

3.3 Messung hoher Gleichspannungen, Stoßspannungen und des Scheitelwerts hoher Wechselfspannungen mit der Kugelfunkenstrecke

Die Messung von Scheitelwerten mit Funkenstrecken beruht auf der Tatsache, daß eine gegebene Elektrodenanordnung unter gleichen äußeren Bedingungen bei einem bestimmten, innerhalb bekannter Toleranzen reproduzierbaren Spannungswert durchschlagen wird. Bei Erreichen der Durchschlagfeldstärke ($E_D = 30 \text{ kV/cm}$ für Luft bei Atmosphärendruck) werden die Gasteilchen im Feldraum zwischen den Elektroden so stark durch die Feldkräfte beschleunigt, daß sie aufgrund ihrer vermehrten kinetischen und potentiellen Energie in der Lage sind, Bestandteil einer selbständigen Entladung zu werden. Die im einzelnen stattfindenden Vorgänge beim Entladungsaufbau sind sehr verwickelt, so daß an dieser Stelle nicht ausführlich darauf eingegangen werden kann. Dies erübrigt sich auch, da der eigentliche Entladungsmechanismus vielerorts ausführlich behandelt wird [207—210]. Es sei hier lediglich erwähnt, daß sich nach bisherigen Erfahrungen nur solche Elektrodenanordnungen gut zur Spannungsmessung eignen, bei denen die Anfangsspannung (Einsatz von Vorentladungserscheinungen) und Funkenspannung (Durchschlagsspannung) dicht beieinander liegen.

Eine Ausnahme bildet die Stab—Stab-Funkenstrecke, die nach neuesten Untersuchungen von Peschke [545] für die Messung hoher Gleichspannungen eine

geringere Streuung der Durchschlagswerte und eine bessere Linearität der Abstandsabhängigkeit besitzt als die im folgenden beschriebene Kugelfunkenstrecke.

Die gebräuchlichste Meßentladungsstrecke ist die Kugelfunkenstrecke [221]. Die beiden kugelförmigen Elektroden sind entweder senkrecht oder waagrecht

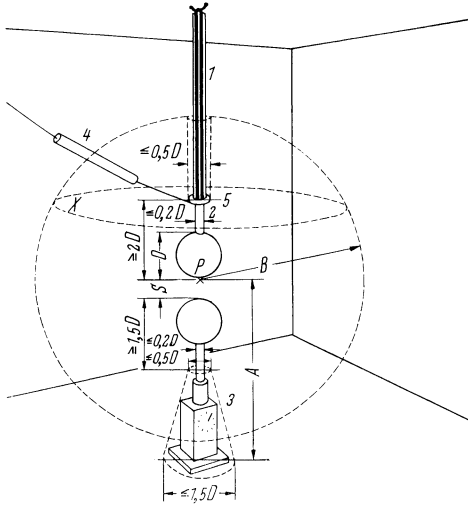


Bild 125. Schutzraumbedarf von Kugelfunkenstrecken bei vertikaler Aufstellung. 1 Isolator, 2 Kugelschaft, 3 Vorrichtung zur Abstandseinstellung, 4 Hochspannungszuführung mit Dämpfungswiderstand, 5 Entlastungsring, P Durchschlagpunkt, A Abstand des Durchschlagpunkts vom geerdeten Fußboden, B Schutzraumbedarf, X Grenzzebene, die von der Hochspannungszuführung nicht durchdrungen werden darf. (Nach IEC.)

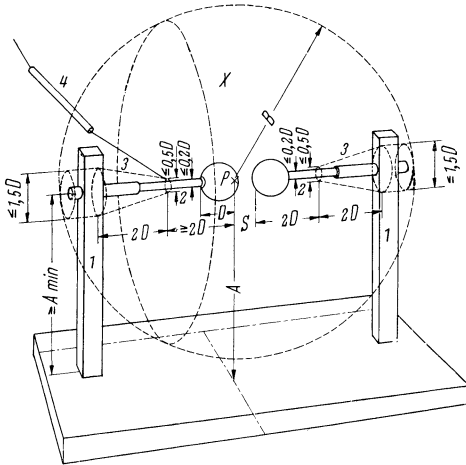


Bild 126. Schutzraumbedarf von Kugelfunkenstrecken bei horizontaler Aufstellung. 1 Isolatoren, 2 Kugelschaft, 3 Vorrichtung zur Abstandseinstellung, 4 Hochspannungszuführung mit Dämpfungswiderstand, P Durchschlagpunkt, A Abstand des Durchschlagpunkts vom geerdeten Fußboden, B Schutzraumbedarf, X Grenzzebene, die von der Hochspannungszuführung nicht durchdrungen werden darf. (Nach IEC.)

