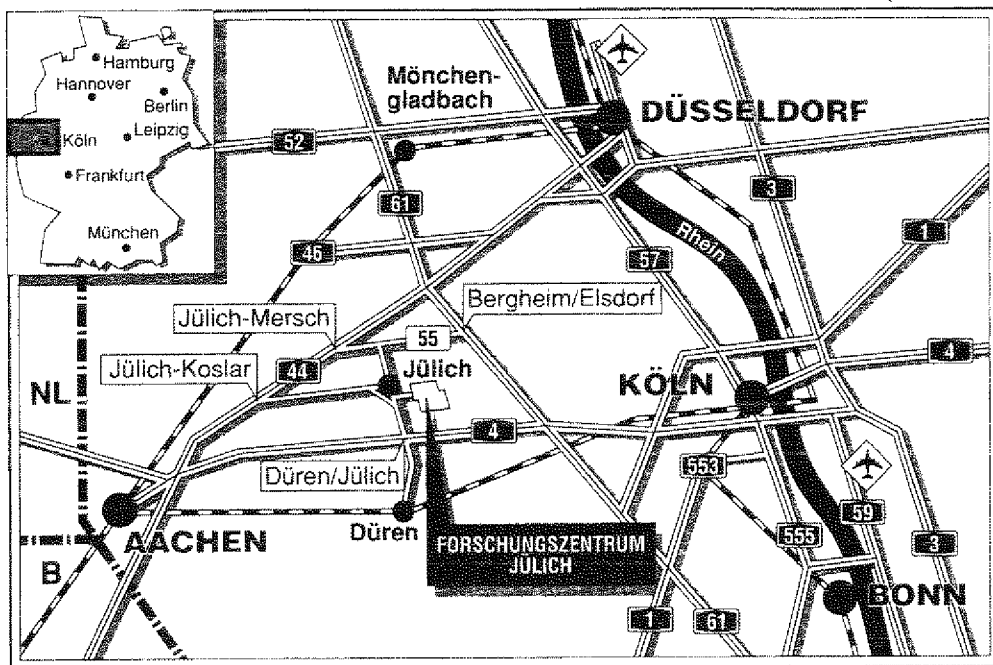


TEXID 7 28

*Institut für Plasmaphysik
Assoziation EURATOM-KFA*

**Barrierenentladungen
zur plasmagestützten
Oberflächenbehandlung**

Uwe Reitz



Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 2613

ISSN 0366-0885

Institut für Plasmaphysik Jüli-2613

Assoziation EURATOM-KFA

D84 (Diss. TU Braunschweig)

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek

Postfach 19 13 · D-5170 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

Telefon: 02461/61-6102 · Telefax: 02461/61-6103 · Telex: 833556-70 kfa d

Barrierenentladungen zur plasmagestützten Oberflächenbehandlung

Uwe Reitz

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1987 bis 1991 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochspannungstechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Herr Professor Dr.-Ing. Jürgen Salge hat die Arbeit angeregt. Er ermöglichte mir eine selbständige Arbeitsweise, förderte die Arbeit durch zahlreiche engagierte, richtungweisende Diskussionen und unterstützte mich in jeder Hinsicht. Sehr gründlich und kritisch nahm er die Durchsicht des Manuskripts vor.

Herr Professor Dr. rer. nat. Georg Wahl, Leiter des Instituts für Oberflächentechnik und plasmatechnische Werkstoffentwicklung, übernahm das zweite Referat, das er mit einer raschen und sehr interessierten Durchsicht der Arbeit verband.

Der geschäftsführende Leiter des Instituts für Hochspannungstechnik, Herr Professor Dr.-Ing. Hermann Kärner, hat die Arbeit mit Interesse verfolgt und unterstützt.

Herr Professor Dr.-Ing. Dieter Kind, Präsident der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig, ermöglichte die Durchführung zahlreicher Messungen zur Analyse der erzeugten Schichten.

Die angenehme Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Instituts für Hochspannungstechnik und insbesondere der Versuchsanlage Hallendorf und deren kollegiale Hilfe haben zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Mit großer Einsatzfreude haben Studenten im Rahmen von Entwurfs-, Studien- und Diplomarbeiten Untersuchungen durchgeführt und einen Beitrag zum erfolgreichen Abschluß der Arbeit geleistet.

Die Arbeit entstand im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Institut für Plasmaphysik des Forschungszentrums Jülich (KFA) GmbH.

Den genannten Personen und Institutionen danke ich herzlich für ihre tatkräftige Unterstützung.

Barrier-discharges for plasma-assisted surface treatment

Thesis by Uwe Reitz

Technische Universität Braunschweig

Germany 1992

This thesis deals with fundamental investigations of barrier-discharges in order to use this kind of gasdischarges for surface treatment. At first characteristic properties of barrier-discharges are pointed out. Barrier-discharges are consisting of microdischarges, which are in the centre of interest.

The experimental and measuring equipment is described. A high-voltage-pulse-generator for steep voltage pulses of high repetition rates and a discharge vessel with a transparent electrode to observe the discharges have been developed for the investigations.

The time- and space-depending behaviour of barrier-discharges is investigated. Kind and pressure of the gas, the geometric arrangement and the supplied voltage are varied in order to achieve a uniform distribution of the microdischarges. The discharges are characterized by their current and voltage shapes. Discharge conditions suitable for the treatment of surfaces are discussed.

The deposition of hydrocarbon thin films on glass substrates is demonstrated successfully. The process characteristics leading to a film of high quality are described. The influence of the discharge characteristics on the film properties is discussed.

Übersicht

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit grundsätzlichen Untersuchungen von Barrierenentladungen im Hinblick auf die Anwendung dieser Art von Gasentladungen zur Oberflächenbehandlung. Zur Einführung werden zunächst die wesentlichen Eigenschaften von Barrierenentladungen dargestellt. Im Mittelpunkt stehen dabei die Mikroentladungen, aus denen sich Barrierenentladungen zusammensetzen.

Die in dieser Arbeit verwendeten Versuchs- und Meßeinrichtungen werden beschrieben. Darunter sind ein speziell entwickelter Hochspannungspulsgenerator zur Erzeugung steiler, schnell repetierender Spannungsimpulse und ein Versuchsgefäß mit transparenter Elektrode zur Beobachtung der Leuchterscheinungen.

Das zeitliche und räumliche Verhalten von Barrierenentladungen wird untersucht. Dabei werden die Gasart und der Gasdruck, die geometrische Anordnung und die Art der erzeugenden Spannung mit dem Ziel variiert, eine gleichmäßige Verteilung der Mikroentladungen zu erreichen. Einen Schwerpunkt bildet die Charakterisierung der Entladung anhand von Strom- und Spannungsverläufen. Es wird diskutiert, welche Entladungsbedingungen sich für die Behandlung von Oberflächen eignen.

Weitere Untersuchungen haben die Erzeugung einer Kohlenwasserstoffschicht auf einem Glassubstrat zum Ziel. Die Prozeßbedingungen für eine qualitativ hochwertige Schicht werden beschrieben. Der Einfluß der Entladungsbedingungen auf die Schichteigenschaften wird diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1. <u>Einführende Betrachtungen</u>	4
1.1 Anwendungen von Barrierenentladungen	4
1.2 Entstehung und Eigenschaften von Mikroentladungen	7
1.3 Die Gesamtentladung als Summe der Mikroentladungen	12
1.4 Einfluß der Entladungsbedingungen auf die Eigenschaften von Barrierenentladungen	16
1.5 Schlußfolgerungen	18
2. <u>Versuchs- und Meßeinrichtungen</u>	20
2.1 Hochspannungspulsgenerator	21
2.2 Andere Spannungsversorgungen	22
2.3 Versuchsgefäße und gastechnische Anlage	24
2.4 Meßtechnische Erfassung der Barrierenentladung	27
3. <u>Grundsätzliche Untersuchungen zum zeitlichen und räumlichen Verhalten von Barrierenentladungen</u>	30
3.1 Zeitlicher Verlauf des Entladungsstroms	30
3.2 Einfluß von Gasdruck und Gasart	32
3.2.1 Entladungsverhalten in Argon bei verschiedenen Drücken	32
3.2.2 Vergleich mit anderen Gasen	35
3.2.3 Auswirkung des Drucks auf die Zündspannung	36

3.3 Einfluß der geometrischen Anordnung	38
3.3.1 Steigerung der Spaltweite	39
3.3.2 Entladungen im Metallgefäß	41
3.4 Einfluß der Spannung	43
3.4.1 Verschiedene Zündzeitpunkte und Zündspannungen	43
3.4.2 Anstieg der Spannung	46
3.4.3 Polarität der Spannung	49
3.5 Einfluß der Frequenz	51
3.5.1 Zündspannung und Stromverlauf	51
3.5.2 Verteilung der Mikroentladungen	54
3.6 Zusammenfassende Diskussion	55
 4. <u>Erzeugung einer Kohlenwasserstoffschicht</u>	 60
4.1 Beschichtungsverfahren und Eigenschaften der Schicht	60
4.2 Die Schichteigenschaften beeinflussende Parameter	64
 Zusammenfassung	 67
 Anhang: Der Hochspannungspulsgenerator	 70
 Literaturverzeichnis	 77
 Bildteil	

Einleitung

Eine Oberfläche bildet die "Schnittstelle" zwischen einem Material oder Gegenstand und dessen Umwelt. Eigenschaften, die einem Gegenstand zugeordnet werden, sind maßgeblich durch seine Oberfläche bestimmt. So sind zum Beispiel die Farbe, die Rauigkeit, die Kratzfestigkeit und die chemische Verträglichkeit mit anderen Stoffen typische Oberflächeneigenschaften. Durch bewußte Gestaltung von Oberflächen können Gegenständen gezielt Eigenschaften gegeben werden, die sie vorher nicht oder in nur unzureichendem Maß besitzen. Im Idealfall ist es möglich, die Oberflächenbeschaffenheit unabhängig vom Grundmaterial zu gestalten, so daß durch die Kombination geeigneter Materialien eine nahezu unbegrenzt große Palette von Gesamteigenschaften zur Verfügung steht.

Die zunehmende wirtschaftliche Bedeutung der Oberflächentechnologie ist neben der Möglichkeit zur Herstellung völlig neuartiger Produkte insbesondere der Veredelung kostengünstiger Ausgangsmaterialien mit hochwertigen Oberflächen zuzuschreiben. Als Beispiel sei die Beschichtung mit Titannitrid zur Standzeitverlängerung von Stahlbohrern genannt /Rie u.a. 1988/.

Neue, meist plasmagestützte Verfahren beginnen, herkömmliche galvanische und chemische Verfahren, die oft mit einer erheblichen Belastung der Umwelt verbunden sind, zu ersetzen. Plasmagestützte Verfahren erfordern aufgrund der für die Gasentladungen notwendigen Prozeßbedingungen oder der geringen Temperaturbelastbarkeit der Werkstoffe bisher einen Betrieb im Niederdruckbereich. Dies führt zu einem hohen vakuumtechnischen Aufwand. Bei sogenannten Batch-Anlagen ergeben sich durch das für jede Charge erforderliche Beladen und Abpumpen der Vakuumkammer lange Fertigungszeiten. Bei Durchlaufanlagen sind zusätzliche Schleusen und Pumpensätze erforderlich. Die Entwicklung leistungsfähiger Verfahren, die in höheren Druckbereichen oder sogar bei Atmosphärendruck arbeiten und bestehende Verfahren ergänzen oder ersetzen können, wäre ein wesentlicher Fortschritt.

Eine Gasentladungsform, die bei Normaldruck betrieben werden kann, ist die Barrierenentladung oder stille Entladung. Sie ist gekennzeichnet durch mindestens eine Isolierstoffbarriere und einen Gasspalt zwischen den Elektroden. Die Barriere bewirkt zum einen eine Begrenzung des Entladungsstroms und damit der im Gasspalt umgesetzten Energie, zum anderen erzwingt sie die Unterteilung der Entladung in eine Vielzahl von Mikroentladungen, welche sich nicht im thermischen Gleichgewicht befinden. Aufgrund deren kurzer Dauer werden die Ionen durch das elektrische Feld nur geringfügig beschleunigt, so daß der Strom hauptsächlich von Elektronen getragen wird. Die Plasmatemperatur bleibt demzufolge gering. Barrierenentladungen werden seit langem für die Ozonsynthese eingesetzt. Hierauf bezieht sich eine große Anzahl von Publikationen, zum Beispiel /Küch 1974;Hirth 1979;Braumann 1981;Labrenz 1983;Kogelschatz 1987;Küchler 1990/.

Die niedrige Plasmatemperatur und der Betrieb bei hohen Drücken machen Barrierenentladungen auch für die Behandlung von Oberflächen interessant. Sie eröffnen grundsätzlich die Möglichkeit, Reinigungs-, Beschichtungs- und Ätzprozesse, die bisher Niederdruckgasentladungen (Druckbereich 10^{-4} bis 10^{-2} mbar) vorbehalten sind, auch bei höheren Drücken einsetzen zu können, ohne auf die Vorzüge der plasmagestützten Niederdruckverfahren verzichten zu müssen. Bisher wurde hiervon vor allem bei der Modifikation der Oberflächenspannung von Isolierstofffolien reger Gebrauch gemacht /von der Heide,Wilson 1961;Levitzky u.a. 1964;Goldman,Amouroux 1981/. Über Möglichkeiten, Barrierenentladungen gegebenenfalls in Verbindung mit reaktiven Gasen für Ätzungen und Beschichtungen bei höheren Drücken einzusetzen, ist dagegen bisher nur wenig bekannt. /Donohoe,Wydeven 1979;Okazaki,Kogoma 1989/ beschreiben erste Untersuchungen.

Zu dieser Thematik leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag. Für die Behandlung von Oberflächen ist es wichtig, eine gleichmäßige Bedeckung der Oberfläche mit Mikroentladungen zu erhalten. Deshalb wird untersucht, wie sich Änderungen der speisenden Spannung und der Spaltweite sowie unterschiedliche Gase bei

verschiedenen Drücken auf die Verteilung und die Eigenschaften der Mikroentladungen auswirken. Die Versuche haben zum Ziel, für eine Oberflächenbehandlung günstige Entladungsbedingungen festzustellen und diese exemplarisch in einem Beschichtungsprozeß anzuwenden.

1. Einführende Betrachtungen

Barrierenentladungen sind durch das Vorhandensein von mindestens einer Isolierstoffbarriere in dem Gasraum zwischen den Elektroden gekennzeichnet. Es ergeben sich eine Vielzahl von Anordnungsvarianten. Bild 1-1a zeigt die Anordnung, mit der die meisten Untersuchungen dieser Arbeit durchgeführt werden. Der Gasspalt befindet sich zwischen der Hochspannungselektrode und der Isolierstoffbarriere, die ohne weiteren Spalt direkt auf der Erdelektrode liegt. Die Isolierstoffbarriere kann auch die Hochspannungselektrode bedecken oder im Entladungsraum zwischen den Elektroden angeordnet sein (Bild 1-1b,c). Ebenso können beide Elektroden von Barrieren abgedeckt sein (Bild 1-1d). Durch Verwendung mehrerer Barrieren ist eine "Reihenschaltung" erreichbar (Bild 1-1e). Die unterschiedlichen Anordnungen und eine Vielzahl anderer Einflußgrößen, wie die Art des Gases, der Gasdruck, die Spaltweite und die speisende Spannung, wirken sich auf die Entladung aus.

1.1 Anwendungen von Barrierenentladungen

Veröffentlichungen über Barrierenentladungen beschäftigen sich in erster Linie mit Ozonerzeugern. Ozon eignet sich aufgrund seiner stark oxidierenden Wirkung unter anderem zur Wasseraufbereitung. Hierfür sind große Anlagen zur Ozonproduktion erforderlich. Aus der wirtschaftlichen Bedeutung ergibt sich das starke Interesse an Untersuchungen zur Optimierung der Ozonerzeugung.

Im Jahr 1857 benutzte Werner von Siemens elektrishe Entladungen zur Herstellung von Ozon. Auch moderne Ozonerzeuger besitzen den gleichen, koaxialen Aufbau des von Siemens entwickelten Ozonrohrs (Bild 1-2). Die Zuführung des Hochspannungspotentials erfolgt über Kontaktbürsten auf eine Aluminiumschicht an der Innenseite eines Glasrohrs von einigen Millimetern Wandstärke, das als Barriere dient. Der Gasspalt für den Durchfluß von Luft

oder Sauerstoff hat eine Weite von einigen Millimetern. Ein Außenrohr aus Edelstahl bildet die Erdelektrode. Die einen Meter langen Ozonrohre werden in Batterien parallel geschaltet und mit sinusförmiger Wechselspannung von einem Kilohertz versorgt.

Gegenstand der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind der konstruktive Aufbau von Ozoneerzeugern und die verwendeten Materialien /Kogelschatz 1987/, die Energieversorgung (hohe Frequenzen, steile Spannungen, eingeprägte Stromimpulse, unterschiedliche Anpassungsnetzwerke) /Hamacher 1971;Rosocha 1979;Braumann 1981;Kogelschatz 1987/, die Abstimmung verschiedener Parameter wie Gasart (Sauerstoff oder getrocknete Luft), Gasfluß, -druck und -temperatur /Küch 1974;Labrenz 1983;Küchler 1990/ und die Prozesse im Entladungsvolumen (Messung der Ozonkonzentrationen, Simulation der Ozonbildungsprozesse) /Labrenz 1983;Eliasson u.a. 1986;Küchler 1990/.

Wie die Ozonproduktion ist auch die Erzeugung vieler anderer chemischer Stoffe an eine geringe Temperaturerhöhung während der Reaktionen gebunden, weil hohe Temperaturen zur Bildung nicht gewünschter Ausgangsstoffe oder zur Zerstörung entstandener Stoffe führen. Für derartige Prozesse bietet sich die Barrierenentladung mit ihrem "kalten" Plasma an.

Die Synthese anderer Stoffe mit Barrierenentladungen wurde bisher nur im Labormaßstab betrieben. Versuche von /Sahasrabudhey, Deshpande 1951/ zur Erzeugung von Formaldehyd aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff ergaben einen zu geringen Wirkungsgrad und waren durch eine unzureichende Selektivität gekennzeichnet. Eine Reihe weiterer, nicht gewünschter Stoffe wurde gebildet. Neuere Untersuchungen beschäftigen sich mit der chemischen Abgasreinigung. /Dhali, Sardja 1991/ und /Chang u.a. 1991/ berichten über die Umwandlung von Schwefeldioxid und Stickoxiden im Abgasstrom. /Traus, Suhr 1991/ beschreiben die Zerlegung von Schwefelwasserstoff in seine Elemente.

In Barrierenentladungen kommt es zur Strahlungsemission von

Gasteilchen. /Kogelschatz 1989/ beschreibt ausgeprägte Maxima im ultravioletten Frequenzbereich bei Verwendung der Edelgase Argon, Krypton und Xenon. Diese Gase bilden in den Mikroentladungen Excimere (von "excited dimer"), angeregte, zweiatomige Moleküle, die mit der Abgabe von Strahlung in ihren einatomigen Grundzustand zurückfallen. Jedem Gas kann ein eng begrenzter Wellenlängenbereich von einigen 10 Nanometern zugeordnet werden. Mit den ebenfalls excimerbildenden Chloriden und Fluoriden der Edelgase wird das ultraviolette Spektrum von 120 bis 360 Nanometer abgedeckt.

Wenn eine Elektrode der Barrierenanordnung als Gitter ausgeführt wird, kann die Barrierenentladung als UV-Strahlungsquelle eingesetzt werden. /Esrom u.a. 1989/ beschreiben ein Verfahren, unter Verwendung von UV-Strahlung aus Barrierenentladungen Schichten aufzubringen: Eine gasförmige, metallorganische Verbindung wird bestrahlt und dadurch zersetzt. Das Metall schlägt sich auf einem Untergrund nieder und bildet eine dünne Schicht.

/Yasui u.a. 1989/ haben festgestellt, daß Barrierenentladungen auch zur Anregung eines Kohlendioxid-Lasers eingesetzt werden können. Bei einem Druck von 100 hPa wird ein Gemisch der Gase Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickstoff und Helium in einer Barrierenentladung mit 100 kHz sinusförmiger Wechselspannung zur kontinuierlichen Strahlungsemission angeregt.

Seit langem werden Barrierenentladungen zur Behandlung von Kunststofffolien erfolgreich eingesetzt /von der Heide, Wilson 1961; Levitzky u.a. 1964; Goldmann, Amouroux 1981/. Das Verfahren wird als "Corona Film Treatment" bezeichnet. Bild 1-3 zeigt ein Beispiel für den Aufbau einer solchen Anlage. Eine Metallrolle als Erdelektrode ist mit einer isolierenden Schicht versehen, die aus Kunststoff oder Keramik bestehen kann. Die Hochspannungselektrode besteht aus einer Platte, aus Stäben oder Schneiden, die mit einigen Millimetern Abstand von der Rollenoberfläche angeordnet sind. Es wird mit sinusförmiger Spannung gearbeitet, deren Amplitude einige 10 Kilovolt und deren Frequenz eini-

ge Kilohertz beträgt. Die Kunststoffolien werden über die sich drehende Rolle gezogen und der Barrierenentladung in Luft bei Atmosphärendruck ausgesetzt.

/Donohoe, Wydeven 1979/ beschreiben die Herstellung einer Polymerschicht aus Äthylen in einer gepulsten Barrierenentladung. Die Barrierenanordnung mit den beiden in Isolierstoff gekapselten Elektroden befindet sich in einem Glasgefäß, das vom Reaktionsgas bei Atmosphärendruck durchströmt wird. Die impulsförmige Spannung wird durch die Selbstzündung einer Funkenstrecke in einem Schwingkreis erzeugt. Die Repetitionsfrequenz der Spannungsimpulse liegt im Bereich von einigen hundert Hertz. Eine gleichmäßige Schichtbildung ist an eine Glimmentladung gebunden, die durch die Verwendung von Helium als Trägergas erreicht wird. Auch im Verfahren von /Okazaki, Kogoma 1989; Kanda u.a. 1991/ ist eine Glimmentladung und damit der Einsatz spezieller Gase, wie zum Beispiel Helium, erforderlich. Der Anteil des reaktiven und schichtbildenden Gases am Gasstrom beträgt etwa 10 %. Bild 1-4 zeigt den verwendeten Versuchsreaktor. Das Substrat c liegt auf der Isolierstoffbarriere d. Die Gaszufuhr b erfolgt bei Atmosphärendruck radial von außen. Durch das Rotieren der Hochspannungselektrode a wird eine gleichmäßige Behandlung erreicht. Die Autoren stellen fest, daß die Frequenz der sinusförmigen Versorgungsspannung mindestens 3 kHz betragen muß, um eine Glimmentladung und gleichmäßige Schichten zu erhalten.

1.2 Entstehung und Eigenschaften von Mikroentladungen

Wird die Spannung an einer Barrierenanordnung nach Bild 1-1a gesteigert, so kommt es zu Entladungen im Gasspalt zwischen der Hochspannungselektrode und der Isolierstoffbarriere. Diese werden aufgrund ihrer kurzen Dauer, ihrer geringen Abmessungen und Energie Mikroentladungen genannt.

/Eliasson u.a. 1986/ beschreiben Untersuchungen über die physi-

kalischen Eigenschaften von Mikroentladungen, bei denen in die Elektrode einer Barrierenanordnung ein dünner, vom Rest der Elektrode isolierter Metallstift eingefügt wird, der ein Segment der Elektrodenfläche von etwa 1 mm^2 Größe bildet. Sie nehmen an, daß dieser Aufbau das Verhalten der Entladung nicht beeinflußt. Über den Stift messen sie den Strom einer Mikroentladung und schließen auf den Ablauf und die Häufigkeit des Auftretens. Unterstützt werden die Messungen durch fotografische Aufnahmen der Entladungskanäle und umfangreiche Simulationsrechnungen. Für atmosphärischen Sauerstoff als Versuchsgas und sinusförmige Spannung von 400 Hz werden die grundsätzlichen Eigenschaften ermittelt.

Der Entladungskanal hat einen Radius von etwa $100 \text{ }\mu\text{m}$. Bei einer Stromdichte von bis zu 1000 A/cm^2 und einer Entladungsdauer von einigen Nanosekunden wird die Barriere mit einer Ladung im Bereich von 10^{-9} Coulomb aufgeladen. Die Energiedichte in der Mikroentladung beträgt etwa 10 mJ/cm^3 . Der Ladungstransport während der kurzen Entladung erfolgt in erster Linie durch die Elektronen, weil diese eine um den Faktor 100 größere Beweglichkeit als die Ionen aufweisen /Hosselet 1971;Kogelschatz 1987/. Aufgrund der geringen Energieaufnahme der Ionen - nach /Küchler 1990/ werden 90 % der eingespeisten Energie den Elektronen zugeführt - entspricht die Temperatur in der Mikroentladung annähernd der Gasraumtemperatur. Die Temperatur der Elektronen erreicht Werte von 50.000 Kelvin, entsprechend einer Elektronenenergie von 5 eV.

/Eliasson u.a. 1986/ stellen weiterhin fest, daß die Zündung der Mikroentladungen nach zwei Mechanismen erfolgen kann: Dem Townsend- und dem Streamer-Mechanismus. Für sich langsam ändernde Felder (sinusförmige Spannung, 50 Hz, 400 Hz) und ein Dichte-Schlagweite-Produkt von $n \cdot d < 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ /Eliasson u.a. 1985/ wird der Townsend-Mechanismus angenommen. Der Townsend-Mechanismus beschreibt die Zündung einer Gasstrecke im homogenen elektrischen Feld /z.B. Kind,Kärner 1982/. Dabei bilden sich im Entladungsraum Elektronenlawinen, die das Gas ionisieren. Positiv

geladene Ionen lösen beim Auftreffen auf der Kathode der Gasentladung eine Sekundärelektronenemission aus und sorgen so für die Vermehrung der Ladungsträger, bis ein leitfähiger Kanal entsteht. Der Emissionskoeffizient hängt /Eliasson u.a. 1986/ zufolge vom verwendeten Metall oder Isolierstoff ab und kann sich um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Die Dauer bis zum Durchschlag ist durch die Laufzeit der Ionen gegeben und liegt im Bereich von Mikrosekunden. Nach /Hamacher 1971; Eliasson u.a. 1986/ ergibt sich die Zündspannung bei atmosphärischem Druck und einigen 1000 hPa Überdruck aus dem Paschengesetz, das die Abhängigkeit der Zündfeldstärke vom Produkt aus Gasdruck und Schlagweite für homogene Gleichfelder beschreibt.

Bei größeren Schlagweiten und höherem Druck ($n \cdot d > 10^{19} \text{ cm}^{-2}$) oder steilerer Spannung erklären /Eliasson u.a. 1986/ den Zündvorgang mit dem Streamer-Mechanismus /z.B. Kind, Kärner 1982/. Dabei erreichen Elektronenlawinen in ihrem Kopf eine kritische Feldstärke, ab der Teilchen zur Strahlungsemission angeregt werden. Die Photonen wirken im Gasraum ionisierend und produzieren so die Anfangselektronen für weitere Lawinen. Die Lawinen wachsen zusammen und bilden einen leitfähigen Kanal, den Streamer. Die Dauer des Zündvorgangs ist in erster Linie durch die statistische Streuzeit und die Aufbauzeit bestimmt. Die statistische Streuzeit ist die Zeit, die vergeht, bis ein Anfangselektron beginnt, eine Lawine kritischer Größe auszubilden. Sie wird kürzer, je mehr freie Ladungsträger im Entladungsvolumen zur Verfügung stehen. Die Aufbauzeit einer Lawine mit kritischer Feldstärke bis hin zu einem leitfähigen Kanal liegt im Bereich der Elektronenlaufzeit von wenigen Nanosekunden. Ist einmal ein Anfangselektron gefunden, so zündet die Entladung sehr schnell. Während der statistischen Streuzeit kann die Feldstärke im Gas-spalt aber weiter gesteigert werden. Damit läßt sich ein "Überschießen" der statischen Zündspannung erreichen /Kind 1985/.

Aufgrund der kurzen Dauer der Mikroentladungen werden ihre Eigenschaften maßgeblich durch den Zündmechanismus bestimmt. /Kogelschatz u.a. 1987/ bezeichnen die streamergezündeten als star-

ke Entladungen, weil sie durch die hohe Feldstärke schnell zünden und einen hohen Stromimpuls aufweisen. Die townsendgezündeten Entladungen bezeichnen sie als schwach, weil der Zündvorgang langsam und der Stromimpuls geringer ist. Bei ihnen wird ein Teil des Stroms auch von den Ionen geführt. Dennoch bleibt der Anteil der Ionenenergie an der Gesamtenergie deutlich unter dem der Elektronenenergie /Küch 1974;Kogelschatz 1987/.

/Kogelschatz 1987/ stellt fest, daß die Mikroentladungen nach kurzer Zeit verlöschen, ohne daß das elektrische Feld am Ort der Entladung zusammenbricht. Die Entladungen werden nicht niederohmig. Durch die Aufladung der Barriere fällt nach /Eliasson u.a. 1986/ der größte Teil der Spannung im Gasspalt direkt vor der Barrierenoberfläche ab. Eine Mikroentladung ist eine transiente Hochdruckglimmentladung /Kogelschatz 1987;Küchler 1990; Salge 1990/.

/Hirth 1979/ beschäftigt sich mit der Charakterisierung der Mikroentladungen in Ozonerzeugern. Er benutzt Barrierenanordnungen mit 1,5 mm Spaltweite, Luft bei Atmosphärendruck und sinusförmige Wechselspannung von 50 bis 100 Hz. Zur Beurteilung der Mikroentladungen zieht er Lichtenberg-Figuren heran, die mit Fotopapier auf der Isolierstoffbarriere sichtbar gemacht werden. Außerdem mißt er die Ladungsverteilung auf der Isolierstoffbarriere, indem er diese nach der Entladung mit einer Sonde abtastet. Er stellt fest, daß sich die Mikroentladungen bei positiver und negativer Spannungssteigung unterscheiden und entwickelt eine Modellvorstellung über den Ablauf einer Mikroentladung, die im folgenden beschrieben wird.

Bei positiver Spannung - das elektrische Ausgangsfeld E ist auf die Barriere gerichtet - werden Elektronen zur Hochspannungselektrode beschleunigt (Bild 1-5). Das nichtleitende Material der Barriere, aus der nicht wie bei einem Metall Elektronen nachgeliefert werden können, ist die Kathode der Entladung. Durch den Entzug von Elektronen bildet sich eine Anhäufung positiver Ladung auf der Barrierenoberfläche. Durch die hohe Feld-

stärke vom Ansatzpunkt der Mikroentladung radial nach außen (im Bild als Oberflächenfeldstärke E_0 bezeichnet) werden auf der Oberfläche ausgeprägte, stark verästelte Gleitentladungen gezündet. Aus diesen nach außen vorwachsenden Gleitentladungen fließen die Elektronen zum Ansatzpunkt der Mikroentladung und weiter zur Hochspannungselektrode. Im Ansatzpunkt der Mikroentladung vergrößert sich die positive Ladung, weil Elektronen von der Barrierenoberfläche nicht im gleichen Maß nachgeliefert werden können, wie sie zur Hochspannungselektrode abfließen. Dadurch wird die lokale Feldstärke im Volumen E_v bei konstantem Ausgangsfeld E herabgesetzt. Die Mikroentladung verlöscht, wenn diese Feldstärke E_v zu klein wird, um die Entladung weiter aufrechtzuerhalten.

Die Gleitentladungen entstehen durch die tangentielle Feldstärke E_0 auf der Barrierenoberfläche. Diese ist nur bei Vorhandensein eines Oberflächenwiderstands der Isolierstoffbarriere möglich. Eine leitende Oberfläche würde keine Potentialunterschiede zulassen und den Strom im Material führen, so daß keine Gleitentladungen entstünden. Die leitfähige Oberfläche würde als Äquipotentialfläche die beschriebene Ladungsanhäufung durch eine ausreichende Elektronenzufuhr verhindern und damit eine Verlängerung der Entladungsdauer bewirken.

Bei negativer Spannung - das elektrische Ausgangsfeld E zeigt von der Barriere weg - werden die Elektronen zur Barriere beschleunigt (Bild 1-5). Sie bilden dort eine Anhäufung negativer Ladung. Der Strahl der nachfolgenden Elektronen wird durch diese Ladung trichterförmig aufgeweitet. Der Ansatz auf der Barrierenoberfläche ist ausgedehnter als bei positiver Spannung und nicht punktförmig. Die tangentielle Feldstärke an der Oberfläche E_0 reicht nicht zur Zündung von Gleitentladungen. Aufnahmen mit Fotopapier zeigen daher diffuse, strukturlose Flecken kleinerer Ausdehnung als bei positiver Spannung. Wieder verlöscht die Mikroentladung, wenn die Potentialdifferenz zwischen Hochspannungselektrode und Barriere zu gering wird.

Durch die unterschiedlichen Mechanismen wird bei positiver Spannung eine größere Ladung auf eine größere Fläche aufgebracht. Die auf der Oberfläche im Zeitbereich von Sekunden verbleibenden Ladungsflecke sind bei positiver und negativer Spannung verschieden. Bild 1-6 zeigt die schematische Darstellung eines positiven Ladungsflecks auf der Barrierenoberfläche. /Ivanov, Laktionov 1973/ haben die Potentialverteilung solcher Ladungsflecke mit Sonden gemessen und stellen eine starke Abnahme der Aufladung vom Mittelpunkt nach außen hin fest. Nach dem Verlöschen der Mikroentladung bleibt die Anhäufung von Ladungen am Ansatzpunkt erhalten. Die radiale Feldstärke kann erst langsam mit einem Strom durch den Oberflächenwiderstand abgebaut werden.

Hirth geht bei seinen Überlegungen von sinusförmiger Wechselspannung zwischen 50 und 100 Hz aus. Im Zeitbereich einer Mikroentladung von einigen Nanosekunden ist die Steigung einer solchen Spannung so gering, daß sie während der Entladung als konstant angesehen werden kann. Wie verhält sich aber eine Mikroentladung, wenn die an den Elektroden anliegende Spannung während der Entladung weiter ansteigt, zum Beispiel bei den von /Braumann 1981/ eingesetzten Spannungsflanken von 2 kV/ns? Es ist doch wahrscheinlich, daß sie weiterbrennt, solange die Steigung der Spannung ausreicht, einen Strom zu treiben. Dieser Frage wird in der Literatur nicht nachgegangen. Es ist aber für eine Oberflächenbehandlung von Interesse, ob eine Stelle der Oberfläche immer nur kurzfristig von einer Mikroentladung betroffen ist (Nanosekunden), oder ob eine Mikroentladung auch über eine längere Zeit auf eine Stelle einwirken kann (Mikrosekunden).

1.3 Die Gesamtentladung als Summe der Mikroentladungen

Die räumliche und die zeitliche Verteilung der Mikroentladungen sind miteinander verknüpft und stark von den jeweiligen Entladungsbedingungen abhängig. Die gesamte Barrierenentladung setzt

sich aus vielen Mikroentladungen zusammen. Eine Barrierenentladung ist deshalb als Summe ihrer Mikroentladungen zu verstehen.

Während eines Spannungsanstiegs entstehen Mikroentladungen im Gasspalt. Sie treten in zwei Formen auf, die in der Literatur eher beiläufig beschrieben werden, hier jedoch deutlich unterschieden werden sollen.

/Eliasson u.a. 1986/ beschreiben den ersten Fall mit geringer Spannungssteigung (Sinus 50 Hz), in dem sich in der Spannungsflanke fortlaufend neue Mikroentladungen bilden und wieder verlöschen (Bild 1-7). Sie stellen fest, daß eine Stelle der Barrierenoberfläche innerhalb einer Periode der Wechselspannung höchstens einmal von einer Mikroentladung betroffen ist. Im Stromverlauf sind die Entladungen als Nadelimpulse zu erkennen. Die räumliche Verteilung der Mikroentladungen über die gesamte Barrierenoberfläche ist dadurch gegeben, daß die örtliche Aufladung der Barriere (im Bild 1-7, Zeichnung 1, durch drei schwarze Punkte gekennzeichnet) das elektrische Feld an dieser Stelle schwächt und bei folgenden Mikroentladungen andere Stellen bevorzugt werden. Mikroentladungen entstehen, solange die Spannung weiter steigt. Die Zeichnungen 2 bis 6 im Bild 1-7 zeigen die weiteren Mikroentladungen während des Spannungsanstiegs. /Janus, Jelenski 1991/ berechnen aus der Zahl der Stromimpulse pro Zeiteinheit eine Frequenz der Mikroentladungen. Damit wird der Eindruck eines periodischen Auftretens erweckt. Die Mikroentladungen sind jedoch zeitlich unregelmäßig verteilt.

Der zweite Fall tritt bei steileren Spannungen auf (Bild 1-8). Die Feldstärke im Entladungsspalt steigt über die statische Zündfeldstärke (keine Entladung: Bild 1-8, Zeichnung 1). Es erfolgt eine gemeinsame Entladung vieler paralleler Mikroentladungen, die im folgenden als Einzelentladung bezeichnet wird (Bild 1-8, Zeichnung 2). Der außen gemessene Stromimpuls setzt sich aus den Strömen der Mikroentladungen zusammen und ist deshalb wesentlich größer als der Stromimpuls einer einzigen Mikroentladung. Die Dauer einer Einzelentladung liegt im Bereich

einiger 100 ns. Die Spannung an den Elektroden bricht ein. /Kogelschatz 1987/ nennt dieses Entladungsverhalten deshalb auch "Pulsen". Das Überschießen der Spannung und die somit hohe Feldstärke sprechen für eine Zündung nach dem Streamer-Mechanismus.

Die räumliche Verteilung der Mikroentladungen innerhalb einer Einzelentladung ist nicht nur durch die örtliche Aufladung der Barriere, sondern auch durch das elektrische Ausgangsfeld im Gasspalt selbst geprägt /Eliasson u.a. 1986/. Je höher die Feldstärke ist, desto mehr Mikroentladungen entstehen /Rosocha 1979; Braumann 1981/.

Auf die Unterscheidung zwischen Mikroentladungen und Einzelentladungen wird in der Literatur kaum Bezug genommen. Deshalb wird auch nicht deutlich, ob die Mikroentladungen während einer Einzelentladung alle synchron zünden und verlöschen, oder ob innerhalb einer Einzelentladung auch Mikroentladungen verlöschen und neue - an anderer Stelle - zünden. Dies ist jedoch für die Beurteilung von Einzelentladungen hinsichtlich der Wirkung ihrer Mikroentladungen auf Oberflächen wichtig.

Beide Formen von Entladungen (kontinuierlich auftretende Mikroentladungen und Einzelentladungen) treten im Spannungsanstieg auf, solange die Spannung weiter gesteigert wird. Der Zeitraum, in dem Entladungen der gleichen Polarität stattfinden, wird als Entladungsphase bezeichnet. Deren Dauer kann bei steilflankiger Spannung (zum Beispiel 2 kV/ns, /Braumann 1981/) im Bereich von 10 bis 100 ns liegen. Sie entspricht in diesem Fall der Dauer einer Einzelentladung, weil nur eine einzige Einzelentladung im Spannungsanstieg entsteht. Bei sinusförmiger Wechselspannung von 50 Hz liegt die Dauer einer Entladungsphase im Bereich von Millisekunden.

Wenn eine Barrierenentladung über eine längere Zeit aufrechterhalten werden soll, müssen sich positive Entladungsphasen (Entladungen bei positiver Spannungssteigung) und negative Entladungsphasen abwechseln. In Abhängigkeit vom betrachteten Zeit-

raum setzt sich die aus den Entladungsphasen aufgebaute Gesamtentladung aus einer oder vielen Perioden der speisenden Spannung zusammen. Bild 1-9 verdeutlicht die Begriffe Mikroentladung, Einzelentladung, Entladungsphase und Gesamtentladung. Die Mikroentladung wird durch einen Entladungskanal und einen Ladungsfleck auf der Barrierenoberfläche wiedergegeben. Die Einzelentladung setzt sich aus mehreren Mikroentladungen zusammen. Die Entladungsphase kann aus Mikroentladungen, aber auch - wie im Bild - aus Einzelentladungen bestehen. Die Gesamtentladung umfaßt einen längeren Zeitraum. Für eine Oberflächenbehandlung ist die Frage wesentlich, ob sämtliche Gebiete im Mittel gleichmäßig von der Entladung erfaßt werden, wie im Bild 1-9 durch eine schwarze Fläche dargestellt.

Für die elektrische Beschreibung von Barrierenentladungen wird die Barrierenanordnung in einem Ersatzschaltbild (Bild 1-10a) entsprechend der Mikroentladungen in Segmente aufgeteilt. Jede "Mikro-Barrierenanordnung" wird durch eine Kapazität für den Barrierenteil, eine Kapazität für den Gasspalt und einen dazu parallel geschalteten, veränderlichen Widerstand repräsentiert. Die einzelnen Segmente sind durch Widerstände verbunden, die den Oberflächenwiderstand der Isolierstoffbarriere repräsentieren.

In vielen Fällen genügt es, ein vereinfachtes Ersatzschaltbild zu benutzen (Bild 1-10b), das den partiellen Charakter der Entladung und die physikalischen Vorgänge in den Mikroentladungen nicht berücksichtigt, sondern über die beteiligte Entladungsfläche mittelt /z.B. Hosselet 1971; Labrenz 1983/. Für Gasspalt und Barriere werden deren Kapazitäten C_G und C_B im entladungsfreien Zustand eingesetzt. Der Widerstand des Gasspalts R_G ist im Grundzustand unendlich groß und nimmt bei der Entladungszündung niedrigere Werte an, so daß die Barrierenoberfläche von der an der Barrierenanordnung anliegenden Spannung u aufgeladen werden kann. Ausgehend von diesem Ersatzschaltbild können die Messungen elektrischer Größen zur Beurteilung von Barrierenentladungen herangezogen werden. Aus Ladungsmessungen außerhalb der Barrierenanordnung kann auf die mittlere Barrierenspannung u_B und

die mittlere Gasraumspannung u_G geschlossen werden. /Küch 1974/ ermittelt so die Zündspannung, die Löschspannung und - als Mittelwert dieser beiden - die Brennspannung am Gasspalt. Die Löschspannung beträgt dabei 90 % der Zündspannung. Das stützt die Aussage von /Kogelschatz 1987/, daß die Mikroentladungen hochohmig sind.

