

Neueste Erkenntnisse bei der Charakterisierung der berührungslosen Messung elektrostatischer Aufladung mittels Feldmühlen

Carola Schierding¹, Dieter Möckel¹, Martin Thedens¹, Michael Beyer¹

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.7 „Grundlagen des Explosionsschutzes“, Braunschweig

Die Zündfähigkeit einer Entladung, ausgehend von einer aufgeladenen Oberfläche, hängt mit der während des Durchbruches der Gasstrecke übertragenen Impulsladung zusammen. Neben der Impulsladung wird unter anderem der Oberflächenwiderstand oder die Fläche als Kriterium für die sicherheitstechnische Bewertung verwendet. Die Messung der elektrischen Feldstärke mittels Feldmühlen kann berührungslos erfolgen, ohne die Aufladung des Materials zu beeinflussen und ohne eine Entladung zu verursachen. Kann letzteres in jedem Anwendungsfall gewährleistet werden, so wäre das Messverfahren gefahrlos in explosionsgefährdeten Bereichen einsetzbar. Um die Feldmühle als Messgerät zu etablieren, sind genaue Kenntnisse der Messmethode, die Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Messung und die Rückführbarkeit der Messwerte auf nationale Normale erforderlich. Für die messtechnische Charakterisierung der berührungslosen Messung elektrostatischer Aufladungen wurde ein Messaufbau entwickelt, der die zu untersuchenden Parameter (z. B. reale Oberflächengeometrien, Abstandsabhängigkeit) darstellt. Erste Ergebnisse der Charakterisierung unter idealisierten Bedingungen (homogene elektrische Feldkonfigurationen) zeigten, dass die Messgenauigkeit in Bezug auf Abstandsabhängigkeit und Messobjektgröße bestimmt werden können. Zusätzlich wurde eine simulationsbasierte Charakterisierung berücksichtigt. Durch Simulationen konnte ein kegelförmiges Detektionsverfahren des Feldmühlenmesskopfes nachgewiesen werden. Im nächsten Schritt wurde neben der simulationsbasierten Bestimmung des Messwinkels eine messtechnische Methodik zur Bestimmung entwickelt. Der hierfür erweiterte Messaufbau wird hier zusammen mit der analytischen Auswertung betrachtet.

1 Einleitung

Um die Höhe der elektrostatischen Aufladung von Oberflächen mit Angabe der zugehörigen Messgenauigkeit zu messen, wird rückgeführte Messtechnik benötigt. Etablierte Messgeräte zum Nachweis elektrostatischer Ladungen sind das Handcoulombmeter und der Shunt [1, 2]. Ein Nachteil dieser Verfahren ist zum einen, dass sie bei der Bestimmung der Oberflächenladung das Messobjekt beeinflussen, indem sie die elektrostatische Aufladung der Oberfläche mittels einer provozierten Entladung bestimmen. Darüber hinaus können diese Messverfahren nicht angewendet werden, wenn eine explosionsfähige Atmosphäre vorhanden ist. Dieser Problematik würde die Bestimmung der Oberflächenladung mit einer Feldmühle vorbeugen. Mit der Feldmühle wird durch die berührungslose und entladungsfreie Messung elektrostatischer Felder ein Messverfahren bereitgestellt, das eine Messung ohne direkte Beeinflussung des Messobjektes ermöglicht [3, 4]. Um die Feldmühle als Messmittel zu etablieren, sind genaue Kenntnisse des Messprinzips, der Charakterisierung von Einflussfaktoren und der Rückführbarkeit der Messwerte auf nationale Normale erforderlich. Aus diesem Grund wurden bereits Voruntersuchungen zur Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Feldmühlenmessung durchgeführt. Basierend auf diesen Ergebnissen zur Abstandsabhängigkeit und Messobjektgröße unter Verwendung von idealisierten Anordnungen (homogene elektrische Feldkonfigurationen) konnte festgestellt werden, dass die Messung elektrostatischer Ladungen von der Größe der Messoberfläche und dem Abstand zwischen Feldmühle und Messobjekt abhängt. In Folge dessen konnten erste Erkenntnisse über die Messgenauigkeit in Bezug auf Abstandsabhängigkeiten bei

