0147-200):2010-08: *Stationäre Ausrüstung zum elektrostatischen Beschichten mit nichtentzündbaren flüssigen Beschichtungsstoffen*. Berlin : Beuth-Verlag
- [11] DIN EN 50223 (VDE 0147-103):2015-09: *Stationäre elektrostatische Flockanlagen für entzündbaren Flock*. Berlin : Beuth-Verlag
- [12] DIN EN 50177 (VDE 0147-102):2010-04: *Stationäre Ausrüstung zum elektrostatischen Beschichten mit entzündbaren Beschichtungspulvern*. Berlin : Beuth-Verlag
- [13] DIN EN 50176 (VDE 0147-101):2010-04: *Stationäre Ausrüstung zum elektrostatischen Beschichten mit entzündbaren flüssigen, Beschichtungsstoffen - Sicherheitsanforderungen*. Berlin : Beuth-Verlag
- [14] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik : Mit zahlreichen Bildern und Tabellen*. 20., aktualisierte Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2011
- [15] LÜTTGENS, G. ; SCHUBERT, W. ; LÜTTGENS, S. ; PIDOLL, U. v. ; EMDE, S.: *Statische Elektrizität : Durchschauen - Kontrollieren - Einsetzen*. Weinheim : Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, 2020
- [16] DIN IEC/TR 61340-1 (VDE 0300-1):2021-08: *Elektrostatik Teil 1: Elektrostatische Vorgänge – Grundlagen und Messungen (IEC TR 61340-1:2012 + COR1:2013 + COR2:2017 + AMD1:2020)*. Berlin : VDE-Verlag
- [17] DIN EN 61140 (VDE 0140-1):2016-11: *Schutz gegen elektrischen Schlag*. Berlin : VDE-Verlag
- [18] *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2006 Teil 1 Nr. 32, ausgegeben zu Bonn am 18. Juli 2006*

- [19] BUTTERWORTH, G. J. ; DOWLING, P. D.: *Electrostatic effects with portable CO₂ fire extinguishers*. In: *Journal of Electrostatics* 11 (1981), Nr. 1, S. 43–55
- [20] BRITTON, L. G.: *Avoiding static ignition hazards in chemical operations*. New York, NY : Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1999 (A CCPS concept book)
- [21] ANG SCHNEIDER: *Abschlussbericht: Messung und Ableitung elektrostatischer Aufladung an Drehflüglern (UH-1D, CH-53) ErpA-Nr. 10052*. 1971 mit Nachtrag 1974
- [22] MÜHLEISEN, R. ; FISCHER, H. J.: *Forschungsbericht aus der Wehrtechnik: Elektrische Aufladung von Hubschraubern BMVg-FBWT 78-7*. 1978
- [23] DOUGLAS, D. G. ; NANEVICZ J.E. ; SOLAK, B. J.: *PASSIVE POTENTIAL EQUALIZATION BETWEEN THE CARGO HANDLER AND A HOVERING HELICOPTER*. In: *Proceedings, Conference on Lightning & Static Electricity at Culham Laboratory, England* (1975)
- [24] ROGERS, M. E.: *Technical Report 67292 Royal Aircraft Establishment* (1967)
- [25] SSERC BULLETIN 223: *Van de Graaff generator hazards*. In: *Physics* (2007)
- [26] DIN EN 50050-3 (VDE 0745-103):2014-03: *Elektrostatische Handsprüheinrichtungen – Sicherheitsanforderungen, Teil 3: Handsprüheinrichtungen für entzündbaren Flock*. Berlin : VDE-Verlag
- [27] BAUMANN, F. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M.: *Personengefährdung in elektrostatischen Applikationsanlagen – Vermeidung von Herzkammerflimmern* (2017), 13. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit in Köthen
- [28] BAUMANN, F.: *Master-Thesis: Personengefährdung in elektrostatischen Applikationsanlagen, eine Untersuchung und Bewertung zur Vermeidung von Herzkammerflimmern bei exponierten Personen*, 2017
- [29] BIEGELMEIER, G.: *Gefahren durch den elektrischen Strom*. 2. Aufl. Berlin : VDE-Verl., 2003 (VDE-Schriftenreihe 80)
- [30] SCHNIER ELEKTROSTATIK GMBH: *Technisches Datenblatt, Hochspannungskabel Typ HKA 06/01 Art.Nr.: 050016*. 050016-TDB-DE-200828. 2020
- [31] PLASTIC CAPACITORS: *HG SERIES 250 POLYESTER / GLASS TUBE AC or PULSE CURRENTS* (o. J.), REV 190311A
- [32] BERGOZ INSTRUMENTATION: *Datenblatt: CT Current Transformer* (o. J.), v.1.8
- [33] METALLUX AG: *HOCHSPANNUNGSWIDERSTÄNDE, PRÄZISION – IMPULS – LEISTUNG, HOCHSPANNUNGSWIDERSTÄNDE HVR 968* (10/2021), 02/2020
- [34] AGILENT TECHNOLOGIES, INC.: *Agilent U1731C, U1732C, Agilent U1731C, U1732C, and U1733C Handheld LCR Meter, User Guide*. Seventh Edition, November 28, 2012 U1731-90077. 2012
- [35] AIRCOM: *Aircom Premium sehr geringe Dämpfung bis 12 GHz*. URL https://www.dnd.hu/uploads/termek_doc/SSB_Aircom_Premium_catalog_de.pdf – Überprüfungsdatum 2024-05-31

