

# 1 Einführung

Gleitentladungen sind dielektrisch behinderte Gasentladungen, die sich auf Isolierstoffoberflächen ausbilden. Ein klassisches Elektrodensystem, mit dem schon Lichtenberg seine berühmten Figuren erzeugte /Lichtenberg/, besteht aus einer Metallplatte, die mit einem festen Isolierstoff bedeckt ist (Bild 1.1a). Auf den Isolierstoff ist eine kleine spitze Elektrode aufgesetzt, die /Toepler/ als „Gleitpol“ bezeichnet. Bei Erregung mit veränderlicher Spannung kommt es schon bei verhältnismäßig kleiner Spannungsamplitude in atmosphärischer Luft zur Ausbildung transienter Entladungen, die sich in unmittelbarem Kontakt mit der Oberfläche am Gleitpol beginnend ausbreiten (Bild 1.1b).

Derartige Elektrodensysteme treten in abgewandelter Form in vielen hochspannungstechnischen Geräten - wie z.B. Transformatoren, Kabeln und Schaltanlagen - bei den Durchführungen und Ausleitungen auf /z.B. Kind, Kärner/. Aus diesem Grund wurde die zeitliche und räumliche Entwicklung von Gleitentladungen in der Vergangenheit vor allem im Hinblick auf die Begrenzung der elektrischen Festigkeit von Hochspannungsgeräten untersucht /z.B. Zipp; Toepler; Gänger<sub>1982</sub>/.

Unter anderem Blickwinkel sind Gleitentladungen zu sehen, mit denen chemische Reaktionen in Gasen initiiert oder Oberflächen behandelt werden. /Masuda u.a.<sub>1988</sub>/, /Humpert u.a./, /Richter/, /Pietsch u.a./, /Gibalov u.a./ und /Haacke/ haben gezeigt, wie Gleitentladungen für die Erzeugung von Ozon genutzt werden können. Auch Abgase können auf diesem Wege behandelt werden /Masuda u.a.<sub>1993</sub>/.

Der Einsatz einer Gleitentladungsanordnung erweist sich hierbei aufgrund der geringen Zündspannung und der guten Abfuhr der unvermeidlichen Verlustwärme als vorteilhaft.

Für die Behandlung von Oberflächen bei Atmosphärendruck werden seit langem sogenannte Barrierentladungen mit großem Erfolg industriell eingesetzt /z.B. von der Heide, u.a./. Barrierentladungen werden in Anordnungen erzeugt, bei denen in dem Gasspalt zwischen den Elektroden mindestens eine Isolierstoffbarriere eingefügt ist (Bild 1.2). Bei Erregung mit ausreichend hoher Wechselspannung entstehen im Gasspalt in bekannter Weise viele parallele Entladungsfilamente, sogenannte Mikroentladungen, denen die zu behandelnden Oberflächen ausgesetzt werden. Durch Einwirkung der Entladungen werden physikalische und chemische Reaktionen angeregt, die die gewünschte Änderung der Oberflächeneigenschaften bewirken. Besonders effizient und wirtschaftlich können auf diese Weise ausgedehnte bewegte Bahnen behandelt werden /z.B. Gerstenberg; Salge; Rott, u.a./. Die einzelnen Mikroentladungen selbst bestehen aus einem Mikroentladungskanal, der den Gasspalt überbrückt, und aus Gleit-

entladungen, die sich von den Fußpunkten der Mikroentladungen auf der zu behandelnden Oberfläche ausbreiten /z.B. Reitz, Meiners, Drews/. In Bild 1.2 ist dies schematisch für eine Entladung dargestellt. Für Oberflächenbehandlungen ist es wünschenswert, den Gleitentladungsanteil so groß wie möglich zu machen und eine im Mittel gleichmäßige Einwirkung der Entladungen auf die Oberfläche zu erzielen. Hier setzt die vorliegende Arbeit an.

Einen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet zunächst die fotografische Erfassung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Leuchterscheinungen von Gleitentladungen bei ausgedehnten Elektrodenanordnungen. Wesentliches Ziel dieser Untersuchungen ist es, festzustellen, ob und auf welche Weise die Ausbreitung von Gleitentladungen, ihre Länge und die gleichmäßige Oberflächenbedeckung durch Spannungsform, Gasart, Gasströmung, Menge der zur Verfügung stehenden Energie sowie durch Gestaltung des Elektrodensystems und der Isolierstoffoberfläche beeinflusst werden kann. Besondere Aufmerksamkeit wird in diesem Zusammenhang Elektrodensystemen gewidmet, bei denen alle Elektroden unter einer Isolierstoffbarriere angeordnet und vollkommen von elektrisch festem Isoliermaterial umgeben sind.

Sodann werden Überlegungen zur Konzeption von Systemen angestellt, die eine Oberflächenbehandlung von bewegten Isolierfolien mit Gleitentladungen erlauben. Dabei wird diskutiert, ob und welche Vorteile gegebenenfalls im Vergleich zu bekannten Barrierenentladungssystemen bestehen. Den Abschluß der Arbeit bilden orientierende Behandlungsversuche in ausgewählten Modellanordnungen.