homogenen E-Feld-Konfigurationen erzielt werden. Durch die Vergrößerung des Abstandes konnte eine Erhöhung der Messabweichung bei dem gleichen Messobjekt [5] festgestellt werden. Aus diesem Grund war es notwendig, die Messmethode der Feldmühle genauer zu verstehen, um eine hohe Genauigkeit zu erreichen. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das auf dem Messaufbau von homogenen Elektrodenanordnungen basiert. Hierbei wurde ein passives Untersuchungsverfahren zur Charakterisierung von Feldmühlen entwickelt. Die simulativen Untersuchungen belegen, dass der Messkopf mittels eines kegelförmigen Detektionsverfahrens charakterisiert werden kann. Bei dieser Methode wird der Kegel durch einen Messwinkel α und den betrachteten Abstand definiert. Durch α und den daraus resultierenden Detektionskegel erkennt der Messkopf nicht nur das Messobjekt, sondern auch die geformte Messfläche d_{Kegel} [6]. Hierdurch wird die Erhöhung der Messabweichung mit der Vergrößerung des Abstandes erklärt. Dies erklärt die Zunahme der Messabweichung mit der Zunahme des Abstandes. Basierend auf den ersten Messergebnissen der Abstandsabhängigkeitsuntersuchungen [5] konnte mittels Simulationen für die untersuchte Feldmühle [6] ein Messwinkel α bestimmt werden. Zusätzlich zur simulationsbasierten Charakterisierung des Messwinkels α einer Feldmühle ist eine messtechnische Bestimmung erforderlich. In diesem Beitrag wird die Entwickelte messtechnische Methodik zur Bestimmung des Messwinkels beschrieben und anschließend basierend auf Mess- und Simulationsergebnissen verifiziert.

2 Methodik zur messtechnischen Charakterisierung von Feldmühlen

Für die weitere messtechnische Charakterisierung von Feldmühlen muss der Messaufbau [5] weiterentwickelt werden, damit der bisher nur durch Simulationen [6] ermittelte Messwinkel bestimmt und verifiziert werden kann. Die notwendigen Anpassungen des Messaufbaus werden hier beschrieben, ebenso wie die Erläuterung der entwickelten Methodik zur Bestimmung des Messwinkels. Zur Verifikation des Messwinkels wird ein Vergleich zwischen den ermittelten Messwinkeln durch Simulation und Messung durchgeführt. Des Weiteren wird die prinzipielle Funktionsweise der zur messtechnischen Bestimmung des Messwinkels verwendeten Feldmühle (EMF58 eltex) beschrieben.

2.1 Feldmühle

Mit einer Feldmühle können statische Aufladungen, sowie Auf- und Entladungsprozesse dargestellt und gemessen werden. Die Funktionsweise des Messverfahrens der Feldmühle zur Messung des elektrischen Feldes beruht auf dem Prinzip der Influenz [5], [6], [7]. Das Messverfahren besteht aus einem Messkopf und einer nachgeschalteten Messelektronik. Es gibt verschiedene Designmethoden für den Messkopf und das Gesamtsystem. Das in diesem Beitrag untersuchte elektrische Feldmessgerät funktioniert nach dem bekanntesten und am häufigsten verwendeten Design, welches im Folgenden beschrieben wird. Der Messkopf besteht aus einem rotierenden Chopper, der periodisch die Influenzelektroden auf- und Abdeckung (Messfläche $A(t)$) (Abbildung 1).

Das zu messende elektrische Feld induziert entweder auf den Influenzelektroden oder auf den Influenzelektroden und der Blende Ladungen. Das auf die Feldmühle wirkende elektrische Feld (E-Feld) bewirkt durch die Rotation der Blende einen proportionalen sinusförmigen Strom an der Messelektronik. Zur Anzeige des gemessenen Stroms (Betrag) wird der Wechselstrom verstärkt, gleichgerichtet und als Wert der Feldstärke oder als Oberflächenpotential ausgegeben [4], [5], [6].