Hinweis: Die Ergebnisse des Projekts sind in diesem Projektbericht ausführlich beschrieben. In Absprache mit den Kooperationspartnern nutzt die BG RCI zeitgleich Texte und Abbildungen des Projektberichts für die Erstellung der „Fachbereich AKTUELL“ zu diesem Thema.

7 Anhang

Anhang A: Kapazitätsmessungen an Personen	40
Anhang B: Abbildungen Versuchsstand PTB.....	45

Anhang A: Kapazitätsmessungen an Personen

Grün hinterlegt sind die Werte, die einen D-Wert von unter 0,1 und eine Abweichung vom Phasenwinkel 90° von unter $\pm 10^\circ$ aufweisen.

Tabelle 9: Kapazitätswerte von Personen in Abhängigkeit vom Untergrund und Schuhen

Person	Untergrund	Schuhe	Frequenz	Kapazität	D-Wert	Q-Wert	Winkel
M	Kupferplatte	Sicherheitsschuhe	100 Hz	195,4 pF	1.53	75.7	-33,7 °
M	Kupferplatte	Sicherheitsschuhe	1 kHz	117,2 pF	0.319	3.1	-73,2 °
M	Kupferplatte	Sicherheitsschuhe	10 kHz	103,1 pF	0.085	11.7	-85,1 °
M	Kupferplatte	Sicherheitsschuhe	100 kHz	93,8 pF	0.069	14.5	-86,0 °
M	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Sicherheitsschuhe	100 Hz	294,8 pF	0.836	1.33	-54,3 °
M	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Sicherheitsschuhe	1 kHz	120,2 pF	0.323	3.08	-72,0 °
M	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Sicherheitsschuhe	10 kHz	104.5	0.086	11.5	-85,0 °
M	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Sicherheitsschuhe	100 kHz	94,4 pF	0.069	14.4	-86,0 °
M	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	1286,7 pF	0.01	100 - 1000	-90,4 °
M	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	1295,5 pF	0.006	140 - 180	-89,6 °
M	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	1288,6 pF	0.044	22.8	-87,4 °
M	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	1122,7 pF	0.316	3.16	- 72,4 °
M	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	450,4 pF	0.035	40 - 130	-91,1 °
M	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	420,7 pF	0.003	280 - 430	-89,8 °
M	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	420,7 pF	0.003	61.8	-89,0 °
M	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	405,1 pF	0.111	9.07	-83,7 °
M	Kupferplatte	Turnschuhe (2 cm Sohle)	100 Hz	134,6 pF	0.259	7.04	-81,9 °
M	Kupferplatte	Turnschuhe (2 cm Sohle)	1 kHz	116,0 pF	0.117	8.67	-83,4 °
M	Kupferplatte	Turnschuhe (2 cm Sohle)	10 kHz	103,8 pF	0.063	15.9	-86,6 °
M	Kupferplatte	Turnschuhe (2 cm Sohle)	100 kHz	94,5 pF	0.058	17.5	-86,6 °
F	Kupferplatte	Turnschuhe (3,5 cm Sohle)	100 Hz	100,3 pF	0.054	5.39	-89,7 °
F	Kupferplatte	Turnschuhe (3,5 cm Sohle)	1 kHz	78,9 pF	0.012	60 - 90	-89,2 °
F	Kupferplatte	Turnschuhe (3,5 cm Sohle)	10 kHz	75,9 pF	0.014	69.5	-89,1 °
F	Kupferplatte	Turnschuhe (3,5 cm Sohle)	100 kHz	73,1 pF	0.032	29.9	-88,1 °
F	Kupferplatte	Sicherheitsschuhe	100 Hz	210 pF	0.943	1.07	-47,0 °