1.4 Einfluß der Entladungsbedingungen auf die Eigenschaften von Barrierenentladungen

/Kogelschatz 1987/ beschreibt den großen Einfluß der Entladungsbedingungen auf die Eigenschaften der Entladung als gute Steuerungsmöglichkeit. Anzahl und über die Mikroentladungen eingekoppelte Energie können in erheblichem Maß variiert werden. Sie werden durch das gewählte Gas, den Druck im Entladungsspalt, die geometrische Anordnung und die speisende Spannung bestimmt.

Mikroentladungen erzeugen auf der Barrierenoberfläche diskrete Ladungsflecke. Das ist nur bei einem hohen Oberflächenwiderstand der Barriere möglich. Dieser ist nicht allein vom Material des Isolierstoffs, sondern auch vom verwendeten Gas und der Feuchtigkeit des Gases abhängig. Nach /Gänger 1953/ werden die Oberflächenentladungen maßgeblich durch das Gas in der Grenzschicht bestimmt. /Hirth 1979/ stellt fest, daß Feuchtigkeit im Gas den Oberflächenwiderstand verringert und daß sich dadurch die Anzahl der Mikroentladungen vermindert. Auch die Dauer der Mikroentladungen hängt von den Eigenschaften und der Beschaffenheit des Gases ab. Nach /Eliasson u.a. 1986; Kogelschatz u.a. 1987/ dauern sie in Luft (5 ns) etwas länger als in Sauerstoff (4 ns). Als Grund dafür wird die Elektronegativität von Sauerstoff angegeben. Sauerstoff besitzt die Eigenschaft, elektrischen Entladungen durch die Bildung negativer Ionen Elektronen zu entziehen, so daß das Zünden und Brennen von Entladungen erschwert ist. In Edelgasen werden von /Eliasson, Kogelschatz 1988/ Entladungszeiten von 100 ns beobachtet.

Auch der Druck des Gases wirkt sich aus. /Küch 1974/ erhöht den Druck vom Atmosphärendruck ausgehend auf einige Bar und stellt eine lineare Erhöhung der Zünd- und Brennspannung fest. /Eliasson u.a. 1986;Küchler 1990/ stellen weiter fest, daß mit steigendem Druck die Zündung nach dem Streamer-Mechanismus begünstigt wird, die Mikroentladungen kontrahieren und eher verlöschen.

Eine Vergrößerung des Gasspalts führt zu einer geringeren Anzahl von Mikroentladungen, die jedoch stromstärker sind /Küch 1974; Hirth 1979/. Der Strom pro Mikroentladung /Eliasson u.a. 1986/ und die mittlere Brennspannung des Gasspalts /Küch 1974/ nehmen linear zu. Erklärt wird dies damit, daß ein immer größerer Anteil der Spannung an der Entladungsstrecke im Gasvolumen abfällt, nicht nur direkt vor der Barriere. Somit wird die Entladung nicht mehr in erster Linie durch die Vorgänge auf der Barrierenoberfläche, sondern in zunehmendem Maß von der Gasstrecke selbst bestimmt.

Die Kapazität der Barriere C_b (Bild 1-10b) ist maßgebend für die Teilspannung über der Barriere u_b und den Strom, der beim Zünden des Gasraums als Ladestrom in die Barrierenkapazität fließt. Sie ist proportional zur Dielektrizitätszahl des Isolierstoffmaterials und umgekehrt proportional zur Dicke. /Hamacher 1971/ betreibt Ozoneerzeuger mit 50 Hz sinusförmiger Wechselspannung. Er stellt fest, daß bei einer Vergrößerung der Barrierenkapazität die Mikroentladungen stromstärker werden und die Anzahl der Mikroentladungen sinkt.

Desweiteren kommt der elektrischen Energiezufuhr eine zentrale Bedeutung für die Entladungsentwicklung zu, zumal sie am ehesten dafür geeignet ist, als schnell zu verändernde Steuergröße eine Barrierenentladung zu beeinflussen. Der Verlauf der Spannung an der Barrierenanordnung wird durch die Anordnung selbst, die Entladung und die Spannungsversorgung bestimmt. Nach /Hossetlet 1971;Hirth 1979;Labrenz 1983/ ist eine schnelle Energiezufuhr von der Impedanz des elektrischen Netzwerks abhängig. Die

Form der Spannung kann sehr verschieden sein. Die Verwendung steiler Spannungen führt nach /Eliasson u.a. 1985/ zu einem Zünden der Mikroentladungen nach dem Streamer-Mechanismus. Es entstehen mehr Mikroentladungen als bei flachen Spannungsanstiegen /Rosocha 1979; Braumann 1981/. Bei Erhöhung der Frequenz sinusförmiger Wechselspannung beobachtet /Kogelschatz 1987/ einzelne leuchtende Kanäle im Entladungsspalt, die darauf hinweisen, daß Mikroentladungen immer an der gleichen Stelle zünden und so eine ungleichmäßige Belegung der Oberfläche verursachen. /Braumann 1981/ stellt fest, daß sich diese Kanäle bei rechteckförmiger Wechselspannung mit steilen Spannungsflanken (2 kV/ns) nicht ausbilden. Die bei steilen Anstiegen überschießende Spannung scheint eine gleichmäßigere Verteilung zu verursachen. Für die Behandlung von Oberflächen muß eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Entladungskanäle angestrebt und die Konzentration auf wenige Kanäle vermieden werden.

1.5 Schlußfolgerungen

Barrierenentladungen weisen eine Reihe von Eigenschaften auf, die für einen Einsatz zur Oberflächenbehandlung günstig sind. Sie sind bei Atmosphärendruck zu betreiben und erübrigen einen hohen vakuumtechnischen Aufwand. Die einzelnen Mikroentladungen sind so kurz, daß der Entladungskanal nur unwesentlich erwärmt wird und ein Betrieb bei Raumtemperatur möglich ist. Durch die entkoppelnde Wirkung der Barriere ergeben sich eine Vielzahl von Anordnungs- und Gestaltungsmöglichkeiten für Elektroden, Barriere und Gasraum. Dabei kann die von der Entladung erfaßte Fläche sehr groß gewählt werden, denn durch den Oberflächenwiderstand der Isolierstoffbarriere werden die Mikroentladungen über die gesamte Fläche verteilt. Die Eigenschaften der Entladung sind durch die gewählte Geometrie, die verwendeten Materialien und die elektrische Energiezufuhr vielfach zu beeinflussen. Jede Anwendung von Barrierenentladungen erfordert andere Entladungseigenschaften, die durch die geeignete Wahl der Einflußgrößen

eingestellt werden.

Für die Behandlung von Oberflächen ist es von grundsätzlicher Bedeutung, daß die Entladung gleichmäßig über die Oberfläche verteilt ist und mit ausreichender Stärke auf die Oberfläche einwirkt. Deshalb soll in dieser Arbeit ermittelt werden, ob sich in möglichst einfacher Weise Entladungsbedingungen herstellen lassen, die sich für eine Oberflächenbehandlung eignen und bei denen auf die von /Okazaki, Kokoma 1989/ für notwendig gehaltene andauernde Glimmentladung und den damit verbundenen Aufwand verzichtet werden kann. Dazu muß untersucht werden, wie sich die Mikroentladungen unter verschiedenen Bedingungen verteilen und welchen Einfluß einzelne Parameter ausüben. Zu variieren sind die Art des eingesetzten Gases, der Gasdruck, die geometrische Anordnung und die Art der speisenden Spannung. Die Steigung der Spannung wirkt sich auf die Energie und Anzahl der Mikroentladungen aus. Sie bestimmt, ob im Spannungsanstieg kontinuierlich Mikroentladungen entstehen, oder ob diese in Einzelentladungen gepulst auftreten. Wiederholte Mikroentladungen am gleichen Ort, die zu stark leuchtenden Kanälen führen /Kogelschatz 1987/, sind zu vermeiden. Sie lassen auf einen Einfluß der Frequenz hinsichtlich der Verteilung der Mikroentladungen schließen.

Es soll weiterhin versucht werden, Barrierenentladungen durch die elektrisch meßbaren Größen Strom und Spannung zu charakterisieren, um sie so einfacher beurteilen und vergleichen zu können. Ziel der Arbeit ist es, für die Behandlung von Oberflächen günstige Entladungsbedingungen herauszustellen und an dem Beispiel eines Beschichtungsverfahrens zu demonstrieren.

2. Versuchs- und Meßeinrichtungen

Für grundsätzliche Untersuchungen von Barrierenentladungen sind Spannungsversorgungen erforderlich, die verschiedene Spannungsformen, Spannungsamplituden und Frequenzen liefern und es erlauben, diese Parameter in möglichst weiten Bereichen zu ändern. Die Spannungsamplitude (> 10 kV) muß für die benutzten Versuchsgefäße ausreichend sein. Es werden fünf verschiedene Spannungsformen verwendet:

- Spannungsimpulse eines Hochspannungspulsgenerators,
- sinusförmige Wechselspannung,
- rechteckförmige Wechselspannung,
- steilflankiger Spannungsimpuls,
- Gleichspannung.

Gebräuchlich und deshalb einfach zu erhalten ist sinusförmige Wechselspannung, entweder direkt aus dem 50 Hz-Netz bezogen und hochtransformiert, oder von Halbleiterschaltungen in der gewünschten Frequenz erzeugt. Sie hat jedoch den Nachteil, daß sich mit Änderung der Frequenz oder der Amplitude gleichzeitig die Steilheit des Spannungsanstiegs und die Dauer der Entladungsphasen ändert. Die Parameter Frequenz und Spannungsform sind miteinander verknüpft.

Unter rechteckförmiger Spannung soll ein im Zeitbereich unter 100 ns stattfindender Wechsel zwischen zwei Gleichspannungen verstanden werden. /Braumann 1981; Scheibe 1982; Labrenz 1983/ haben Ozoneerzeuger mit dieser Spannungsform betrieben und gleichmäßigere Entladungen und größere Ozonausbeuten als bei sinusförmiger Wechselspannung festgestellt. Eine Änderung der Frequenz hat hier keinen Einfluß auf die Spannungsform. Der Nachteil der rechteckförmigen Wechselspannung liegt in der aufwendigen Schaltungstechnik, die nur geringe Frequenzen (200 Hz) zuläßt.

Der steilflankige Spannungsimpuls bezeichnet einen unipolaren Einzelimpuls mit rechteckförmigem Anstieg der Spannung von 0 V

auf Hochspannungspotential innerhalb einiger 10 Nanosekunden. Ein geladener Kondensator wird über eine Funkenstrecke auf die Versuchsanordnung geschaltet. Es sind nur Einzelimpulse möglich.

Spannungsanstiege im Mikrosekundenbereich bei hoher Repetitionsfrequenz (einige 10 kHz) erzeugt ein im Rahmen dieser Arbeit entwickelter Hochspannungspulsgenerator. Die Repetitionsfrequenz hat dabei keinen Einfluß auf den Verlauf der Pulse, die Parameter Frequenz und Spannungsform sind also unabhängig voneinander einzustellen.

Bild 2-1 zeigt den Vergleich zwischen sinusförmiger Spannung mit 50 Hz, Spannungsimpulsen des Hochspannungspulsgenerators und steilflankigen Spannungsimpulsen. Im Millisekundenbereich erscheinen die vom Hochspannungspulsgenerator gelieferten Spannungsimpulse nur als Nadelimpulse, die steilflankige Spannung macht einen Sprung auf den höheren Wert. Die Dauer eines gedämpften Impulses des Hochspannungspulsgenerators liegt im Mikrosekundenbereich. Die sinusförmige Wechselspannung erscheint in diesem Zeitbereich als Gleichspannung, der steilflankige Spannungssprung bleibt. Im Nanosekundenbereich entspricht die sinusförmige Spannung weiterhin einer Gleichspannung, der Impuls des Hochspannungspulsgenerators zeigt eine nur geringe Steigung, aber der Anstieg der steilflankigen Spannung ist jetzt aufgelöst und zeigt das Einschwingen auf den Endwert.

2.1 Hochspannungspulsgenerator

Der Hochspannungspulsgenerator wurde für die Untersuchungen dieser Arbeit entwickelt. Er liefert steile Spannungsimpulse mit stufenlos verstellbarer Spannungsamplitude und einer bis zu 40 kHz einstellbaren Repetitionsfrequenz. Er bietet Erweiterungsmöglichkeiten zum Betrieb auch größerer Anlagen. Die Schaltung ist in Bild 2-2 schematisch dargestellt. Die Speicherkapazität C mit einer in einem Gleichspannungszwischenkreis erzeug-

ten Gleichspannung U_{zk} wird durch den Schalter über die Primärwicklung des Pulstransformators kurzgeschlossen. Der durch die Induktivität des Transformators etwa linear ansteigende Strom i_p erzeugt sekundär einen Spannungsimpuls, dessen Amplitude durch die Einschaltdauer bestimmt wird. Nach dem Ausschalten kommutiert der Strom in einen Freilaufzweig mit der Diode D.

Der grundsätzliche Aufbau des Generators ist Bild 2-3 zu entnehmen. Ein Stelltransformator ist an das dreiphasige Netz angeschlossen. Nach der Gleichrichtung liegt eine maximale Spannung von $U_{zk}=540$ V an der Speicherkapazität C. Der Schaltkreis ist als Halbbrücke ausgelegt. Er schaltet die Zwischenkreisspannung auf den Pulstransformator. Form und Amplitude des Ausgangsimpulses sind vom Pulstransformator abhängig. Eine Dämpfungswicklung bewirkt das schnelle Abklingen des Impulses. Im Bild 2-4 ist ein Spannungsimpuls eines Transformators mit dem Übersetzungsverhältnis 1:12 dargestellt. Er erreicht seine Amplitude von 12 kV innerhalb von $4,5 \mu s$.

Der Aufbau und die Funktionsweise des Hochspannungspulsgenerators werden im Anhang ausführlich beschrieben.

2.2 Andere Spannungsversorgungen

Die Schaltung zur Erzeugung sinusförmiger Wechselspannung ist in Bild 2-5 dargestellt. Die 50 Hz Netzspannung wird auf Spannungen bis 50 kV hochtransformiert. Zur Entlastung des Hochspannungstransformators im Kurzschlußfall wird ein hochohmiger Widerstand in Reihe zum Versuchsgefäß geschaltet.

Die rechteckförmige Wechselspannung wird in einer Schaltung nach /Braumann 1981/ erzeugt (Bild 2-6). Die Netzspannung wird über einen Stelltransformator dem Gleichrichtertransformator zugeführt. Die maximale Gleichspannung beträgt ± 20 kV. Über Ladewiderstände R_L werden die Stoßkapazitäten C_1 und C_2 auf die Spannung

U_L mit verschiedener Polarität geladen.

Über Zündfunkenstrecken FS1 und FS2 wird die Spannung im Wechsel auf die Barrierenanordnung geschaltet. Dabei wirken die Kondensatoren C_1 und C_2 wie Gleichspannungsquellen, weil ihre Kapazität mit 30 nF wesentlich größer ist als die des Versuchsgefäßes (einige 10 pF). Die Spannung an der Versuchsanordnung steigt mit etwa 2 kV/ns an. Die Funkenstrecken werden über elektronische Schaltungen ausgelöst und zusätzlich mit Druckluft beblasen, um das Verlöschen zu beschleunigen und so die maximale Frequenz von 200 Hz zu erreichen.

Die steilflankigen Spannungsimpulse werden nach dem gleichen Prinzip wie die rechteckförmige Wechselspannung erzeugt (Bild 2-7a). Die vom Transformator gelieferte sinusförmige Hochspannung wird auch hier gleichgerichtet und der Stoßkondensator $C = 60$ nF auf die Spannung U_L aufgeladen. In die Funkenstrecke ist eine Zündeinrichtung integriert, die von einer Batterie versorgt wird und keine elektrische Verbindung zu Steuerkreisen besitzt. Sie wird über einen Lichtwellenleiter ausgelöst. Die elektronische Fernbedienung in der Meßkabine ermöglicht die zeitliche Zuordnung von Spannungsimpuls und Kamerabild der Entladung. Nach einem Spannungsimpuls mit einer Entladung im Gasspalt und dem Verlöschen der Zündfunkenstrecke liegt die Spannung U_L zwischen den Elektroden der Barrierenanordnung an. Diese Spannung baut sich über den Tastkopf zur Spannungsmessung in einem Zeitraum von Millisekunden ab.

Im Ersatzschaltbild (Bild 2-7b) entspricht die Zündung der Funkenstrecke dem Einschalten eines Reihenschwingkreises mit dem idealen Schalter S. Die für die einzelnen Elemente angegebenen Zahlenwerte gelten für das Versuchsgefäß mit transparenter Elektrode. Der Widerstand R (etwa 200 Ω) und die Induktivität L (etwa 40 μ H) stehen für die Eigenschaften von Funkenstrecke und Zuleitung. Die Kapazität von Hochspannungselektrode und Zuleitung gegen Erde ist in C_E (etwa 10 pF) enthalten. Das Ersatzschaltbild der Barrierenanordnung setzt sich aus der Gasspaltka-

pazität C_G (etwa 30 pF) und dem Gasspaltwiderstand R_G sowie der Barrierenkapazität C_B (etwa 120 pF) zusammen. Die Steilheit des Spannungsanstiegs am Versuchsgefäß hängt von dem Widerstand und der Induktivität der Funkenstrecke und der Zuleitung ab /Scheibe 1982/. Im Vergleich zur rechteckförmigen Wechselspannung besitzt die Zündfunkenstrecke eine geringere Zündenergie und die Zuleitung ist länger. /Braumann 1981/ gibt die Induktivität L seiner Schaltung mit $2,4 \mu\text{H}$ an. Das Einschwingen des steilflankigen Spannungsimpulses auf den Endwert erfolgt mit einer geringeren Frequenz, die Steilheit ist mit $0,5 \text{ kV/ns}$ kleiner als bei rechteckförmiger Wechselspannung (2 kV/ns).

Mit der Anlage für den steilflankigen Spannungsimpuls wird auch die für die Untersuchungen benötigte Gleichspannung erzeugt. Dazu werden die Kugeln der Funkenstrecke zusammengefahren. Die Gleichspannung über dem Kondensator kann nun durch manuelles Betätigen des Stelltransformators langsam gesteigert werden.

2.3 Versuchsgefäße und gastechnische Anlage

Die drei erstellten Versuchsgefäße sind für verschiedene Anwendungsfälle geeignet: Für die grundsätzlichen Untersuchungen, für die Beschichtung und für die Untersuchungen von Entladungen in einem Metallgefäß.

Das Versuchsgefäß für grundsätzliche Untersuchungen von Barrierenentladungen ermöglicht es, Druck, Spaltweite und die Barriere in weiten Bereichen zu variieren. Außerdem ist es möglich, die Entladungen optisch aufzunehmen. Das Gefäß ist in Bild 2-8 dargestellt. Die Hochspannungselektrode aus Messing G hat eine zum Entladungsspalt hin kreisförmige Fläche mit 5 cm Durchmesser. Eine Messingstange A zur mechanischen Befestigung und zum elektrischen Anschluß wird nach oben aus dem Gefäß geführt. Mit dem Abstandsstück D wird die Spaltweite vorgegeben. Die Barriere besteht aus $3,8 \text{ mm}$ starkem Glas H , das durch eine einseitige

Silberbeschichtung gleichzeitig als Erdelektrode dient. Ein Ring aus Kupfer I kontaktiert die leitfähige Schicht, die so dünn ist, daß die Entladungen mit einer CCD-Kamera N durch die Barriere aufgenommen werden können.

Ein Glasrohr E mit 10 cm Durchmesser ist das Grundelement des Gefäßes. Es ist in zwei Zwischenringen aus Acrylglas C und F gelagert, die Anschlußstücke zur Leitung des Versuchsgases (im oberen Teil mit K bezeichnet) enthalten. Den oberen und unteren Abschluß bilden zwei Acrylglasteile B und M. Mit ihnen und sechs über den Umfang verteilten Gewindestangen L wird das Gefäß verspannt. Die verwendeten Dichtungsringe J lassen einen Unterdruck kleiner 10^{-2} hPa zu.

Die vielen Einzelteile erlauben den einfachen Umbau des Gefäßes, das Einsetzen anderer Elektroden und anderer Barrieren. Bild 2-9 zeigt prinzipiell den gleichen Aufbau. Es fehlt der obere Zwischenring, und der untere Abschluß ist mit einer runden Erdelektrode anders gestaltet. Diese Elektrode enthält zusätzlich eine Bohrung, die den Einsatz von Isolierstofffolien als Barriere auch bei Unterdruck ermöglicht. Ohne die Bohrung, die an die Vakuumpumpe angeschlossen ist, drückt die beim Zusammenbau unter der Folie eingeschlossene Luft die Folie in den Unterdruckbereich des Gefäßes. Sie wölbt sich in Richtung Hochspannungselektrode.

Zur Behandlung von Oberflächen wird ein Gefäß mit kleinem Gasvolumen und gezielter Gasführung erstellt (Bild 2-10). Die Elektroden 5 und 11 aus Messing oder Aluminium besitzen wiederum einen Durchmesser von 5 cm. Sie werden mit den Bolzen 1 und 12 befestigt und elektrisch mit der Spannungsversorgung verbunden. Die Spaltweite wird über das Abstandsstück 2 eingestellt. Die Barriere 8 liegt auf der Erdelektrode 11 und dem unteren Abschluß aus Acrylglas 10 eben auf. Das Zwischenstück 7 (Acrylglas) enthält die Gasanschlüsse 6. Der Einsatz von Strömungsbarrieren 3 bezweckt einen gleichmäßigen Gasstrom durch den Entladungsspalt. Der obere Abschluß 4 ist aus Acrylglas, die Dichtungen 9 verhindern das Austreten von Gasen und das Zuströ-

men atmosphärischer Luft bei Untersuchungen in leichtem Unterdruck.

Für Untersuchungen von Barrierenentladungen, bei denen sich Hochspannungs- und Erdelektrode nicht planparallel gegenüberstehen, wird ein Metallkessel benutzt. Das Metall-Versuchsgefäß besteht aus einem Stahlrohr mit 14 cm Durchmesser, das zugleich als Begrenzung des Gasvolumens und als Erdelektrode dient. Die Hochspannungselektroden sind durch den Zylinder isoliert hindurchgeführt. Der Schnitt (Bild 2-11) zeigt die beiden Hochspannungselektroden a unterschiedlicher Form. Sie sind in Epoxidharz b eingegossen, das durch seine Formgebung die Entladung in den Bereich des Gasraums zwingen soll, in dem sich die Elektroden gegenüberstehen. Dort ist der Isolierstoff nur 2 mm dick. Die Elektroden sind eben ausgeführt und besitzen eine rechteckförmige Fläche von 6,5 cm · 3 cm. Die Entladung brennt jeweils zwischen einer Hochspannungselektrode und dem Metallkessel c, weil die Hochspannungselektroden elektrisch parallel geschaltet sind. Die Elektroden mit ihrer Isolierstoffummantelung werden mit Halterungen d am Metallkessel befestigt und sind dort auch abgedichtet. Für den Anschluß von Gaszufuhr und Vakuumpumpe sind weitere Öffnungen e vorhanden. Das Stahlrohr wird frontal von einer Scheibe aus Acrylglas abgedeckt, so daß die Beobachtung der Entladung möglich ist.

Alle Versuchsgefäße besitzen Anschlüsse für die Zu- und Ableitung des Versuchsgases. Bild 2-12 zeigt die gastechnische Anlage, die die Barrierenanordnung mit dem gewählten Gas bei dem gewünschten Druck versorgt. Die Gase Argon, Helium, Sauerstoff, Acetylen und Methan werden aus den Flaschen über einen Druckminderer an den Gasmischer angeschlossen, an dem mit Dosierventilen die Strömungsmenge auch bei Gasgemischen eingestellt werden kann. Für Untersuchungen mit strömender Luft wird diese über ein Gebläse eingespeist. Die Gase werden dem Versuchsgefäß über Schläuche und ein Ventil zugeführt. Am Ausgang des Gefäßes befindet sich ein Druckmeßgerät und ein weiteres Ventil. Untersuchungen bei Atmosphärendruck werden mit strömenden Gasen und

geöffneten Ventilen durchgeführt. Bei Unterdruck ist eine Vakuumpumpe angeschlossen. Im strömenden Betrieb wird am Gaseinlaß des Gefäßes ein Nadelventil installiert und mit diesem der gewünschte Druck eingestellt. Der Nachteil dieses Vorgehens liegt darin, daß zwischen Gefäß und Vakuumpumpe eine Unterdruckstrecke liegt, die zu Weitdurchschlägen von der Hochspannungselektrode zu der geerdeten Vakuumpumpe führen kann. Deshalb werden für Untersuchungen bei einem Druck von unter 1 hPa nach Einstellen des gewünschten Drucks die beiden Ventile am Versuchsgefäß geschlossen und der Schlauch zwischen Pumpe und Gefäß belüftet.

2.4 Meßtechnische Erfassung der Barrierenentladung

Grundsätzlich werden die Verläufe der Spannung über der Barrierenanordnung und des Stroms durch die Anordnung mit einem digitalen Speicheroszilloskop (Gould 4074, Punktabstand 2,5 ns) festgehalten und von einem Computer ausgelesen und gespeichert. Die Spannung u wird direkt am Hochspannungsanschluß des jeweiligen Versuchsgefäßes mit einem Tastkopf (Tektronix P6015) abgegriffen (Bild 2-13). Der Tastkopf mit dem Teilerverhältnis 1000:1 ist mit einer Abstimmereinrichtung ausgerüstet, mit der Tastkopf, Zuleitung und Eingang des Oszilloskops zur Messung steiler Spannungsflanken abgeglichen werden. Der Gesamtstrom durch die Barrierenanordnung i fließt durch einen koaxial aufgebauten und niederinduktiven Shunt. Der Widerstand R_M liegt im Bereich von Milliohm bis zu einigen Ohm, so daß der Spannungsabfall von einigen Volt weder für das Verhalten der Entladung noch für die Messung der Hochspannung von Bedeutung ist.

Die Ladung der Barrierenanordnung wird entweder durch Integration des Stromverlaufs mit einem Computerprogramm oder durch den Einsatz eines Meßkondensators C_M bestimmt. In der Reihenschaltung entspricht seine Ladung der Ladung der Barrierenanordnung. Die Kapazität des Kondensators C_M ist mit 420 nF so groß, daß wiederum kein maßgeblicher Einfluß auf Entladung oder Spannungs-

messung gegeben ist. Beide Methoden zeigen eine gute Übereinstimmung.

Die Spannungen an der Barriere und am Gasspalt sind lokal verschieden und ihre Mittelwerte u_B und u_G einer direkten Messung nicht zugänglich. Unter Annahme einer konstanten Kapazität der Isolierstoffbarriere C_B kann aber aus der Ladungsmessung auf die mittlere Spannung über der Barriere geschlossen werden:

$u_B = q_B / C_B$. Wird diese Spannung u_B von der gemessenen Spannung an der Anordnung u abgezogen, ergibt sich die Gasraumspannung u_G . Sie ist eine fiktive, gemittelte Größe, denn das elektrische Feld im Entladungsspalt ist nicht homogen. Die Spannung über der Barriere wird außerdem mit einem weiteren Verfahren gemessen. Die Barrierenanordnung wird durch zwei Elektroden und die Isolierstoffbarriere - ohne Gasspalt - nachgebildet. Die Spannung über dieser Nachbildung wird mit einem zweiten Tastkopf gemessen (Bild 2-13) und entspricht unter Annahme gleicher und konstanter Kapazität der Spannung über der Barriere u_B . Diese Spannung muß zunächst von der gemessenen Gesamtspannung abgezogen werden, um die Spannung über der Barrierenanordnung u zu erhalten. Nochmalige Subtraktion von der so erhaltenen Spannung u führt zur Gasraumspannung u_G .

Die optische Aufnahme der Barrierenentladungen ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Beurteilung ihrer Eigenschaften. Die für die Versuchsgefäße verwendeten Materialien Glas und Acrylglas ermöglichen Aufnahmen von der Seite, senkrecht zur Entladungsrichtung im Gasspalt. Die Fußpunkte der Mikroentladungen können durch das Einbringen von Fotofolie in den Entladungsspalt dargestellt werden. Für dieses nur für wenige Untersuchungen benutzte, aufwendige Verfahren muß die Umgebung des Versuchsgefäßes abgedunkelt werden, damit die lichtempfindliche Folie auf die Isolierstoffbarriere gelegt werden kann. Auch während des Versuchs und bis zur Entfernung der Folie darf kein Streulicht auftreten. Nach der Entwicklung werden die Fußpunkte der Mikroentladungen mit ihren Lichtenberg-Figuren deutlich sichtbar.

Wesentlich einfacher ist die Aufnahme durch eine transparente Elektrode mit einer CCD-Kamera (Sony XC77CE). Die Bilder werden direkt auf einem Monitor dargestellt, können von einem Computer gespeichert und bearbeitet und von einem Video-Printer ausgedruckt werden. Die vom Aufnahmesystem vorgegebene Belichtungszeit beträgt 20 Millisekunden. Die Kamera kann von der elektronischen Fernsteuerung in richtiger zeitlicher Zuordnung zu der jeweiligen Spannungsversorgung ausgelöst werden.

Für die Auswertung der Bilder spielt die Helligkeit eine erhebliche Rolle. Der Vergleich verschiedener Kameras und Objektive führt zu dem Ergebnis, daß die Mikroentladungen sehr leuchtschwach und für eine Erfassung zu dunkel sein können, so daß sie auf dem Bild überhaupt nicht sichtbar sind. Damit kann die Anzahl der Mikroentladungen nicht exakt benannt und zur Beurteilung herangezogen werden. Es ist lediglich der qualitative Vergleich möglich, ob mehr oder weniger Mikroentladungen klar zu erkennen sind. Zudem wird der Kontrast der Bilder nachträglich verstärkt, um sie auf dem Monitor hell genug erscheinen zu lassen. Für den Vergleich der Bilder ist es wichtig, daß der Kontrast in stets gleicher Weise angehoben wird. Deshalb sind alle Aufnahmen der Mikroentladungen auf ein Musterbild bezogen und gleich behandelt.

3. Grundsätzliche Untersuchungen zum zeitlichen und räumlichen Verhalten von Barrierenentladungen

Barrierenentladungen sind in ihrem Verhalten stark von den Versuchsbedingungen bestimmt, die zu den Parametern Gasdruck und Gasart, geometrische Anordnung, Spannungsform und Frequenz zusammengefaßt werden. Diese "äußeren" Parameter beeinflussen die "inneren", wie zum Beispiel die Zündspannung oder die Entladungsdauer, in vielfältiger Weise und gegenseitiger Abhängigkeit. Es sind die Ergebnisse vieler Versuchsreihen mit verschiedenartigen Spannungsformen erforderlich, weil die Messungen bei einzelnen Versuchen starke Streuungen aufweisen und selten quantitativ exakte Aussagen getroffen werden können. Durch eine gezielte Versuchsführung sind jedoch qualitative Vergleiche möglich. Ziel der Untersuchungen sind Aussagen darüber, wie die äußeren Parameter zu wählen sind, um geeignete Bedingungen für die Behandlung von Oberflächen zu schaffen. Dazu werden Spannungs-, Strom- und Ladungsverläufe sowie fotografische Aufnahmen der Mikroentladungen herangezogen. Die Stromverläufe sind für die jeweiligen Eigenschaften der Entladung charakteristisch.

3.1 Zeitlicher Verlauf des Entladungsstroms

Die gemessenen Stromverläufe weisen verschiedene Formen auf. Sie lassen sich in vier Arten, die Stromverläufe Typ A bis D, unterteilen (Bilder 3-1 bis 3-4). Diese Arten des Stromverlaufs sind jeweils charakterisierend für die Entladungseigenschaften. Ihre prinzipielle Beschreibung wird deshalb den weiteren Untersuchungen vorangestellt. Auf Einzelheiten der zur Erläuterung benutzten Diagramme wird nicht eingegangen. Das Spannungsdiagramm zeigt jeweils den Anstieg eines Spannungsimpulses des Hochspannungspulsgenerators.

Stromverlauf Typ A

Dieser Stromverlauf repräsentiert den ungezündeten Verschie-

bungsstrom der Versuchsanordnung (Bild 3-1). Im Gasspalt brennt keine Entladung, so daß das Ersatzschaltbild (Bild 1-10b) in diesem Fall aus der Reihenschaltung von Gasspaltkapazität C_G und Barrierenkapazität C_B besteht. Der Strom ist proportional zur Steigung der Spannung:

$$i = C_G \cdot du/dt \quad (C_G - \text{Gesamtkapazität}).$$

Er verläuft sinusförmig, denn die Spannung steigt cosinusförmig an. Das Rauschen im Stromverlauf ist auf den Betrieb des Oszilloskops an seiner Auflösungsgrenze zurückzuführen.

Stromverlauf Typ B

Der ungezündete Verschiebungsstrom (entsprechend Typ A) ist in Bild 3-2 zu klein, um sich deutlich von der Nulllinie abzuheben. Die Entladung im Gasspalt zündet mit einem impulsförmigen Strom von hoher Amplitude und kurzer Dauer (Bereich 100 ns). Danach verlöscht die Entladung. Es fließt wieder der ungezündete Verschiebungsstrom.

Stromverlauf Typ C

Zunächst fließt der ungezündete Verschiebungsstrom, bis es - wie bei Typ B - zu einer Zündung der Entladung mit einem impulsförmigen Strom kommt (Bild 3-3). Danach verlöscht die Entladung jedoch nicht, sondern sie wird weiter aufrechterhalten. Der Strom ist deutlich höher als der Strom im ungezündeten Zustand und proportional zur Steigung der Spannung. Unter der Voraussetzung, daß die gesamte Barrierenoberfläche von der Entladung erfaßt wird, entspricht der Proportionalitätsfaktor der Kapazität der Barriere C_B :

$$i = C_B \cdot du/dt \quad .$$

Stromverlauf Typ D

Bei diesem Stromverlauf ist die Entladung gezündet und verlöscht nicht (Bild 3-4). Im Ersatzschaltbild (Bild 1-10b) wird die ständige Entladung durch einen kleinen Widerstand R_G repräsen-

tiert, der die Gasspaltkapazität C_G überbrückt. Der Strom wird durch die Kapazität der Barriere C_B bestimmt und ist proportional zur Steigung der Spannung:

$$i = C_B \cdot du/dt \quad .$$

Der im Spannungsverlauf erkennbare negative Anfangswert sowie die höhere Amplitude des Impulses sind auf die Überlagerung aufeinanderfolgender Impulse zurückzuführen. Der Folgeimpuls beginnt, bevor der vorherige vollständig ausgeklungen ist.

Zu dieser ständigen Entladung mit dem Stromverlauf Typ D kann es nur bei einer sich genügend schnell ändernden Spannung und einer ausreichenden Wiederholungsfrequenz kommen. Es dürfen keine Phasen ohne Spannungsänderung bestehen, die lang genug sind, um die Entladung verlöschen zu lassen. Die Entladung ist an eine Mindestfrequenz gebunden und entspricht in ihrem Wesen einer Hochfrequenzentladung.

3.2 Einfluß von Gasdruck und Gasart

In Barrierenentladungen beeinflussen die Art und der Druck der verwendeten Gase den Ladungstransport durch den Spalt. Aufgrund der Kürze der einzelnen Mikroentladungen ist auch der Zündvorgang selbst für die Eigenschaften von Barrierenentladungen von großer Bedeutung. Die Vermehrung der Ladungsträger ist unter anderem von der Ionisierungsenergie und der Größe der Gasatome oder -moleküle abhängig. Deshalb wirken sich Druck und Art des Gases auf die Anzahl, Verteilung und Energie der Mikroentladungen aus.

3.2.1 Entladungsverhalten in Argon bei verschiedenen Drücken

Anhand eines Modellversuchs in Argon werden die Auswirkungen

einer Druckabsenkung auf Barrierenentladungen beschrieben. Dazu wird das Versuchsgefäß mit transparenter Elektrode bei einem Gasspalt von 1,2 mm benutzt. Die Entladung wird mit einzelnen, steilen Spannungsimpulsen gezündet, die auf einen Endwert von 20 kV einschwingen (Bild 3-5). Da es sich hierbei um überschießende Spannungen handelt - der Maximalwert der Spannungsimpulse ist wesentlich größer als die statische Zündspannung von nur wenigen kV -, erfolgt die Zündung zufällig im Spannungsanstieg, während des Einschwingens oder nach Erreichen der Endspannung von 20 kV. Das entspricht den Zeitpunkten t_1 , t_2 und t_3 , die in Bild 3-5 eingezeichnet sind. Die Zündung in den Diagrammen des Bilds 3-5 erfolgt zum Zeitpunkt t_1 . Um einen Vergleich der Messungen zu erleichtern, werden für die folgenden Betrachtungen in jedem Druckbereich Entladungen ausgewählt, die im Anstieg der angelegten Spannung bei etwa 25 kV zünden.

Die Spannung und der Strom weisen in allen Druckbereichen prinzipiell die gleichen Verläufe auf (Bild 3-5). Nach Zündung der Funkenstrecke steigt die Spannung bis zur Zündung der Barrierenentladung an (Schaltung in Bild 2-7). Sie bricht zusammen und schwingt schließlich mit einer von der Kapazität der Barrierenanordnung bestimmten Frequenz auf den Endwert ein. Der Strom ist zunächst proportional zur Steigung der Spannung, mit der Kapazität der ungezündeten Anordnung als Proportionalitätsfaktor. Nach dem Zündimpuls ist der Strom wiederum proportional der Spannungssteigung und zur Kapazität der Barriere C_B . Der Stromverlauf entspricht dem Typ C. Die in den Diagrammen von Bild 3-5 zu erkennenden hochfrequenten Schwingungen entstehen durch Erdkapazitäten von Hochspannungselektrode und Zuleitungen.

Bild 3-6a zeigt die Verteilung der Mikroentladungen bei Atmosphärendruck. Im Elektrodengebiet sind viele, punktförmige Entladungen zu erkennen. Helle Gleitentladungen auf dem Rand dominieren jedoch. Vermehrte Entladungen auf dem Rand ergeben sich durch die stark gekrümmte Hochspannungselektrode, die eine stärkere Feldstärke als im inneren Elektrodengebiet mit homogenem Feld bewirkt. Über Gleitentladungen kann auch die nicht direkt

unter der Elektrode liegende Fläche der Barriere in die Entladung einbezogen und aufgeladen werden (Bild 3-7a). Die Gleitentladungen haben ihren Ursprung in den Fußpunkten der am Rand entstehenden Mikroentladungen. Diese erhöhen punktförmig das Potential auf der Barrierenoberfläche. Entlang der Oberfläche entsteht eine hohe Feldstärke, die eine Entladung im Gas zündet. Dabei sind die Eigenschaften der nichtleitenden Oberfläche nach /Gänger 1953/ von nur untergeordneter Bedeutung. Das Potential wird in der Gleitentladung weitergetragen, so daß ein vorwachsender Kanal entsteht, der sich nach außen hin verzweigen kann.

Mit Senken des Drucks verschwinden die Gleitentladungen am Rand. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der Mikroentladungen im Elektrodenbereich zu. Bei 80 hPa sind schließlich keine Gleitentladungen mehr zu erkennen (Bild 3-6b). Die Spannungs- und Stromverläufe sind leicht gegenüber Atmosphärendruck verändert. Die Spannung fällt bei der Zündung auf einen kleineren Wert ab als in Bild 3-5. Die dem Stromverlauf überlagerte Schwingung ist weniger bedämpft.

Bei Drücken unter 80 hPa existiert die Entladung nur im Randgebiet, bildet jedoch keine Gleitentladungen. Bild 3-6c zeigt eine Entladung bei einem Druck von 4 hPa. Die Mikroentladungen bilden sich vom gekrümmten Elektrodenrand zur Barriere und zu der seitlichen Gefäßbegrenzung (Bild 3-7b). Offenbar bietet der Randbereich mit großen Schlagweiten bei dieser Gasdichte bessere Entladungsbedingungen als der Elektrodenbereich mit der geringen Spaltweite von 1,2 mm. Die Spannungs- und Stromverläufe ändern sich gegenüber 80 hPa nicht mehr.

Zusammenfassend ist ein Druckbereich um die 100 hPa festzustellen, in dem sich die Mikroentladungen statistisch über die Elektrodenfläche verteilen. Bei höheren Drücken kommt es zu Gleitentladungen, deren Verschwinden bei Unterdruck bereits von /Gänger 1953/ festgestellt wurde. Bei Drücken unter 100 hPa brennt die Entladung nur noch diffus im Randbereich.

3.2.2 Vergleich mit anderen Gasen

Barrierenentladungen in Helium, die unter vergleichbaren Bedingungen wie in Argon erzeugt werden, sind insgesamt wesentlich leuchtstärker und diffuser. Die Gleitentladungen im Randbereich bei atmosphärischem Druck wachsen zwar auch strahlenförmig nach außen vor, lassen aber keine Entladungskanäle oder Verästelungen erkennen, sondern verschwimmen diffus. Im Elektrodenbereich entstehen eine große Zahl von Mikroentladungen. Bereits ab 200 hPa konzentriert sich die Entladung auf den Randbereich. Die Spannung an den Elektroden u bricht bei Atmosphärendruck genauso stark zusammen wie in Argon bei 100 hPa.

Entladungen in Luft sind grundsätzlich leuchtschwächer. Bei atmosphärischem Druck sind nur vereinzelte Punkte im Elektrodenbereich auszumachen. Gleitentladungen treten nicht auf. Der Stromverlauf entspricht dem Typ B. Mit Senken des Drucks erhöht sich die Anzahl der Lichtpunkte auf der Barriere, und der Stromverlauf geht in den Typ C über. Die Entladung bleibt gezündet, aber der Proportionalitätsfaktor zwischen Entladungsstrom und Spannungssteigung ist kleiner als die Barrierenkapazität C_B . Das spricht dafür, daß nicht die gesamte Kapazität der Barriere wirksam ist und nicht die gesamte Barrierenoberfläche von den Mikroentladungen erfaßt wird. Erst ab 80 hPa kommt es zur "vollkommenen Zündung" mit Ausnutzung der Barrierenkapazität C_B , die auch mit einem stärkeren Einbruch der Spannung verbunden ist. Unter 80 hPa verlagert sich die Entladung auf den Randbereich.

In Sauerstoff zeigt sich das gleiche Verhalten wie in Luft. Die Entladungen sind allerdings noch leuchtschwächer.