angeordnet Bilder 125 und 126 [217]. Da die Handhabung der Kugelfunkenstrecke umständlich und zeitraubend ist, und außerdem während des Spannungszusammenbruchs der eigentliche Versuchsvorgang jedesmal unterbrochen wird, wobei zusätzlich durch Ausgleichsvorgänge erhebliche Spannungsüberhöhungen auftreten können, eicht man häufig eine andere kontinuierlich anzeigende Scheitel-

spannungsmeßeinrichtung bei Spannungen knapp unterhalb der Prüfspannung mit der Kugelfunkenstrecke ein und extrapoliert die so gewonnene Eichkurve über den Wert der Prüfspannung hinaus. Die Kugelfunkenstrecke wird während der weiteren Messungen meist in der Schaltung belassen. Mit einer auf den 1,1- bis 1,2fachen Wert der Prüfspannung eingestellten Schlagweite dient sie als Schutzfunkenstrecke. Es ist zu beachten, daß die aus Vergleichsmessungen mit der Kugelfunkenstrecke und der daneben verwendeten Scheitelspannungsmeßeinrichtung ermittelte Eichkurve durch Änderungen in der Schaltung ungültig werden kann. Eine solche Schaltungsänderung bedeutet beispielsweise

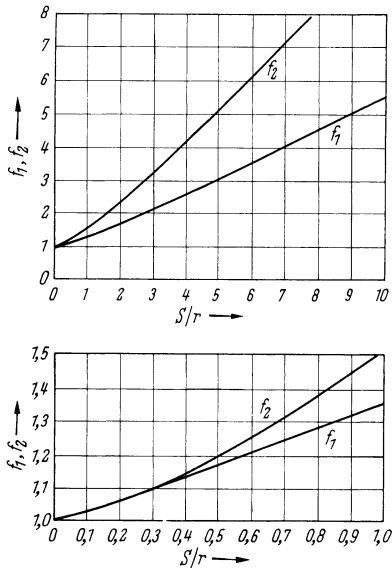


Bild 127. Geometriefaktor f zur Berechnung der Kapazität von Kugelfunkenstrecken in Abhängigkeit vom Verhältnis Schlagweite zu Kugelradius.

die Wegnahme der Kugelfunkenstrecke, da damit gleichzeitig die parallel zum Prüfling liegende Kapazität der Kugelfunkenstrecke entfällt. Hat man in einer Eichkurve die Primärspannung eines Prüftransformators in Abhängigkeit von den hochspannungsseitig mit einer Kugelfunkenstrecke gemessenen Scheitelwerten dargestellt, so wird die Eichkurve hinfällig, wenn sich durch Wegnahme der Funkenstreckenkapazität das Übersetzungsverhältnis des Prüftransformators merklich ändert (s. a. 3.2.3).

Die Kapazität von Kugelfunkenstrecken berechnet man mit ausreichender Genauigkeit aus untenstehender Gleichung [211–213]:

$$C = \frac{S \cdot 10^{-11}}{36(f - 1)} \text{ in F,} \quad \text{Schlagweite } S \text{ in cm.}$$

Die Werte für den Geometriefaktor f können in Abhängigkeit von dem Quotienten Schlagweite durch Kugelradius dem Bild 127 entnommen werden. Es ist $f = f_1$, wenn an den Kugeln eine erdsymmetrische Spannung liegt. Ist eine der beiden Kugeln geerdet, so gilt $f = f_2$. Übliche Kugelfunkenstrecken weisen Kapazitäten

25		50		75		100		150		200		Schlag- seite <i>S</i> cm
a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
Durchschlagspannung U_D (Scheitelwert in kV) einpolig geerdeter Kugelfunkenstrecken in Abhängigkeit von Schlagweite S (in cm) und Kugeldurchmesser D (in cm) bei 20°C und 1013 mbar (= 760 Torr). Bei dem angegebenen Kugeldurchmesser gilt jeweils die Spalte a für Wechselspannungen, positive und negative Gleichspannungen, negative Stoßspannungen die Spalte b für positive Stoßspannungen.												0,05
												0,10
												0,15
												0,20
												0,25
												0,30
												0,40
												0,50
												0,60
												0,70
0,80												
0,90												
1,0												
1,2												
1,4												
1,5												
1,6												
1,8												
2,0												
2,2												
2,4												
2,6												
2,8												
3,0												
3,5												
4,0												
4,5												
5,0												
5,5												
6,0												
6,5												
7,0												
7,5												
8,0												
9,0												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												