F	Kupferplatte	Sicherheitsschuhe	1 kHz	119,6 pF	0.336	2.97	-71,4 °
F	Kupferplatte	Sicherheitsschuhe	10 kHz	103,6 pF	0.085	11.7	-85,1 °
F	Kupferplatte	Sicherheitsschuhe	100 kHz	95,8 pF	0.066	14.9	-46,0 °
F	Kupferplatte	Barfuß	100 Hz	293,8 nF	0.95	1.04	-46,0 °
F	Kupferplatte	Barfuß	1 kHz	98,9 nF	1.31	0.772	-37,2 °
F	Kupferplatte	Barfuß	10 kHz	5,9 nF	4.77	0.211	-11,7 °
F	Kupferplatte	Barfuß	100 kHz	463,0 pF	7.35	0.135	-7,6 °
F	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	1237,9 pF	0.005	50 - 300	-89,9 °
F	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	1239,5 pF	0.011	30 - 90	-89,1 °
F	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	1208,3 pF	0.05	18.8	-87,0 °
F	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	1033,6 pF	0.341	2.91	-71,2 °
F	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	402,7 pF	0.003	25.8	-90,1 °
F	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	398,5 pF	0.001	50 - 600	-89,9 °
F	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	382,9 pF	0.013	40 - 80	-89,2 °
F	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	379,4 pF	0.103	9.7	-84,1 °
F	Kupferplatte + Folie (0,2 mm)	Barfuß	100 Hz	2043 pF	0.002	150 - 500	-89,5 °
F	Kupferplatte + Folie (0,2 mm)	Barfuß	120 Hz	2003 pF	0.002	150 - 400	-89,9 °
F	Kupferplatte + Folie (0,2 mm)	Barfuß	1 kHz	2050 pF	0.011	60 - 90	-89,3 °
F	Kupferplatte + Folie (0,2 mm)	Barfuß	10 kHz	2021 pF	0.077	12.3	-85,5 °
F	Kupferplatte + Folie (0,2 mm)	Barfuß	100 kHz	1383 pF	0.594	1.74	-59,8 °
F	Kupferplatte	Anzugschuhe (3 cm Sohle hinten, ca. 1,2 cm Sohle vorne)	100 Hz	108,3 pF	0.078	10 - 200	-93,7 °
F	Kupferplatte	Anzugschuhe (3 cm Sohle hinten, ca. 1,2 cm Sohle vorne)	1 kHz	106,3 pF	0.032	31.4	-88,2 °
F	Kupferplatte	Anzugschuhe (3 cm Sohle hinten, ca. 1,2 cm Sohle vorne)	10 kHz	102,1 pF	0.022	44.6	-88,7 °
F	Kupferplatte	Anzugschuhe (3 cm Sohle hinten, ca. 1,2 cm Sohle vorne)	100 kHz	99,1 pF	0.041	24.2	-87,6 °
F	Kupferplatte	Timberland (2,5 cm Sohle)	100 Hz	102,7 pF	0.03	3 - 100	-93,8 °
F	Kupferplatte	Timberland (2,5 cm Sohle)	1 kHz	82,0 pF	0.019	51.4	-88,9 °