Bei der Verwendung von Acetylen gibt es mit einzelnen, steilen Spannungsimpulsen keine sichtbaren Entladungen. Der Stromverlauf entspricht dem Typ B, die Entladung verlöscht nach kurzer Zeit wieder. Um sichtbare Entladungen zu erhalten, wird Acetylen mit Pulsen des Hochspannungspulsgenerators bei einer Repetitionsfrequenz von 1 kHz untersucht. Das Aufnahmesystem mit einer

Belichtungszeit von 20 ms integriert die Leuchterscheinungen von 20 Entladungen. Erst bei Drücken unter 400 hPa kommt es überhaupt zu Zündungen. Der Stromverlauf entspricht dem Typ B. Die Entladungen sind sehr dunkel, aber gleichmäßig über die Elektrodenfläche verteilt. Es gibt keine Gleitentladungen. Bei weiterer Druckabsenkung wird das Bild etwas heller. Ab 80 hPa beginnt eine deutliche Bevorzugung des Randes, auf dem sich ein schmaler, leuchtender Ring ausbildet. Die Entladung bleibt nach dem Zünden bestehen (Stromverlauf Typ C). Bei 8 hPa ist die Entladung hell genug, um sogar die Entladungsspuren eines einzelnen Spannungsimpulses des Hochspannungspulsgenerators zu erkennen. Sie befinden sich ausnahmslos im Randbereich.

Alle untersuchten Gase weisen einen ausgezeichneten Druckbereich auf, der von der Gasart abhängt und bei einigen 100 hPa liegt. Bei diesem Druck kommt es zu den meisten Mikroentladungen im Elektrodengebiet. Bei tieferen Drücken existiert die Entladung nur noch im Randbereich. Bei höheren Drücken entstehen weniger Mikroentladungen. Im Randbereich kommt es zu Gleitentladungen.

In Argon und Helium bleiben die Entladungen nach der Zündung bestehen und sind deshalb leuchtstark (Stromverlauf Typ C). In Luft, Sauerstoff und Acetylen verlöschen die Entladungen sofort nach dem ersten Stromimpuls und sind deshalb leuchtschwach (Stromverlauf Typ B). Zur gleichmäßigen Behandlung von Oberflächen sind die kurzen Entladungen dieser Gase ein Vorteil, weil bei längeren Entladungszeiten ein stärkeres Einwirken der Entladung auf einzelne Stellen der Oberfläche gegeben ist.

3.2.3 Auswirkung des Drucks auf die Zündspannung

Die Abhängigkeit der Zündspannung einer Elektrodenanordnung mit homogenem elektrischen Feld von dem Produkt aus Druck und Schlagweite wird in der Paschenkurve dargestellt, deren Verlauf ein Minimum aufweist und vom verwendeten Gas abhängt. Nach /Hammacher 1971; Eliasson u.a. 1986/ zünden Barrierenentladungen

entsprechend der Paschenkurve.

Dies wird für die in dieser Arbeit verwendeten Anordnungen und den betrachteten Druckbereich durch Versuchsreihen mit sinusförmiger Wechselspannung von 50 Hz bestätigt. Die Zündung erfolgt entsprechend der Paschenkurve. Die Spannungsänderung bei 50 Hz sinusförmiger Wechselspannung ist sehr langsam. Für steilflankige Einzelimpulse (überschießende Spannung) kann ein Zünden entsprechend der Paschenkurve nicht festgestellt werden. Zwar kommt es bei niedrigem Druck häufiger zu Zündungen bei geringer Spannung, aber es gibt auch Zündungen im Spannungsmaximum.

Werden wiederkehrende Spannungsimpulse oder rechteckförmige Wechselspannung mit 50 Hz angelegt, stellt sich eine für alle Spannungsimpulse gleiche Zündspannung ein.

In Versuchsreihen mit 50 Hz rechteckförmiger Wechselspannung wird der Druck zwischen 10 und 1800 hPa verändert. Die positive Flanke der rechteckförmigen Wechselspannung entspricht in ihrer Form dem steilflankigen Spannungsanstieg in Bild 3-5. Die Zündung der Entladung erfolgt im Spannungsanstieg. Die Größe der dabei auftretenden Stromspitzen ist im Bild 3-8 über dem Druck aufgetragen. In Luft und in Argon erhöhen sich die Stromspitzen mit sinkendem Druck. Dies wird bei verschiedenen Scheitelwerten der Spannung festgestellt.

Das beschriebene Verhalten ist darin begründet, daß die Zündspannung der Entladung vom Druck abhängt. Ein kleinerer Druck bewirkt eine kleinere Zündspannung. Weil die rechteckförmige Spannung auch noch nach der Zündung sehr schnell ansteigt (2 kV/ns), überlagert sich der Stromimpuls bei der Zündung mit dem darauf folgenden Strom im gezündeten Zustand (Stromverlauf Typ C) zu einer Stromspitze. Da der Spitzenwert proportional zur Spannungssteigung ist, führt eine frühe Zündung, und damit eine Zündung bei noch sehr steiler Spannung, zu einer höheren Stromspitze als eine spätere, die im bereits wieder abflachenden Teil der Spannung erfolgt. Die höheren Stromspitzen bei niedrigem

Druck werden durch die niedrige Zündspannung und den steilen Spannungsanstieg verursacht. Der niedrige Druck selbst ist nicht der unmittelbare Grund.

Der Druck beeinflußt bei sich langsam ändernden Spannungen (Sinus 50 Hz) und bei sich mit 50 Hz wiederholenden, steilen Spannungen die Zündspannung. Ein Absenken des Drucks verringert die Zündspannung. Die Zündung erfolgt konstant bei einem Spannungswert.

Bei einzelnen, steilen Spannungsimpulsen streut der Zündzeitpunkt - und damit die Zündspannung - statistisch. Durch Senken des Drucks ist zwar der zahlenmäßige Anteil der Zündungen bei niedrigen Spannungen zu erhöhen, es treten aber auch Zündungen im Spannungsmaximum auf.

3.3 Einfluß der geometrischen Anordnung

Sollen Barrierenentladungen in Verfahren zur Oberflächenbearbeitung eingesetzt werden, so sind für die geometrischen Abmessungen der Entladungsanordnung neben den Anforderungen der Entladung selbst weitere Faktoren von Bedeutung, wie Stabilität und Haltbarkeit des Gefäßes, Herstellungs- und Wartungskosten sowie die Eingliederung in andere Verfahrensschritte. Es kann erforderlich sein, die Barrierenanordnung an vorgegebene Rahmenbedingungen anzupassen.

Große Gefäße zur Aufnahme von plasmagestützten Verfahren sind in der Regel aus Metall. Sie stellen eine Äquipotentialfläche dar und beeinflussen Entladungen in ihrem Inneren. Für die Praxis ist es von Interesse, ob Barrierenentladungen in Metallgefäßen zu betreiben sind, bei denen die Elektroden nicht parallel zueinander verlaufen.

3.3.1 Steigerung der Spaltweite

Bild 3-9a zeigt die Entladung in einem Einzelimpuls bei einer Spaltweite von 5,2 mm. Nur wenige, sehr helle Mikroentladungen bestimmen das Bild. Sie befinden sich vornehmlich am Elektrodenrand und besitzen strahlenförmige Gleitentladungskanäle, die auch zur Elektrodenmitte gerichtet sind. Im Vergleich zu Bild 3-6a, das unter gleichen Versuchsbedingungen (auch gleiche Zündspannung) bei einer Spaltweite von 1,2 mm aufgenommen ist, wird deutlich, daß die Anzahl der Mikroentladungen mit der Spaltweite stark abnimmt, die Helligkeit und Ausdehnung der einzelnen Mikroentladungen aber zunehmen. Da Spannungs- und Stromverläufe keine wesentlichen Unterschiede aufweisen, muß der gleiche Strom durch weniger Mikroentladungen fließen, die Stromdichte der einzelnen Entladungskanäle wird größer. Das bestärkt die Aussagen von /Küch 1974; Hirth 1979; Eliasson u.a. 1986/. Auch durch eine Senkung des Gasdrucks wird die Anzahl der Mikroentladungen nicht wesentlich erhöht (Bild 3-9b).

Eine weitere Steigerung des Abstands zwischen Hochspannungselektrode und Isolierstoffbarriere ist an einen geringeren Gasdruck gebunden, weil sonst die Höhe der verwendeten Spannungen für eine Zündung der Gasstrecke nicht ausreicht. Um annähernd gleiche Zündspannungen zu erhalten, werden zwei Versuche mit 3 mm und 33 mm Spaltweite durchgeführt, bei denen das Produkt aus Druck und Schlagweite gleich ist. Die Zündung erfolgt entsprechend der Paschenkurve bei der gleichen Spannung. Die Diagramme der Bilder 3-10 und 3-11 stellen jeweils die mit dem Hochspannungspulsgenerator erzeugte Gesamtspannung u , den Strom i , die Ladung der Barriere q_B und die Gasspaltspannung u_G dar (Bild 1-10b).

Der Vergleich der Diagramme von Bild 3-10 und Bild 3-11 zeigt, daß bei kleiner Schlagweite aufgrund der größeren Kapazität des Gasspalts C_G und damit der Gesamtanordnung zunächst ein größerer Verschiebungsstrom fließt (10 mA). Die Zündung erfolgt bei kleiner Spaltweite abrupt. Der Strom i steigt sehr schnell auf sei-

nen Maximalwert von 250 mA. Die Ladung der Barriere q_B steigt sprungartig an. Die Spannung im Gasraum u_G bricht auf 400 V zusammen. Der Strom klingt schnell ab und erreicht wieder den ursprünglichen Verschiebungsstrom der Anordnung. Die Entladung ist verloschen.

Bei großer Spaltweite laufen alle Vorgänge langsamer ab (Bild 3-11). Der Übergang vom Verschiebungsstrom der ungezündeten Anordnung (5 mA) zum Zündstrom ist fließend. Die Spitze des Zündstroms hat mit 120 mA einen geringeren Wert. Die Ladung der Barriere steigt langsamer an. Die Gasraumspannung u_G behält nach der Zündung mit 1300 V einen größeren Wert. Der Strom i nach der Zündspitze ist größer (20 mA) und zeigt, daß die Entladung nicht sofort verlöscht, sondern weiter bestehen bleibt. Die maximale Ladung der Barriere q_B (10^{-7} As) wird auch hier im Spannungsmaximum erreicht und ist der Ladung bei kleiner Schlagweite gleich.

Ein langsamer Anstieg des Zündstroms und ein geringer Maximalwert wird insbesondere bei noch größerer Schlagweite (200 mm) festgestellt. Das "trägere" Verhalten der Entladung bei großer Spaltweite ist mit dem wachsenden Einfluß der Eigenschaften des Gasraums zu erklären. Bei kleiner Spaltweite sind die Vorgänge an der Oberfläche von Elektrode und Barriere für die Entladung bestimmend. Je größer der Gasspalt ist, desto mehr Bedeutung gewinnen die Vorgänge im Gasvolumen. Die Vorgänge benötigen eine längere Zeit, die Spannung über dem Gasraum ist größer. Der Gasstrecke kann ein höherer Widerstand zugeordnet werden.

Eine Steigerung der Spaltweite über einige Millimeter hinaus ist für eine gleichmäßige Oberflächenbehandlung von Nachteil, weil die Anzahl der Mikroentladungen pro Einzelentladung abnimmt und die Dauer der Entladung zunimmt. Es kommt zu einer Konzentration der Oberflächenbehandlung auf wenige Stellen, auf die die Entladung lange und mit hoher Stromdichte einwirken kann.

3.3.2 Entladungen im Metallgefäß

Die Untersuchungen werden in einem rohrförmigen Metallgefäß durchgeführt (Bild 2-11). Beide Hochspannungselektroden sind in Isolierstoff eingegossen. Die Entladung brennt zwischen den Hochspannungselektroden und der Gefäßwand. Die Doppelelektrodenanordnung soll zeigen, daß in den Zwischenspalt eingebrachte Substrate von beiden Seiten gleichzeitig behandelt werden können.

Beide Elektroden haben eine verschiedene Form, die aber dem gleichen Prinzip entspringt (Bild 2-11). Die eigentlichen Elektroden sind aus Messing und mit abgerundeten Kanten versehen, um hohe Feldstärken zu vermeiden. Sie sind in Epoxidharz eingebettet. Im Entladungsbereich ist die Harzschicht dünn (2 mm) und die Kapazität der Barriere somit groß. Im Isolierbereich hat das Harz eine große Stärke (10 mm), die Kapazität ist dementsprechend klein. Wird die Oberfläche der Barriere in Flächenelemente unterteilt und jedem Element eine Kapazität zugeordnet, ergibt sich die in Bild 3-12 für eine Elektrode angegebene Verteilung. Die Spannung zwischen Hochspannungselektrode und Gefäßwand fällt jeweils über der Reihenschaltung aus Barrierenkapazität und Gasspaltkapazität ab. Je größer die Barrierenkapazität ist, desto mehr Spannung entfällt auf die Gasspaltkapazität und desto eher kommt es zur Zündung. Im gezündeten Fall ist der Strom proportional zur Barrierenkapazität, der Hauptanteil des Stroms fließt im Bereich von Flächenelementen mit großer Kapazität. Mit der Wahl einer dünnen Barriere kann die Entladung demnach auf einen bestimmten Bereich konzentriert werden. Die Grenze liegt dabei in der Durchschlagsfestigkeit des Isolierstoffs.

Der Hochspannungspulsgenerator wird an beide Hochspannungselektroden angeschlossen, Strom und Spannung werden gemessen, durch die Acrylglasscheibe werden die Entladungen fotografiert. Der Argondruck wird zwischen 10^{-1} und 130 hPa variiert, im Druckbereich darüber kommt es zu keinen sichtbaren Entladungen.

Die Formgebung der Hochspannungselektroden wird grundsätzlich

als richtig bestätigt. Die Entladungen brennen in erster Linie im angestrebten Bereich. Im Isolierbereich kommt es auch zu Entladungen. Bei niedrigem Druck (10^{-1} hPa) sind im rückwärtigen Bereich der Elektroden Leuchterscheinungen zu beobachten, die bei hohen Frequenzen den Raum vollkommen ausfüllen. Untersuchungen der Oberfläche einer zwischen den Hochspannungselektroden angebrachten Glasscheibe zeigen, daß die Oberflächenspannung sich über die gesamte Fläche des Glases gleichmäßig ändert. Das gesamte Gasvolumen nimmt demnach an der Entladung teil. Mit steigendem Druck entstehen diffuse Gleitentladungen von den Rückseiten der Elektroden zur Gefäßwand. Sie sind jedoch wesentlich leuchtschwächer als die Hauptentladung, die sich mit steigendem Druck und steigender Frequenz immer kontrahierter und schärfer abgegrenzt zeigt.

In Bild 3-13a ist eine Entladung bei 130 hPa mit den beschriebenen Leuchterscheinungen an der Rückseite der stabförmigen Elektrode zu sehen. In Bild 3-13c sind die Leuchterscheinungen und der Aufbau des Gefäßes schematisch dargestellt. Die Hauptentladung teilt sich den Elektroden entsprechend auf. Die Entladung der oberen Elektrode brennt zur oberen Gefäßwand. Die Entladung der unteren Elektrode brennt zur unteren Gefäßwand. Im Elektrodenzwischenraum ist das Leuchten der Entladung geschichtet. Dem Diagramm in Bild 3-13b ist der Intensitätsverlauf der Leuchterscheinung zwischen einer Elektrode und einer in den Spalt eingebrachten Glasscheibe zu entnehmen. Die Entladung ist geschichtet, brennt an den Oberflächen leuchtstärker als im Raum. Das weist auf Gleitentladungen an der Harzoberfläche und der Glasoberfläche hin. Die Oberflächenspannung der Glasscheibe wird nur in dem Gebiet verändert, das der Elektrode direkt gegenübersteht. Dieses von der Entladung betroffene Gebiet besitzt eine scharfe Grenze.

Die Entladungen im Elektrodenrückraum sind durch das Aufbringen einer Leitsilberschicht zu vermeiden. Dadurch sind auch bei niedrigem Druck und hoher Frequenz nur noch die gewünschten Entladungsbereiche beteiligt. Trotz der Konzentration der Entla-

dung auf das den Elektroden gegenüberliegende Gebiet hat die Änderung der Oberflächenspannung einer eingebrachten Glasscheibe bei niedrigem Druck (10^{-1} hPa) eine verschwommene Grenze. Die Entladung brennt diffuser als bei höherem Druck.

Insgesamt ist festzustellen, daß Barrierenentladungen auch in Anordnungen betrieben werden können, in denen sich die Elektroden nicht direkt gegenüberstehen. Durch eine entsprechende Konstruktion von Elektroden und Barriere kann die Entladung auf den gewünschten Bereich konzentriert werden. Dabei ist die beidseitige Behandlung von Substraten möglich. Die Substrate stellen nicht die Barriere dar. Die zu behandelnden Oberflächen stehen nicht senkrecht zur Entladungsrichtung. Die Entladung findet entlang der Oberfläche statt. Sie ist an Unterdruck gebunden. Bei der untersuchten Anordnung beträgt der maximale Druck 130 hPa.

3.4 Einfluß der Spannung

Die im folgenden geschilderten Untersuchungen haben das Ziel, den Einfluß unterschiedlicher Spannungsformen auf Barrierenentladungen festzustellen und die Ergebnisse unter Aspekten wie Zündzeitpunkt, Zündspannung oder Anzahl und Intensität der Mikroentladungen zu vergleichen.

3.4.1 Verschiedene Zündzeitpunkte und Zündspannungen

Für eine erste Versuchsreihe wird steilflankige Spannung benutzt, die auf einen Endwert von 20 kV einschwingt (Bild 3-5). Da es sich um eine überschießende Spannung handelt, streut der Zündzeitpunkt. Es werden Entladungen verglichen, die bei der gleichen Spannung von 20 kV zünden, im Spannungsanstieg, nach dem ersten Überschwingen und nach Erreichen des Endwerts. Im Bild 3-5 sind die drei möglichen Zündzeitpunkte t_1 bis t_3 einge-

zeichnet. Die Zündung erfolgt in diesem Fall bei t_1 . Bei Zündungen zu den Zeitpunkten t_2 und t_3 lassen weder das optische Erscheinungsbild, noch die Spannungs- und Stromverläufe nach der Zündung Unterschiede erkennen. Alle Entladungen weisen die gleiche Verteilung und Intensität der Mikroentladungen, Gleitentladungen am Rand, den Spannungszusammenbruch auf den gleichen Wert, den gleichen Stromverlauf und das gleiche Einschwingen der Spannung nach der Zündung auf (Bild 2-7b zeigt das Ersatzschaltbild des Stoßkreises). Gleiche Zündspannung bedeutet demnach bei dieser Spannungsform auch gleiche Entladung.

Davon verschieden ist allerdings das Zünden der Entladung nach Verlöschen der Zündfunkenstrecke (nach dem Zeitpunkt t_3). Die Spannung bricht zusammen, ohne danach wieder anzusteigen und dadurch einen weiteren Entladungsstrom zu verursachen. Die Entladung verlöscht schnell. Die Mikroentladungen sind gleichmäßig über die Elektrodenfläche verteilt, sie sind sehr lichtschwach. Gleitentladungen sind nur im Ansatz zu erkennen. Die Anzahl der Mikroentladungen stimmt aber mit der Anzahl bei einer Zündung mit gleicher Spannung zu den Zeitpunkten t_1 bis t_3 überein.

Die Höhe der Zündspannung ist vom Zeitpunkt der Zündung, der einem Abschnitt des Spannungsverlaufs zugeordnet werden kann, abhängig, und sie hat einen großen Einfluß auf die Entladung. Bei einer Zündspannung von 10 kV sind Entladungen nur im Randbereich zu erkennen (Bild 3-14a). Sie wachsen als Gleitentladungen nach außen vor. Bei 25 kV Zündspannung (Bild 3-14b) gibt es neben Gleitentladungen eine Reihe von Entladungskanälen im Elektrodenbereich.

Daraus ergibt sich, daß allein die Höhe der Zündspannung für die Anzahl und die Verteilung der Mikroentladungen von Bedeutung ist, während der Zeitpunkt und der Spannungsverlauf vor der Zündung bedeutungslos sind. Eine hohe Zündspannung setzt das Überschreiten der statischen Zündspannung (hier etwa 2 kV) und damit einen steilen Anstieg der Spannung voraus. Sie ist mit einer hohen Feldstärke im gesamten Entladungsspalt verbunden,

die das gleichzeitige Zünden vieler paralleler Mikroentladungen ermöglicht.

Eine Versuchsreihe unter Verwendung von Impulsen des Hochspannungspulsgenerators bestätigt diese Aussage. Wieder werden verschiedene Zündzeitpunkte und -spannungen verglichen. Niedrige Zündspannungen führen zu Entladungen auf dem Rand (Bild 3-15a), hohe Zündspannungen erhöhen die Anzahl der Entladungen und bewirken eine statistische Verteilung über den Elektrodenbereich (Bild 3-15b). Bei gleicher Zündspannung sind Anzahl und Verteilung von Mikroentladungen bei Zündungen im ansteigenden und abfallenden Teil der Spannung gleich.

Eine Gegenüberstellung mit den Entladungsbildern steilflankiger Spannungsimpulse, die bei gleicher Spannung zünden, zeigt die gleiche Anzahl und Verteilung der Mikroentladungen. Die Amplituden des Zündstroms haben gleiche Werte. Nach dem Zündvorgang bleibt die Entladung gezündet (Stromverlauf Typ C). Der Strom ist proportional zur Steigung der Spannung und hat daher bei den verschiedenen Spannungsversorgungen einen unterschiedlichen Verlauf.

Die Stromspitze bei der Zündung ist in erster Linie von der Höhe der Zündspannung und nicht von der Art der Spannungsversorgung abhängig. Dies ist darauf zurückzuführen, daß während der Kürze des Zündvorgangs im Bereich von Nanosekunden die Induktivität der Zuleitung für eine Entkopplung zwischen Spannungsversorgung und Barrierenanordnung sorgt (Bild 2-7b). Deshalb bricht auch die am Versuchsgefäß gemessene Spannung ein, und zwar umso stärker, je größer diese Induktivität ist. Das zeigt der Vergleich der Anlagen zur Erzeugung der rechteckförmigen Wechselspannung (Induktivität $2,4 \mu\text{H}$) und der steilflankigen Spannungsimpulse (Induktivität $40 \mu\text{H}$).

Der Zündstrom speist sich anfangs aus der Streukapazität der Hochspannungselektrode gegen Erde /Braumann 1981/, denn diese kann sich auf kurzem Weg direkt in den Gasspalt entladen (Bild

2-7b). Eine Erhöhung der Kapazität C_E muß sich nach /Salge u.a. 1980/ auf das Verhalten der Entladung während des Zündens auswirken. In einem Versuch wird ein 70-pF-Kondensator zum Versuchsgefäß mit sehr kurzer Leitungsführung parallelgeschaltet. Er erhöht den Zündstrom und verringert den Spannungszusammenbruch. Aber durch die zusätzliche Kapazität wird eine nur wenig gedämpfte Schwingung angeregt, die den Strom zu einem hochfrequenten Wechselstrom macht und etwa $1 \mu s$ andauert. Die Mikroentladungen werden bei gleicher Anzahl und Verteilung heller.

3.4.2 Anstieg der Spannung

Die Steigung der steilflankigen Spannung wird von 500 V/ns bis zu 40 V/ns verringert. Dies geschieht durch den Einbau von Induktivitäten in die Zuleitung zur Hochspannungselektrode (zusätzlich zur Induktivität des Aufbaus L in Bild 2-7b). In Abhängigkeit von der Größe der Induktivität wird nicht nur der Spannungsanstieg flacher, auch das Einschwingen auf den Endwert nach der Zündung geschieht mit einer geringeren Frequenz und nimmt längere Zeit in Anspruch.

Bild 3-16 zeigt den Spannungsverlauf und die Leuchterscheinungen einer Einzelentladung, die bei Verwendung einer Zusatzinduktivität von 1,5 mH entstanden ist. Die Spannung steigt mit 60 V/ns an. Die Entladung zündet bei einer Spannung von 26 kV an den Elektroden. Danach bleibt die Entladung bestehen, die Spannung schwingt auf ihren Endwert von 20 kV ein. Im Vergleich mit Entladungsbildern ohne Zusatzinduktivität (zum Beispiel Bild 3-6a) sind die einzelnen Entladungsflecken wesentlich heller und größer, ebenso die Gleitentladungen im Randbereich. Im Bereich der Elektrode kommt es vereinzelt zum Ansatz von Gleitentladungen.

Wenn die Zündspannung bei verschiedenen Spannungsanstiegen übereinstimmt, sind Anzahl und Verteilung der Mikroentladungen gleich. Auch der Spannungseinbruch und die Stromspitze bei der Zündung lassen keinen Unterschied erkennen. Der Unterschied

liegt nur in der Helligkeit und Ausdehnung der Entladungsflecken auf der Barrierenoberfläche. Je größer die Zusatzinduktivität ist, desto heller und größer sind die Entladungsspuren.

Der Grund dafür liegt in der Entladungsdauer. Bei einer größeren Induktivität sind die Frequenz und die Dämpfung des Stoßkreises kleiner (Bild 2-7b). Nach der Zündung schwingt die Spannung über einen längeren Zeitraum, bis sie den Endwert erreicht. Die Zusatzinduktivität von 1,5 mH verlängert die Zeitdauer des Einschwingens um den Faktor 10. Dies zeigt sich im Vergleich der Spannungsverläufe der Bilder 3-16 und 3-5. Weil die Entladung aufgrund der ständigen Spannungsänderung bestehen bleibt, fließt während dieser Zeit ein Entladungsstrom wechselnder Polarität, der proportional zur Spannungssteigung ist (Stromverlauf Typ C).

Der Hochspannungspulsgenerator liefert Spannungsimpulse mit noch flacherem Anstieg ($5 \text{ kV}/\mu\text{s}$, Bild 2-4). Zündungen erfolgen deshalb öfter bei niedrigen Spannungswerten (einige kV). Im Vergleich zur steilflankigen Spannung sind die Zündspannungen kleiner, die Anzahl der Mikroentladungen ist geringer und der Rand bevorzugt.

Für die Helligkeit der Einzelentladungen bei Impulsen des Hochspannungspulsgenerators ist der Zündzeitpunkt von Bedeutung. Bei Zündung im Spannungsanstieg ist die Entladung heller als bei Zündung während der abfallenden Flanke. Dies ist auf die Eigenschaften dieser Spannungsversorgung zurückzuführen. Der Spannungsimpuls wird durch den Primärstrom des Pulstransformators erzeugt, der nach einer Einschaltzeit von etwa $5 \mu\text{s}$ zu dem Zeitpunkt abgeschaltet wird, wenn der Spannungsimpuls an der nicht gezündeten Barrierenanordnung sein Maximum erreicht. Bei einer Zündung im Spannungsanstieg steigt die Spannung nach einem Einbruch wieder an (Bild 3-17a). Erfolgt die Zündung und der Spannungszusammenbruch im oder nach dem Maximum (Bild 3-17b), kann danach keine hohe Spannung mehr erreicht werden, weil der Spannungsimpuls sich bereits in der abklingenden Phase befindet. Der

Spannungsimpuls ist die Sekundärspannung eines Pulstransformators, und stammt nicht - wie bei der steilflankigen Spannung - aus einem großen Kondensator, der nach der Zündung weitere Energie nachliefern kann. Bei Zündung im Maximum bricht die Spannung an den Elektroden zusammen (im Bild 3-17b von 12 kV auf 5 kV) und steigt danach nicht mehr wesentlich an. Der nach der Zündung folgende Entladungsstrom ist dadurch kleiner als bei einer Zündung im Spannungsanstieg.

Sinusförmige Wechselspannung von 50 Hz enthält einen bedeutend flacheren Spannungsanstieg (etwa 6 kV/ms im Nulldurchgang bei einem Scheitelwert von 20 kV). Die Spannung steigt so flach an, daß sie nicht mehr überschießt. Es kommt zu vielen Entladungen, die schnell wieder verlöschen, denn die anliegende Spannung ist im Zeitbereich einer Mikroentladung (Nanosekunden) einer statischen Spannung gleichzusetzen. In einer Versuchsreihe mit Argon wird der Spannungsscheitelwert zwischen 3 und 20 kV sowie der Druck zwischen 1000 und 16 hPa variiert. Bei allen untersuchten Bedingungen ist die Entladung auf den Randbereich beschränkt. Im Elektrodenbereich sind keine Entladungen zu erkennen.

Zum weiteren Vergleich wird eine statische Spannung an die Versuchsanordnung gelegt, indem eine Spannung langsam (im Bereich von Sekunden) bis zur Zündung gesteigert wird. Die Zündung einer Entladung erfolgt in Argon (1000 hPa, Spaltweite 1,2 mm) bei wenigen kV. Es gibt nur wenige, schwach leuchtende Mikroentladungen, die sich ausschließlich am Rand befinden und in Gleitentladungen übergehen. Im Stromverlauf ist nur eine Entladung zu erkennen. Das führt zu dem Schluß, daß die Mikroentladungen auch bei dieser langsamen Spannungssteigerung gleichzeitig entstehen. Sie bilden eine Einzelentladung mit nur wenigen Mikroentladungen.

Das gleichzeitige Entstehen von Mikroentladungen kann nur auf einer gegenseitigen Beeinflussung der Mikroentladungen beruhen. Die elektromagnetische Strahlung einer Mikroentladung löst an anderen Stellen des Entladungsspalts, an denen die statische

Zündspannung bereits erreicht ist, weitere Mikroentladungen aus. Ist die statische Zündspannung an vielen Stellen erreicht oder überschritten (mit überschießender Spannung), dann entstehen entsprechend viele Mikroentladungen. Jede Mikroentladung schwächt das örtliche elektrische Feld im Gasspalt und wirkt so der Entstehung von Mikroentladungen in ihrer unmittelbaren Umgebung entgegen. Ein hohes elektrisches Ausgangsfeld im Gasspalt ermöglicht geringe Abstände zwischen benachbarten Mikroentladungen, weil die örtliche Feldstärke trotz Schwächung durch die Nachbarentladung zur Zündung ausreicht. Mit einer hoch überschießenden Spannung werden daher viele Mikroentladungen gleichzeitig ausgelöst.

Eine große Anzahl von Mikroentladungen ist günstig für eine gleichmäßige Behandlung von Oberflächen. Die für eine große Anzahl erforderliche, überschießende Spannung wird mit einem steilen Spannungsanstieg erreicht. Die Untersuchungen zeigen, daß eine Steigung von $5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ (Hochspannungspulsgenerator) ausreicht, um die statische Zündfeldstärke im Gasspalt deutlich zu übertreffen, während eine Steigung von $6 \text{ kV}/\text{ms}$ (Sinus 50 Hz) zu gering ist.

3.4.3 Polarität der Spannung

Mikroentladungen entwickeln sich bei positiver und negativer Polarität unterschiedlich. In Bild 3-18 sind die Entladungsbilder bei positiver und negativer Polarität eines einzelnen Spannungsimpulses gegenübergestellt. Die schnell ansteigenden Spannungsimpulse ($2 \text{ kV}/\text{ns}$) werden mit der Anlage für rechteckförmige Wechselspannung erzeugt. Die Entladung zündet bei einer Spannung von 15 kV (statische Zündspannung etwa 8 kV). Die Polaritätsunterschiede sind klar zu erkennen: Fein verästelte, scharf gezeichnete Gleitentladungen auf der Oberfläche bei positiver Spannung, diffuse, strukturlose Lichtflecke bei negativer Spannung.

Unter anderen Versuchsbedingungen werden die Unterschiede der Spannungspolaritäten im Entladungsbild weniger deutlich. In Spannungsimpulsen des Hochspannungspulsgenerators kommt es unter den Versuchsbedingungen für schnell verlöschende Entladungen (Stromverlauf Typ B) zu Zündungen im Spannungsanstieg und im Bereich der abfallenden Spannung. Aufnahmen der Leuchterscheinungen zeigen die Merkmale beider Polaritäten. Bleibt die Entladung nach der Zündung bestehen (Stromverlauf Typ C), so ist der Strom proportional zur Ableitung der Spannung. Während bei der rechteckförmigen Wechselspannung der Endwert schnell und ohne wesentliches Einschwingen erreicht wird, zeigen die anderen Spannungsversorgungen deutliche Schwingungen im Spannungsverlauf. Der Entladungsstrom nimmt daher beide Polaritäten an. Es treten stets die Charakteristika beider Polaritäten in einem Entladungsbild auf. Einen wichtigen Unterschied der Polarität gibt es dennoch: Die Zündung. Der impulsförmige Zündstrom entspricht in seiner Polarität der des Spannungsanstiegs und beeinflusst die Anzahl und Verteilung der Mikroentladungen.

Bei Entladungen in Argon gibt es einen Druckbereich (um 100 hPa), in dem viele Mikroentladungen über die Elektrodenfläche verteilt sind und nicht den Randbereich erfassen. Während die Entladung bei positiven Spannungsimpulsen bereits ab 40 hPa den Rand bevorzugt, setzt dieser Effekt bei negativer Spannung erst bei 4 hPa ein. Die gleiche Beobachtung wird bei Verwendung von Luft und Sauerstoff gemacht. Bei diesen Gasen kommt hinzu, daß die Entladungen negativer Polarität grundsätzlich heller sind als die positiver. In Sauerstoff sind die Entladungskanäle positiver Polarität so dunkel, daß sie kaum zu erkennen sind.

Der Grund für dieses polaritätsbedingt unterschiedliche Verhalten liegt in der Entstehung der für die Entladung benötigten Elektronen. Bei negativer Spannung können die Elektronen aus der als Kathode geschalteten Metallelektrode emittiert werden. Dies erfordert nur geringe Energien und wird durch den Sekundäremissionskoeffizienten beschrieben /z.B. Kind, Kärner 1982/. Bei positiver Spannung kommen die Elektronen von der Barriere, sie

müssen an der Isolierstoffoberfläche erzeugt werden. Dazu ist eine Entladung an der Oberfläche, eine Gleitentladung, erforderlich. Gleitentladungen entstehen nicht im Material des Isolierstoffs, sondern in der Grenzschicht über diesem /Gänger 1953/. Die Art des Gases ist damit wichtig für die Bereitstellung der den Entladungsstrom tragenden Elektronen. In elektronegativen Gasen wie Luft und Sauerstoff ist die Erzeugung der Elektronen wesentlich schwerer als zum Beispiel in Argon. Deshalb wird bei diesen Gasen der Polaritätsunterschied besonders deutlich.

3.5 Einfluß der Frequenz

Die rechteckförmige und die sinusförmige Wechselspannung werden mit einer fest vorgegebenen Frequenz von 50 Hz eingesetzt. Ein wesentlicher Vorzug des Hochspannungspulsgenerators ist, daß Entladungen mit unipolaren Spannungsimpulsen und einstellbarer Repetitionsfrequenz untersucht werden können.

3.5.1 Zündspannung und Stromverlauf

Während bei einem Einzelimpuls aufgrund der überschießenden Spannung starke Streuungen des Zündzeitpunkts und damit der Zündspannung auftreten, beginnt mit steigender Repetitionsfrequenz eine Stabilisierung der Zündspannung. Die Zündung erfolgt zunehmend in der ansteigenden Spannungsflanke. Die Abweichung der Zündspannung von Puls zu Puls wird geringer. Die Zündspannung wird kleiner, je höher die Repetitionsfrequenz ist.

Auf der Barrierenoberfläche und im Entladungsvolumen verbleibende Ladungsträger, die in der Zeit zwischen Verlöschen der Entladung und erneutem Spannungsanstieg nicht rekombinieren, rufen dieses Verhalten hervor. Sie ermöglichen die Einleitung einer früheren Zündung. Weil bei stets gleichem Entladungsverlauf während des neuen Spannungsimpulses etwa die gleiche Anzahl

von Ladungsträgern nach dem Verlöschen vorhanden ist, stabilisiert sich die Zündung bei einer bestimmten Spannung.

Im Gegensatz dazu steht der stark streuende Zündzeitpunkt bei einem Einzelimpuls, denn dabei ist die Anzahl der anfangs vorhandenen Ladungsträger gering und zufällig. Eine Erhöhung der Repetitionsfrequenz verkürzt die Zeitspanne zwischen den Spannungsimpulsen und erhöht so die Anzahl der noch nicht rekombinierten Ladungsträger. Eine weitere Senkung der Zündspannung ist die Folge. Bei weiterer Frequenzsteigerung bewegt sich der Abstand der Pulse gegen Null, sie gehen ineinander über und überlappen sich. Die Entladung muß nicht mehr zünden, sie bleibt - wie in einer Hochfrequenzentladung - kontinuierlich bestehen.

Die Repetitionsfrequenz bestimmt auch den Verlauf des Stroms. Deshalb kann eine Frequenzsteigerung auch anhand des sich ändernden Stromverlaufs verfolgt werden. Dazu eignen sich die vier Typen des Stromverlaufs A bis D (Bilder 3-1 bis 3-4). Die Typen A und B können unter konstanten Versuchsbedingungen gleichzeitig auftreten, weil die Zündverzugszeit nach Erreichen der statischen Zündspannung statistisch streut und so lang sein kann, daß es nicht zur Zündung kommt. Der zahlenmäßige Anteil des Stromverlaufs vom Typ B wächst jedoch mit der Frequenz.

Wenn eine Zündung überhaupt möglich ist, wenn neben dem Verschiebungsstrom im ungezündeten Zustand (Stromverlauf Typ A, Bild 3-1) auch impulsförmige Ströme (Stromverlauf Typ B, Bild 3-2) auftreten, bewirkt eine Frequenzsteigerung zunächst häufigere Zündungen und schließlich die Zündung bei jedem Impuls mit annähernd gleicher Spannung. Mit dem Sinken der Zündspannung ist ein geringerer Stromimpuls verbunden. Weil die Zündung immer früher im Spannungsanstieg erfolgt, kann danach erneut die Zündspannung erreicht werden, so daß innerhalb einer Spannungsflanke mehrere Zündungen stattfinden. Wenn die Spannung so steil ansteigt, daß die folgende Zündung in dem Moment erfolgt, in dem die vorherige Entladung gerade verlöscht, ist der Übergang zur weiterbestehenden Entladung des Stromverlaufs Typ C erreicht (Bild 3-3). Die

Entladung zündet nur einmal in der Spannungsflanke und bleibt längere Zeit erhalten. Immer geringere Zeitabstände zwischen den Spannungsimpulsen führen zu einer kontinuierlichen Entladung ohne Verlöschen und Neuzünden, dem Stromverlauf Typ D entsprechend (Bild 3-4).

Bei atmosphärischem Druck in Luft (Hochspannungspulsgenerator, Barriere 2 mm Acrylglas, Spaltweite 2,5 mm) ergibt sich auch mit 25 kHz Repetitionsfrequenz kein Übergang vom Stromverlauf des Typs B zu dem des Typs C. Durch Senkung des Drucks ist dies allerdings möglich, denn eine Druckabsenkung führt zu einer geringeren Zündspannung und außerdem zu einer längeren Lebensdauer der Ladungsträger, weil die Rekombination durch die geringere Dichte erschwert wird. Dadurch wird schon bei geringerer Steigung der Spannung erreicht, daß die Entladung nicht verlischt.

In Bild 3-19 sind die Versuchsergebnisse zusammengestellt. In Abhängigkeit von Druck und Frequenz ergeben sich Bereiche, in denen bestimmte Stromtypen auftreten. Es handelt sich um eine schematische Darstellung, die Übergänge zwischen den verschiedenen Bereichen sind fließend und können nicht durch exakte Grenzen angegeben werden. Bei 10 hPa ergibt sich schon beim einzelnen Spannungsimpuls ein Stromverlauf des Typs C. An dieser Stelle ist die Zündspannung minimal. Das Produkt aus Druck und Spaltweite liegt mit $10 \text{ hPa} \cdot 2,5 \text{ mm} = 25 \text{ hPa} \cdot \text{mm}$ im Bereich des Paschen-Minimums. Unterhalb dieses Drucks verlöschen die Entladungen nach der Zündung wieder (Stromverlauf Typ B). Wenn die jeweilige statische Zündspannung überschritten wird, führt eine Erhöhung der Frequenz von kurzzeitigen Stromimpulsen (B) über länger dauernde Ströme (C) zur andauernden Hochfrequenzentladung (D). Bei welchen Frequenzen die Übergänge erfolgen, hängt vom eingestellten Druck ab.

3.5.2 Verteilung der Mikroentladungen

Die Zündspannung sinkt mit steigender Repetitionsfrequenz der Spannungsimpulse. Bei geringer Zündspannung entstehen weniger Mikroentladungen und der Randbereich wird bevorzugt. Aufnahmen von Entladungen in Argon und Helium zeigen eine Konzentration der Entladungen auf den Rand. Außerdem bilden sich bei hohen Repetitionsfrequenzen (20 kHz) einzelne sehr helle Kanäle aus, die am Elektrodenrand "wandern".

In Luft, Sauerstoff und Acetylen ergibt sich ein anderes Entladungsverhalten. In einer Versuchsreihe mit Impulsen des Hochspannungspulsgenerators in atmosphärischer Luft wird dies deutlich. Bis zu 1 kHz ergibt sich eine diffuse, gleichmäßige Verteilung der Mikroentladungen über das Elektrodengebiet mit einer leichten Bevorzugung des Randes (Bild 3-20a). Schon bei 1 kHz ist im Mittelbereich eine Konzentration auf wenige, hell leuchtende Kanäle erkennbar. Diese Kanäle heben sich bei einer leichten Frequenzsteigerung auf 1,5 kHz noch deutlicher hervor. Sie bilden Linien (Bild 3-20b). Aus der Belichtungszeit der CCD-Kamera von 20 ms, während der die Entladungen von 30 Spannungsimpulsen aufgenommen werden, ist zu schließen, daß sich die Kanäle fortbewegen. Bei 3 kHz sind die Entladungen noch heller (Bild 3-20c). Dies hängt allerdings auch mit der konstanten Belichtungszeit zusammen. Es sind nach wie vor einzelne Kanäle, deren Unschärfe für ein "Wandern" innerhalb der Aufnahmezeit spricht. Bei 25 kHz haben sich klar definierte Entladungskanäle etabliert (Bild 3-20d).

Da es sich nicht um eine kontinuierliche Hochfrequenzentladung handelt, sondern ein Stromverlauf des Typs B mit sofortigem Verlöschen der Entladung vorliegt, müssen die Mikroentladungen stets in den gleichen Bahnen zünden. Dies kann nicht auf den Einfluß der Barrierenoberfläche zurückgeführt werden, denn die geladenen Gebiete der Oberfläche verschlechtern durch eine Schwächung des lokalen elektrischen Feldes die Zündbedingungen. Die Konzentration der Entladung auf definierte Kanäle ist ein

Effekt im Gasvolumen. Die im Gas eines Entladungskanals gespeicherte Energie - in Form von angeregten, ionisierten oder neu entstandenen (Ozon aus Sauerstoff) Molekülen - ist groß genug und die Zeitspanne zwischen zwei Zündungen klein genug, um die erneute Zündung an der gleichen Stelle einzuleiten.