Tabelle 1. (Fortsetzung)

Schlag- seite S cm	25		50		75		100		150		200	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
20	(366)	(395)	460	480	492	505	510	510	510	510	510	510
22			489	510	530	545	555	555	560	560	560	560
24			515	540	565	585	595	600	610	610	610	610
26			(540)	(570)	600	620	635	645	655	655	660	660
28			(565)	(595)	635	660	675	685	700	700	705	705
30			(585)	(620)	665	695	710	725	745	745	750	750
32			(605)	(640)	695	725	745	760	790	790	795	795
34			(625)	(660)	725	755	780	795	835	835	840	840
36			(640)	(680)	750	785	815	830	875	880	885	885
38			(655)	(700)	(775)	(810)	845	865	915	925	930	935
40			(670)	(715)	(800)	(835)	875	900	955	965	975	980
45					(850)	(890)	945	980	1050	1060	1080	1090
50					(895)	(940)	1010	1040	1130	1150	1180	1190
55					(935)	(985)	(1060)	(1100)	1210	1240	1260	1290
60					(970)	(1020)	(1110)	(1150)	1280	1310	1340	1380
65							(1160)	(1200)	1340	1380	1410	1470
70							(1200)	(1240)	1390	1430	1480	1550
75							(1230)	(1280)	1440	1480	1540	1620
80									(1490)	(1530)	1600	1690
85									(1540)	(1580)	1660	1760
90									(1580)	(1630)	1720	1820
100									(1660)	(1720)	1840	1930
110									(1730)	(1790)	(1940)	(2030)
120									(1800)	(1860)	(2020)	(2120)
130											(2100)	(2200)
140											(2180)	(2280)
150											(2250)	(2350)

Durchschlagspannung U_D (Scheitelwert in kV)
 einpolig geerdeter Kugelfunkenstrecken in
 Abhängigkeit von Schlagweite S (in cm) und Kugel-
 durchmesser D (in cm) bei 20°C und 1013 mbar
 (= 760 Torr).

Bei dem angegebenen Kugeldurchmesser gilt jeweils
 die Spalte a für Wechselspannungen, positive und
 negative Gleichspannungen, negative Stoßspannun-
 gen; die Spalte b für positive Stoßspannungen.

zwischen 1 und 50 pF auf. Man kann also leicht nachprüfen, ob die Kapazität der Kugelfunkenstrecke im Vergleich zur Kapazität des Prüflings vernachlässigt werden kann.

Bei einseitig geerdeter Kugelfunkenstrecke bewirkt die benachbarte auf Erdpotential liegende Umgebung eine Feldveränderung derart, daß die Feldstärke an der nichtgeerdeten Kugel größer und an der geerdeten Kugel kleiner wird als

im symmetrischen Fall. Dies kann man sich anschaulich dadurch erklären, daß die von der nicht geerdeten Kugel ausgehenden Feldlinien nur noch zu einem Teil auf der geerdeten Kugel enden, die übrigen Feldlinien enden auf benachbarten geerdeten Gegenständen. Besonders bei größeren Schlagweiten gewinnt der Umgebungseinfluß stark an Bedeutung [219, 223]. Alle Funkenstrecken mit asymmetrischer Feldverteilung weisen einen Polaritätseffekt auf. Bei der Kugelfunkenstrecke macht sich diese Erscheinung bei Schlagweiten $S > 0,5r$ bemerkbar [214, 215].

Während bei niederfrequenten Wechselspannungen und Gleichspannungen die Schlagweite einen einfachen Schluß auf die Höhe der angelegten Spannung zuläßt, ergeben sich bei der Messung sehr kurzzeitiger Stoßspannungen unter Umständen starke Unterschiede zwischen den tatsächlichen Scheitelwerten und den der eingestellten Schlagweite zugeordneten Werten der statischen Durchschlagspannung (Durchschlagspannung der Kugelfunkenstrecke bei niederfrequenten Wechselspannungen und Gleichspannungen). Die Bereitstellung geeigneter Anfangsbedingungen zur Erzeugung einer selbständigen Gasentladung folgt statistischen Gesetzen. Liegen während eines sehr kurzzeitigen Spannungsimpulses keine geeigneten Startbedingungen vor, so kommt es zu keinem Durchschlag, auch wenn der Scheitelwert des Impulses über der statischen Durchschlagspannung der Funkenstrecke liegt. Ausführliche Betrachtungen dieses Effekts findet man im Schrifttum über die Stoßfestigkeit gasförmiger, flüssiger und fester Isolierstoffe [20, 226–228].