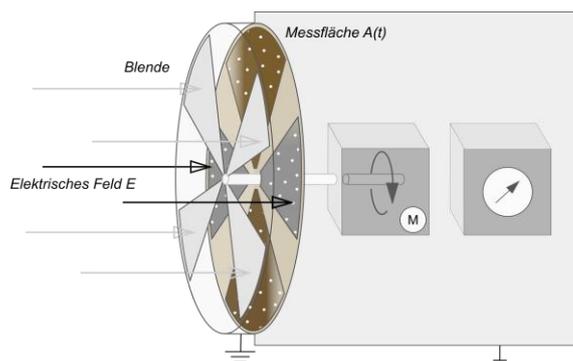


Abbildung 1: Prinzipielle Funktionsweise der Feldmühle (nach [4])

Bei diesem Messverfahren wird die elektrostatische Ladung der Oberfläche nicht direkt durch die Feldmühle und deren Messkopf beeinflusst. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Feldmühle die Ausformung des elektrischen Feldes verändert. Verursacht wird dies durch die Feldmühle und insbesondere durch den äußeren Rand des geerdeten Messkopfes, welcher aufgrund seines Aufbaus eine Inhomogenität darstellt. Hierdurch verzerrt sich das elektrische Feld im Bereich der Inhomogenität (Abbildung 2 a) [4], [6]. Einer derartigen Verzerrung kann entgegengewirkt werden, indem der Messkopf von einer geerdeten Metallplatte (Erdelektrode) bündig eingefasst wird. In Folge der Homogenisierung kommt es durch den Messkopf zu keiner signifikanten Beeinflussung bei der Ausformung des elektrischen Feldes (Abbildung 2 b).

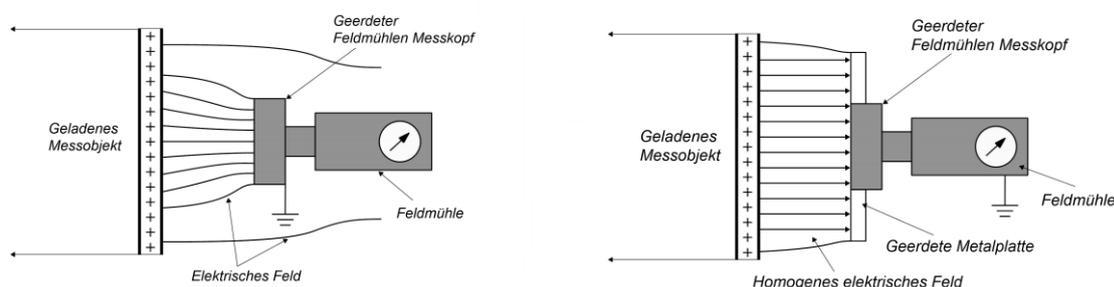
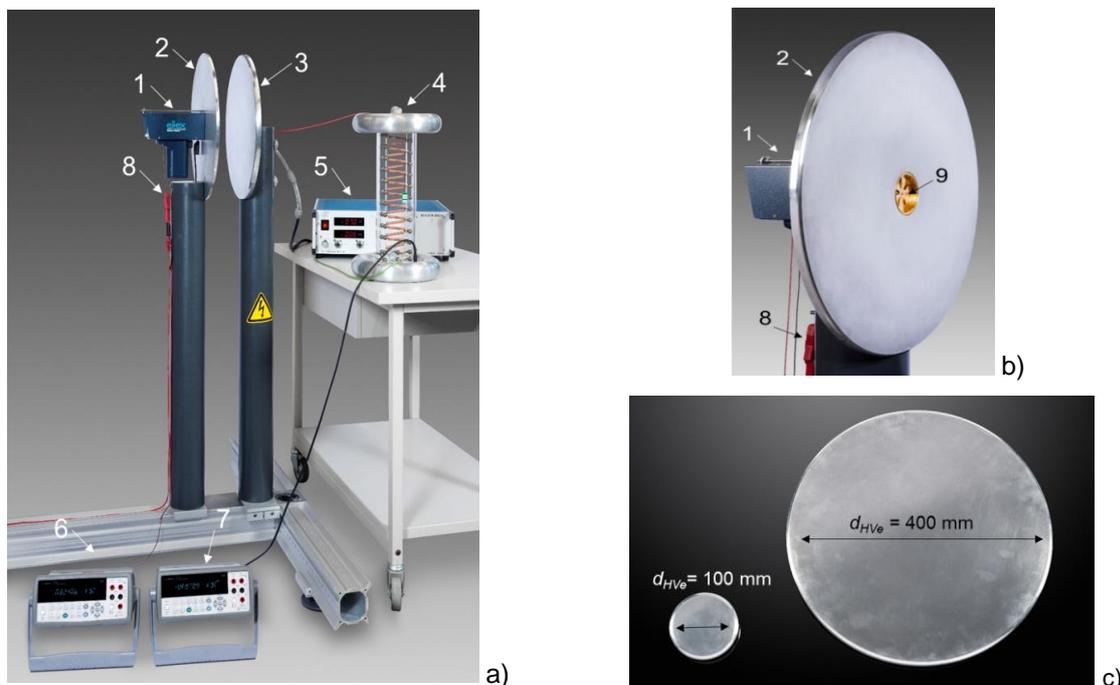