Die Konzentration der Entladung auf wenige Kanäle als Folge einer hohen Repetitionsfrequenz wird auch bei großer Spaltweite und niedrigem Druck festgestellt. Bei einer Spaltweite von 200 mm, mit je einer Barriere über jeder Elektrode, in Luft von 12 hPa wird die Frequenz des Hochspannungspulsgenerators von 0 bis 25 kHz gesteigert. Der Stromverlauf verändert sich vom ungezündeten Verschiebungsstrom (Typ A) bis zum kontinuierlichen Entladungsstrom (Typ D). Die Stromverläufe Typ B und C werden unter diesen Bedingungen bei einer diffusen Entladung im ganzen Volumen oder im Randbereich des Gefäßes festgestellt (Bild 3-21a), während sich beim Typ D die Entladung auf einen einzelnen Schlauch konzentriert (Bild 3-21b, der zweite, dünnere Schlauch ist eine Spiegelung im Glas). Der Übergang von einer diffusen Entladung zu diesem Schlauch benötigt nach Einschalten der Spannungsimpulse etwa eine halbe Sekunde. So lange dauert es offenbar, bis sich ein leitfähiger Kanal in dem großen Volumen aufgebaut hat. Der Durchmesser dieses Kanals kann mit einer höheren Frequenz oder einem höheren Druck weiter herabgesetzt werden.

3.6 Zusammenfassende Diskussion

Die vorangegangenen Untersuchungen lassen Schlüsse auf die zeitliche und räumliche Entwicklung von Barrierenentladungen, insbesondere aber auch auf die einer Einzelentladung zu. Eine Einzelentladung beginnt mit der Zündung von Mikroentladungen. Die Anzahl und die Verteilung der Mikroentladungen ist durch die Höhe der Zündspannung bestimmt. Bei hoher Feldstärke im Gasspalt zum Zeitpunkt der Zündung kommt es zum gleichzeitigen Entstehen vieler paralleler Entladungskanäle. Der Zündstrom als Summe der

in den Mikroentladungen fließenden Ströme wird in erster Linie aus der Erdkapazität der Barrierenanordnung C_E gespeist (Bild 2-7b). Nach der Zündung entstehen keine weiteren Mikroentladungen. Die Aufnahmen der Leuchterscheinungen zeigen, daß die Anzahl der Mikroentladungen unterschiedlich lang dauernder Einzelentladungen gleich ist, wenn die Zündspannung übereinstimmt. Der Strom fließt in den einmal gezündeten Kanälen weiter, die dadurch im Entladungsbild mit zunehmender Stromflußdauer heller erscheinen. Die bei der Zündung auf der Barrierenoberfläche initiierten Gleitentladungen wachsen vor und bilden Lichtenberg-Figuren, die mit zunehmender Dauer der Entladung immer heller werden.

Eine Einzelentladung setzt sich aus zwei Phasen zusammen: Aus der Zündphase, in der durch die Höhe der Zündspannung die Anzahl und Verteilung der Mikroentladungen bestimmt wird, und aus der Brennphase, während der die bestehenden Kanäle weiter von Strom durchflossen werden und Gleitentladungen auf der Barrierenoberfläche vorwachsen können. Beide Phasen werden durch die Wahl der äußeren Parameter beeinflusst. Für die Zündphase ist die Zündfeldstärke im Gasspalt entscheidend. Ein kleiner Gasspalt und ein steiler Spannungsanstieg erlauben das Überschreiten der statischen Zündfeldstärke /Gänger 1953;Kogelschatz 1987/. Je steiler der Spannungsanstieg an der Barrierenanordnung ist, desto höher kann die Zündfeldstärke sein. Ein geringer zeitlicher Abstand der auftretenden Einzelentladungen setzt durch die noch vorhandenen Ladungsträger die Zündfeldstärke herab.

Für die Brennphase der Einzelentladung ist die Stromflußdauer prägend. Wenn die Entladung sofort nach der Zündung wieder verlischt (Stromverlauf Typ B), fließt der Strom nur über einen kurzen Zeitraum und es bilden sich keine leuchtstarken Entladungskanäle und Gleitentladungen, was nur geschieht, wenn die Entladung über längere Zeit aufrechterhalten bleibt (Stromverlauf Typ C). Hierfür ist der Verlauf der Spannung nach der Zündung verantwortlich. Die Steigung der Spannung muß ausreichen, den zum Weiterbestehen der Entladung nötigen Strom durch den Gasspalt zu treiben. Die Größe der notwendigen Steigung ist von

der Gasart und dem Gasdruck abhängig. Spannungsversorgung und elektrischer Kreis bestimmen den Verlauf der Spannung. Steigt die Spannung an den Elektroden nach einer Zündung wieder steil an, wie bei der rechteckförmigen Wechselspannung und den steilflankigen Spannungsimpulsen, so bleibt die Entladung bestehen. Steigt sie aber langsamer, wie bei Spannungsimpulsen des Hochspannungspulsgenerators, so kann die Entladung verlöschen.

Oberflächen sollen gleichmäßig bearbeitet werden. Da Barrierenentladungen aus einzelnen Mikroentladungen bestehen, muß jedes Oberflächenelement mit gleicher Häufigkeit von einer Mikroentladung betroffen sein. Dazu ist zunächst ein elektrisches Ausgangsfeld senkrecht zu der zu bearbeitenden Oberfläche Voraussetzung. Mit vielen Mikroentladungen pro Zeiteinheit läßt sich die Forderung nach gleicher Häufigkeit leichter erfüllen als mit wenigen. Deshalb ist der Gasspalt klein zu halten (Millimeter-Bereich). Für die Wahl der Spannungsform gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Spannung mit geringer Steilheit für Zündungen bei der statischen Zündspannung, zum Beispiel sinusförmige Wechselspannung mit 50 Hz, oder steile Spannung mit Überschießen der Spannung über die statische Zündspannung.

Sinusförmige Spannung mit 50 Hz hat den Vorteil einfacher Erzeugung aus dem Netz. Die Zündung der Entladung erfolgt nach dem Townsend-Mechanismus bei der statischen Zündspannung. Mikroentladungen in Gasen mit geringer Zündspannung (Argon, Helium) bevorzugen unter diesen Bedingungen den Elektrodenrand und bilden Gleitentladungen auf der Barrierenoberfläche. Diese Gase kommen deshalb für die Oberflächenbehandlung mit sinusförmiger Spannung nicht in Frage. In Luft und Sauerstoff allerdings bilden sich die Mikroentladungen im Bereich der Elektrodenfläche und verteilen sich gleichmäßig, weil neue Entladungskanäle bevorzugt dort entstehen, wo die Barrierenoberfläche nicht bereits von vorhergehenden Entladungen aufgeladen ist. Dies ergibt sich aus den Messungen von /Eliasson u.a. 1986/ und wird durch Aufnahmen dieser Arbeit bestätigt, die in diesen Gasen nur sehr dunkle, gleichmäßig verteilte Entladungserscheinungen zeigen.

Sie sind deshalb so dunkel, weil die in einer Mikroentladung umgesetzte Energie aufgrund der niedrigen Zündspannung und des kleinen, kurzen Stroms gering ist.

Eine Erhöhung dieser Energie ist mit überschießender Spannung zu erreichen. Dazu ist eine Spannungsform mit impulsartigem Anstieg erforderlich. Die Zündung erfolgt hier nach dem Streamer-Mechanismus. Durch die hohe Feldstärke im Gasspalt bilden sich viele parallele Kanäle gleichzeitig. Um Oberflächen in einem kurzen Zeitraum zu bearbeiten, ist eine möglichst hohe Repetitionsfrequenz der Spannungsimpulse wünschenswert. Diese darf jedoch nicht zu hoch sein, denn ein geringer zeitlicher Abstand der Einzelentladungen führt zu einem Absinken der Zündspannung und begünstigt die Konzentration auf wenige Entladungskanäle, die sich sogar stationär etablieren können. Mit Spannungsimpulsen des Hochspannungspulsgenerators beginnt der Prozeß der Konzentration in Luft bei einem Kilohertz.

Der Zündspannung des verwendeten Gases kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Bei geringer Zündspannung entstehen weniger Mikroentladungen, der Elektrodenrand wird bevorzugt, es bilden sich Gleitentladungen auf der Barriere. Je höher die Zündspannung des Gases ist, desto günstiger sind die Bedingungen. Zumischungen von Inertgasen können die Zündspannung vermindern und so die Vorteile impulsförmiger Spannung beeinträchtigen.

Durch ein Absenken des Gasdrucks auf etwa 100 hPa wird bei gleicher Zündspannung die Anzahl und die Helligkeit der Mikroentladungen gesteigert. Barrierenentladungen können bei Unterdruck mit Spaltweiten im Bereich von Zentimetern betrieben werden. Durch eine geeignete konstruktive Gestaltung von Elektroden und Barrieren kann die Entladung sogar bei nicht planparallelen Elektroden auf die gewünschte Entladungsfläche konzentriert werden.

Die gleiche Zündspannung wie bei atmosphärischem Druck kann allerdings nur bei einem Einzelimpuls mit überschießender Span-

nung erreicht werden. Mit repetierenden Spannungsimpulsen ist die Zündspannung bei Unterdruck nach dem ersten Impuls geringer als bei atmosphärischem Druck, weil die Ladungsträger, die bei geringer Dichte des Gases seltener stoßen und deshalb schlechter rekombinieren können, eine längere Lebensdauer haben.

Insgesamt ist festzuhalten, daß sich eine hohe Zündspannung und eine gleichmäßige Verteilung der Mikroentladungen mit einer Spaltweite von wenigen Millimetern, einem Gas bei atmosphärischem Druck, das eine hohe Zündspannung aufweist, und mit einer Spannungsversorgung erreichen lassen, die steil ansteigende Spannungsimpulse mit einer ausreichenden Repetitionsfrequenz (Bereich von Kilohertz) liefert. Die Spannung sollte nach der Zündung möglichst schnell einen konstanten Wert erreichen, um die Entladung schnell verlöschen zu lassen. Der Zeitraum zwischen dem Verlöschen der Entladung und dem folgenden Spannungsimpuls muß eine ausreichende Rekombination von Ladungsträgern zulassen, so daß auch im Folgeimpuls eine hohe Zündspannung erreicht werden kann.

4. Erzeugung einer Kohlenwasserstoffschicht

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen mit Barrierenentladungen in Acetylen zeigen, daß sich auf der Isolierstoffbarriere eine Schicht bildet. Die Eigenschaften dieser Schicht hängen in starkem Maß von den Versuchsparametern ab. Im folgenden wird zunächst die Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schicht beschrieben, die eine gleichmäßige Schichtdicke, eine große Haftfestigkeit und eine hohe Transparenz aufweist. Bei der anschließenden Diskussion darüber, in welcher Weise die Versuchsbedingungen die Eigenschaften der Schicht beeinflussen, wird ein Modell für das Aufwachsen der Schicht entworfen.

4.1 Beschichtungsverfahren und Eigenschaften der Schicht

Die Schicht wird im Versuchsgefäß nach Bild 2-10 hergestellt. Als Substrat und gleichzeitig Barriere wird eine Glasscheibe (10 cm · 12 cm) mit einer Stärke von 1 mm eingesetzt. Der Gas-spalt beträgt 1,5 mm. Substrat, Elektroden und Gas haben Raumtemperatur. Die Spannungsversorgung erfolgt mit dem Hochspannungspulsgenerator.

Zunächst wird die Glasscheibe 2 min lang einer Entladung in Argon ausgesetzt, das mit 4 l/min bei atmosphärischem Druck durch die Anordnung strömt. Die Repetitionsfrequenz der Hochspannungsimpulse mit einem Scheitelwert von 6 kV beträgt 1 kHz. Diese Vorbehandlung dient zur Aktivierung der Glasoberfläche und ist Voraussetzung für eine gute Schichthaftung.

Als reaktives Gas wird zu 100 % (Schweiß-)Acetylen mit einem Durchfluß von 0,5 l/min bei atmosphärischem Druck benutzt. Es erfolgt keine Zumischung anderer Gase. Der Scheitelwert der Hochspannungsimpulse liegt bei 12 kV. Die Repetitionsfrequenz ist 1 kHz. In den Stromverläufen sind impulsartige Zündungen mit schnellem Verlöschen entsprechend dem Stromverlauf des Typs B

(Bild 3-2) zu erkennen. Die Zündung erfolgt bei einer Spannung von 10 kV an den Elektroden. Der Hochspannungspulsgenerator wird im Intervallbetrieb eingesetzt. Auf jeweils 70 ms Entladungsintervall folgen 3 s Pause. Diese Zeiten sind auf die Strömungsgeschwindigkeit des Gases abgestimmt. Während der Beschichtungsphase von 70 ms können die Gasteilchen als ortsfest angenommen werden. Sie bewegen sich um weniger als 1 mm. Innerhalb der Pause wird das Gasvolumen im Spalt vollständig gegen frisches Gas ausgetauscht. Mit dem Intervallbetrieb wird eine über die Beschichtungsfläche gleichmäßige Schichtdicke erreicht. Während einer Gesamtbeschichtungszeit von 15 min, entsprechend einer effektiven Beschichtungszeit von 21 s, wird eine Schicht von 120 nm Dicke auf dem Glas abgeschieden.

Zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit dienen die Schichtdicke und die Transparenz der Schicht. Um die Schichtdicke messen zu können, wird ein Klebestreifen auf dem Glassubstrat mitbeschichtet und danach entfernt, so daß eine steile Kante entsteht. Dort wird das Oberflächenprofil mit einer Diamantnadel mechanisch abgetastet (Perthometer pmk, Firma Perthen). Die Schicht weist im Randbereich (etwa 2 mm) eine leichte Überhöhung auf (140 nm). Die gesamte Innenfläche ist jedoch vollkommen gleichmäßig.

Die Transmission der Schicht wird in einem Wellenlängenbereich von 800 nm bis 200 nm (nahes Infrarot, sichtbares Licht, nahes Ultraviolett) mit einem Spektrophotometer (Cary 2300) gemessen. Bild 4-1 zeigt vier Verläufe der Transmission in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Das unbeschichtete Glas hat im Bereich von 800 nm bis 340 nm eine nahezu konstante Transmission von 90 %. Ein steiler Abfall trennt den sichtbaren vom ultravioletten Bereich, in dem das Glas keine Strahlung mehr durchläßt. Eine aufgebrauchte Schicht vermindert die Transmission, allerdings im kurzwelligen Bereich wesentlich stärker als im langwelligen. Je dicker die Schicht ist, desto geringer ist die Transmission - allerdings nur im kurzwelligen Bereich, denn bei Schichten etwas größerer Dicke (ab 100 nm deutlich zu beobachten) bildet sich im Bereich um 600 nm ein Transmissionsmaximum aus, das die Trans-

missionswerte dünnerer Schichten übertrifft und nahezu den Wert unbeschichteten Glases erreicht.

Im Verbund mit anderen Schichten können Transmission und Reflexion stark beeinflusst und bewußt gesteuert werden. Als Beispiel wird eine Goldschicht auf die bestehende Schicht aufgedampft. Bild 4-2 zeigt die Transmission von Glas, von der Acetylen-schicht auf Glas, von einer Goldschicht auf Glas und von dem Verbund aus Acetylen- und Goldschicht auf Glas. Obwohl der Schichtverbund nur in einem kleinen Wellenlängenbereich in der Transmission leicht über der Transmission der Goldschicht liegt, wird die Schichtkombination vom menschlichen Auge als transparenter empfunden, weil sich die maximale Empfindlichkeit des Auges in eben diesem Wellenlängenbereich, beim Gelb, befindet.

Die Gleichmäßigkeit der Schicht ist allerdings auch mit dem Auge zuverlässig zu beurteilen. Bei senkrechter Betrachtung der Glasscheibe auf weißem Untergrund zeichnet sich die Schicht etwas dunkler ab. Sie wirkt aufgrund der stark herabgesetzten Transmission im blauen Spektralbereich gelblich (Bild 4-1). Eine als gleichmäßig dunkel eingestufte Schicht weist über die gesamte Fläche gleiche Schichtdicke und Transmissionsverläufe auf. Wird die Glasscheibe auf einen dunklen Untergrund gelegt und schräg gegen weißes Licht betrachtet, ergeben sich farbige Interferenzerscheinungen. Flächen gleicher Schichtdicke erscheinen in gleicher Farbe. Eine Änderung der Schichtdicke von etwa 10 nm ist zuverlässig zu erkennen /Gerthsen u.a. 1977/.

Die Oberfläche der Schicht ist sehr glatt. Mit der Diamantspitze werden keine Rauigkeitsunterschiede zum Glassubstrat festgestellt. Bei Betrachtung durch ein Mikroskop (Vergrößerung Faktor 1000) läßt sich keine Oberflächenstruktur erkennen.

Aus der Größe der Oberflächenspannung des Substrats kann auf die zu erwartende Haftung - Adhäsion - zwischen Substrat und aufzutragender Schicht geschlossen werden /Walter 1968/: Je höher die Oberflächenspannung ist, desto besser sind die Haftungsei-

enschaften. Von /Sell, Neumann 1964/ wird die Methode beschrieben, mit der kritischen Benetzungsspannung von Flüssigkeiten die Oberflächenspannung von Festkörpern zu ermitteln. Anhand des Benetzungsgrads von Testflüssigkeiten wird die Oberflächenspannung des unbeschichteten Glases zu 54 dyn/cm (= 54 mN/m), des mit einer Argonentladung vorbehandelten Glases zu >56 dyn/cm und der Schicht zu 36 dyn/cm bestimmt. Damit besitzt die Schicht ein hydrophobes Verhalten. Ihre Oberflächenspannung liegt noch unter der Oberflächenspannung der behandelten Glasscheibe. Wasser perlt von der Schicht deutlich ab. Durch eine Argonentladung von 2 min Dauer kann die Oberflächenspannung der Schicht allerdings auf 42 dyn/cm erhöht werden.

Die Schicht besteht aus elektrisch isolierendem Material. Weitere Eigenschaften der Schicht werden mit einfachen Testmethoden ermittelt. Ein Klebestreifen wird auf der Schicht befestigt und wieder abgezogen. Es bleibt kein Schichtmaterial am Streifen haften. Die Schicht läßt sich mit Wasser nicht ablösen. Sie ist hart genug, um von einem Bleistift der Härte 6H nicht geritzt zu werden. Erst durch Aufdrücken einer scharfen Metallspitze kann die Schicht abgekratzt werden.

In ersten Analysen wird versucht, die Schichtzusammensetzung zu bestimmen. Beim Erhitzen von Schichtpartikeln in einem Tiegel färben sich diese zunächst schwarz (Kohlenstoff) und verbrennen dann rückstandslos, so daß auf eine rein organische Verbindung geschlossen werden kann. Außerdem wird das Elektrodenmaterial Aluminium mit einem empfindlichen Meßverfahren als Bestandteil der Schicht ausgeschlossen (Spectroflame-ICP, Spectro Analytical Instruments). Das Infrarotspektrum der Schicht ist Bild 4-3 zu entnehmen (Perkin Elmer 883 Infrared Spectrometer). Dargestellt ist die Transmission in Abhängigkeit von der Wellenzahl in cm^{-1} . Aus dem Verlauf des Spektrums und charakteristischen Absorptionslinien kann unter Heranziehung von Vergleichsspektren auf das durchstrahlte Material geschlossen werden. Für diese aus Acetylen hergestellte Schicht zeigte sich keine Übereinstimmung mit Spektren gängiger Kunststoffe, auch nicht mit Polyacetylen

(Strukturformel: $-(CH=CH)-$). /Gibson, Pochan 1982/ beschreiben Untersuchungen der Oxidation von Polyacetylen durch Umwelteinflüsse. Ihr Infrarotspektrum einer über 49 Tage den Einwirkungen von Luft, Licht und Feuchtigkeit ausgesetzten Polyacetylen-schicht weist große Ähnlichkeit mit dem Spektrum in Bild 4-3 auf. Es ist somit wahrscheinlich, daß die Schicht zumindest zu einem erheblichen Teil aus "gealtertem" Polyacetylen besteht, das in seiner Struktur durch die Anlagerung von Sauerstoff verändert ist. Dieser Sauerstoff kann aus dem für die Druckflaschenlagerung des Acetylens benutzten Lösungsmittel Aceton stammen oder erst nachträglich aus der Luft aufgenommen werden.

4.2 Die Schichteigenschaften beeinflussende Parameter

Eine gleichmäßig dicke Schicht kann nur im Intervallbetrieb des Hochspannungspulsgenerators aufgetragen werden. Im Dauerbetrieb wächst eine keilförmige Schicht auf, die in Strömungsrichtung des Reaktionsgases stärker wird. Außerhalb des Entladungs-bereichs bilden sich - wie im Intervallbetrieb - keine Ablagerungen. Daraus ergibt sich der Schluß, daß mindestens zwei Prozesse für die Anlagerung von Gasteilchen an der Oberfläche wirksam sind. Im ersten werden Gasteilchen in einer Mikroentladung direkt auf der Oberfläche deponiert. Im zweiten werden Teilchen, die bereits in einer Mikroentladung angeregt aber nicht abgelagert wurden, in einer nächsten Mikroentladung auf die Oberfläche gebracht. Feste Bestandteile der Schicht werden aber nur auf der Oberfläche durch Einwirken des Plasmas gebildet, nicht im Entladungsvolumen, denn sonst würden sich infolge der Gasströmung auch Ablagerungen außerhalb des Entladungsgebiets befinden. /Frenklach, Spear 1987/ beschreiben eine ähnliche Vorstellung für das Aufwachsen von Diamantschichten. Die nötigen Moleküle werden zwar im Volumen erzeugt, der Einbau in die Schicht erfolgt aber für jedes einzelne Molekül erst durch die Einwirkung des Plasmas an der Oberfläche.

Das Aufwachsen einer Schicht im Dauerbetrieb ist in Bild 4-4 schematisch dargestellt. Neutrale Gasteilchen werden durch Mikroentladungen direkt auf der Isolierstoffbarriere niedergeschlagen oder nur im Volumen angeregt. Die angeregten Teilchen bewegen sich im Gasraum weiter. In folgenden Mikroentladungen können diese Teilchen zusätzlich zu den direkt niedergeschlagenen Teilchen in die Schicht eingebaut werden. Die Konzentration der angeregten und besonders leicht abzuscheidenden Teilchen wird in Richtung des Gasstroms immer größer. So wächst die Schicht im linken Bereich der Darstellung schneller auf. Nach Abschalten der Spannungsversorgung bleibt eine ungleichmäßig dicke Schicht zurück.

Wird dem Acetylen Argon zugesetzt, vermindert sich die Zündspannung. Im Bereich des Elektrodenrands wächst die Schicht stärker auf. Die Haftung der Schicht auf dem Substrat wird verschlechtert. In der Schicht entstehen Spannungsrisse, die aus den äußeren Bereichen in die Schichtmitte vorwachsen. Außerdem bilden sich pulverförmige Ablagerungen auf dem Substrat und im Beschichtungsgefäß außerhalb des Entladungsgebiets, die nur eine geringe Haftung aufweisen. In diesem Fall werden also feste Teilchen im Entladungsvolumen selbst erzeugt. /Zhu u.a. 1990/ weisen darauf hin, daß Edelgase bei der Herstellung von Diamantschichten die Reaktionen katalytisch beeinflussen und zu einer Erhöhung der Beschichtungsrate beitragen können. In der Barrierenanordnung ist die Beschichtungsrate in Argon offenbar zu hoch und führt zu überschüssigen Ablagerungen.

Auch ein geringerer Druck führt zu schlechterer Haftung und vermehrter Rißbildung. Dies kann an der geringeren Zündspannung liegen. Eine gewisse Energie der Mikroentladungen scheint die Voraussetzung für eine feste Schicht zu sein. /Mort, Jansen 1986/ stellen fest, daß Kohlenwasserstoffschichten dichter werden, wenn die Stoßenergie der Teilchen höher ist.

Eine höhere Frequenz der Spannungsimpulse senkt die Zündspannung und vermindert dadurch die Schichtqualität. Außerdem wächst die

Schicht ungleichmäßig auf, denn die Schichtverteilung orientiert sich direkt an der Verteilung der Mikroentladungen. In einer Barrierenentladung in Acetylen mit Spannungsimpulsen des Hochspannungspulsgenerators ergibt sich bei einer Repetitionsfrequenz von 25 kHz eine punktförmige Verteilung der Schicht, die genau der Entladungsverteilung in Bild 3-20d entspricht. Die Schicht wächst an den Stellen auf, an denen Mikroentladungen entstehen.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Barrierenentladungen mit dem Ziel untersucht, sie zur Behandlung von Oberflächen einzusetzen. Anhand des bekannten Wissensstandes erfolgt zunächst eine Differenzierung verschiedener Entladungsformen und unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Verteilungen von Barrierenentladungen. Für die experimentellen Untersuchungen wird ein Generator entwickelt, der schnell ansteigende, unipolare Spannungsimpulse liefert (zum Beispiel 12 kV / 4,5 μ s) und in Bezug auf die Scheitelspannung (0..17 kV) und die Repetitionsfrequenz der Impulse (0..40 kHz) variabel ist. Mit diesem Generator und mit einer Barrierenanordnung, die eine Beobachtung der Entladung durch eine transparente Elektrode erlaubt, wird es möglich, vertiefte und neue Kenntnisse über die zeitliche Entwicklung und die räumliche Verteilung von Mikroentladungen zu gewinnen.

Es werden umfangreiche Untersuchungen in mehreren Versuchsanordnungen durchgeführt, bei denen die Gasart, der Gasdruck, die geometrische Anordnung von Elektroden und Barriere sowie die Art der erzeugenden Spannung in weiten Bereichen variiert werden. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

Die Höhe der Zündspannung ist von entscheidender Bedeutung für die Anzahl und die gleichmäßige Verteilung der Mikroentladungen. Mit steil ansteigenden Spannungen (500 V/ns) kann ein Überschießen der statischen Zündfeldstärke erreicht werden. Je höher die Zündfeldstärke im Gasspalt ist, desto mehr Mikroentladungen entstehen parallel.

Nach dem Zünden wird die Entladung durch das Verhalten der Spannungsversorgung bestimmt. Solange die Steigung der Spannung genügend groß ist, bleiben die Mikroentladungen in den einmal gezündeten Kanälen bestehen. Damit sind die Ansatzpunkte der Mikroentladungen auf der Barrierenoberfläche dem Einwirken der Entladung länger ausgesetzt als bei einem Verlöschen der Entladung direkt nach der Zündung.

Eine Steigerung der Repetitionsfrequenz führt grundsätzlich zu einer Senkung der Zündspannung aufgrund der zwischen den Impulsen nicht rekombinierten Ladungsträger. In den verwendeten Versuchsanordnungen erfolgt ab einer Repetitionsfrequenz von einigen Kilohertz eine örtliche Konzentration der Entladung. In den Edelgasen Argon und Helium wird der Bereich des Elektrodenrands bevorzugt, in den Gasen Luft, Sauerstoff und Acetylen entstehen stationäre, gleichmäßig über die Entladungsfläche verteilte Kanäle.

Durch eine Spaltweite, die einige Millimeter deutlich übersteigt, wird die Anzahl der Mikroentladungen verringert und der Strom pro Mikroentladung erhöht. Für Barrierenentladungen mit Spaltweiten im Bereich von 10 cm ist bei einem Scheitelwert der Spannungsimpulse von 12 kV ein Absenken des Gasdrucks erforderlich, um das Zünden der Entladung zu ermöglichen. Bei einem Gasdruck von 100 hPa können Barrierenentladungen auch in Anordnungen betrieben werden, bei denen sich die Elektroden nicht planparallel gegenüberstehen. In einem zylinderförmigen Metallgefäß als Erdelektrode kann durch die gezielte Formgebung von Hochspannungselektrode und Barriere die Entladung auf den gewünschten Bereich konzentriert werden.

Die Spannungs- und Stromverläufe sind für die Eigenschaften von Barrierenentladungen charakteristisch. Die Untersuchungen zeigen, daß ein Zusammenhang zwischen einer hohen Zündspannung und einer großen Anzahl von gleichmäßig verteilten Entladungskanälen besteht. Fließt auch nach dem impulsförmigen Zündstrom weiter ein Strom, so bestehen die Mikroentladungen über eine längere Zeit und können eine inhomogene Oberflächenbeanspruchung verursachen.

Mit Barrierenentladungen kann eine gleichmäßig dicke Kohlenwasserstoffschicht auf der Isolierstoffbarriere (zum Beispiel Glas) aufgetragen werden. Dazu wird das Beschichtungsgas Acetylen bei atmosphärischem Druck durch eine Barrierenanordnung geleitet und Hochspannungsimpulsen mit einer Repetitionsfrequenz von 1 kHz

ausgesetzt. Das gleichmäßige Aufwachsen der Schicht bis zu einer Schichtdicke im Bereich von 100 nm wird im Intervallbetrieb des Hochspannungspulsgenerators erreicht, bei dem sich eine kurze Beschichtungsphase mit einer Pause zum Nachströmen frischen Gases abwechseln. Durch das experimentell entwickelte Verfahren entsteht eine haftfeste, harte und hydrophobe Kohlenwasserstoffschicht. Im sichtbaren und infraroten Spektralbereich ist sie hochtransparent, im ultravioletten nimmt die Transmission stark ab. Sie könnte zum Beispiel für korrosions- und diffusionshemmende Zwecke eingesetzt werden.

Anhang: Der Hochspannungspulsgenerator

Wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit beruhen auf der Verwendung des Hochspannungspulsgenerators. Er liefert im Mikrosekundenbereich ansteigende Spannungsimpulse einstellbarer Amplitude und Frequenz (Bild 2-4). Die Form der Ausgangsimpulse wird geprägt von dem schaltungstechnischen Aufbau, dem elektrischen Verhalten des Pulstransformators und der elektronischen Ansteuerung. Dem Bild 2-3 ist der grundsätzliche Aufbau des Hochspannungspuls-generators zu entnehmen.

Halbbrücke mit Leistungshalbleitern

Als Schalter werden Insulated Gate Bipolar Transistoren (IGBT) der Firma Toshiba gewählt (MG50N1BS1). Sie verbinden die Eigenschaften von bipolaren Transistoren und Feldeffekt-Transistoren /Heumann 1989/. Trotz hoher zulässiger Ströme (bis 50 A) und wesentlich geringerer Durchlaßspannung als Feldeffekt-Transistoren, sind sie spannungsgesteuert. Sie benötigen eine geringe Steuerleistung und verlöschen bei Abfallen der Steuerspannung selbständig. Die Ein- und Ausschaltzeiten liegen unter 1 μ s, Frequenzen von bis zu 20 kHz bei Vollast sind möglich. Die Sperrspannung von 1000 V ist für eine Zwischenkreisspannung von 540 V ausreichend.

Der Schaltkreis ist als Halbbrücke ausgeführt. Dadurch wird die Spannungsbelastung der Bauteile verringert, ein Rückspeisen in den Gleichspannungs-Zwischenkreis ermöglicht und ein Ausbau zur Vollbrücke mit Pulsen wechselnder Polarität oder sinusförmiger Ausgangsspannung offengehalten. Im Schaltbild (Bild A-1) ist der Hauptstrompfad durch Pfeile gekennzeichnet. Er verläuft vom Zwischenkreis durch den Oberschalter, den Pulstransformator und den Unterschalter zurück zum Zwischenkreis. Über die Freilaufdioden D_1 und D_2 wird Energie in den Zwischenkreis zurückgespeist.

Die übrigen Bauelemente dienen zur Ein- und Ausschaltentlastung der IGBTs. Diese ist notwendig, um die Halbleiter vor zu hohen Verlustleistungen während der Schaltvorgänge zu schützen. Die Entlastungsnetzwerke sind nach Schaltungen aufgebaut, die /Boehring, Knöll 1979/ und /Würslin 1984/ bereits für bipolare Transistoren eingesetzt haben. Ihre Funktion wird im folgenden anhand der bezeichneten Bauelemente des Unterschalters erklärt (Bild A-1).

Das schnelle Einschalten des IGBT - das schnelle Senken des Durchlaßwiderstands - hält die Verlustleistung bereits klein. Eine weitere Verminderung ist durch die Begrenzung des Stromanstiegs möglich, die durch die Induktivitäten L_1 bis L_3 erfolgt.

Auch das schnelle Ausschalten - der schnelle Anstieg des Widerstands auf seinen Sperrwert - hält die Verlustleistung klein. Dennoch gibt es einen Nachstrom, der noch bei hoher Spannung fließt. Eine weitere Verbesserung wird durch das Verlangsamen des Spannungsanstiegs und das Kommutieren des Stroms in einen zum Schalter parallelen Zweig erzielt.

Beim Einschalten des Unterschalters sei der Kondensator C_1 aufgeladen und der Kondensator C_2 entladen. Die Ladung von C_1 fließt im Schwingkreis aus C_1 , der Umschwing-Drossel L_U , der Diode D_5 , C_2 und dem IGBT auf den Kondensator C_2 . Dadurch ergibt sich ein zusätzlicher Strom durch den IGBT (in Bild 2-4 schraffiert dargestellt), dessen Dauer und Amplitude durch die Dimensionierung von L_U , C_1 und C_2 bestimmt wird. Ein Zurückschwingen wird durch D_5 verhindert.

Beim Ausschalten kommutiert der Strom in die Entlastungsbeschaltung. C_1 wird wieder geladen, C_2 wird über D_6 auf C_3 entladen. Die für die Entlastung wirksame Kapazität entspricht der Parallelschaltung der beiden Kondensatoren C_1 und C_2 . An C_3 liegt Zwischenkreisspannung. Zusätzlich auf C_3 gebrachte Ladung wird über den Widerstand R_1 in den Zwischenkreis zurückgespeist. Steigt die Spannung am IGBT auf einen Wert über den des Kondensators C_3 , so

wird C_3 direkt über die Diode D_7 geladen. Die Diode D_3 verhindert ein unkontrolliertes Entladen der Kondensatoren C_1 und C_2 .

Bild A-2 zeigt die Wirksamkeit der Ausschaltentlastung. Dargestellt sind die direkt am IGBT gemessenen Spannungs- und Stromverläufe und die daraus errechneten Verläufe der Leistung und der Energie. Jedes Diagramm zeigt den Verlauf mit Ausschaltentlastung und den Verlauf ohne Ausschaltentlastung. Das Abschalten erfolgt bei 40 A mit einer Zwischenkreisspannung von 300 V. Durch Kommutieren des Stroms und Verlangsamen des Spannungsanstiegs wird der Spitzenwert der Verlustleistung von 12,5 kW auf 3,4 kW und die Verlustenergie von 3,2 mJ auf 1,2 mJ gesenkt.

Die Halbbrücke ist so ausgelegt, daß ein Strom von 50 A bei einer Zwischenkreisspannung von 540 V abgeschaltet werden kann. Dabei ist die Frequenz durch die Ausschaltverluste auf 20 kHz begrenzt. Eine Frequenz von 100 kHz wird bei einem Abschaltstrom bis zu 10 A erreicht.

Pulstransformator

Der Ausgangsimpuls und die Belastung der Halbbrücke sind in erster Linie durch den Pulstransformator bestimmt. Sein Aufbau ist im Zusammenhang mit der Last für das Schwingungsverhalten und damit die Form der Spannungs- und Stromverläufe sekundär- und primärseitig verantwortlich. Für das Gesamtverhalten des Hochspannungspulsgenerators, das sich - ausreichende Energiespeicherung im Zwischenkreis vorausgesetzt - aus dem Netzwerk und der Ansteuerung der Halbbrücke, der Auslegung des Pulstransformators und der Last ergibt, ist er von zentraler Bedeutung.

Das Verhalten des Pulstransformators wird am Ersatzschaltbild nach /Millmann, Taub 1963/ deutlich. Es beinhaltet in seiner Grundform (Bild A-3a) den Primärwicklungs-Widerstand R_p , die Streuinduktivität L_s , die Magnetisierungsinduktivität L_M , den Widerstand R_b , der die Sekundärwicklungsverluste, die Wirbel-

strom- und Ummagnetisierungsverluste und den Lastwiderstand repräsentiert, sowie die Kapazität C , die sich aus den transformierten Kapazitäten der Sekundärwindungen und der Last zusammensetzt. Das Übersetzungsverhältnis des Übertragers ist $\bar{u}$.

Aus dieser Grundform ergibt sich das Hochfrequenz-Ersatzschaltbild, das für die schnellen Ein- und Ausschaltvorgänge gültig ist (Bild A-3b). Dabei kann die Magnetisierungsinduktivität weggelassen werden, weil die Kapazität C für schnelle Vorgänge einen Kurzschluß darstellt. Es ergibt sich ein gedämpfter Serienschwingkreis aus der Streuinduktivität L_s und der Kapazität C .

Im Niederfrequenz-Ersatzschaltbild für das Impulsdach (Bild A-3c) fehlt die im eingeschwungenen Zustand geladene Kapazität C und die Streuinduktivität L_s , die gegenüber der Magnetisierungsinduktivität L_M vernachlässigt wird. Die Widerstände werden mit dem Einführen einer Ersatzspannungsquelle $A \cdot u_1$ zu R zusammengefaßt, so daß sich das Niederfrequenz-Ersatzschaltbild nur aus einem Widerstand und einer Induktivität zusammensetzt.

In Bild A-4a ist der Verlauf der Sekundärspannung u_2 prinzipiell dargestellt. Er ergibt sich bei der Überlagerung der Spannungsverläufe aus beiden Ersatzschaltbildern A-3b und A-3c. Bild A-4b zeigt einen gemessenen Spannungsverlauf an einem Transformator mit 3 Primär- und 20 Sekundärwindungen im Leerlauf. Impulsanstieg und -dach ähneln dem idealen Verlauf. Der Impulsabfall ist jedoch langsam und die dadurch angeregte Schwingung sehr gering. Dies liegt an der Ausschaltentlastung der IGBTs, die primärseitig beim Ausschalten einen langsamen Spannungsanstieg an den Schaltern bewirkt und damit einen sanften Impulsabfall bedingt. Bild A-4c zeigt einen Spannungsverlauf an einem Transformator mit 5 Primär- und 20 Sekundärwindungen und einer kapazitiven Last von 136 pF. Deutlich ist die aufgrund größerer Induktivität und Kapazität wesentlich größere Periodendauer und die geringere Dämpfung der Einschaltsschwingung zu erkennen. Sie setzt sich über den Ausschaltvorgang fort, von dem wiederum keine Schwin-

gung angeregt wird.

Je kürzer der Impuls, desto mehr wird der Verlauf durch den Einschaltvorgang und die durch ihn initiierte Schwingung bestimmt. Bei den für die Untersuchungen benutzten Transformatoren wird dieser Umstand derart ausgenutzt, daß der Spannungsimpuls lediglich aus der ersten Halbwelle der Einschaltsschwingung gebildet wird (Bild 2-4). Der Impulsabfall beginnt bereits im Scheitelwert der Spannung u , wenn der Primärstrom abgeschaltet wird (Bild 2-4). Er ist durch die Ausschaltentlastung der IGBTs langsamer und erregt keine zusätzliche Schwingung. Im weiteren Verlauf der Sekundärspannung ist allein die Anfangsschwingung zu erkennen, die aber durch eine für diesen Zweck installierte Beschaltung gedämpft wird (Dämpfungswicklung, Bild 2-3), um die Dauer des Spannungsimpulses kurz zu halten und damit hohe Repetitionsfrequenzen ohne Beeinflussung des Folgepulses zu erreichen.

In Bild A-5 ist der Aufbau des Pulstransformators dargestellt. Die Streuinduktivität ergibt sich aus dem Teil des Feldes, das nicht sowohl Primär- als auch Sekundärwicklung durchsetzt. Um eine geringe Streuinduktivität zu erreichen, sollten Primärwicklung b und Sekundärwicklung e übereinander angeordnet sein oder zumindest sehr eng am Kern anliegen. Dieser Forderung kann bei der Hochspannungswicklung jedoch nur bedingt nachgekommen werden. Die Hochspannungswicklung e (300 Windungen) ist aus Isolationsgründen trapezförmig in mehreren, mit Kunststoffolie voneinander isolierten Lagen auf einem Wickelkörper d angeordnet. Die Wicklungskapazität ergibt sich in erster Linie aus der Kapazität der Lagen gegeneinander. Um die Kapazität klein zu halten und eine ausreichende Isolation zu erreichen, sind große Abstände der Lagen günstig, die aber wiederum eine größere Streuinduktivität und größere Abmessungen des Transformators zur Folge haben. Der Pulstransformator ist in Isolieröl gebettet.

Elektronische Ansteuerung

Die zur elektronischen Steuerung gezählten Baugruppen sind in Bild 2-3 aufgeführt.

IGBT-Treiberkarte:

Die Treiberkarte ist direkt am IGBT angeordnet. Sie enthält die Baugruppen Ansteuerung und Versorgung. IGBTs sind wie Feldefekt-Transistoren spannungsgesteuert. Ihr Verhalten kann durch ein Ersatzschaltbild, das zwischen Gate und Source sowie zwischen Gate und Drain jeweils eine Kapazität enthält, beschrieben werden /Clemente u.a. 1989/. Diese Kapazitäten gilt es während des Ein- und Ausschaltvorgangs möglichst schnell zu laden beziehungsweise zu entladen. Zu diesem Zweck wird ein Ansteuer-IC der Firma Unitrode (UC3706N) benutzt und mit Einsatz geeigneter Vorwiderstände und negativer Spannung zum Ausschalten so betrieben, daß minimale Schaltzeiten erreicht werden.

Über einen als Bandleiter ausgeführten Shunt wird der IGBT-Strom gemessen und vom Ansteuer-IC mit einem eingestellten Maximalwert verglichen. Bei zu hohem Strom wird der IGBT direkt ausgeschaltet, so daß die Signallaufzeit zur Gesamtsteuerung vermieden wird, denn innerhalb dieser Zeit kann der Laststrom im Fehlerfall über die zulässigen 50 A ansteigen und zur Zerstörung des IGBT führen.

Das Bezugspotential für die Ansteuerung ist der Source-Kontakt des IGBT, dessen Potential jedoch nicht festliegt und vom Schaltzustand abhängt. Deshalb erhält die Treiberkarte die Ein- und Ausschaltsignale über einen galvanisch getrennten Impulsübertrager. Die Versorgungsspannung wird auf der Karte selbst aus der vom Schaltnetzteil potentialgetrennt gelieferten Wechselspannung erzeugt.