F	Kupferplatte	Timberland (2,5 cm Sohle)	10 kHz	78,5 pF	0.018	45.8	-88,7 °
F	Kupferplatte	Timberland (2,5 cm Sohle)	100 kHz	75,6 pF	0.042	23.4	-87,5 °
M	Kupferplatte	Nike Sportschuhe (3 cm Sohle)	100 Hz	170,2 pF	0.227	8 - 30	-75,2 °
M	Kupferplatte	Nike Sportschuhe (3 cm Sohle)	1 kHz	129,7 pF	0.085	12.3	- 85,2 °
M	Kupferplatte	Nike Sportschuhe (3 cm Sohle)	10 kHz	116,9 pF	0.06	17.4	-86,7 °
M	Kupferplatte	Nike Sportschuhe (3 cm Sohle)	100 kHz	105,0 pF	0.08	12	-85,2 °
Z	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	1100,3 pF	0.009	54.4	-88,8 °
Z	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	1109,4 pF	0.011	99.4	-89,3 °
Z	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	1104,2 pF	0.051	20.2	-87,0 °
Z	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	930,7 pF	0.366	2.77	-69,8 °
Z	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	335,4 pF	0.042	50 - 300	-90,6 °
Z	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	337,0 pF	0.011	82.4	-89,2 °
Z	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	333,4 pF	0.013	54.1	-88,9 °
Z	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	324,9 pF	0.104	9.51	-84,0 °
L	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	1830,8 pF	0.033	43.8	-87,7 °
L	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	1823,8 pF	0.043	22.2	-87,6 °
L	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	1644,7 pF	0.091	10.9	-84,3 °
L	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	1358,9 pF	0.374	2.67	-69,4 °
L	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	528,6 pF	0.002	10 - 800	-88,6 °
L	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	500,7 pF	0.018	40 - 60	-89,0 °
L	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	498,5 pF	0.023	40.4	-88,7 °
L	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	478,3 pF	0.106	9.49	-83,9 °
X	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	1376,9 pF	0.027	31.9	-87,0 °

X	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	1278,3 pF	0.028	28.1	-87,7 °
X	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	1266,1 pF	0.055	18.3	-86,7 °
X	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	1103,7 pF	0.305	3.4	-77,0 °
X	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	444,8 pF	0.006	15.1	-86,4 °
X	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	422,0 pF	0.02	10 - 80	-88,9 °
X	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	411,4 pF	0.022	44.9	-89,0 °
X	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	395,9 pF	0.02	11.3	-88,4 °
Y	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	1920,3 pF	0.043	34.3	-88,1 °
Y	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	1821,8 pF	0.049	20.3	-87,2 °
Y	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	1664,5 pF	0.103	9.55	-84,1 °
Y	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	1327,3 pF	0.405	2.45	-67,7 °
Y	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	506,7 pF	0.009	15.7	-90,4 °
Y	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	481,9 pF	0.022	44.4	-88,7 °
Y	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	472,2 pF	0.024	42.8	-88,6 °
Y	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	459,3 pF	0.112	8.84	-83,5 °
E	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	1274,3 pF	0.034	28.1	-87,8 °
E	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	1192,2 pF	0.062	15.4	-86,2 °
E	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	1081,3 pF	0.104	9.6	-84,0 °
E	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	869,9 pF	0.362	2.75	-70,0 °
E	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	349,2 pF	0.001	61.9	-86,4 °
E	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	342,6 pF	0.038	26.5	-87,9 °