Abbildung 2: a) E-Feld Verzerrung durch Messkopf der Feldmühle (nach [4], [6])
b) E-Feld Homogenisierung durch Erdelektrode (nach [4], [6])

2.2 Messaufbau zur messtechnischen Charakterisierung

Der entwickelte Messaufbau für die methodische Untersuchung der potentiellen Einflussgrößen auf das Messverfahren der Feldmühle [5] wird in dieser Arbeit weiterentwickelt. Dies ermöglicht es, zusätzlich zur Bestimmung des Messwinkels α die Zusammenhänge der Einflussgrößen, den Abstand zwischen Feldmühle und Messobjekt sowie die Messobjektgröße zu untersuchen (Abbildung 3 a). Eine idealisierte Anwendung der Feldmühle wird für den Entwurf des Messaufbaus zur Homogenisierung der elektrischen Feldverteilung verwendet. Im Aufbau wird der Messkopf der Feldmühle zentriert in eine Erdelektrode ($d_{ge} = 400 \text{ mm}$) eingesetzt und an einem isolierenden Stativ befestigt, wie in Abbildung 3 b dargestellt. Die Messobjekte werden auf einem zweiten isolierenden Stativ parallel und gegenüberliegend positioniert. Hierbei handelt es sich um Metallprofile, die mit einer einstellbaren DC-Hochspannungsquelle (HV-DC-Generator; negative Polarität; 0 kV - 40 kV;) verbunden sind. Die Gleichspannung U_{HV} wird durch einen kalibrierten Spannungsteiler bestimmt. Die Feldmühle (EMF58) verfügt über einen externen

Schreiberausgang zur Erfassung des Messsignals über ein Digitalmultimeter [5]. Zur messtechnischen Bestimmung von α werden vier kreisförmige Plattenelektroden (HV-Elektroden) mit den Durchmessern $d_{HVe} = 100$ mm, 200 mm, 300 mm und 400 mm als Messobjekte eingesetzt. Beispielhaft sind in Abbildung 3 c die HV-Elektroden $d_{HVe} = 100$ mm und $d_{HVe} = 400$ mm zu sehen. Mit dieser parallelen Elektrodenanordnung zur Erreichung eines homogenen E-Feldes werden Abstandsuntersuchungen (Abstände $a = 20$ mm – 800 mm) durchgeführt und anschließend der Messwinkel durch analytische Betrachtungen ermittelt.



- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1: Feldmühle EMF58 | 6: Multimeter: Schreiberausgang EMF58 |
| 2: Erdelektrode $d_{ge} = 400$ mm | 7: Multimeter: Spannung U_{HV} |
| 3: HV-Elektrode $d_{HVe} = 400$ mm | 8: Erdung |
| 4: Spannungsteiler | 9: Messkopf $d_{FM} = 55$ mm |
| 5: HV-DC Generator | |

Abbildung 3: a) Messaufbau zur messtechnischen Charakterisierung [5]

b) Feldmühle mit Erdelektrode [5]

c) Kreisförmige Plattenelektroden mit $d_{HVe} = 100$ mm und 400 mm [5]

2.3 Methodik zur messtechnischen Bestimmung des Messwinkels

Die Methodik zur messtechnischen Bestimmung des Messwinkels beruht auf dem Prinzip der Abstandsabhängigkeitsuntersuchungen. Hierbei wird die gemessene elektrische Feldstärke E_{mess} mit der erwarteten elektrischen Feldstärke E_h des homogenen Feldes für verschiedene Abstände a verglichen. Dafür wird der Verhältnisfaktor x_m nach Gleichung (1) mit Gleichung (2) [2] gebildet.

$$x_m = E_h / E_{mess} \quad (1)$$

$$E_h = U_{HV} / a \quad (2)$$

Es wird davon ausgegangen, dass der Detektionskegel des Messkopfes nur das Messobjekt detektiert solange $x_m \sim 1$ gilt. Unter Berücksichtigung von Messabweichungen wird der

Grenzwert für den Verhältnissfaktor x_m auf $x_m = 1,11$ festgelegt. Beim Erreichen oder Überschreiten des Grenzwertes wird davon ausgegangen, dass bei diesem ermittelten Abstand die Messfläche des Detektionskegels (d_{Kegel}) gleich der Messobjektgröße (d_{HVe}) ist, wie in Abbildung 4 exemplarisch dargestellt. Die Definition, welcher Grenzwert für den Abstand a genommen wird, hängt vom Verhältnissfaktor x_m ab. Wenn das Verhältnis von $x_m = 1,11$ zum letzten Mal über den gesamten Abstandsbereich a erreicht wird, ohne dass dieser anschließend abnimmt und nur stetig ansteigt, dann wurde der Grenzwert für a gefunden. Dies bedeutet, wenn $x_m > 1,11$ erreicht ist, dass der Messkopf nicht nur das Messobjekt erfasst. Nach Ermittlung des Abstandes a , wo $x_m \leq 1,11$ gilt, wird über die trigonometrische Berechnung nach Gleichung (3) der Messwinkel α bestimmt, welcher den Detektionskegel aufspannt. Hierfür wird der Wert von b_{HVe} benötigt, der sich aus der Differenz zwischen dem Radius der HV-Elektrode r_{HVe} und dem Radius des Messkopfes r_{FM} (4) ergibt.

$$\alpha = \tan^{-1} (b_{HVe} / a) \quad (3)$$

$$b_{HVe} = r_{HVe} - r_{FM} \quad (4)$$

Dieser Ansatz wird für vier Messobjekte mit unterschiedlichen Durchmessern d_{HVe} ($d_{HVe} = 100$ mm, 200 mm, 300 mm und 400 mm) durchgeführt, um einen definierten und reproduzierbaren Messwinkel α innerhalb eines homogenisierten Messaufbaus unabhängig von der Messobjektgröße zu bestimmen. Bei der Durchführung der messtechnischen Methodik wird das gemessene elektrische Feld (Mittelwert über 10 Messungen) für die Abstände von $a = 20$ mm bis 200 mm in Messintervallen von $\Delta a = 10$ mm und für einen Abstand von 400 mm und 800 mm bestimmt (Abbildung 4). Aufgrund der zunehmenden Messabweichung bei Voruntersuchungen ($d_{ge} = 400$ mm, $d_{HVe} = 400$ mm) [5] wurde beschlossen, die Abstandsintervalle ab einem Abstand von $a = 200$ mm zu vergrößern, da davon ausgegangen werden kann, dass die Feldmühle nicht nur das Messobjekt erkennt. Darüber hinaus wird der Maximalwert der an der HV-Elektrode anliegenden Gleichspannung U_{HV} basierend auf dem Messbereich der untersuchten Feldmühle und dem Mindestabstand von $a = 20$ mm bestimmt. Dies geschieht, um mögliche Messfehler der Messelektronik durch Überschreitung des Messbereiches vermeiden zu können. Und damit es zu keinen Überschlügen zwischen der HV-Elektrode und dem Messkopf der Feldmühle kommen kann und so eine Beschädigung des Messmittels vermieden wird.