## 2 Räumliche und zeitliche Entladungsentwicklung

Mit der Entwicklung von Gleitentladungen und den dabei ablaufenden Vorgängen haben sich viele Autoren bis in die jüngste Vergangenheit beschäftigt. /Murooka u.a.<sup>2001</sup>/ haben beispielsweise gezeigt, daß sich Gleitentladungen auf Isolierstoffoberflächen bei Atmosphärendruck mit Geschwindigkeiten von ca.  $10^6$  m/s ausbreiten. /Larigaldie u.a./ haben untersucht, wie sich 1 m lange Gleitentladungen aus aufgesprühten Ladungen entwickeln können. Das Verständnis der Entwicklung von Entladungen wurde wesentlich durch die Arbeiten von /Pietsch, Gibalov und Mitarbeitern/ verbessert. Mit Hilfe von Staubfiguren wurde die unterschiedliche Entladungsbildung bei positiven und negativen Spannungspulsen gezeigt. Es wurden Entladungsverläufe modelliert und Elektronendichte- und Feldverteilungen berechnet.

Eine Erweiterung und Vertiefung der Kenntnisse über die räumliche und zeitliche Gleitentladungsentwicklung wird mit den im folgenden geschilderten Untersuchungen vor allem durch den Einsatz von Kurzzeitfotographie erreicht.

### 2.1 Versuchs- und Meßeinrichtungen

Zur Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Entladungsentwicklung wird ein Versuchsaufbau eingesetzt, der neben dem eigentlichen Versuchsgefäß aus verschiedenen Meßeinrichtungen zur zeitaufgelösten elektrischen und optischen Erfassung der Gleitentladungen, dem Gasversorgungssystem und dem Energieversorgungssystem besteht.

#### 2.1.1 Versuchsgefäß und Gasversorgung

##### Versuchsgefäß

Bild 2.1 stellt schematisch das Versuchsgefäß dar, das aus mehreren Acrylglasbauteilen zusammengesetzt ist. Der Grundkörper (1) hat die äußeren Abmessungen 150 x 170 x 30 mm (l x b x h). Mit Hilfe der Kunststoffschrauben (3) und zwei Dichtungsringen (4) wird das untersuchende Elektrodensystem (2) - im Bild ist ein Beispiel eingezeichnet - über den Andruckrahmen (5) gasdicht in den Grundkörper eingepreßt. Auf den Grundkörper wird ein Abstandsrahmen (6) gesetzt, auf dem die Abdeckscheibe (7) und der Halterahmen (8) aufliegen. Durch die Abdeckscheibe (Floatglas 2 mm dick) erfolgt die Entladungsbeobachtung in Draufsicht (13). Mit Kunststoffschrauben (9) und drei Dichtungsringen (10) wird ein dichter Gasraum (11) mit den Abmessungen 80 x 80 x 31 mm (l x b x h) über dem Elektrodensystem aufgebaut. Das Volumen des Gasraums beträgt ca. 0,2 l. Zusätzlich ist seitlich in den Grundkörper ein Beobachtungsfenster (12) aus Floatglas (2 mm dick) eingebaut (l x h: 50 x 25 mm),

das die seitliche Beobachtung (14) der Gleitentladungen erlaubt (unteres Bild in Bild 2.1). Die verschiedenen Versuchsgase bzw. -gasgemische werden über drei Gaseinlaßbohrungen (15;  $\varnothing$  3 mm) in den Gasraum (11) geleitet und strömen über drei gegenüberliegende Gasauslaßbohrungen (16;  $\varnothing$  3 mm) wieder hinaus (unteres Bild in Bild 2.1). Der Gasdurchsatz durch das Versuchsgefäß ist durch die Druckminderer begrenzt und liegt im Bereich von 0 bis 10 l/min. Bei einem Gasdurchsatz von 10 l/min durch das Versuchsgefäß liegt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Elektrodensystem bei 6,7 cm/s.

### Gasversorgung

Das Versuchsgefäß kann mit verschiedenen inerten und reaktiven Gasen versorgt werden, die einer Gasversorgungsanlage entnommen werden (Bild 2.2). Die einzelnen Gase (Stickstoff, Helium, Argon, Acetylen und trockene Druckluft) strömen - jeweils mit einem eigenen Druckminderer und Durchflußmesser ausgestattet - aus den Gasflaschen bzw. aus dem Druckluftnetz gemeinsam durch die Zufuhrleitung in das Versuchsgefäß. In der Acetylenzufuhrleitung befindet sich ein Flammenrückschlagventil. Die Gase werden aus dem Versuchsgefäß über eine Abluftleitung nach außen geleitet, so daß sich im Versuchsgefäß ein im Atmosphärendruckbereich liegender Innendruck einstellt.

## **2.1.2 Energieversorgungen**

Als Energieversorgungssysteme werden in erster Linie die von Barrierenentladungen bekannten und bewährten Wechselspannungsquellen eingesetzt, die eine repetierende Entladungserzeugung erlauben. Bei den Untersuchungen wird neben sinusförmigen auch mit von der Sinusform abweichenden Spannungen gearbeitet. Weiterhin wird eine Stoßspannungsschaltung eingesetzt, mit der einzelne steile Spannungspulse erzeugt werden können. Die Energieversorgungen befinden sich in unmittelbarer Nähe des Versuchsgefäßes und werden von einer Meßkabine aus ferngesteuert.