Die eigentliche Spannungsmessung geschieht entweder bei konstant eingestellter Hochspannung und Verringern der anfänglich zu groß gewählten Schlagweite oder bei gleichbleibender Schlagweite und Hochfahren der Spannung bis zum Durchschlag. Im ersten Fall sollte die Schlagweite höchstens um 1% des Kugeldurchmessers je Sekunde geändert werden, im zweiten Fall die Spannung frühestens nach etwa 30 Sekunden den Durchschlagswert erreichen. Aus mehreren aufeinanderfolgenden Meßwerten kleiner Streuung wird der endgültige Spannungswert ermittelt. Bei Stoßspannungsmessungen wird entweder die Schlagweite oder der Scheitelwert so lange verändert, bis 50% aller Stöße zum Durchschlag führen (50%-Durchschlagsstoßspannung [234]). Aus einer Vielzahl international durchgeführter Messungen hat man Standarddurchschlagswerte ermittelt [216, 217], die sich unter noch zu nennenden Voraussetzungen überall mit bestimmter Genauigkeit reproduzieren lassen (Tab. 1, S. 110–112). Die in der Tabelle angegebenen Werte gelten für Wechselspannungen bis zu maximalen Schlagweiten $S \leq r$ innerhalb $\pm 3\%$ als genau; bei Gleichspannungen bis zu $S \leq 0,8r$ innerhalb $\pm 5\%$. Die für positive und negative Stoßspannung getrennt angegebenen Werte gelten für Schlagweiten $S \leq r$ innerhalb $\pm 3\%$ als genau. Die in Klammern stehenden Werte besitzen wegen größerer, noch ungeklärter Streuungen nicht angebbare Unsicherheiten.

Wie schon erwähnt, hängt die tatsächliche Durchschlagspannung bei Stoßspannungen stark vom zeitlichen Verlauf der Stoßwelle ab. Die in der Tabelle genannten Werte gelten nur für Normstoßspannungen nach VDE und IEC mit Rückenzeiten $\geq 50 \mu\text{s}$. Um die Standardmeßwerte mit der angegebenen Genauigkeit reproduzieren zu können, ist die Einhaltung vieler Bedingungen erforderlich, die in den Vorschriftenwerken des VDE und der IEC ausführlich

festgelegt sind [216, 217]. Die wichtigsten Bestimmungen werden im folgenden auszugsweise wiedergegeben:

Aufbau und Anordnung der Kugelfunkenstrecke: Die Kugeln bestehen aus Metall, vorzugsweise Kupfer. Der Nenn Durchmesser soll mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ eingehalten werden. Für die Anordnung der Kugeln gegeneinander und gegenüber der Umgebung (Decken, Wände, Fußboden) gelten die in Tab. 2 (S. 115) aufgeführten Mindest- und Höchstwerte, die im Zusammenhang mit den Bildern 125 und 126 anzuwenden sind.

Die Spannung wird dem Kugelschaft in einem Mindestabstand $2r$ vom Kugelansatz entfernt zugeführt.

Vorwiderstand: Zur Dämpfung von vorentladungsbedingten Ausgleichsvorgängen und zwecks Verringerung des Kugelabbrands schaltet man vor die Kugelfunkenstrecke gern einen ohmschen Widerstand von $10\text{ k}\Omega$ bis $1\text{ M}\Omega$. Bei Frequenzen größer als 1000 Hz ist der Vorwiderstand frequenzproportional zu verringern. Der Vorwiderstand und die Kapazität der Kugelfunkenstrecke bilden einen frequenzabhängigen Spannungsteiler. Der maximal zulässige Vorwiderstand richtet sich nach der Funkenstreckenkapazität. Es muß dafür gesorgt werden, daß im Rahmen der angestrebten Meßgenauigkeit R ausreichend klein gegen $1/\omega C$ ist, das Übersetzungsverhältnis des Teilers also nahe bei 1 liegt (s. a. [760]). Meßergebnisse über den Einfluß überlagerter hochfrequenter Wechselspannungen auf die niederfrequenten Durchschlagspannungen von Luft findet man bei Rasquin, Depping und Büser [230—233].