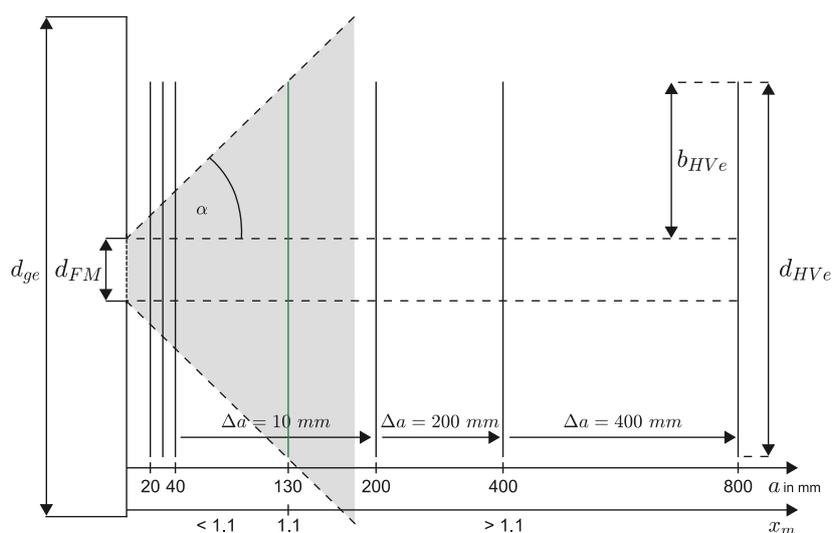


Abbildung 4: Prinzip der Methodik zur messtechnischen Bestimmung des Messwinkels α [8] (hier: $x_m = 1,11$ bei $a = 130$ mm; $d_{FM} = 55$ mm, $d_{ge} = 400$ mm, $d_{HVe} = 300$ mm)

2.4 Ergebnisse und Verifikation der Methodik zur Bestimmung des Messwinkels

Zur Bestimmung des Messwinkels α der hier betrachteten Feldmühle wird die beschriebene Methodik verwendet. Hierfür wird die Feldmühle zunächst im Messaufbau mit der HV-Elektrode des größten Durchmessers $d_{HVe} = 400$ mm auf die Abstandsabhängigkeit im Abstandsbereich $a = 20$ mm bis 200 mm, 400 mm, 800 mm jeweils mit den entsprechenden Intervallen Δa untersucht (Abbildung 4). Anschließend werden die HV-Elektroden unterschiedlicher Größe als Messobjekte variiert. An die HV-Elektrode wird aufgrund des Messbereichs der Feldmühle eine konstante Gleichspannung von $U_{HV} = 4$ kV angelegt. Durch die Verhältnisfaktoren x_m (1) wird der jeweilige Grenzwert und die daraus resultierenden Abstände für die HV-Elektroden, wo $x_m \leq 1,11$ gilt, bestimmt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Messwinkel (3), wodurch ein Messwinkel von $\alpha = 45^\circ \pm 3^\circ$ ermittelt werden konnte. Zusätzlich wurden die Messungen mit einer Gleichspannung von $U_{HV} = 10$ kV wiederholt, wodurch eine Erhöhung des geringsten Untersuchungsabstandes auf $a = 40$ mm erfolgte. Dies dient zur Überprüfung, ob die entwickelte Methodik unabhängig von der elektrischen Feldstärke oder der Höhe der angelegten DC Spannung ist. Sowie um festzustellen, ob die Methodik reproduzierbar ist. Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen sind in der Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Messergebnisse mit einem Messkopfdurchmesser von $d_{FM} = 55$ mm
(markierte Zeilen: Grenzwerte für a , wobei $x_m \leq 1,11$ gilt, nach [8])

d_{HVe} in mm			400			300			200			100		
b_{HVe} in mm			172,5			122,5			72,5			22,5		
a in mm			160	170	180	120	130	140	70	80	90	20	30	40
U_{HV} in kV	4	x_m	1,11	1,10	1,15	1,10	1,11	1,13	1,09	1,11	1,14	1,11	1,12	1,14
	10	x_m	1,10	1,11	1,13	1,10	1,11	1,13	1,10	1,11	1,14	-	-	1,12
α in°			47	45	44	46	43	41	46	42	39	48	37	29