Gesamtsteuerung:

In der Gesamtsteuerung werden die Ein- und Ausschaltsignale für beide Schalter erzeugt. Dabei werden Mindestein- und Mindestaus-

schaltzeiten berücksichtigt. Der Laststrom wird potentialgetrennt gemessen, so daß bei Überschreitung des eingestellten Maximalstroms abgeschaltet werden kann. Die Frequenz ist von 0 bis 100 kHz stufenlos einstellbar.

Schaltnetzteil:

Im Schaltnetzteil wird eine rechteckförmige Wechselspannung mit einer Amplitude von 30 V und einer Frequenz von 50 kHz erzeugt. Es versorgt die Gesamtsteuerung und - potentialgetrennt - die Treiberkarten. Durch die Rechteckform und die hohe Taktfrequenz wird eine ausreichende Energie auch bei Trenntransformatoren kleiner Abmessung übertragen.

Fernbedienung:

Die Gesamtsteuerung besitzt zwei Eingänge für Lichtwellenleiter. So besteht die Möglichkeit, den Hochspannungspulsgenerator aus einer Meßkabine zu betreiben. Dabei kann entweder die an der Steuerung eingestellte Frequenz aktiviert oder eine von der Fernbedienung erzeugte Frequenz direkt vorgegeben werden. Die Fernbedienung wird benutzt, um die Spannungsimpulse des Hochspannungspulsgenerators und die Auslösung der Meßgeräte Oszilloskop und Kamera aufeinander abzustimmen.

Literatur

- Boehringer, A.
Knöll, H. Transistorschalter im Bereich hoher Leistungen und Frequenzen
etz, Band 100 (1979), Heft 13, S. 664-670
- Braumann, P. Über die Erzeugung von Gasentladungen zur Herstellung von Ozon
Dissertation, TU Braunschweig, 1981
- Chang, M.B.
Balbach, J.H.
Rood, M.J.
Kushner, M.J. Removal of SO₂ from gas streams using a dielectric barrier discharge and combined plasma photolysis
J. Appl. Phys. 69 (8), 15. April 1991, S. 4409-4417
- Clemente, S.
Pelly, B.R.
Isidori, A. Das Schaltverhalten von Leistungs-MOSFETs
Design & Elektronik, 9/1989, S. 130-145
- Dhali, S.K.
Sardja, I. Dielectric-barrier discharge for processing of SO₂ / NO_x
J. Appl. Phys. 69 (9), 1. May 1991, S. 6319-6324
- Donohoe, K.G.
Wydeven, T. Plasma polymerization of ethylene in an atmospheric pressure discharge
4th Intern. Symposium on Plasma Chemistry, Zürich 1979, S. 765-771
- Eliasson, B.
Hirth, M.
Kogelschatz, U. Ozon synthesis from oxygen in dielectric-barrier discharges
BBC Research Report, Baden/Schweiz, 1986
- Eliasson, B.
Kogelschatz, U. UV Excimer Radiation from Dielectric-Barrier Discharges
Appl. Phys. B, 1988, S. 299-303
- Eliasson, B.
Kogelschatz, U.
Hirth, M. The Townsend/streamer transition in a silent discharge in oxygen
Proceedings XVII. Intern. Conf. on Phen. in Ion. Gases, Budapest 1985, S. 590-592
- Esrom, H.
Demny, J.
Kogelschatz, U. VUV light-induced deposition of palladium using an incoherent Xe₂⁺ excimer source
Chemtronics, Vol. 4, Sept. 1989, S. 202-208
- Frenklach, M.
Spear, K.E. Growth mechanism of vapor-deposited diamond
J. Mater. Res. 3(1), Jan/Feb 1988, S.133-140
- Gänger, B. Der elektrische Durchschlag von Gasen
Springer-Verlag 1953

- Gerthsen, C. Physik
Kneser, H.O. Springer-Verlag 1977
Vogel, H.
- Gibson, H.W. Chemical modification of Polymers
Pochan, J.M. Oxidation of Polyacetylen
Macromolecules 1982, 15, S. 242-247
- Goldman, A. Plasma Chemistry
Amouroux, J. Plenum Press, Nato Study 1981 B, S. 293-346
- Hamacher, H. Untersuchung der Entladungsvorgänge in einem
Ozonrohr und Entwicklung eines Verfahrens
zur Berechnung der Rückwirkung eines elek-
trischen Ozonerzeugers mit Glimmentladung
auf das Netz
Dissertation, RWTH Aachen, 1971
- Heide, J.C.v.d. Guide to corona film treatment
Wilson, H.L. Modern Plastics 5/1961, S. 199-208
- Heumann, K. Untersuchungen und Erfahrungen mit abschalt-
baren Leistungshalbleitern
Archiv für Elektronik 72 (1989), S. 95-111
- Hirth, M. Teilprozesse bei der Ozonerzeugung mittels
stiller elektrischer Entladungen
Dissertation, TH Karlsruhe, 1979
- Hosselet, L.M.L.F. Ozonbildung mittels elektrischer Entladungen
TH-Report 71-E-19, TH Eindhoven, 1971
- Ivanov, A.V. The investigation of charge formed during
Larionov, V.P. the development of a surface discharge of
solid dielectric
XI. International Conference on Phenomena in
Ionized Gases, Prag 1973, S. 91
- Janus, H.W. Study of current pulses of microdischarges
Jelenski, W. as a function of gas pressure in dielectric
barrier-discharges
Intern. Symp. on Plasma Chemistry, Bochum,
August 1991, 3.2-15, S. 1-6
- Kanda, N. Atmospheric pressure glow plasma and its
Kogoma, M. application to surface treatment and film
Jinno, H. deposition II. Development of a new method
Uchiyama, H. for lower cost
Okazaki, S. Intern. Symp. on Plasma Chemistry, Bochum,
August 1991, 3.2-20, S. 1-6
- Kind, D. Einführung in die Hochspannungs-Versuchs-
technik
Vieweg-Verlag Braunschweig, 1985

- Kind, D.
Kärner, H. Hochspannungs-Isoliertechnik
Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1982
- Kogelschatz, U. Advanced Ozone Generation
10. BBC Symposium on Process Technologies
for Water Treatment, Plenum Press, 1987,
S. 87-120
- Kogelschatz, U. Silent discharges for the generation of uv
and vuv excimer radiation
9th International Symposium on Plasma Chemi-
stry, 9/1989
- Kogelschatz, U.
Eliasson, B.
Hirth, M. Ozon generation from oxygen and air: Dis-
charge physics and reaction mechanisms
8th Ozone World Congress, Zürich 1987
- Küch, H. Entladungsvorgänge am Ozonерzeuger und Ozon-
ausbeute
Dissertation, RWTH Aachen, 1974
- Küchler, U.P. Zur Optimierung luftbetriebener Ozonерzeuger
Dissertation, RWTH Aachen, 1990
- Labrenz, M. Elektrische Gasentladungen zur Ozonерzeugung
Dissertation, TU Braunschweig, 1983
- Levitzky, J.J.
Lindsey, F.J.
Kaghan, W.S. Corona discharge treatment of polypropylene
films
SPE Journal, December 1964, S. 1305-1308
- Millmann, J.
Taub, H. Impuls- und Digitalschaltungen
Berliner Union Verlag, Stuttgart 1963
- Mort, J.
Jansen, F. Plasma Deposited Thin Films
CRC Press Boca Raton, Florida, 1986
- Okazaki, S.
Kogoma, M. Glow discharge plasma at atmospheric pressu-
re and its application
Proc. Jpn. Symp. Plasma Chem., Vol. 2, 1989,
S. 95-102
- Rie, K.-T.
Eisenberg, S.
Gebauer, A. Plasma assisted CVD of TiN on steels and
geometric effects
First International Conference on Plasma
Surface Engineering 1988, Garmisch-Parten-
kirchen, S. 125-132
- Rosocha, L.A. Design and analysis of transient high vol-
tage electrical devices: Ozone production in
fast pulsed dielectric barrier discharges in
oxygen and modeling of an intense relativistic
electron beam source
Thesis, University of Wisconsin-Madison 1979

- Sahasrabudhey, R.H. Interaction of carbon monoxide and hydrogen
Deshpande, S.M. under silent electric discharge: Production
of formaldehyde
Jour. Indian Chem. Soc., Vol. 28, No 7, 1951
S. 377-382
- Salge, J. High pressure glow discharges
Forschungszentrum Jülich GmbH,
IInd Workshop on Plasma and Laser Technology
Cairo 1990, S. 267-291
- Salge, J. Characteristics of ozonizers supplied by
Kärner, H. fast rising voltages
Labrenz, M. 6th Int. Conf. on Gas Discharges and their
Scheibe, K. Applications, Edinburgh 1980, S. 94-97
Braumann, P.
- Scheibe, K. Über den Betrieb von Ozonisatoren mit steil-
flankiger Wechselspannung
Dissertation, TU Braunschweig, 1982
- Sell, P.J. Ein Verfahren zur Bestimmung der Oberflä-
Neumann, A.W. chenspannungen und Grenzflächenspannungen
von Festkörpern
Zeitschrift für Physikalische Chemie,
Neue Folge, Bd. 41, 1964, S. 191-196
- Traus, I. H₂S-dissociation in a ozonizer discharge at
Suhr, H. elevated temperatures
Intern. Symp. on Plasma Chemistry, Bochum,
August 1991, 3.2-10, S. 1-6
- Walter, H. Die Grundlagen der Adhäsionstheorien
Adhäsion 1968, Heft 12, S. 542-548
- Würslin, R. Pulsumrichtergespeister Asynchronmaschinen-
antrieb mit hoher Taktfrequenz und sehr
großem Feldschwäcbereich
Dissertation, Universität Stuttgart, 1984
- Yasui, K. Silent-Discharge Excited TEM₀₀ 2.5 kW CO₂
Kuzumoto, M. Laser
Ogawa, S. IEEE Journ. of Quantum Electronics, Vol. 25,
Tanaka, M. No. 4, April 1989, S. 836-840
Yagi, S.
- Zhu, W. Effects of noble gases on diamond deposition
Inspektor, A. from methan-hydrogen microwave plasmas
Badzian, A.R. J. Appl. Phys. 68 (4), 15.08.1990,
McKenna, T. S. 1489-1496
Messier, R.

Bildteil

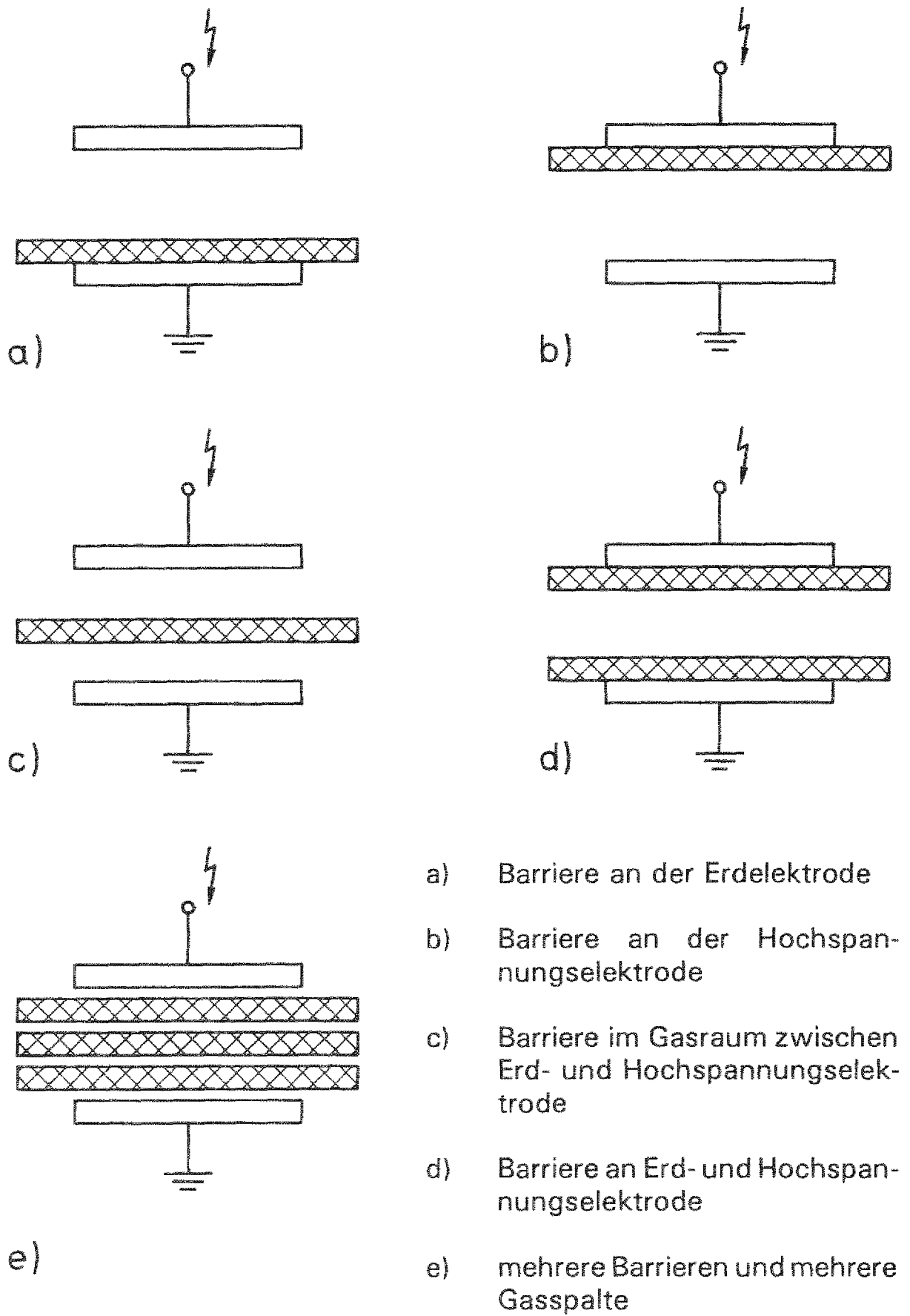


Bild 1-1: Barrierenanordnungen

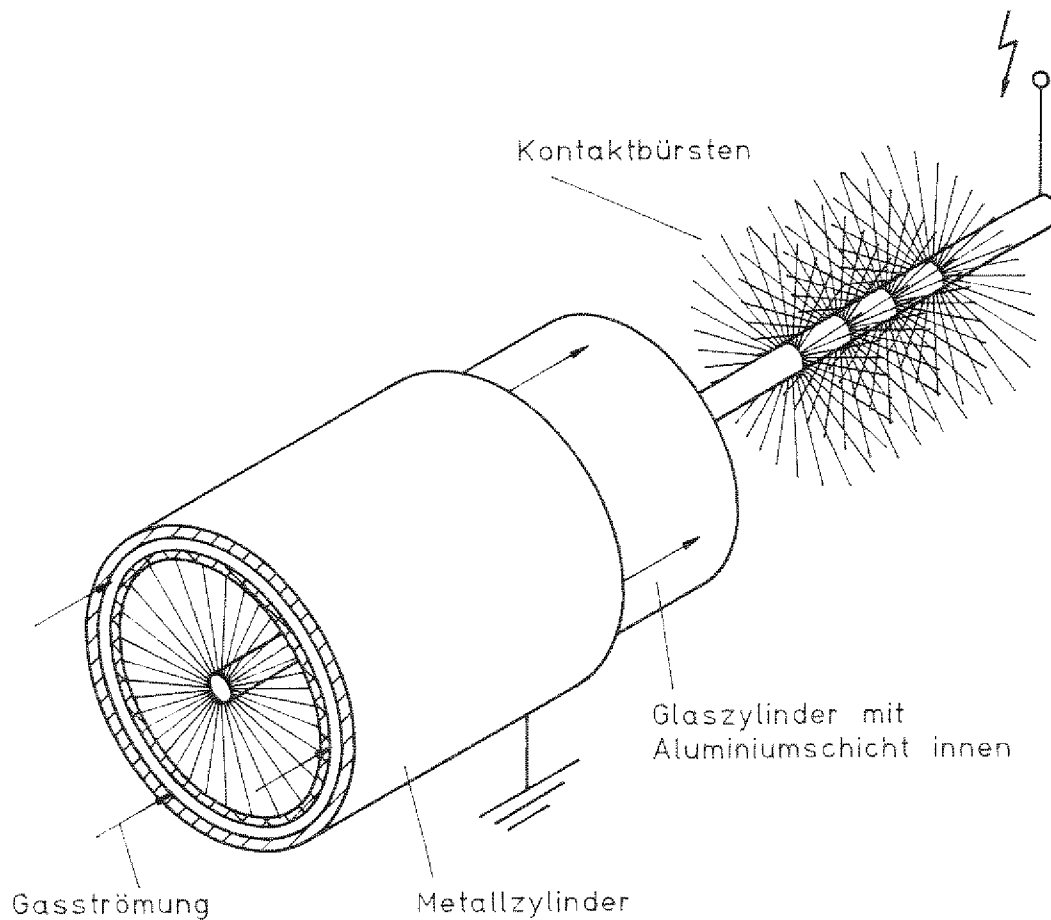


Bild 1-2: Rohrförmiger Ozoneerzeuger nach /Kogelschatz 1987/

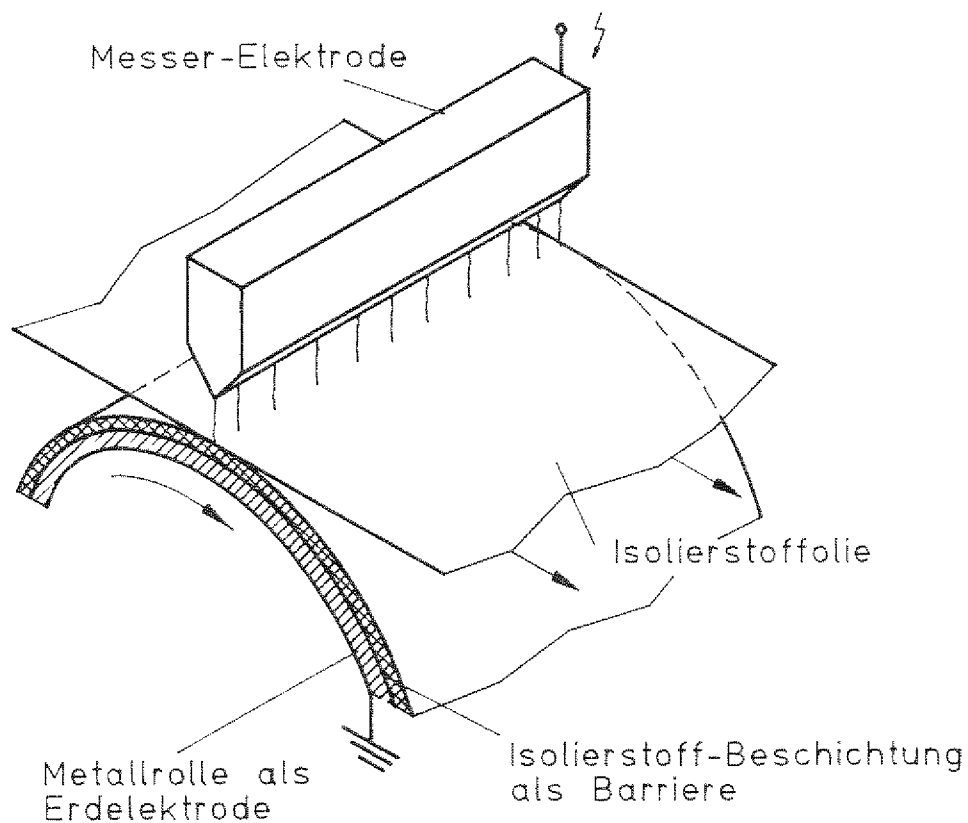
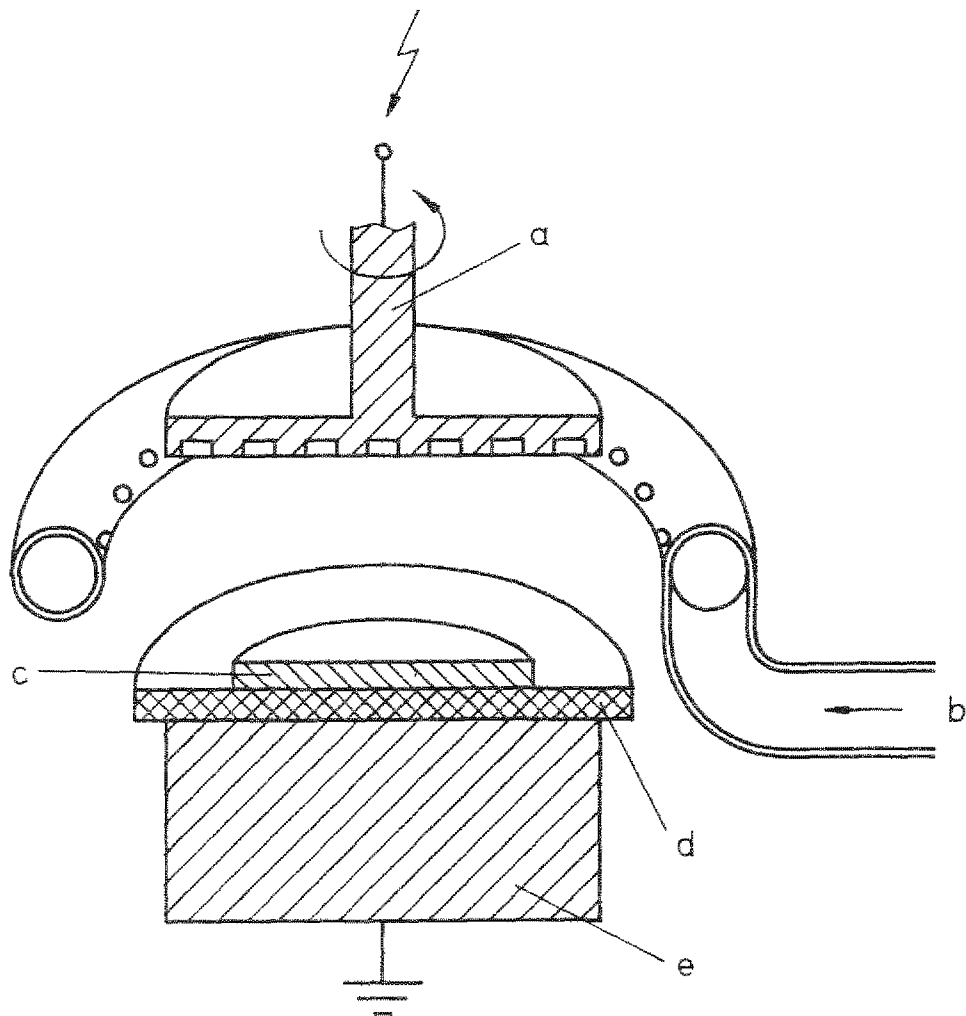
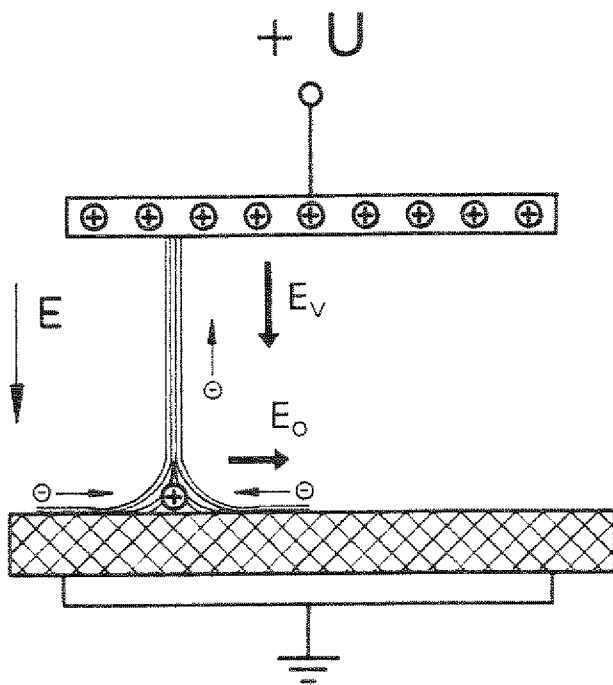


Bild 1-3: Barrierenanordnung zur Aktivierung von Oberflächen

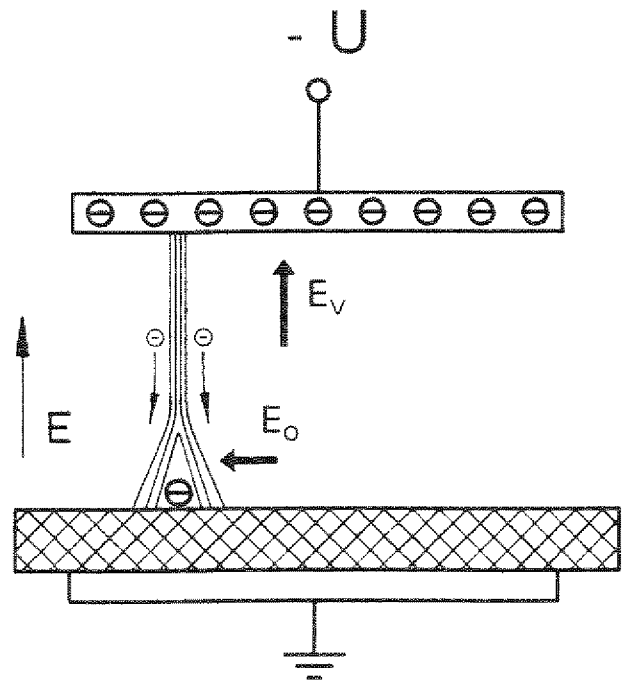


- a strukturierte, rotierende Hochspannungselektrode
- b radiale Gaszuführung
- c Substrat
- d Isolierstoffbarriere
- e Erdelektrode

Bild 1-4: Barrierenanordnung zum chemischen Ätzen und Beschichten nach /Okazaki,Kogoma 1989/



positive Spannung



negative Spannung

Bild 1-5: Mikroentladung im Modell nach /Hirth 1979/

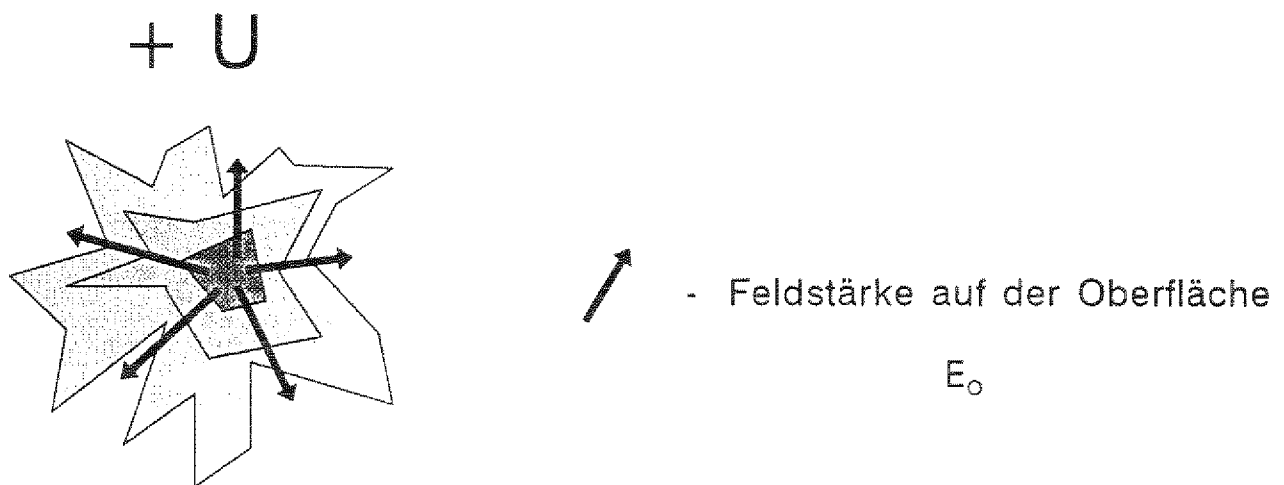
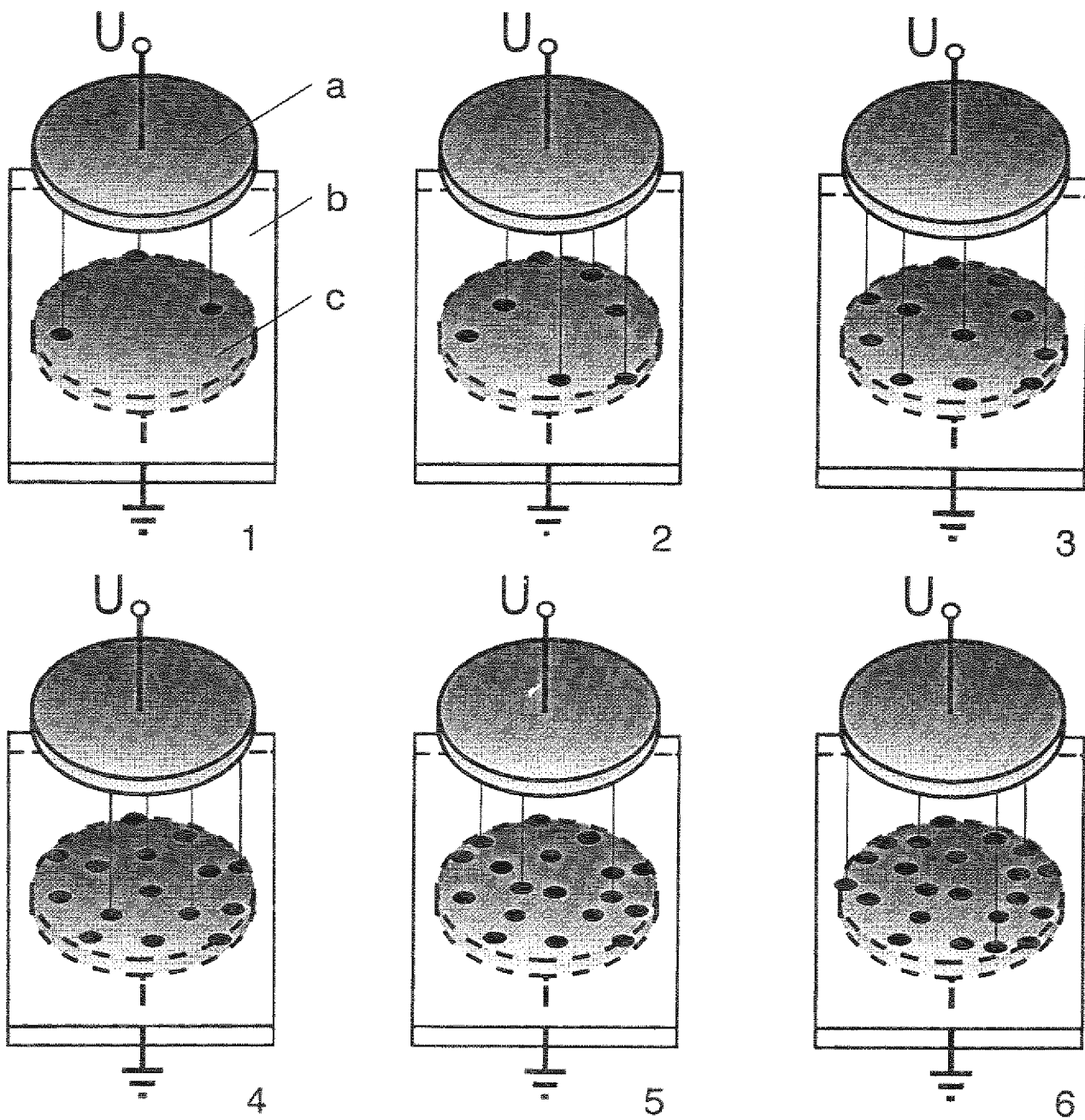


Bild 1-6: Schematische Darstellung eines positiven Ladungsflecks auf der Isolierstoffbarriere



a - Hochspannungs-Elektrode

b - Isolierstoff-barriere

c - Erdelektrode

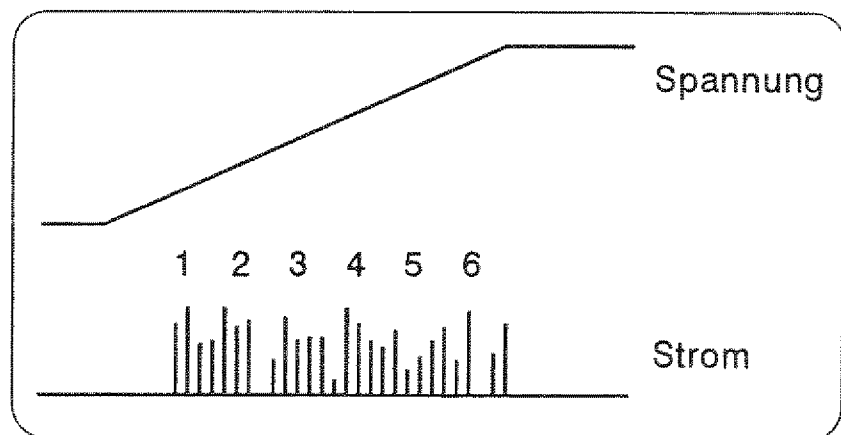
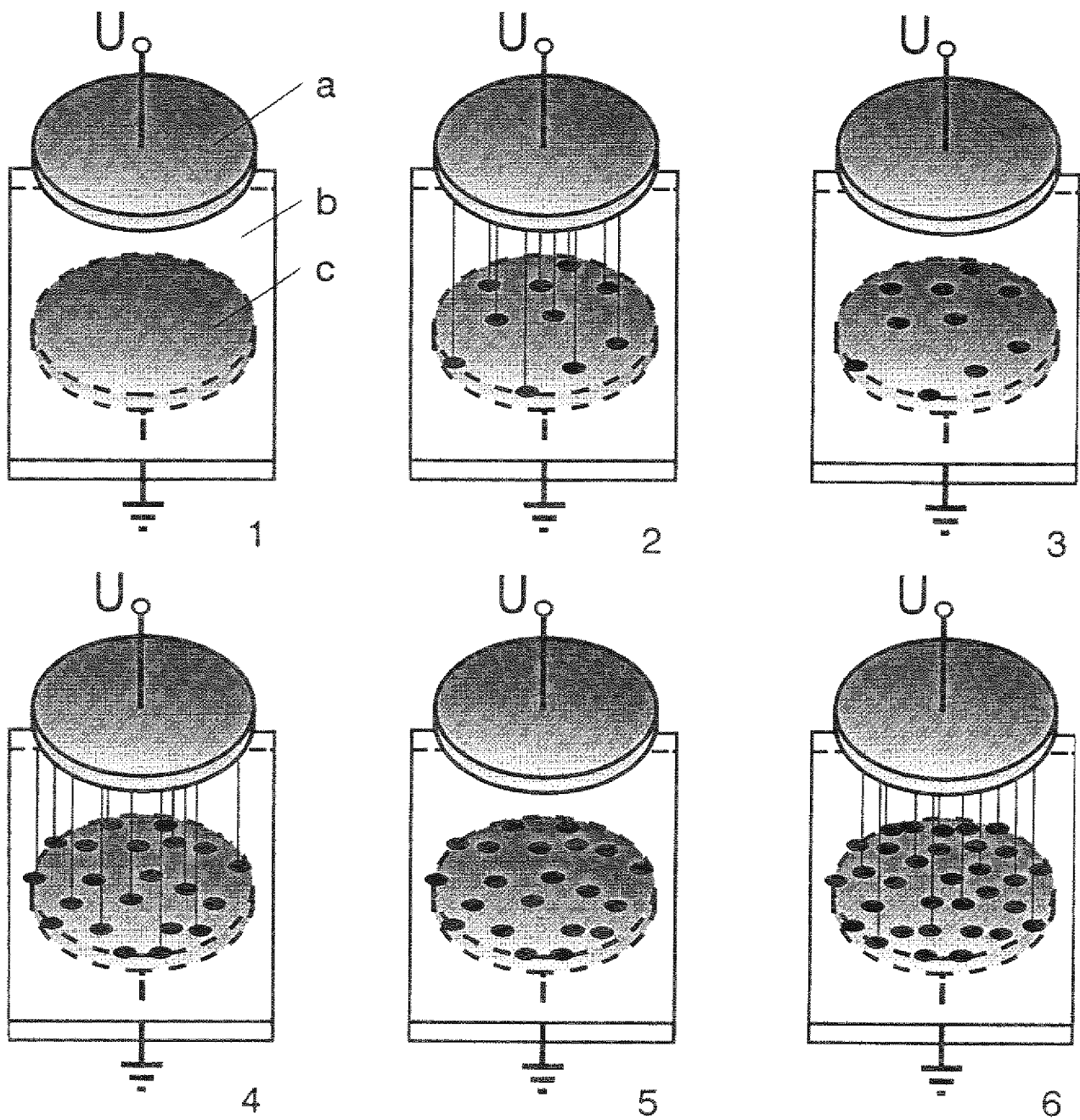


Bild 1-7: Schematische Darstellung von kontinuierlich im Spannungsanstieg entstehenden Mikroentladungen



- a - Hochspannungs-Elektrode
- b - Isolierstoff-barriere
- c - Erdelektrode

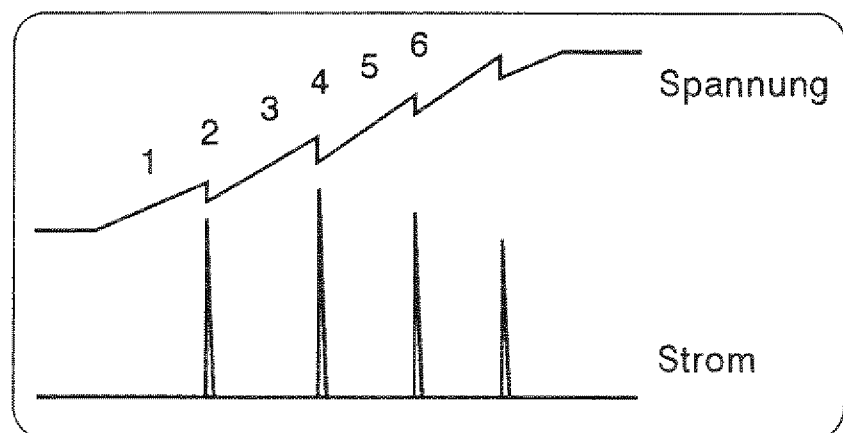
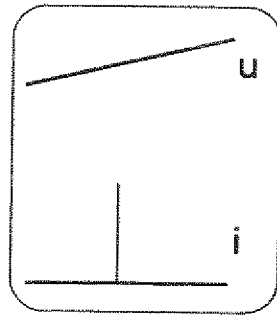
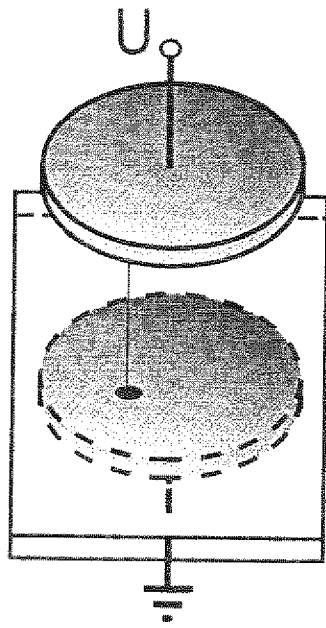
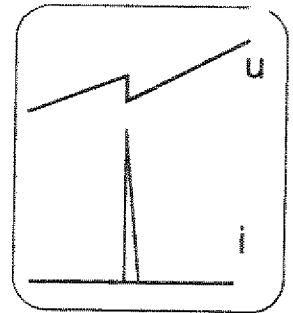
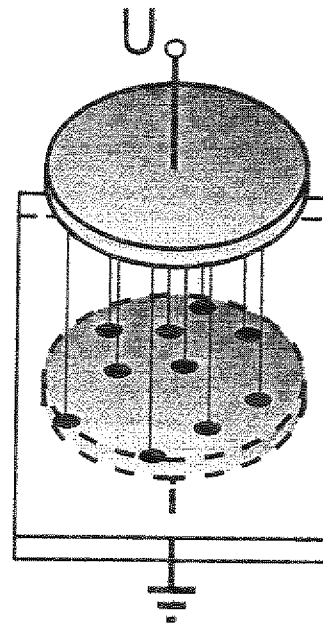


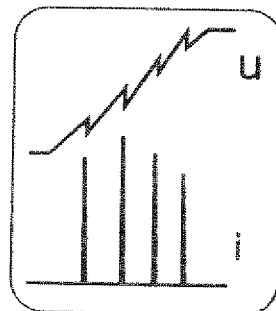
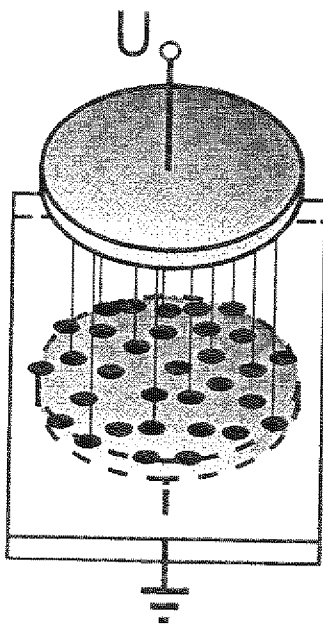
Bild 1-8: Schematische Darstellung von Einzelentladungen im Spannungsanstieg



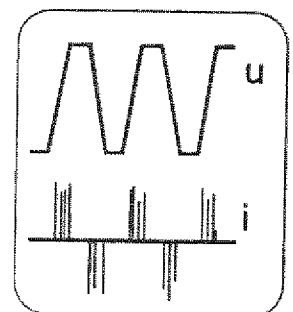
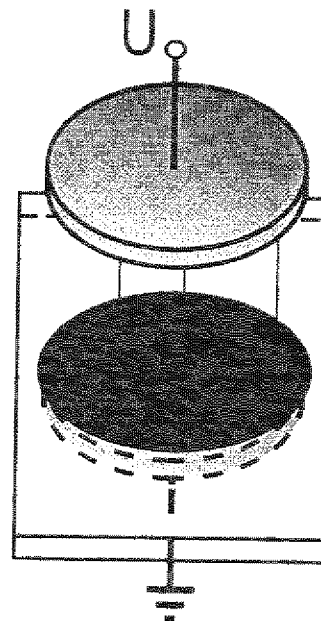
Mikroentladung