Bei Stoßspannungsmessungen dämpft der Vorwiderstand die durch die schnellen Strom- und Spannungsänderungen beim Durchschlag verursachten Ausgleichsvorgänge, die zu einer Gefährdung des Prüflings führen könnten. Gängige Werte liegen bei etwa $500\ \Omega$. Bei vergleichsweise kleiner Kapazität der Kugelfunkenstrecke sind auch größere Werte möglich. Die Eigenzeitkonstante der Kugelfunkenstrecke mit Vorwiderstand muß eben ausreichend klein sein gegen die vorkommenden Stirnteilheiten.

Bestrahlung: Beim Messen von Spannungen unter 50 kV Scheitelwert mit Kugeln aller Größen und in jedem Falle beim Messen mit Kugeln von $12,5\text{ cm}$ und kleinerem Durchmesser ist eine zusätzliche Bestrahlung der Kugelfunkenstrecke erforderlich, wenn genaue und nur wenig streuende Meßergebnisse erzielt werden sollen [224, 225, 750, 763]. Die Bereitstellung von Anfangselektronen durch Bestrahlung kann erfolgen

- a) mit einem radioaktiven Präparat, das sich in einer Kapsel im Innern der spannungsführenden Kugel in der Nähe des Durchschlagpunkts befindet. Die Radioaktivität soll mindestens $0,2\text{ mCurie}$, vorzugsweise etwa $0,6\text{ mCurie}$ betragen [759].
- b) mit einer Quecksilberdampf-Quarzlampe, die ungefähr in einem Abstand gleich dem Mindestwert von B gemäß Tab. 2 so angeordnet sein sollte, daß ihr Licht auf die Durchschlagpunkte der Kugeln fällt.
- c) mit einer Röntgenröhre, deren Anordnung sinngemäß a) oder b) und deren Bestrahlungswirkung nachweislich der von a) und b) entspricht.
- d) mit einem gepulsten UV-Laser, dessen Anordnung sinngemäß a) oder b) und dessen Bestrahlungswirkung nachweislich der von a) und b) entspricht.

Tabelle 2

Kugeldurchmesser D cm	Mindestwert von A	Höchstwert von A	Mindestwert von B
bis 6,25	$7D$	$9D$	$14S$
10 bis 15	$6D$	$8D$	$12S$
25	$5D$	$7D$	$10S$
50	$4D$	$6D$	$8S$
75	$4D$	$6D$	$8S$
100	$3,5D$	$5D$	$7S$
150	$3D$	$4D$	$6S$
200	$3D$	$4D$	$6S$
250 } 300 }	Für diese Durchmesser sind vorerst noch keine Werte festgelegt.		

Die Bestrahlungsarten a) und c) haben außer bei speziellen Forschungsarbeiten wenig Verbreitung gefunden, da die sehr strengen Sicherheitsbestimmungen über den Umgang mit radioaktiven Präparaten und Röntgenstrahlen ihre Handhabung sehr umständlich machen. Die Bestrahlung mit dem UV-Licht eines Stickstofflasers führt zu einer erheblichen Reduzierung der Streuung und besitzt darüber hinaus den Vorzug einer geringeren Belästigung [762].

Einfluß der Atmosphäre: Die Durchschlagspannung von Kugelfunkenstrecken ändert sich angenähert proportional mit der relativen Luftdichte d , die ihrerseits von der Lufttemperatur ϑ und dem Luftdruck b abhängig ist:

$$d = \frac{b}{1013} \cdot \frac{273 + 20}{273 + \vartheta} = 0,289 \cdot \frac{b}{273 + \vartheta},$$

mit b in mbar und ϑ in $^{\circ}\text{C}$ bzw.

$$d = \frac{b}{760} \cdot \frac{273 + 20}{273 + \vartheta} = 0,386 \cdot \frac{b}{273 + \vartheta},$$

mit b in Torr und ϑ in $^{\circ}\text{C}$.