Es ist erkennbar, dass für die HV-Elektroden $d_{HVe} = 400$ mm, 300 mm und 200 mm identische Messwinkel für $U_{HV} = 4$ kV und 10 kV bestimmt werden konnten. Dies war für die HV-Elektrode $d_{HVe} = 100$ mm aufgrund des Mindestabstandes von $a = 40$ mm bei $U_{HV} = 10$ kV nicht möglich. Dennoch kann festgestellt werden, dass die entwickelte Methodik unabhängig von der gemessenen Feldstärke E_{mess} und reproduzierbar ist. Vergleicht man nun den messtechnisch ermittelten Messwinkel mit dem zuvor durch Simulation bestimmten Messwinkel aus [6] miteinander (Tabelle 2), ist zu sehen, dass diese Winkel übereinstimmen. Wobei der messtechnisch bestimmte Messwinkel einen genaueren Bereich von $\alpha = 45^\circ \pm 3^\circ$ aufweist. Hierdurch erfolgte zusätzlich eine Verifikation der Methodik zur messtechnischen Bestimmung des Messwinkels und kann folglich zur Charakterisierung einer Feldmühle eingesetzt werden.

Tabelle 2: Vergleich des messtechnischen und durch Simulation bestimmten Messwinkels α
(Simulationsergebnisse aus [6])

Methodik	Messwinkel α
Messtechnisch	$45^\circ \pm 3^\circ$
Simulation	$45^\circ \pm 5^\circ$

3 Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt die weitere Entwicklung der messtechnischen Charakterisierung von Feldmühlen. Hierfür wird die entwickelte Methodik zur messtechnischen Bestimmung des Messwinkels α beschrieben, sowie die dadurch notwendige Erweiterung des bereits vorhandenen Messaufbaus zur Charakterisierung. Durch die messtechnische Methodik konnte ein Messwinkel von $\alpha = 45^\circ \pm 3^\circ$ für die untersuchte Feldmühle ermittelt werden, der den resultierenden Detektionskegel definiert. Zusätzlich konnte die Methodik durch weitere Messungen verifiziert werden. Des Weiteren konnte der messtechnisch ermittelte Messwinkel durch das vorherige Simulationsergebnis mit $\alpha = 45^\circ \pm 5^\circ$ bestätigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] T. Langer, M. Beyer and U. v. Pidoll, "Messtechnische Charakterisierung elektrostatischer Entladungen", *Technisches Messen*, pp. 516 - 524, 2008.
- [2] A. Küchler, "Hochspannungstechnik - Grundlagen - Technologie – Anwendungen", 3. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017.
- [3] G. Lüttgens, "Expert Praxislexikon Statische Elektrizität", Expert Verlag, 2000.
- [4] G. Lüttgens, "Statische Elektrizität begreifen - beherrschen – anwenden", 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Expert Verlag, 2002.
- [5] C. Schierding, D. Möckel, C. Ladda and M. Beyer, "Messtechnische Charakterisierung der berührungslosen Messung elektrostatischer Aufladungen mittels Feldmühlen", 13. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit, Köthen, Germany, Nov 2017.
- [6] C. Schierding, D. Möckel, T. Runge, T. Meyer, C. Ladda and M. Beyer, "Metrological and simulation-based characterization of the non-contact measurement of electrostatic charge by means of electric field meters", 12th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Kansas City, USA, August 2018.
- [7] J. N. Chubb, "Two New Designs of „Field Mill“ Type Fieldmeters not Requiring Earthing of Rotating Chopper", *IEEE Transactions on industry applications*, Vol.26, No. 6, 1990.
- [8] C. Schierding, D. Möckel, M. Thedens, M. Beyer, M. Kurrat, „Further Developments of metrological and simulation-based characterization of the non-contact measurement of electrostatic charge by means of electric field meters", 21st International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, August 2019, (zur Veröffentlichung angenommen)