Einzelentladung

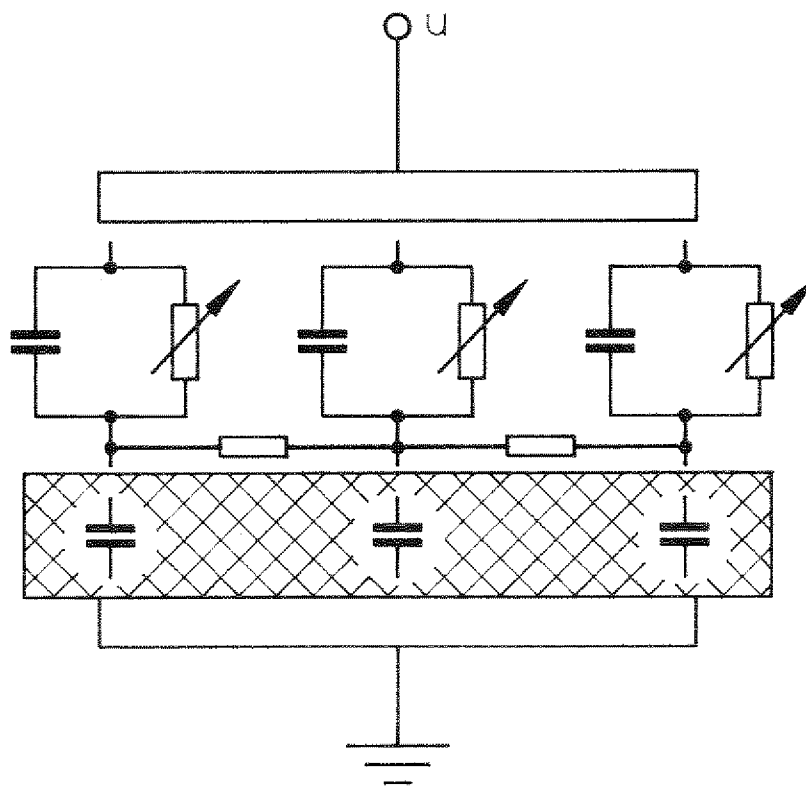


Entladungsphase

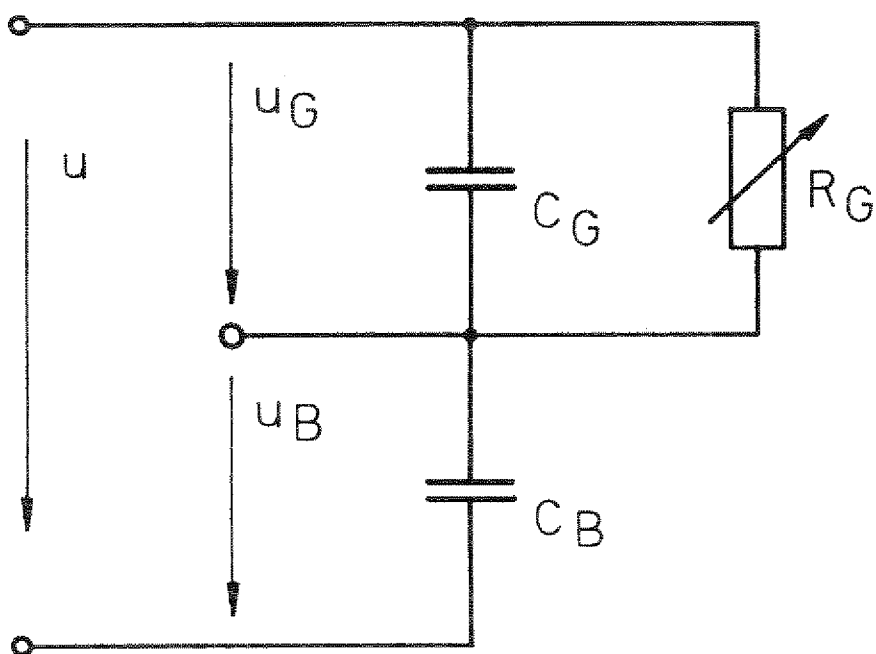


Gesamtentladung

Bild 1-9: Schematische Darstellung von Mikroentladung, Einzelentladung, Entladungsphase und Gesamtentladung



a) Ersatzschaltbild mit Einzelementen
/z.B. Hosselet 1971/



b) vereinfachtes Ersatzschaltbild
/z.B. Hosselet 1971/

Bild 1-10: Ersatzschaltbilder einer Barrierenanordnung

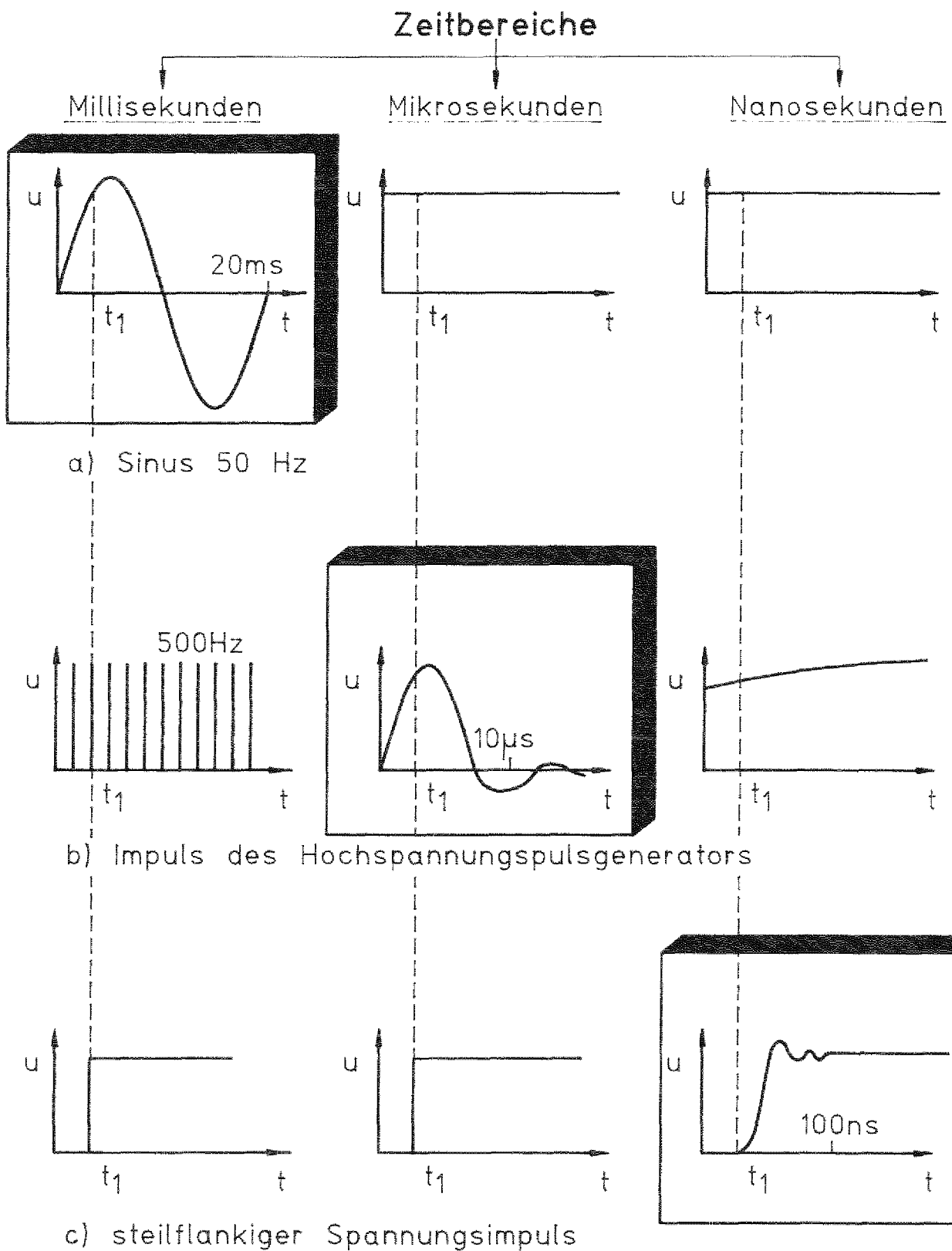
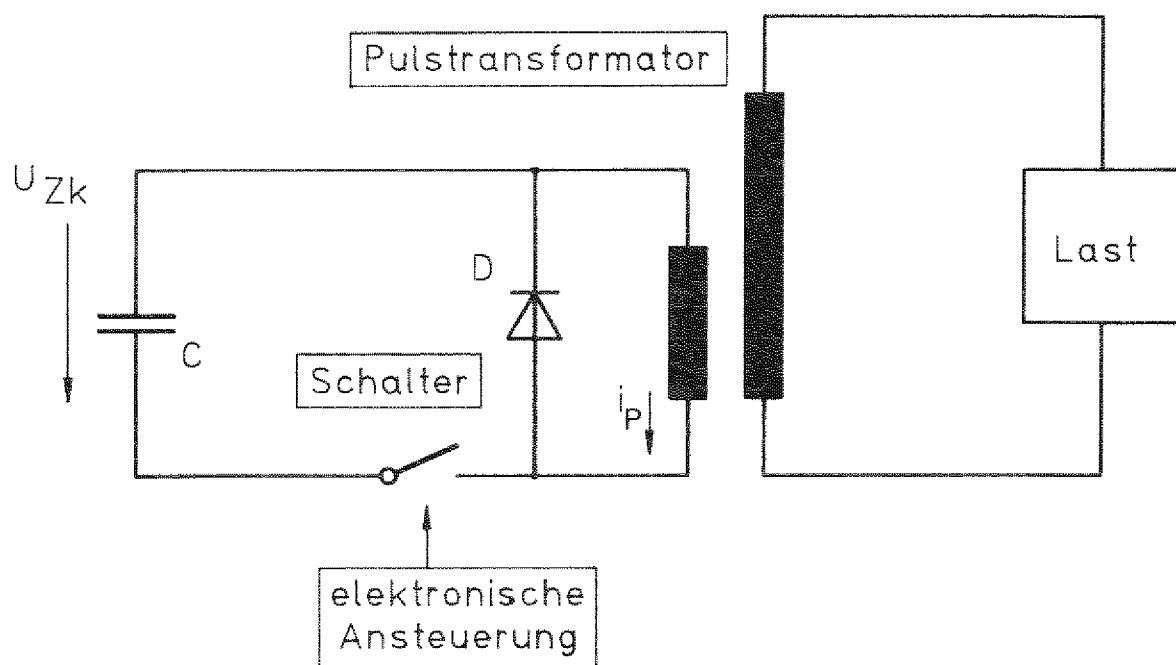


Bild 2-1: Zeitlicher Vergleich von drei benutzten Spannungsformen



- i_P - Primärstrom des Pulstransformators
- U_{Zk} - Zwischenkreisspannung
- C - Speicherkondensator
- D - Freilaufdiode

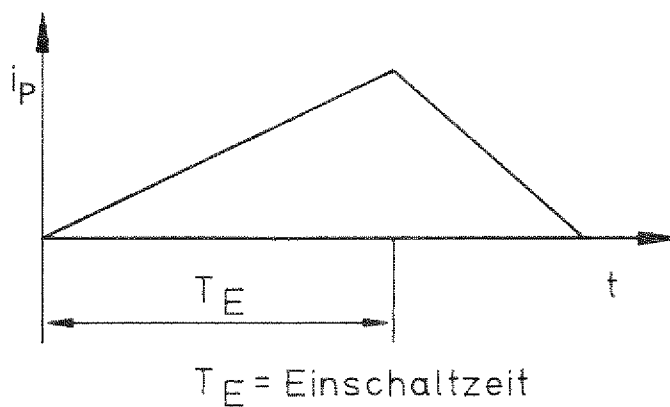


Bild 2-2: Prinzip des Hochspannungspulsgenerators

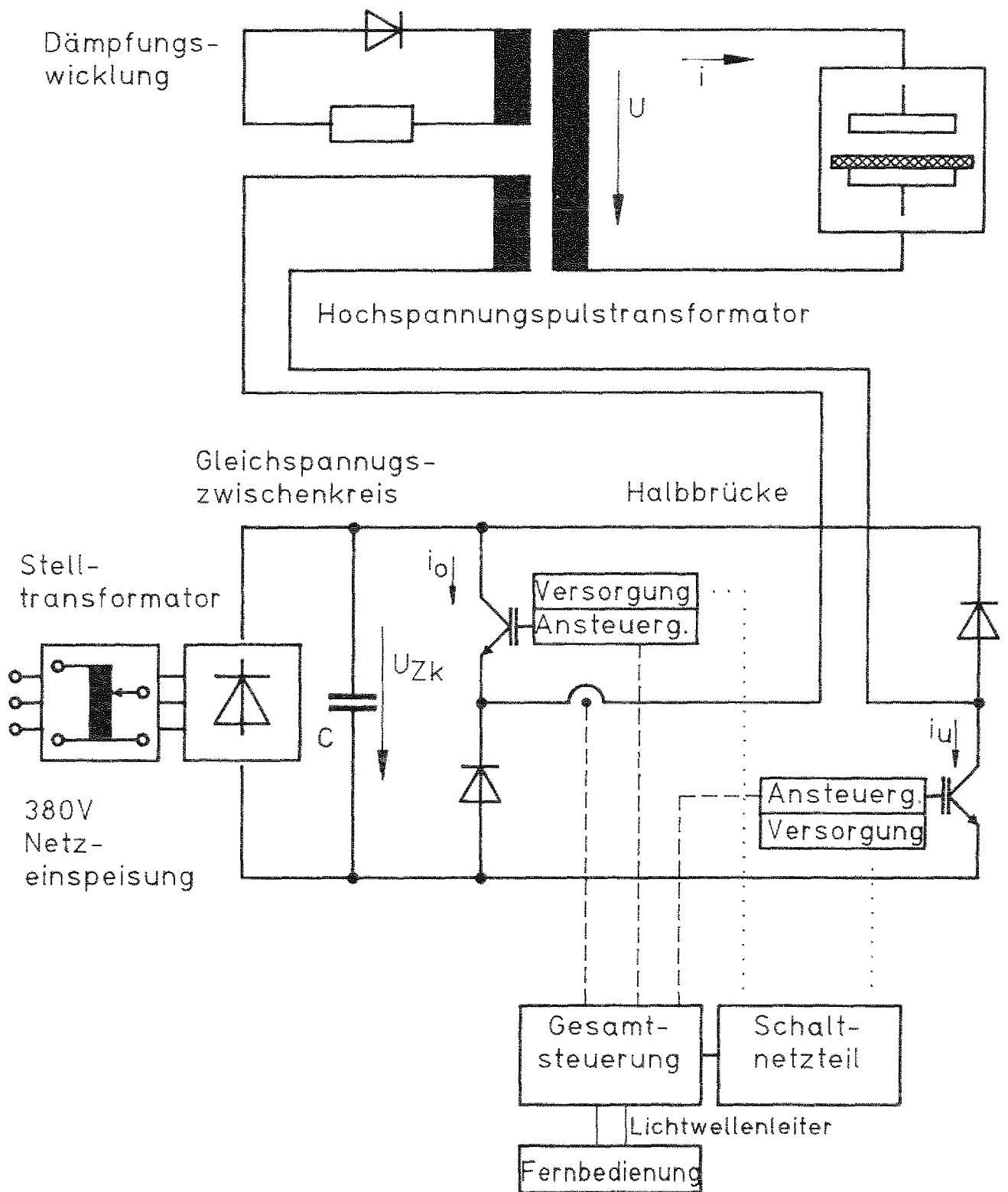
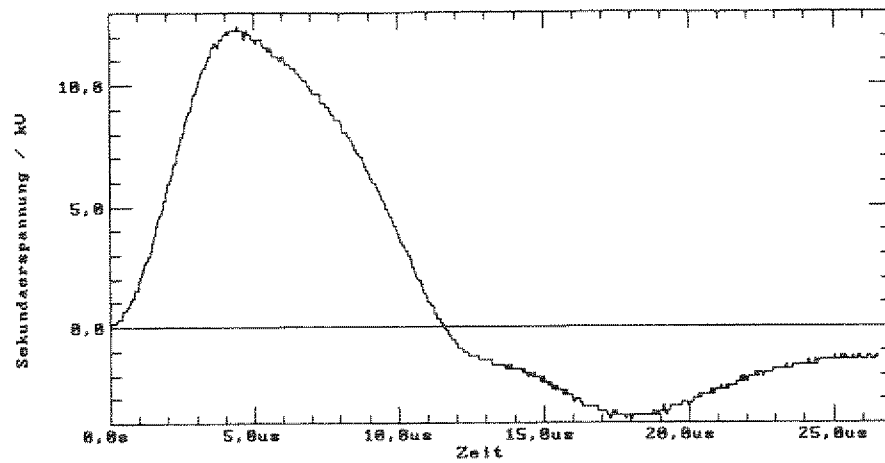
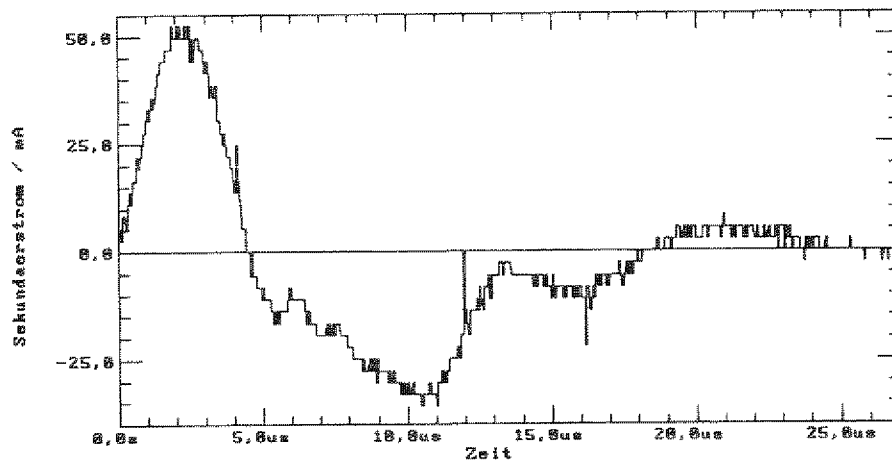


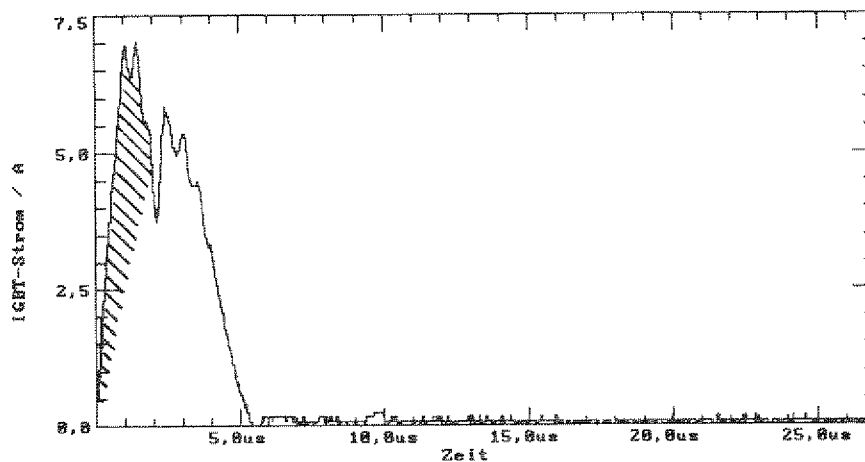
Bild 2-3: Grundsätzlicher Aufbau des Hochspannungspulsgenerators



Sekundärspannung
 U



Sekundärstrom
 i

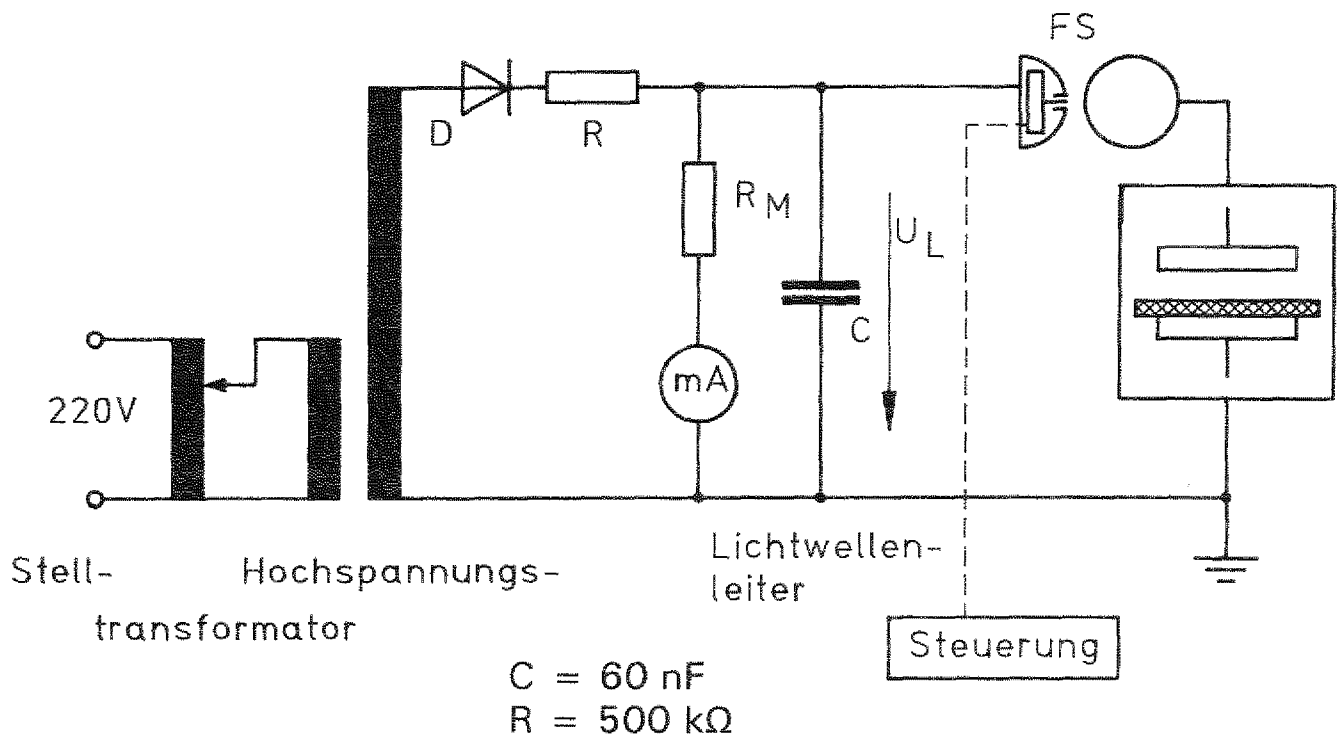


Strom durch den
Unterschalter i_U

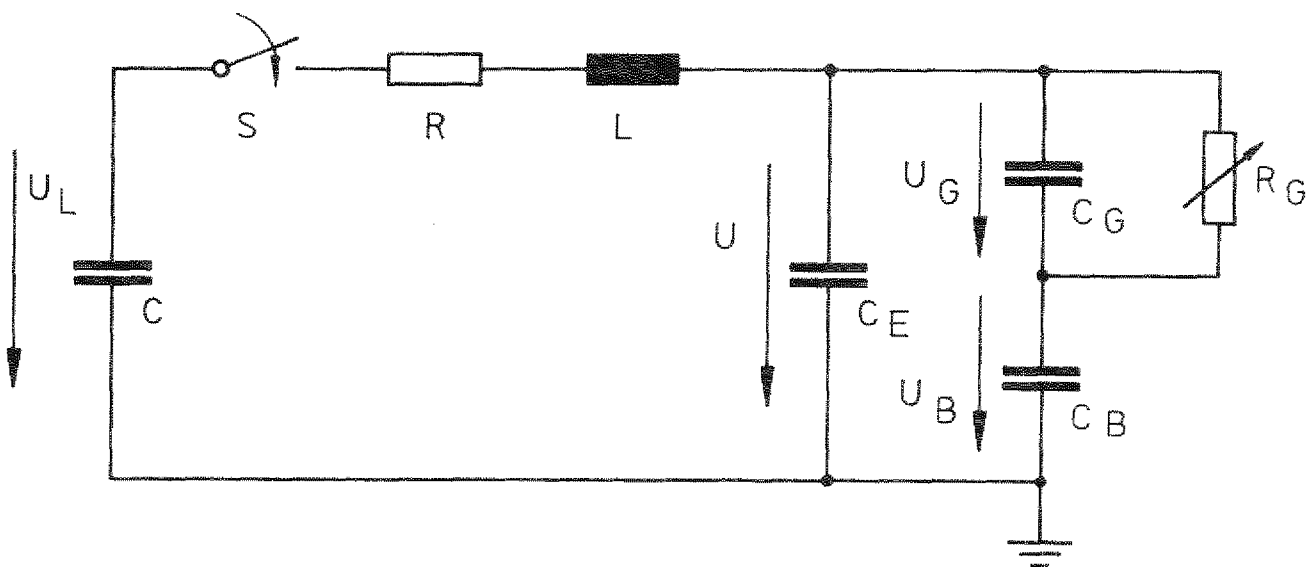
schraffiert:
Umschwingstrom
der Ausschalt-
entlastung

Barriere 2 mm Acrylglas
Spaltweite 1 mm
Acetylen 1000 hPa

Bild 2-4: Spannungs- und Stromverlauf
des Hochspannungspulsgenerators



a) Schaltung



typische Werte: $C = 60 \text{ nF}$, $R = 200 \text{ }\Omega$, $L = 40 \text{ }\mu\text{H}$
 $C_E = 10 \text{ pF}$, $C_G = 30 \text{ pF}$, $C_B = 120 \text{ pF}$

b) Ersatzschaltbild des Stoßkreises

Bild 2-7: Erzeugung steilflankiger Spannungsimpulse

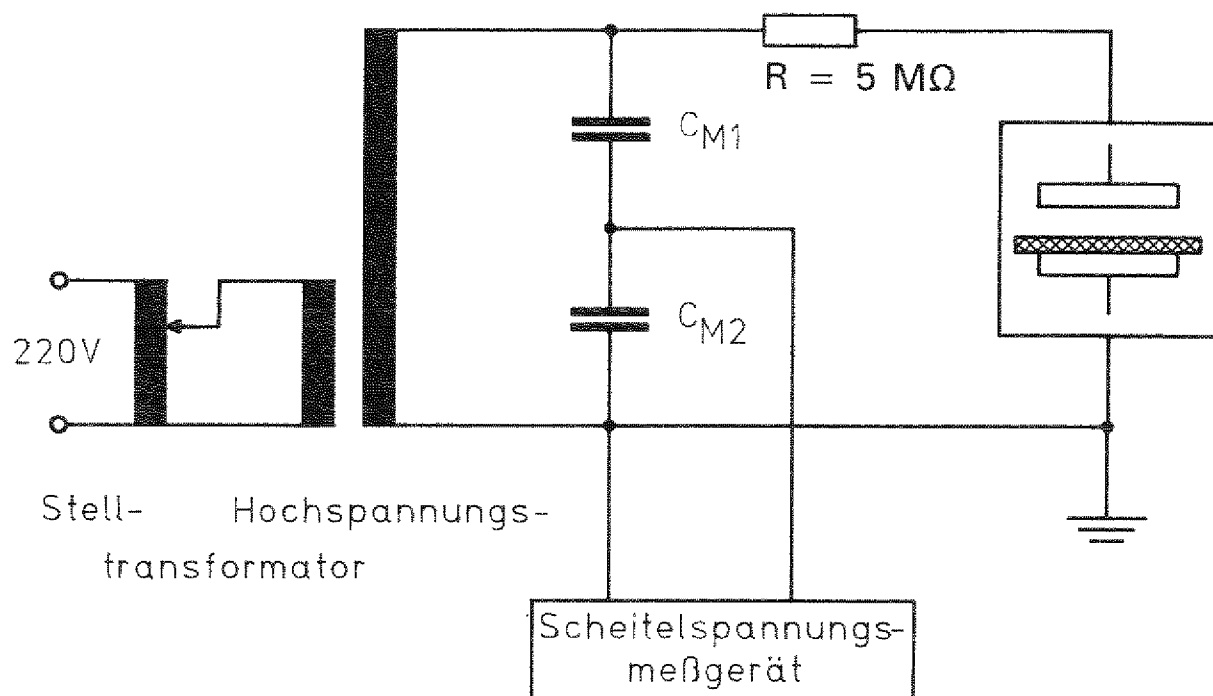


Bild 2-5: Schaltung zur Erzeugung sinusförmiger Wechselspannung

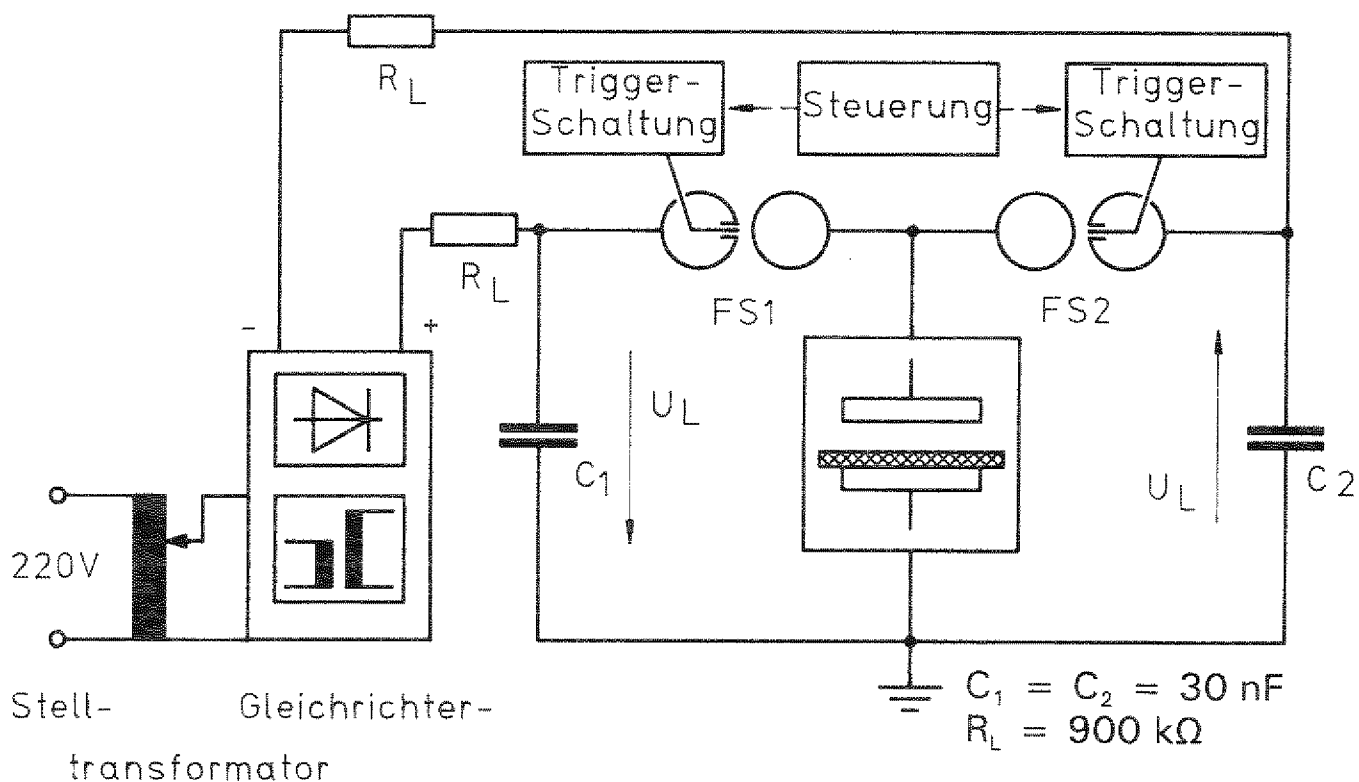
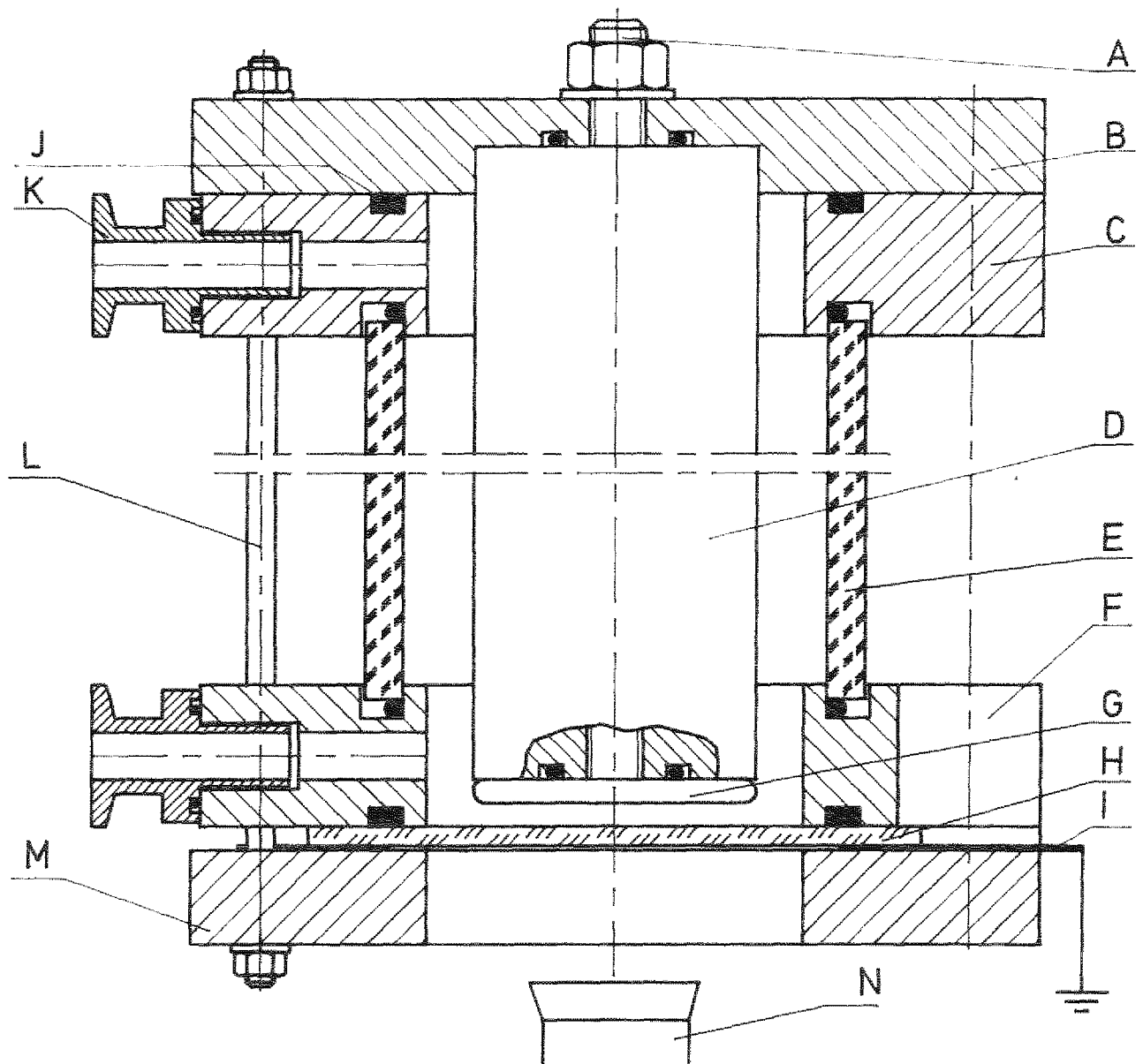


Bild 2-6: Schaltung zur Erzeugung rechteckförmiger Wechselspannung /Braumann 1981/



- A Hochspannungsanschluß
- B Abschluß oben
- C Zwischenring oben
- D Abstandsstück für Hochspannungselektrode
- E Glasrohr
- F Zwischenring unten
- G Hochspannungselektrode
- H beschichtetes Glas als Barriere und Erdelektrode
- I Kontaktring für Erdelektrode
- J Dichtungsring
- K Gasanschluß
- L Gewindestange
- M Abschluß unten
- N CCD-Kamera

Bild 2-8: Versuchsgefäß mit transparenter Elektrode

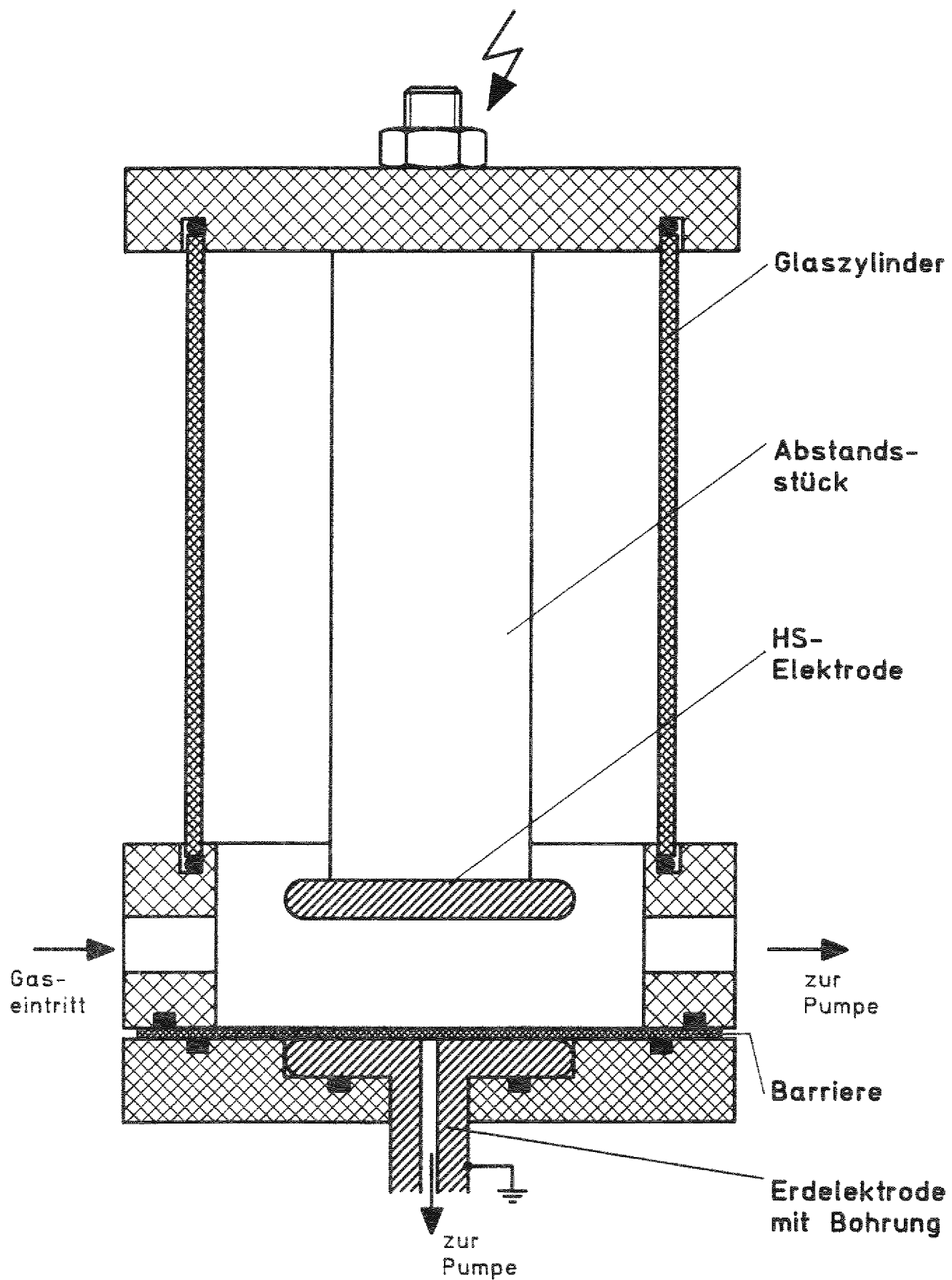
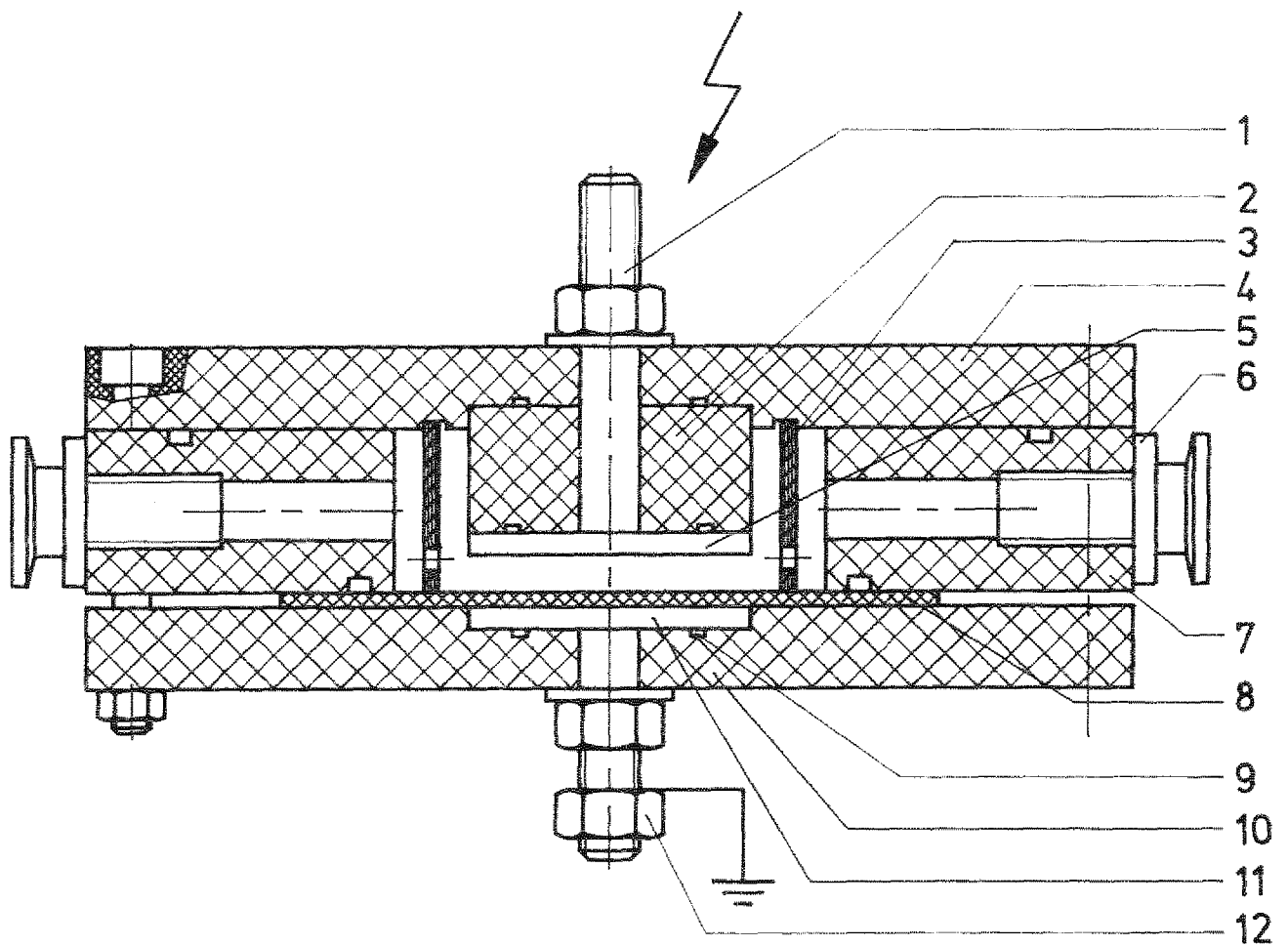
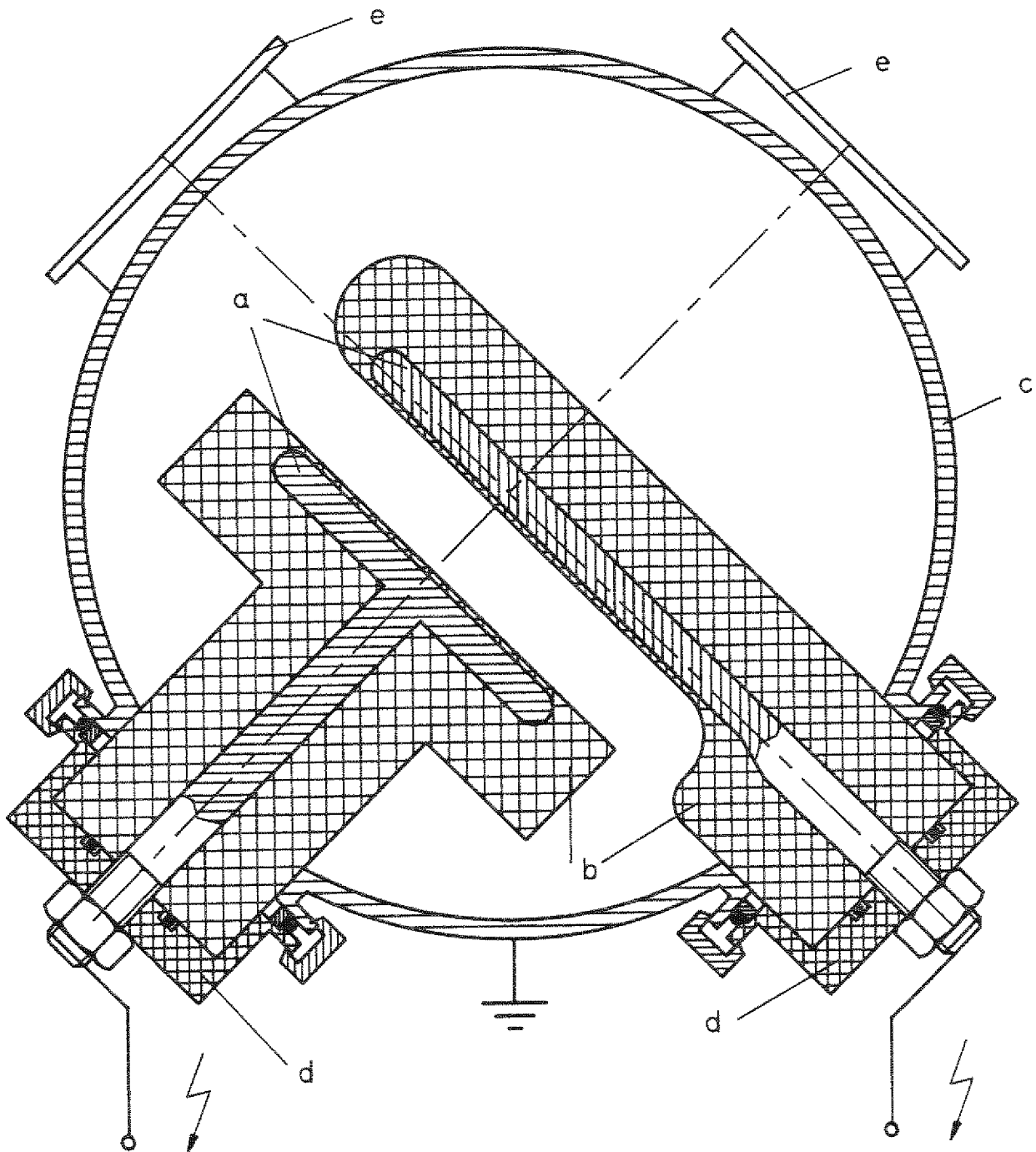