Die in der Tab. 1 aufgeführten Durchschlagspannungen für atmosphärische Normalbedingungen von 20°C und 1013 mbar ($= 760$ Torr), bei denen die relative Luftdichte $d = 1$ ist, müssen deshalb bei anderen Werten der relativen Luftdichte d umgerechnet werden. Die dafür gültigen Durchschlagspannungen U_{Dd} werden erhalten, indem man die Durchschlagspannungen U_D der Tab. 1 mit einem von d abhängigen Umrechnungsfaktor k gemäß Tab. 3 multipliziert.

$$U_{Dd} = kU_D.$$

Im Bereich $0,95 \leq d \leq 1,05$, in dem hiernach praktisch $k = d$ ist, gilt

$$U_{Dd} = dU_D.$$

Tabelle 3

$d = 0,70$	$0,75$	$0,80$	$0,85$	$0,90$	$0,95$	$1,00$	$1,05$	$1,10$	$1,15$
$k = 0,72$	$0,77$	$0,81$	$0,86$	$0,91$	$0,95$	$1,00$	$1,05$	$1,09$	$1,13$

Bei einer anderen relativen Luftdichte als $d = 1$ ist die Tab. 1 wie folgt zu gebrauchen:

a) Die Durchschlagspannung zu einer bestimmten Schlagweite S wird gesucht:

Der Tabelle wird die zu S gehörende Durchschlagspannung entnommen und mit k (im Bereich $0,95 \leq d \leq 1,05$ mit d) multipliziert.

b) Die zum Durchschlag bei einer bestimmten Spannung erforderliche Schlagweite S wird gesucht:

Die betreffende Spannung wird durch k (im Bereich $0,95 \leq d \leq 1,05$ durch d) dividiert, und zu dieser auf $d = 1$ umgerechneten Durchschlagspannung wird der Tabelle die zugehörige Schlagweite entnommen.

Einfluß der Luftfeuchte: Die Feuchte der Luft hat im Rahmen der angestrebten Genauigkeiten praktisch keinen Einfluß auf die Durchschlagspannung.

Zum Abschluß zeigt Bild 128 die moderne Ausführung einer Kugelfunkenstrecke für Spannungen bis 540 kV.

Wie aus den anfänglich angestellten Betrachtungen hervorgeht, ist die Kugelfunkenstrecke ziemlich empfindlich gegen den Durchgriff von Fremdfeldern und gegen benachbarte auf Erdpotential befindliche Gegenstände. Nach theoretischen und experimentellen Untersuchungen von Binns und Randall [218, 219] weist

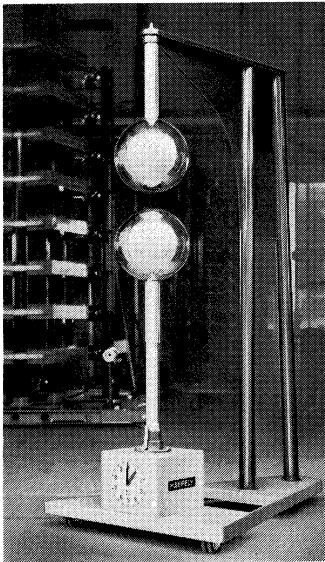


Bild 128. Kugelfunkenstrecke für Spannungen bis 540 kV. Kugeldurchmesser $D = 50$ cm (Haefely).

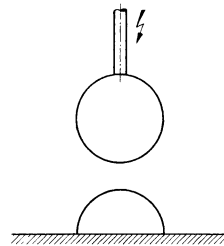


Bild 129. Kugel-Halbkugelfunkenstrecke

die Anordnung nach Bild 129 eine weit geringere Abhängigkeit gegenüber benachbarten geerdeten Wänden und Geräten auf. Sie besitzt daher einen kleineren Schutzraumbedarf. Die Durchschlagspannung der Kugel-Halbkugelfunkenstrecke liegt etwa 5% unter den Werten einer normalen Kugelfunkenstrecke, wenn die Schlagweite gleich dem Kugelradius ist. Für kleinere Schlagweiten werden die Abweichungen geringer. Die Verfasser geben einen Korrekturfaktor

an, mit dem die Durchschlagspannungen der Kugel-Halbkugelfunkenstrecke aus den Standardwerten der Normalkugelfunkenstrecke berechnet werden können (s. a. [761]).

Funkenstrecken mit gekreuzten Zylinderelektroden sind ebenfalls vergleichsweise unempfindlich gegen den Durchgriff äußerer Felder [220]. Gleichzeitig besitzen sie noch den Vorzug, daß die Elektroden mit geringem Aufwand sehr genau hergestellt werden können. Nachteilig bei hohen Spannungen ist allerdings der große Platzbedarf, da die Länge der Zylinder etwa das Fünffache der Schlagweite betragen soll.