E	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	329,3 pF	0.037	26.3	-87,8 °
E	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	307,9 pF	0.11	8.91	-83,6 °
H	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	955,8 pF	0.042	25.1	-87,7 °
H	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	899,3 pF	0.055	18.6	-86,9 °
H	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	829,9 pF	0.093	10.8	-84,7 °
H	Kupferplatte + Folie (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	678,0 pF	0.274	3.7	-74,9 °
H	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 Hz	321,2 pF	0.179	15.1	-80,9 °
H	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	1 kHz	301,4 pF	0.066	15.8	-86,2 °
H	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	10 kHz	275,7 pF	0.043	23.1	-87,5 °
H	Kupferplatte + 4 Folien (0,4 mm)	Barfuß	100 kHz	258,6 pF	0.078	12.7	-85,5 °

Anhang B: Abbildungen Versuchsstand PTB

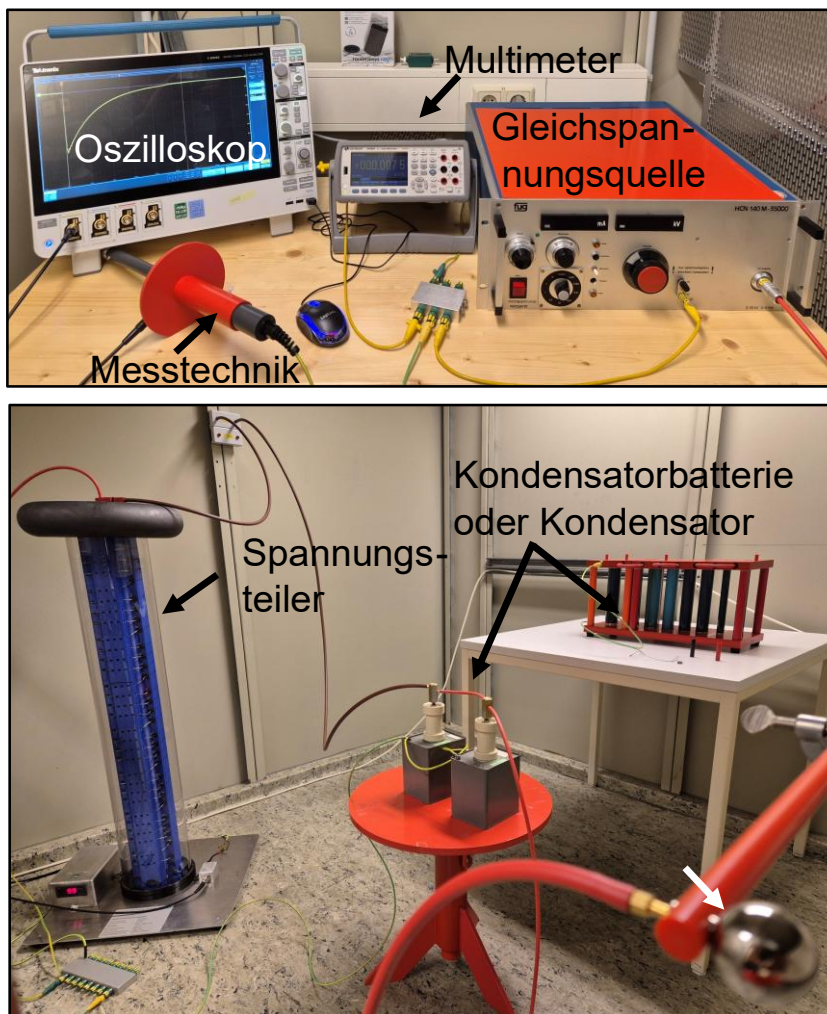


Abbildung 17: Abbildungen Versuchsstand PTB



Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21
Fax: (0531) 592-30 08
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de