### Erzeugung von sinusförmigen Spannungen

Zur Erzeugung von sinusförmigen Spannungen wird der in Bild 2.3 schematisch dargestellte Hochspannungsgenerator eingesetzt (Fa. Softal electronic, Modell 6340). Die aus dem 400 V-Netz aufgenommene Energie wird über einen Spartransformator  $T_1$  und einen Gleichrichter  $V_0$  dem Gleichspannungs-Zwischenkreis (dargestellt als  $L_{ZK}$  und  $C_{ZK}$ ) zugeführt. Die Zwischenkreisspannung  $U_{ZK}$  wird über  $C_{ZK}$  gemessen und kann im Bereich von 0 bis 540 V eingestellt werden. Mit dem Zwischenkreis ist ein Reihenschwingkreis-Wechselrichter verbunden, bei dem vier IGBTs ( $V_1$ - $V_4$ ) mit jeweils einer eigenen Freilaufdiode ( $D_1$  -  $D_4$ ) als Schaltelemente eingesetzt werden. Die IGBTs sind zu einer Vollbrückenschaltung zusammen-

geschaltet. Die Ansteuerung schaltet jeweils die diagonal im Brückenweig liegenden IGBTs ( $V_1+V_4$ ) bzw. ( $V_2+V_3$ ) im Gegentakt. An die Brückenschaltung ist ein Hochspannungstransformator  $T_2$  angeschlossen, der die Spannung auf eine Amplitude von bis zu 30 kV hochtransformiert. Das Versuchsgefäß ist an die Sekundärseite von  $T_2$  angeschlossen. Ein Sekundärspulenanschluß ist geerdet.

Die Ansteuerfrequenz (Betriebsfrequenz  $f$ ) ist im Bereich von 10 kHz bis 100 kHz einstellbar. Eine Fernsteuerung wirkt auf die Ansteuerung ein und ermöglicht das Ein- und Ausschalten der Hochspannungserzeugung.

### Kontinuierlicher Betrieb des Generators

Im „kontinuierlichen Betrieb“ des Wechselrichters werden die IGBTs fortlaufend wechselseitig angesteuert (Bild 2.4a). Mit einer Zwischenkreisspannung  $U_{ZK} > 0$  entsteht eine sinusförmige Spannung  $U$  über dem Versuchsgefäß mit der eingestellten Betriebsfrequenz  $f$ .

Die in das Entladungssystem einkoppelbare Leistung läßt sich im kontinuierlichen Betrieb über die Parameter Betriebsfrequenz und Höhe der Zwischenkreisspannung steuern. Die Spannungsamplitude über dem Entladungssystem und die eingekoppelte Leistung ist maximal, wenn bei höchster Zwischenkreisspannung die gewählte Betriebsfrequenz mit der Resonanzfrequenz des schwingungsfähigen Gesamtsystems übereinstimmt /Hagmann/. Die Resonanzfrequenz des schwingungsfähigen Gesamtsystems wird hauptsächlich von der Streuinduktivität, der Wicklungskapazität des Transformators  $T_2$  und von der Kapazität des Versuchsgefäßes bestimmt /Schwarz/.

### Pulsbetrieb des Generators

In der Betriebsart „Pulsbetrieb“ beginnt ab dem Zeitpunkt  $t_1$  die Einschaltzeit  $t_{\text{EIN}}$  (Bild 2.4b). Von dem Zeitpunkt an werden die IGBT-Paare  $V_1+V_4$  bzw.  $V_2+V_3$  im Gegentakt angesteuert. Die Spannung über dem Versuchsgefäß schwingt auf. Zum Zeitpunkt  $t_2$  endet die Einschaltzeit. Die Ansteuerung der IGBTs wird für die Dauer der Ausschaltzeit  $t_{\text{AUS}}$  unterbrochen, wodurch die über dem Versuchsgefäß anliegende Spannung wieder bis auf 0 V ausschwingt ( $t_3$ ). Die innerhalb des Zeitraums von  $t_1$  bis  $t_3$  erzeugte Hochspannung wird in dieser Arbeit als Pulszug bezeichnet. Die Pulszüge wechseln sich mit Pausen ab, in denen keine Spannung über dem Entladungssystem anliegt. Die Einschaltzeit  $t_{\text{EIN}}$  kann über die Ansteuerung im Bereich von 5  $\mu\text{s}$  bis 400  $\mu\text{s}$  vorgegeben werden. Weiterhin ist es möglich, die Anzahl der zu erzeugenden Spannungshalbschwingungen im Zeitraum zwischen  $t_1$  und  $t_2$  vorzugeben (1 bis 9 Halbschwingungen). Die Ausschaltzeit  $t_{\text{AUS}}$  ist im Bereich von 8  $\mu\text{s}$  bis 1,6 ms einstellbar.