Bild 2-9: Modifiziertes Versuchsgefäß



- | | |
|----|---------------------------------|
| 1 | Anschlußbolzen für Hochspannung |
| 2 | Abstandsstück |
| 3 | Strömungsbarriere |
| 4 | Abschluß oben |
| 5 | Hochspannungselektrode |
| 6 | Gasanschluß |
| 7 | Zwischenstück |
| 8 | Barriere |
| 9 | Dichtung |
| 10 | Abschluß unten |
| 11 | Erdelektrode |
| 12 | Anschlußbolzen für Erdpotential |

Bild 2-10: Beschichtungsgefäß



- a Hochspannungselektrode
- b Barriere und Isolierung aus Epoxidharz
- c Stahlrohr
- d Halterung
- e Gas- und Vakuumanschluß

Bild 2-11: Metall-Versuchsgefäß

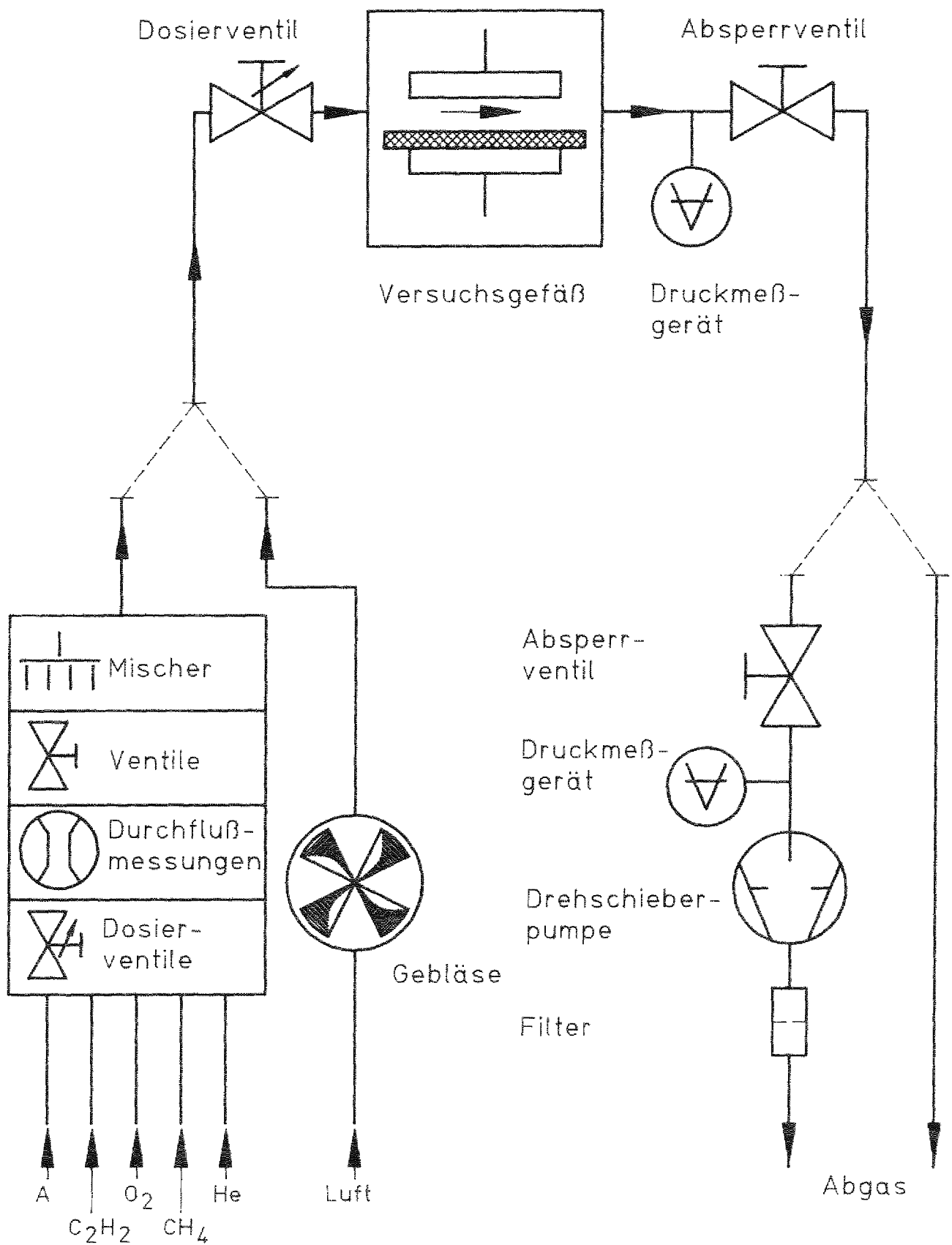
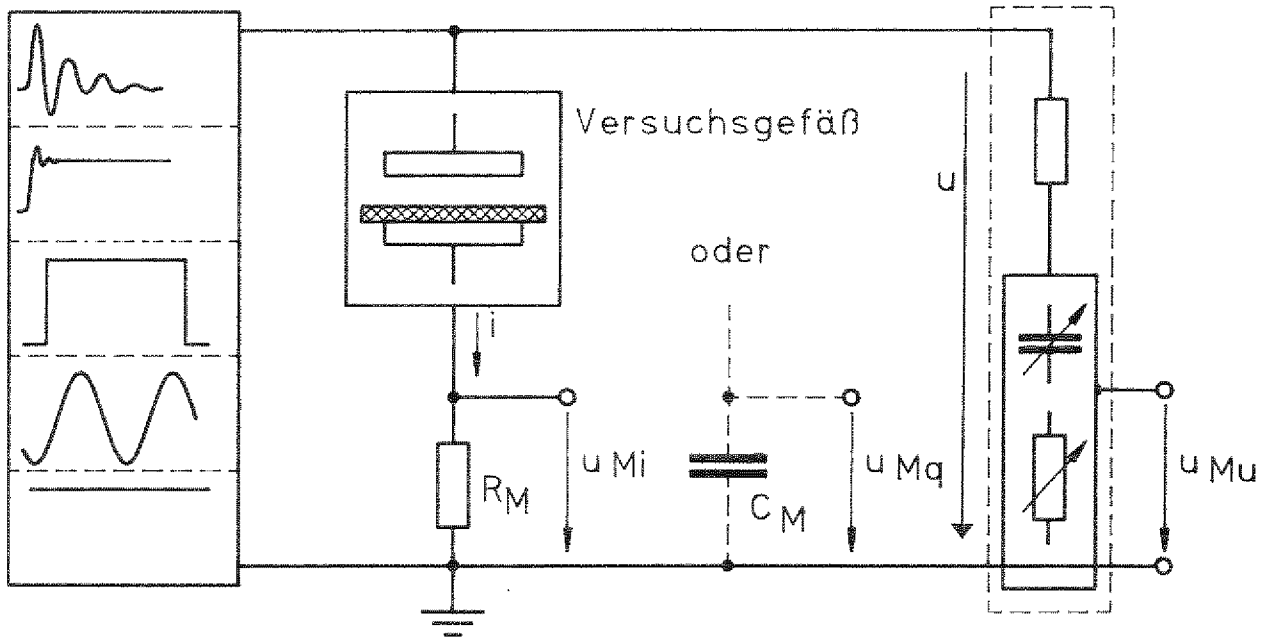


Bild 2-12: Gastechnische Anlage

Spannungsversorgung

Tastkopf mit
Abstimmereinheit



Messung der Spannung über der Barriere:

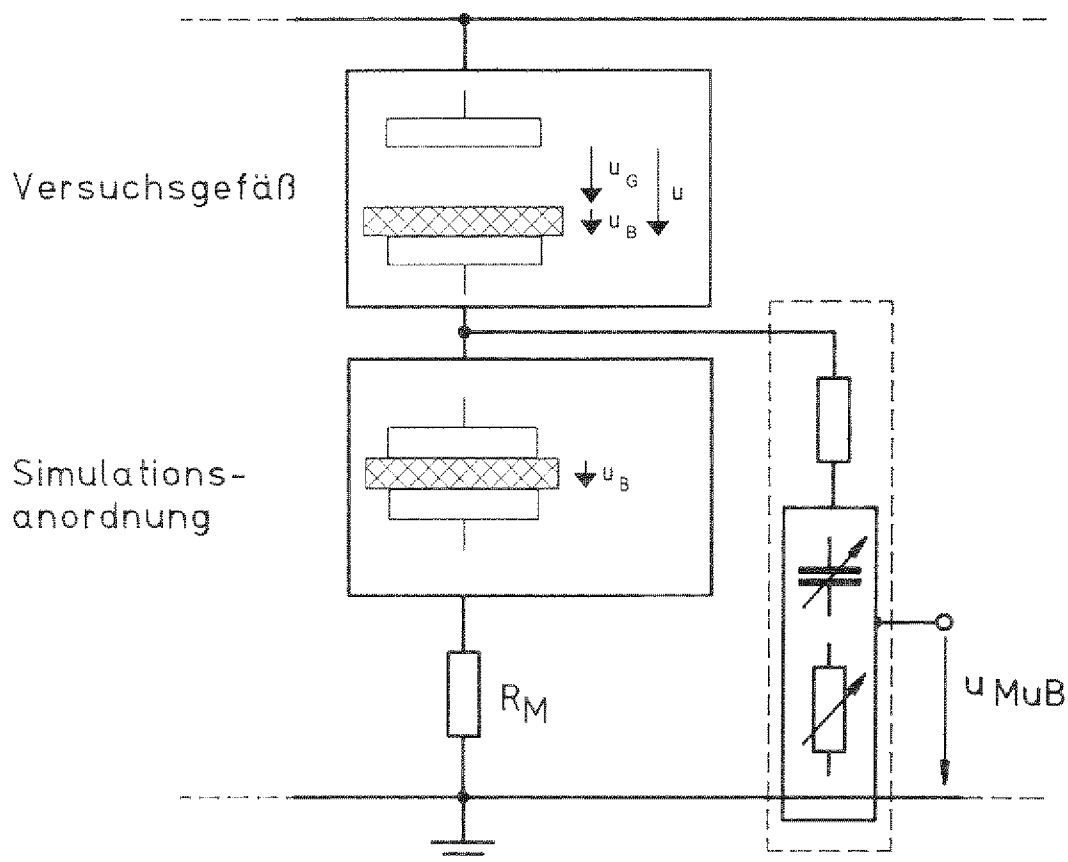


Bild 2-13: Spannungs- und Strommessung

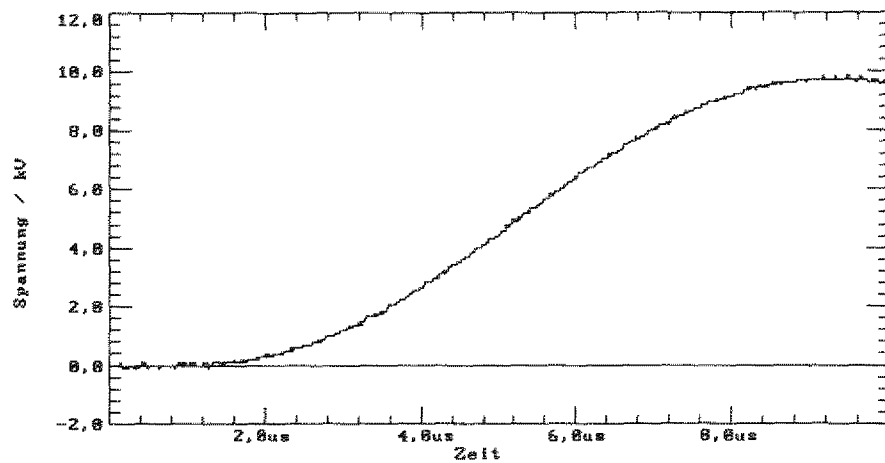
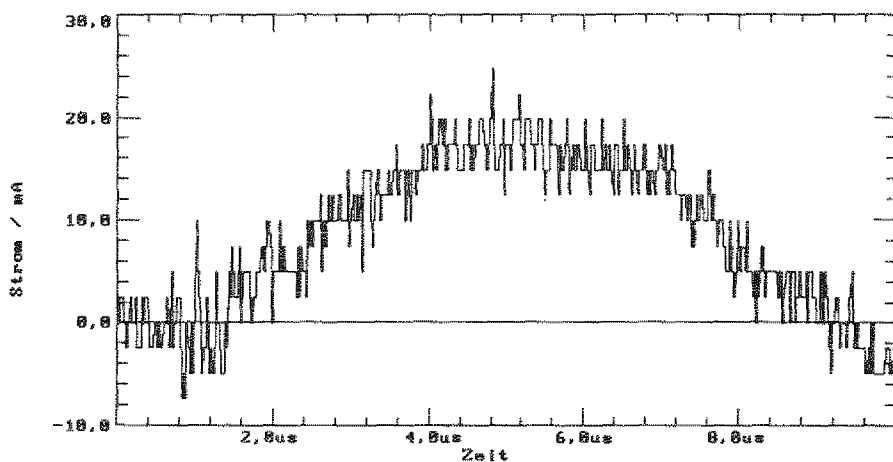


Bild 3-1:
Spannungsimpuls mit
Stromverlauf Typ A



Hochspannungspuls-
generator
10 kV, Einzelimpuls
Luft, 100 hPa
Spaltweite 2,5 mm
Barriere:
2 mm Acrylglas

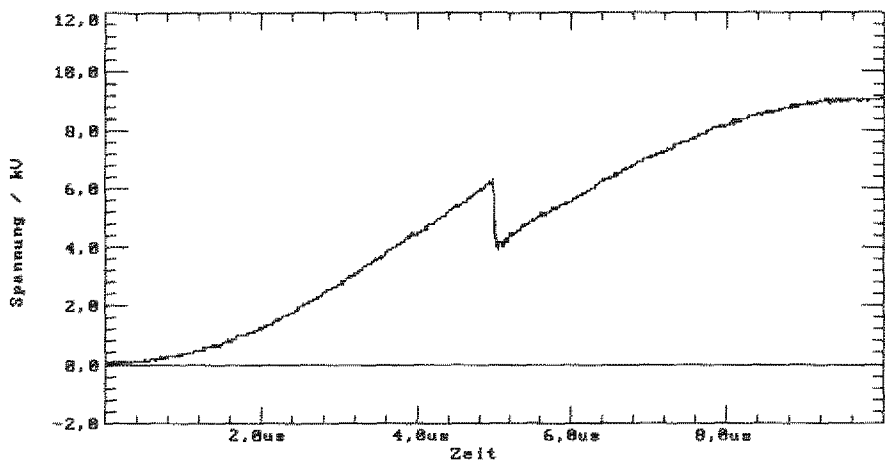
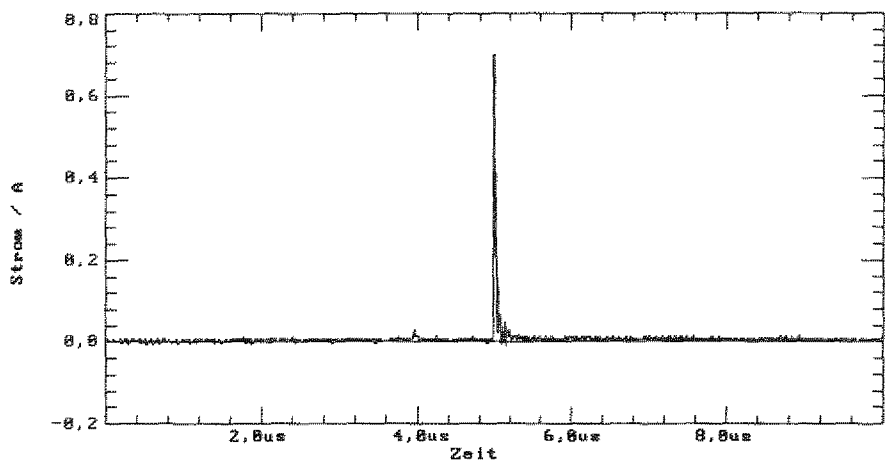


Bild 3-2:
Spannungsimpuls mit
Stromverlauf Typ B



Hochspannungspuls-
generator
10 kV, 220 Hz
Luft, 100 hPa
Spaltweite 2,5 mm
Barriere:
2 mm Acrylglas

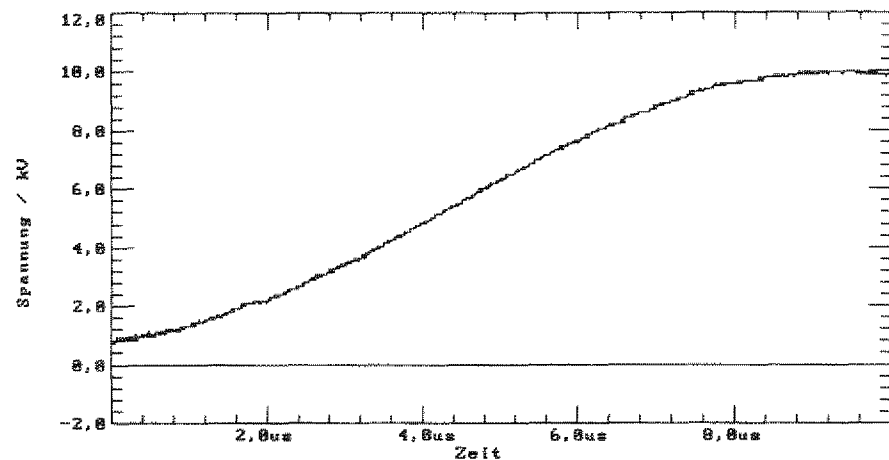


Bild 3-3:
Spannungsimpuls mit
Stromverlauf Typ C

Hochspannungspuls-
generator
10 kV, 3 kHz
Luft, 100 hPa
Spaltweite 2,5 mm
Barriere:
2 mm Acrylglas

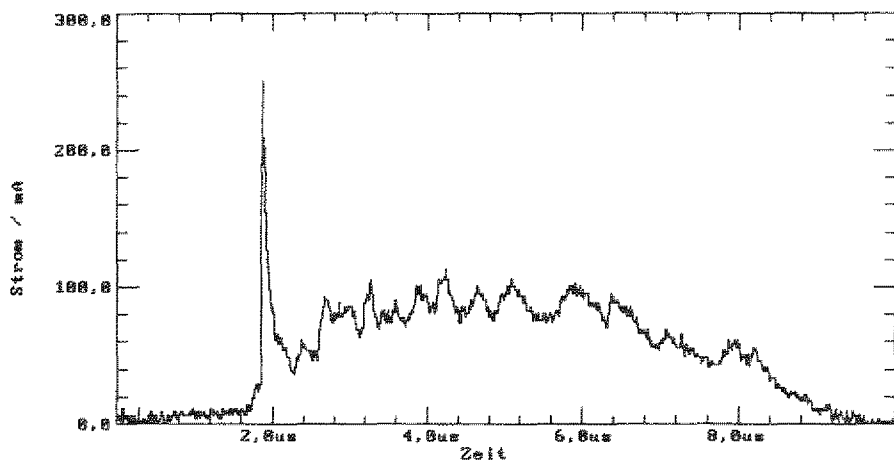
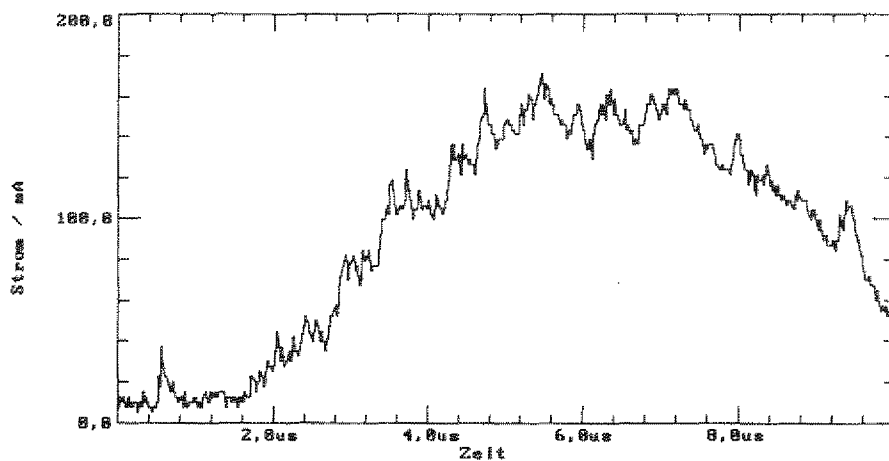
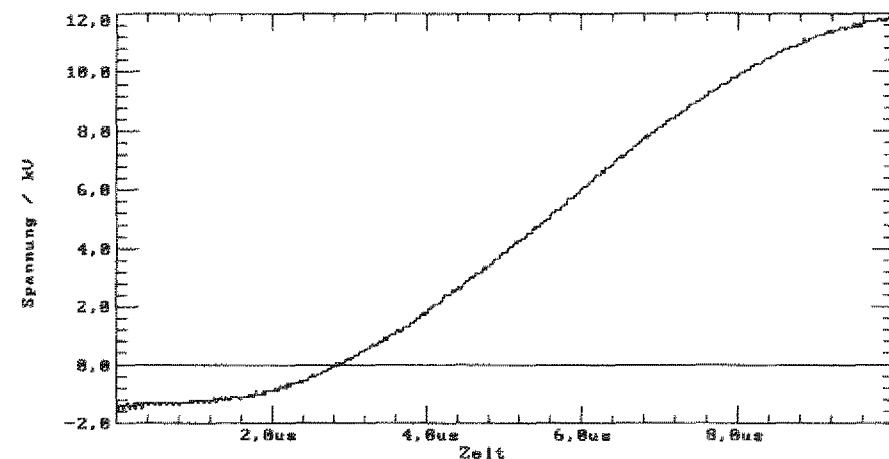
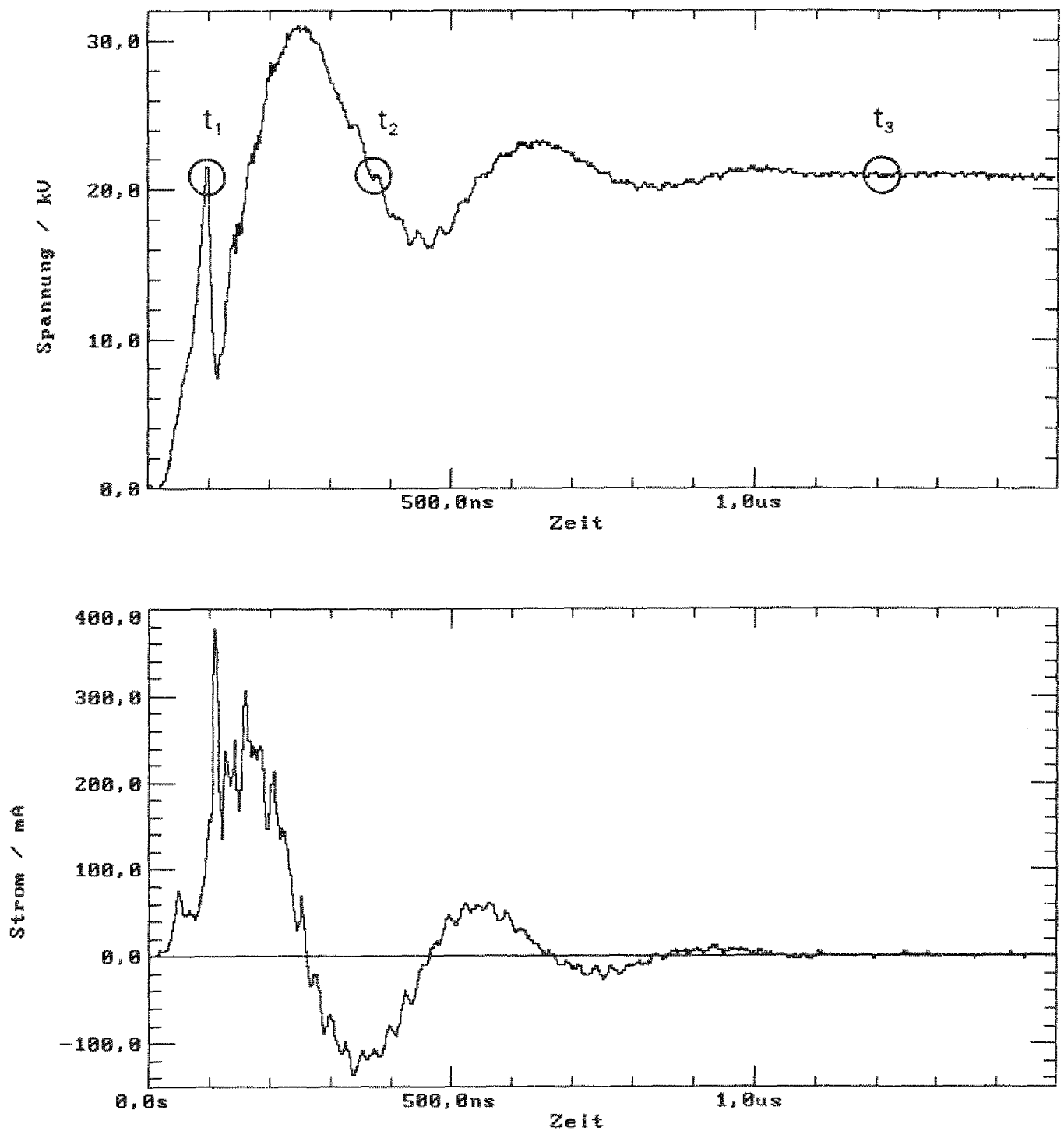


Bild 3-4:
Spannungsimpuls mit
Stromverlauf Typ D

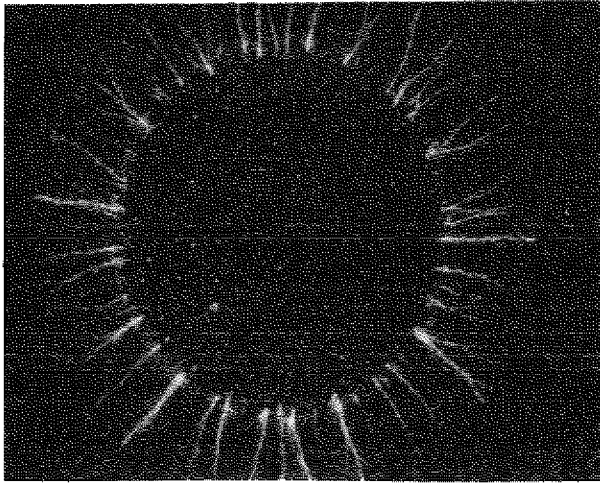
Hochspannungspuls-
generator
10 kV, 16 kHz
Luft, 100 hPa
Spaltweite 2,5 mm
Barriere:
2 mm Acrylglas



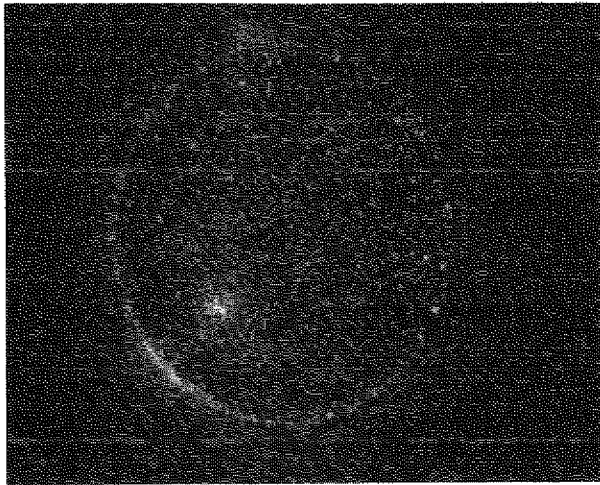


Spannungsendwert 20 kV
 Argon, 1000 hPa
 Spaltweite 1,2 mm

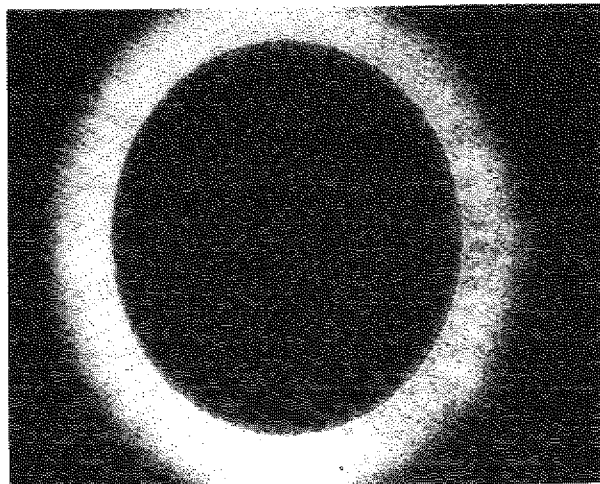
Bild 3-5: Spannungs- und Stromverlauf bei steilflankiger Spannung



a) Gasdruck 1000 hPa



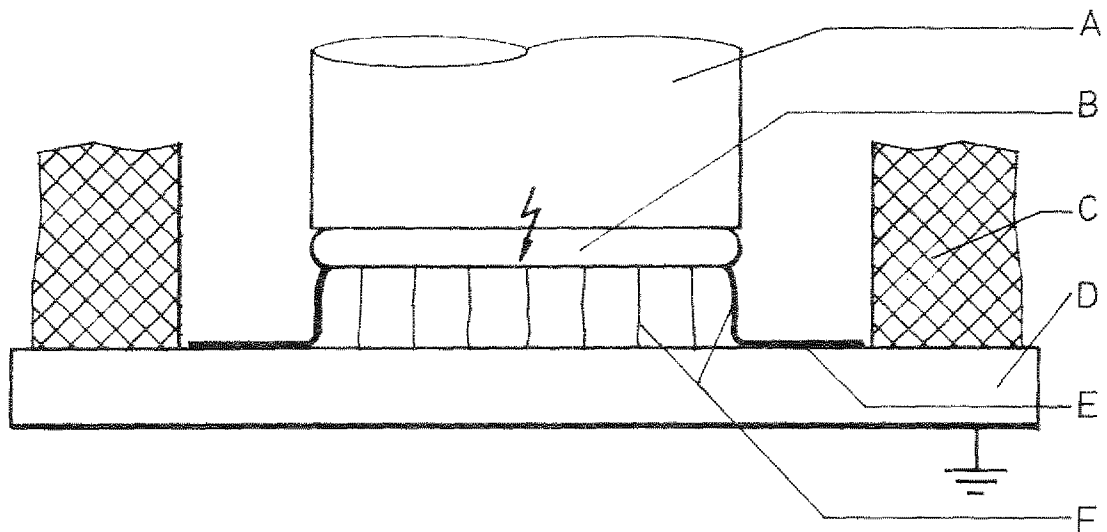
b) Gasdruck 80 hPa



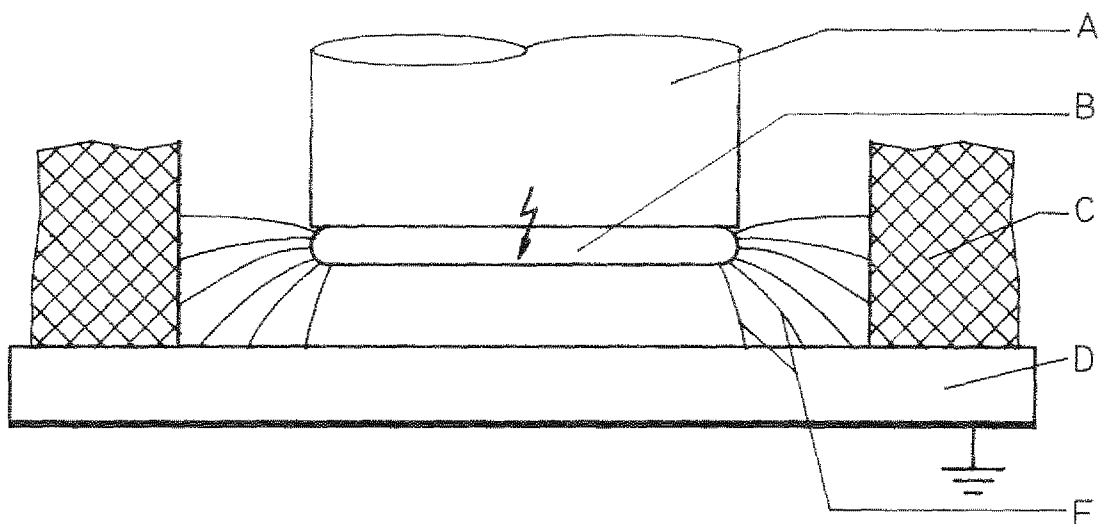
c) Gasdruck 4 hPa

steiflankige Spannung, Endwert 20 kV
 Argon
 Spaltweite 1,2 mm

Bild 3-6: Einzelentladungen mit steiflankiger Spannung bei verschiedenen Drücken



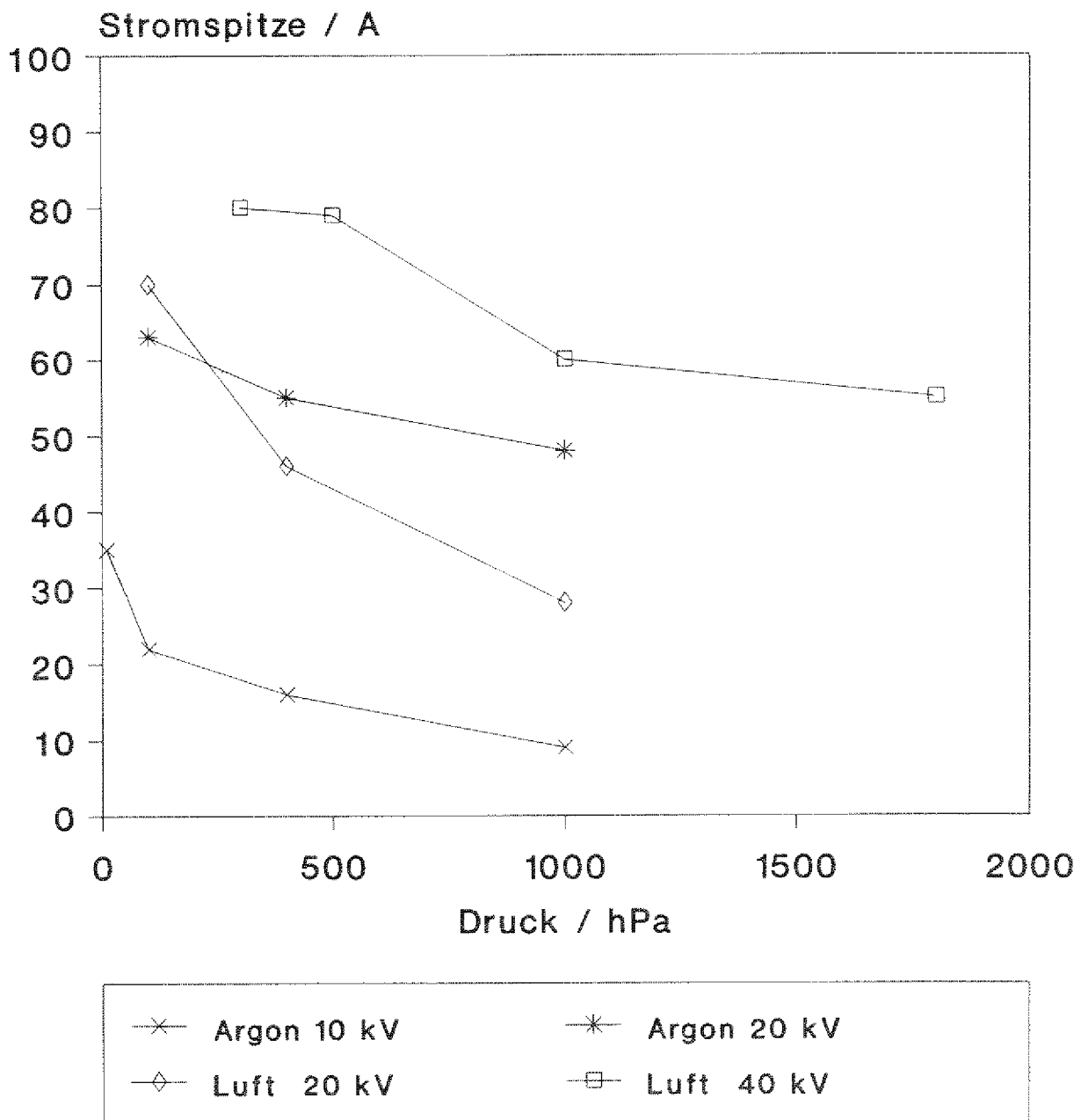
a) Gleitentladungen auf der Barrierenoberfläche



b) Entladungen im Randbereich bei Unterdruck

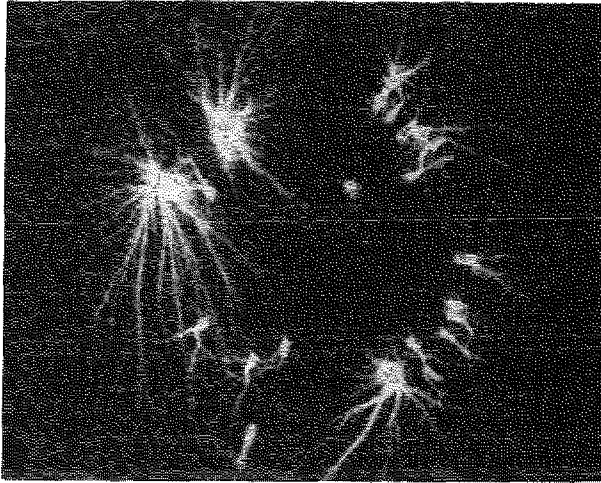
- A Abstandsstück (Isolierstoff)
- B Hochspannungselektrode
- C Gefäß (Isolierstoff)
- D Glaselektrode mit Metallschicht
- E Gleitentladungen
- F Mikroentladungen

Bild 3-7: Schematische Darstellung von Entladungen im Randbereich

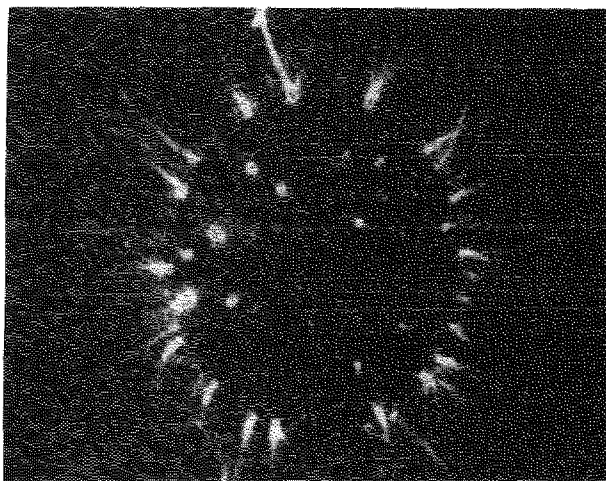


50 Hz rechteckförmige Wechselspannung
 (angegeben ist der Betrag der Spannungsflanke)
 Spaltweite 2,5 mm
 Barriere 2mm Acrylglas

Bild 3-8: Abhängigkeit des Maximalstroms vom Gasdruck



a) Gasdruck 1000 hPa



b) Gasdruck 400 hPa

Argon

steiflankige Spannung 20 kV Endwert

Spaltweite 5,2 mm

Bild 3-9: Einzelentladungen bei 5,2 mm Spaltweite

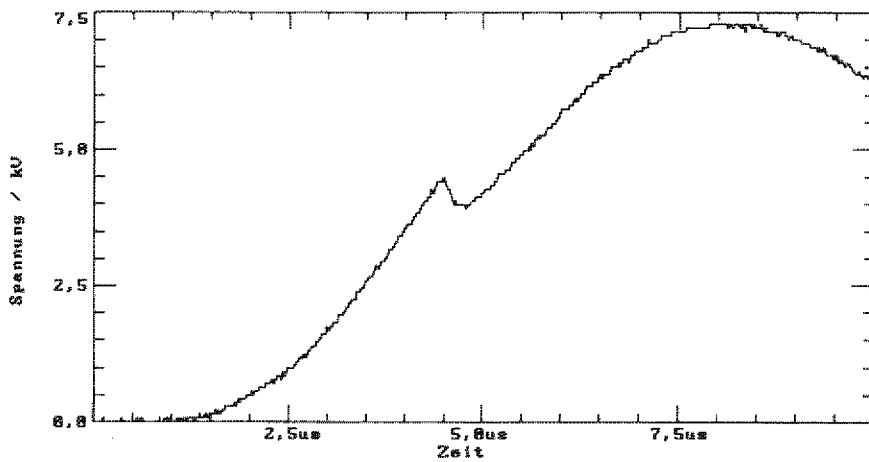
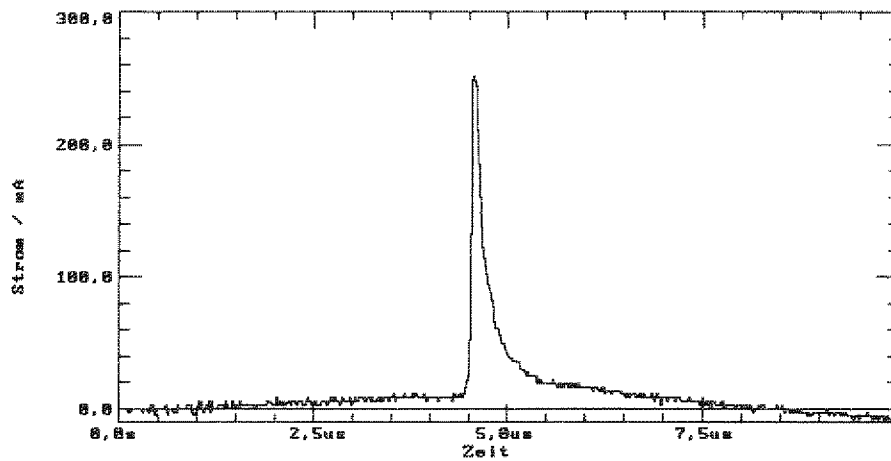
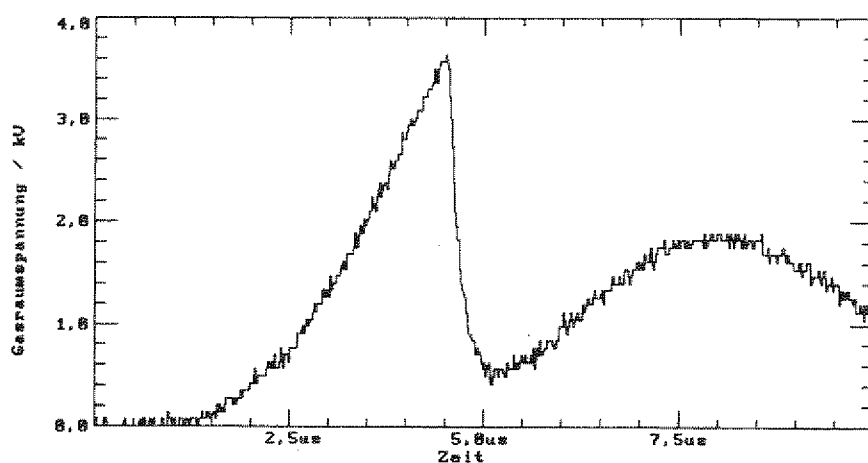
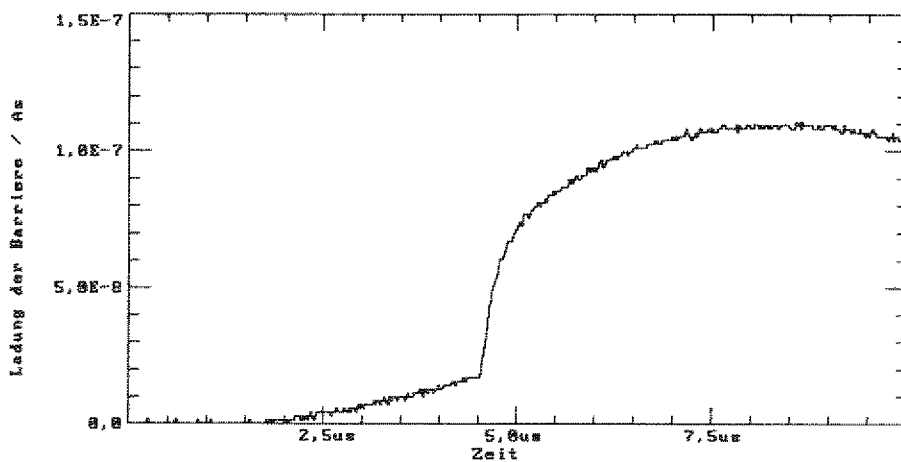


Bild 3-10:
Diagramme einer
Entladung bei
3 mm Spaltweite



Hochspannungspuls-
generator
10 kV, 1 kHz
Argon, 500 hPa
Barriere:
2 mm Acrylglas



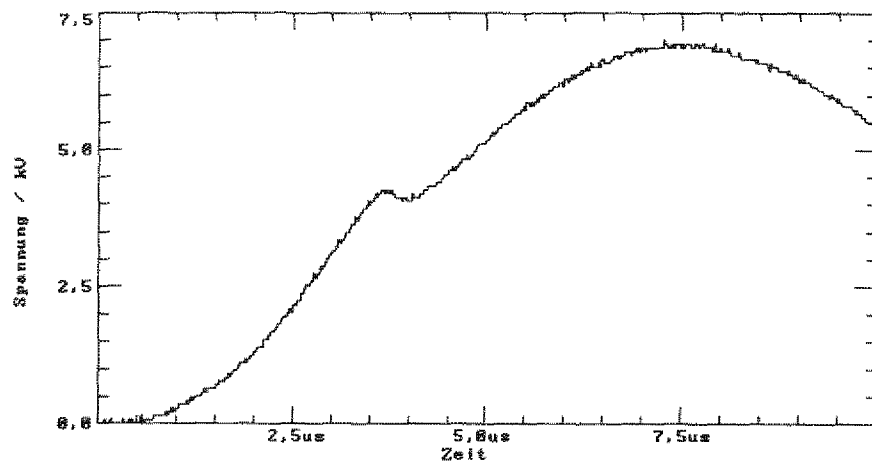
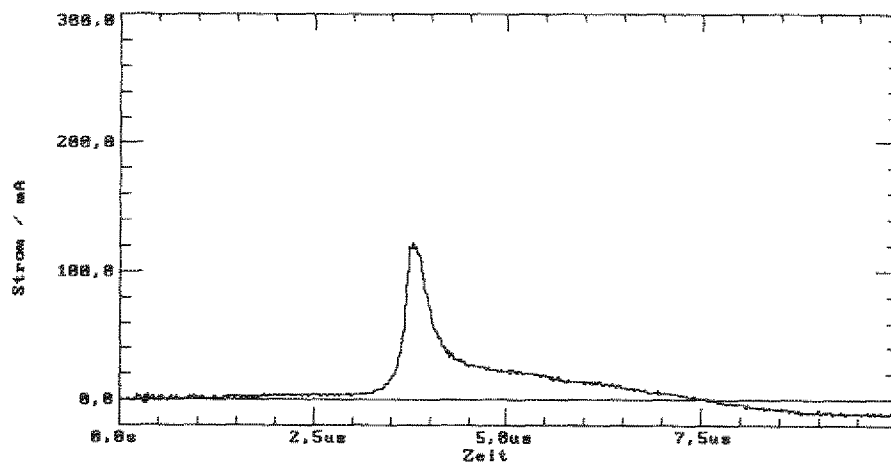
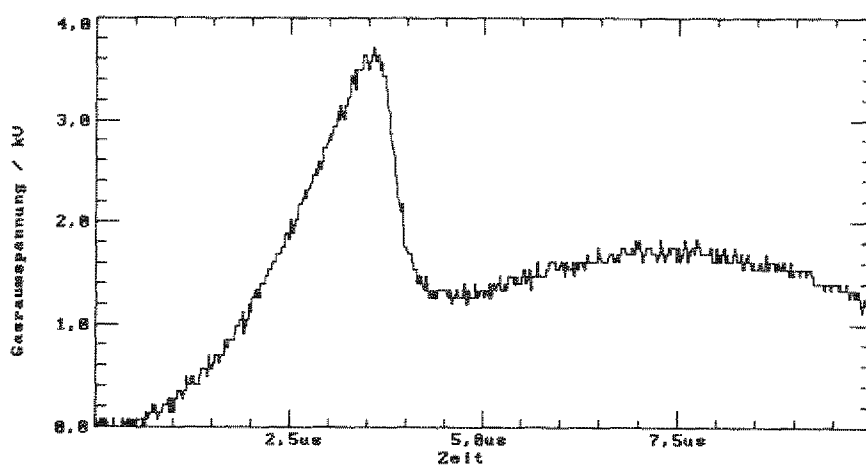
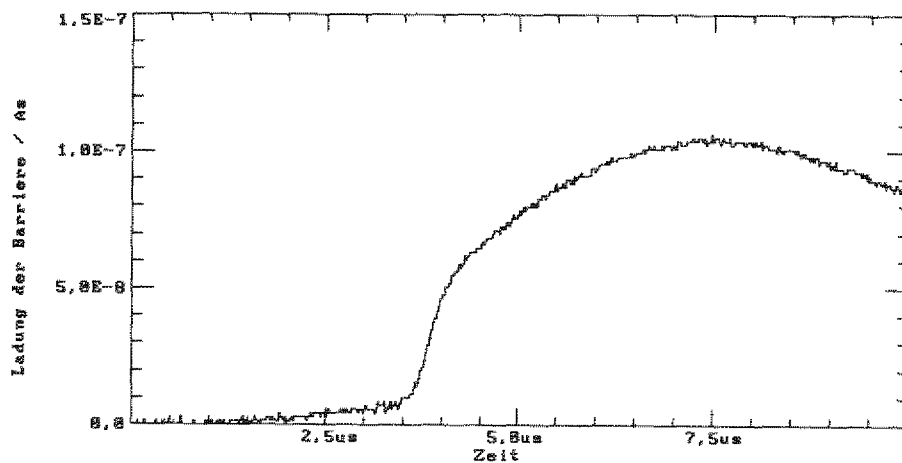
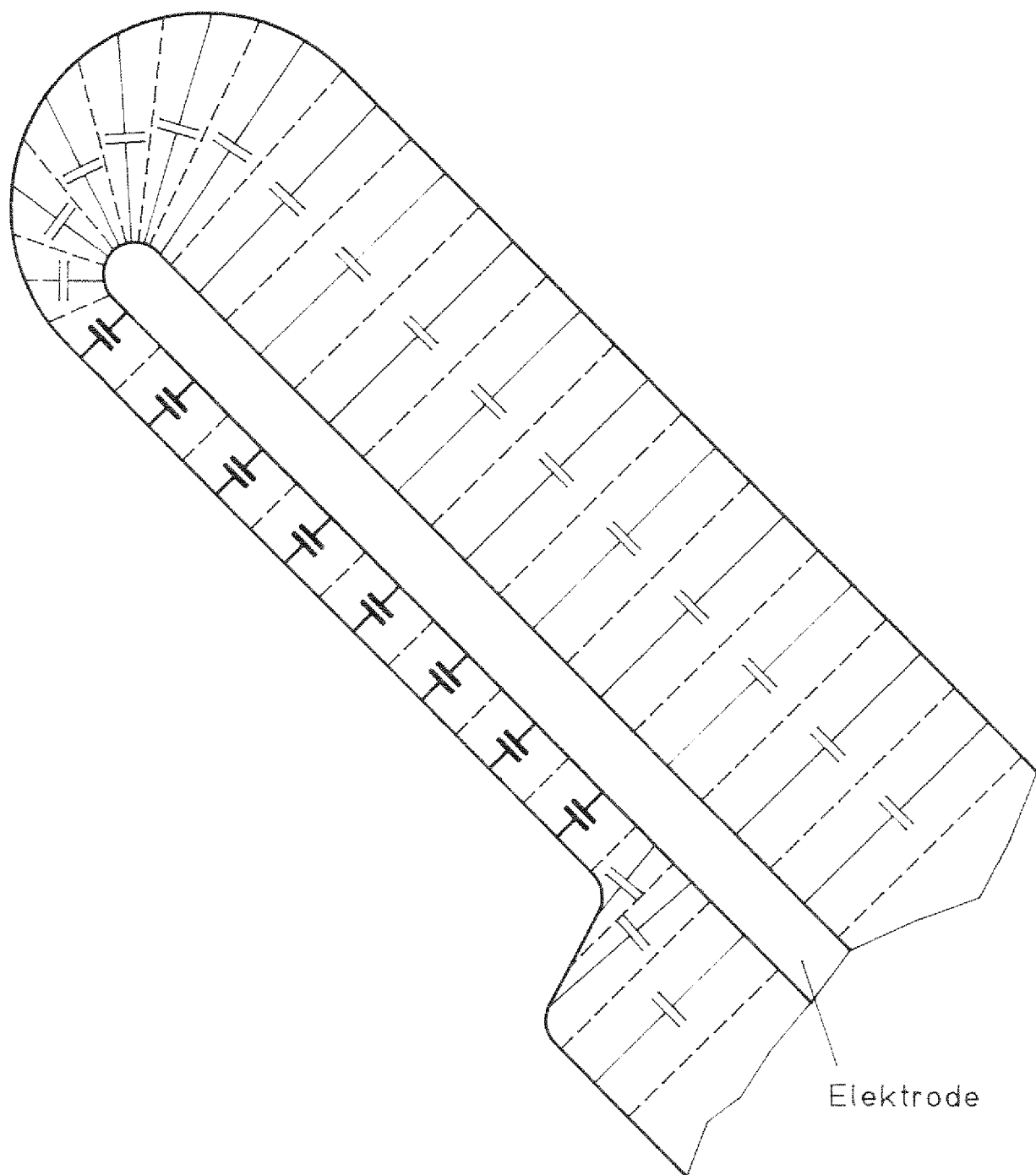


Bild 3-11:
Diagramme einer
Entladung bei
33 mm Spaltweite



Hochspannungspuls-
generator
10 kV, 1 kHz
Argon, 45 hPa
Barriere:
2 mm Acrylglas





Kapazität pro Flächenelement der Barriere

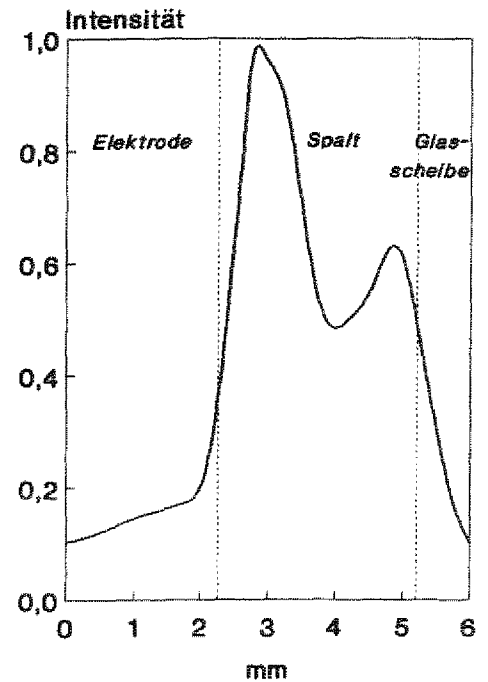
⎓ groß, im Entladungsbereich

⎓ klein, im Isolierbereich

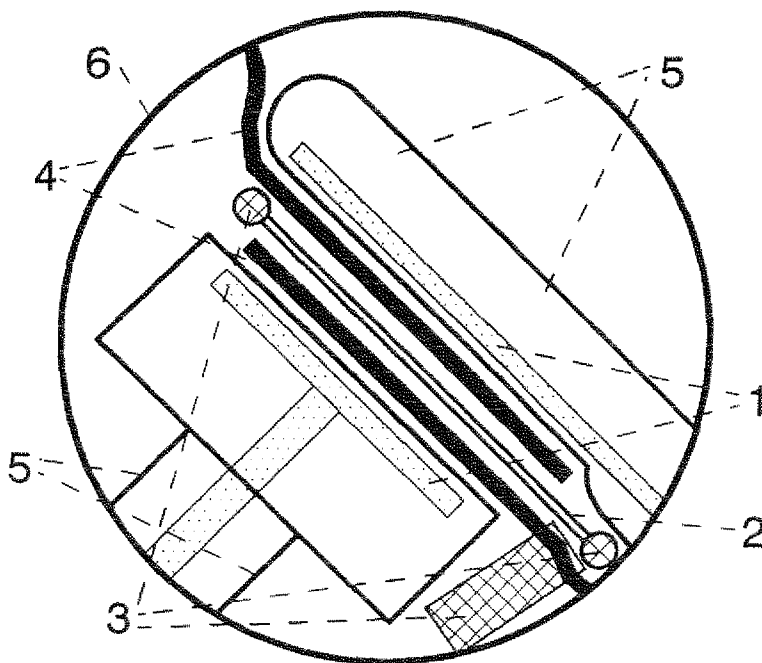
Bild 3-12: Schnitt einer Hochspannungselektrode in Epoxidharz



a) Leuchterscheinungen



b) Lichtintensität
im Spalt zwischen
Elektrode und Glasscheibe

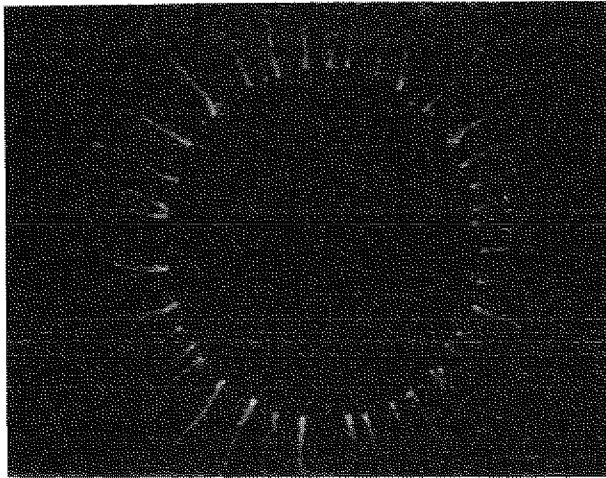


c) Schematische Darstellung

- 1 Elektroden
in Gießharz
- 2 Glasscheibe
- 3 Kunststoffhalterungen
für Glasscheibe
- 4 starkes Leuchten
- 5 schwaches Leuchten
- 6 Reflexion
an der Gefäßwand

Hochspannungspulsgenerator, 4 kV, 3 kHz
Argon, 130 hPa

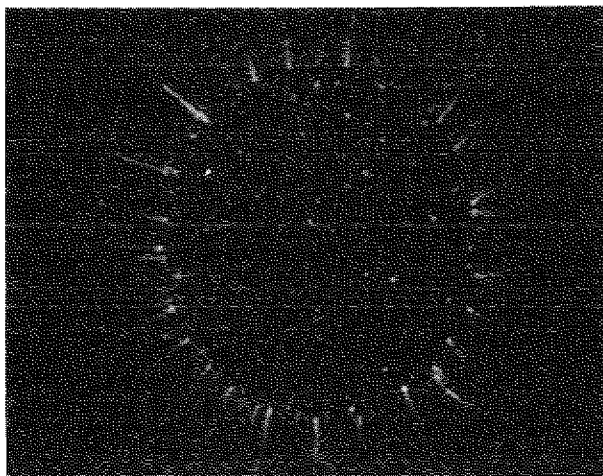
Bild 3-13: Entladung im Metallgefäß



a)

Zündspannung

10 kV



b)

Zündspannung

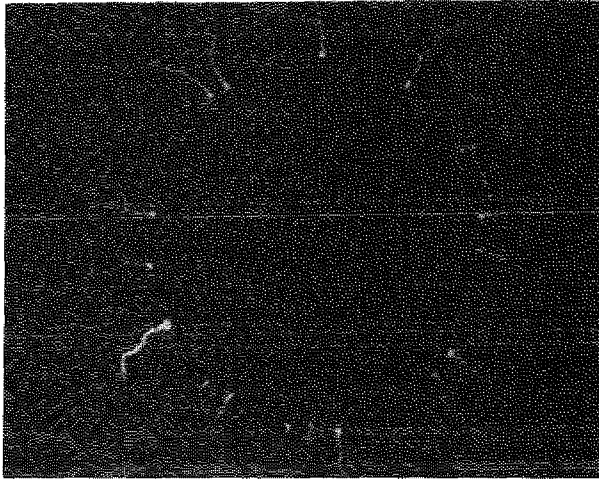
25 kV

steilflankige Spannung 20 kV Endwert

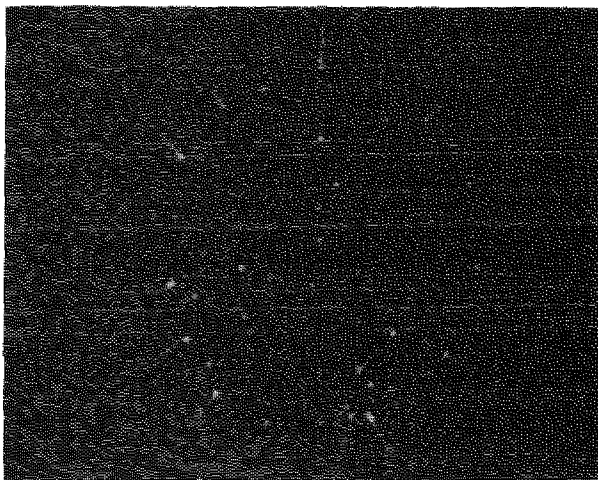
Argon 1000 hPa

Spaltweite 1,7 mm

Bild 3-14: Einzelentladungen bei verschiedenen Zündspannungen
im Anstieg steilflankiger Spannung



a)
Zündung im
Spannungsanstieg
bei 4 kV



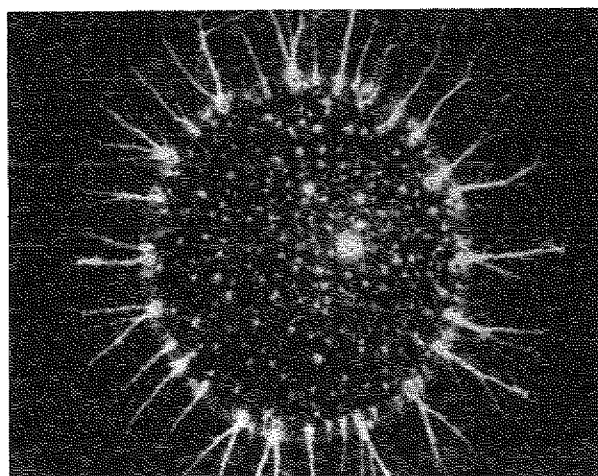
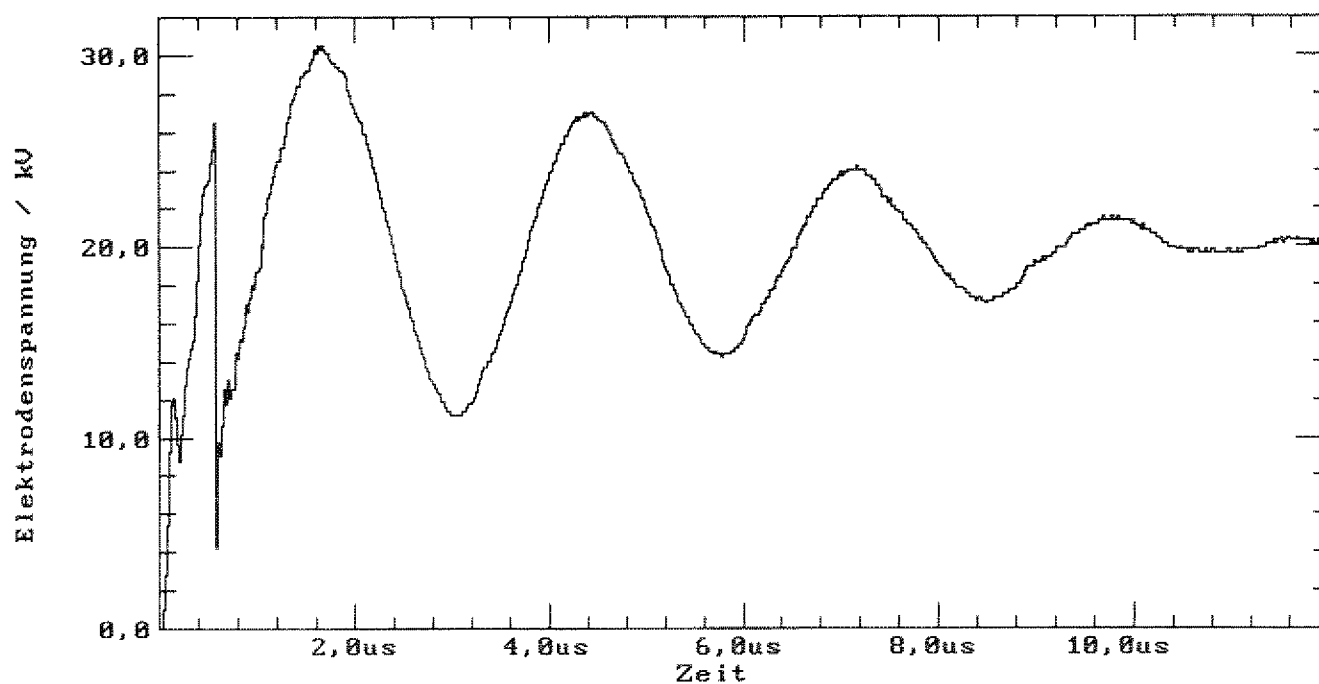
b)
Zündung im
Spannungsmaximum
bei 12 kV

Hochspannungspulsgenerator, 12 kV Einzelimpuls

Argon 400 hPa

Spaltweite 1,7 mm

Bild 3-15: Einzelentladungen bei verschiedenen Zündspannungen



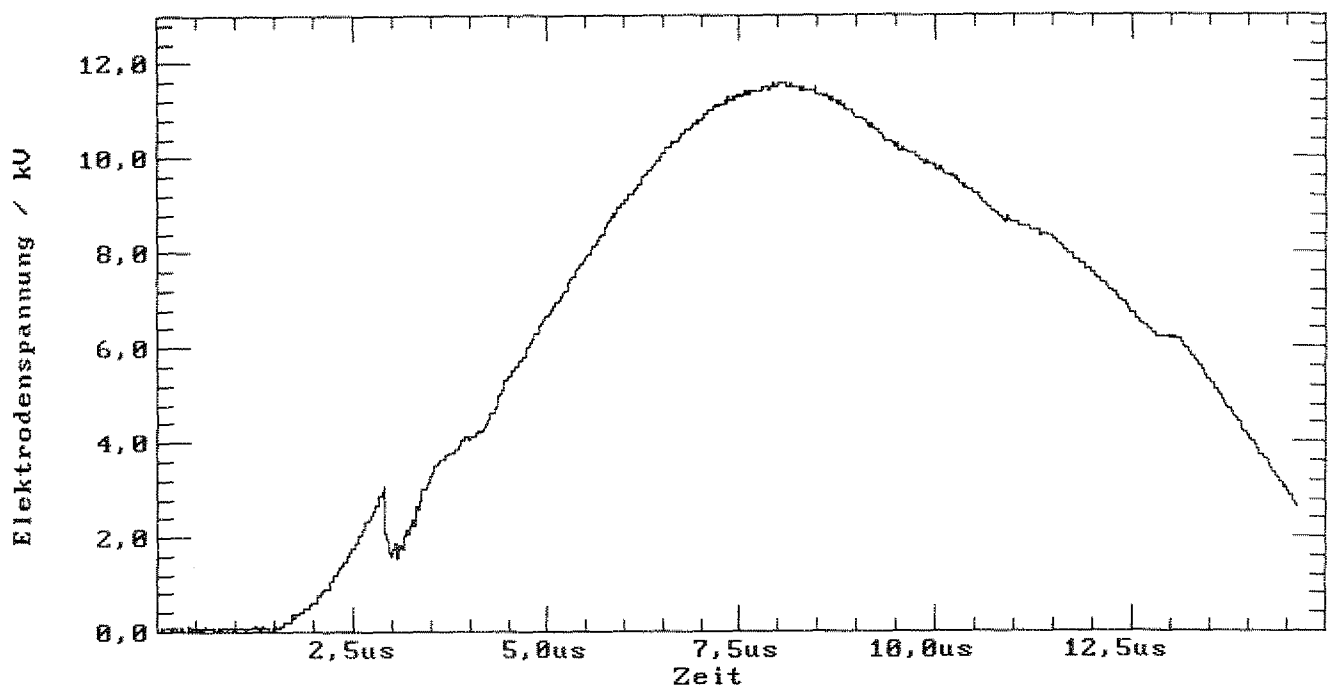
steilflankige Spannung 20 kV Endwert

Argon 1000 hPa

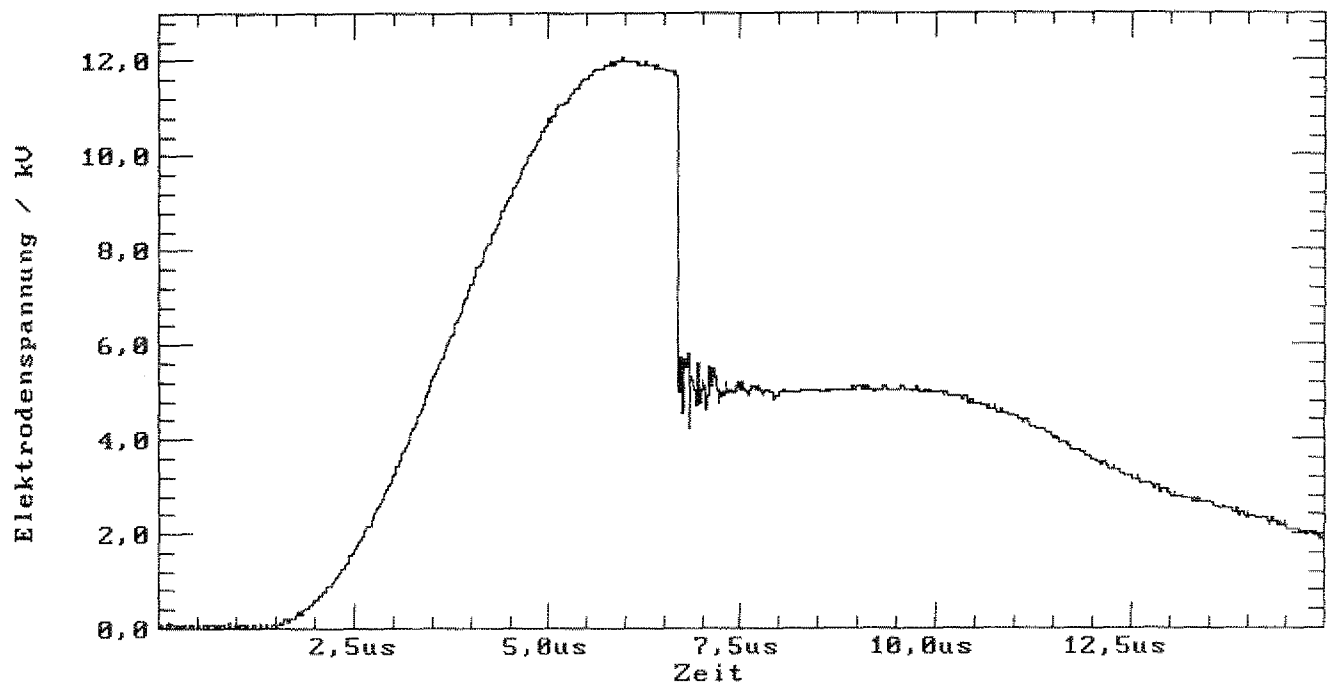
Spaltweite 1,2 mm

1,5 mH Induktivität in der Zuleitung

Bild 3-16: Einzelentladung bei verlangsamttem Spannungsanstieg



a) Zündung der Entladung im Spannungsanstieg



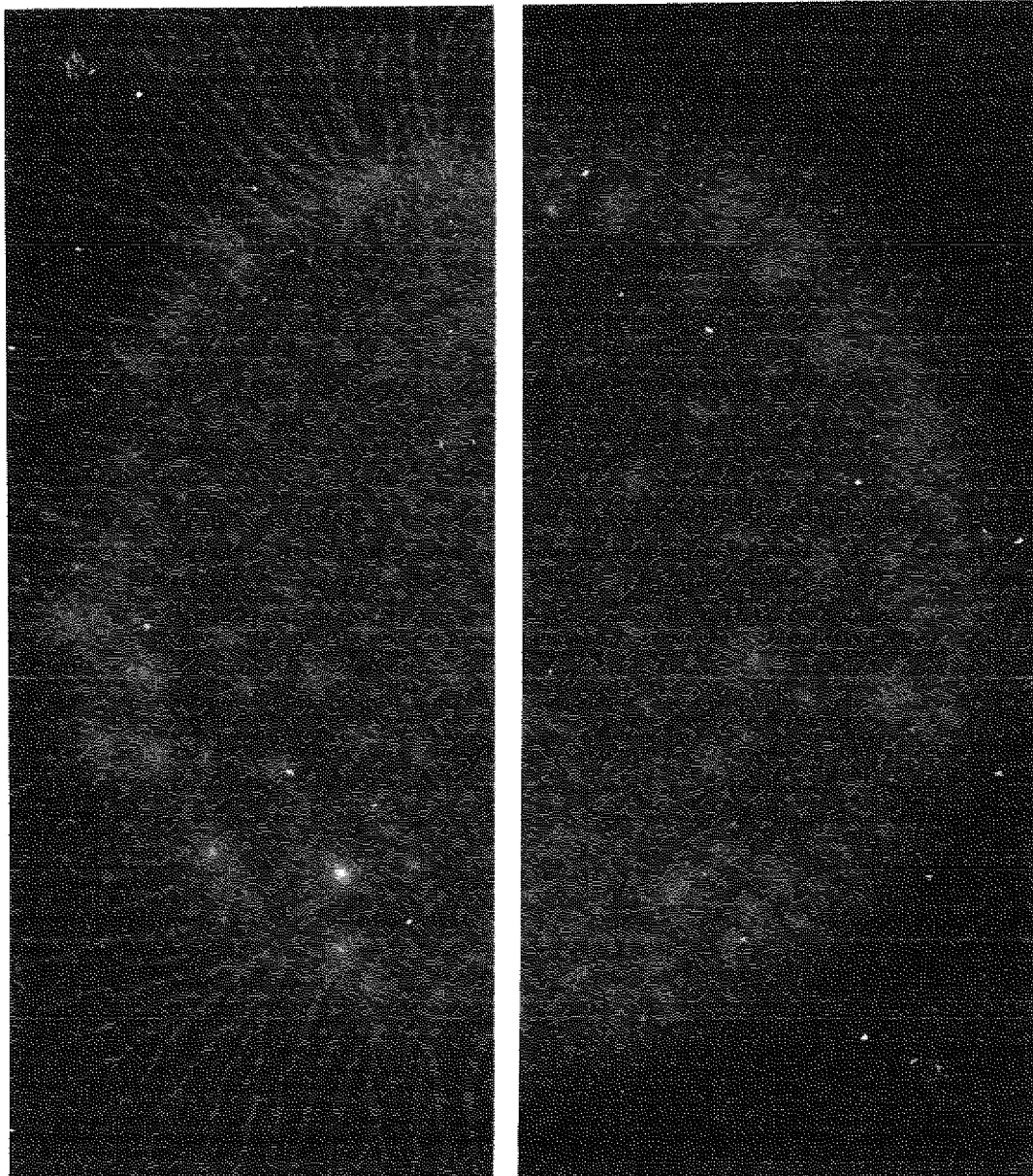
b) Zündung der Entladung im Spannungsmaximum

Hochspannungspulsgenerator, 12 kV Einzelimpuls

Argon 1000 hPa

Spaltweite 1,7 mm

Bild 3-17: Zündung im Spannungsimpuls des Hochspannungspulsgenerators



Zündspannung
+ 15 kV

Zündspannung
- 15 kV

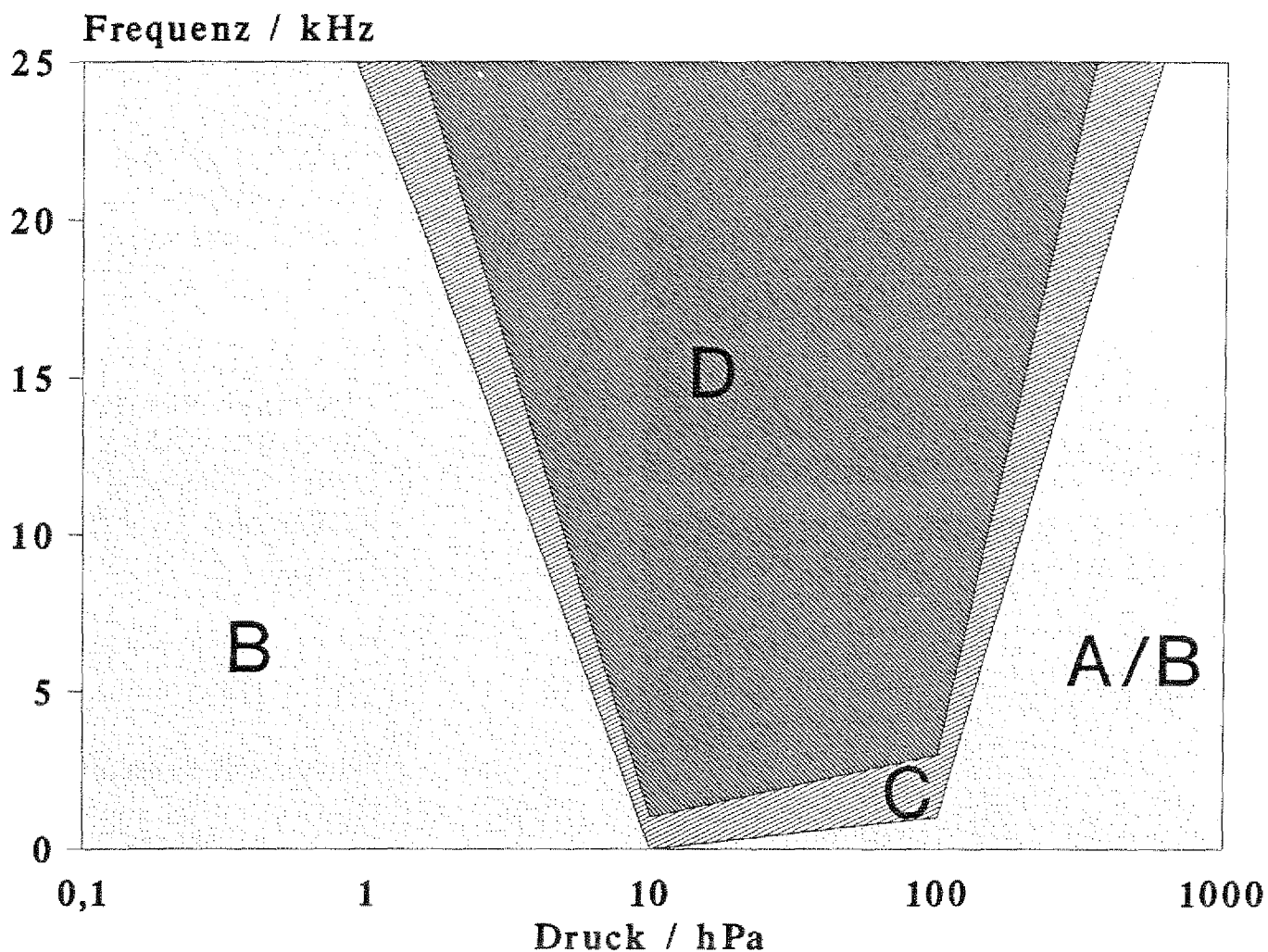
Luft, 1000 hPa

Spaltweite 2,5 mm

Barriere 2 mm Acrylglas

Aufnahmen mit Fotopapier

Bild 3-18: Fußpunkte der Mikroentladungen bei einem Rechteckimpuls



A, B, C, D : Typen des Stromverlaufs entsprechend Kapitel 3.1

Gebiet A / B : keine Zündung oder
impulsförmige Zündung mit Verlöschen

Gebiet B : impulsförmige Zündung mit Verlöschen

Gebiet C : impulsförmige Zündung
mit Weiterbestehen der Entladung

Gebiet D : permanente Entladung ohne Verlöschen

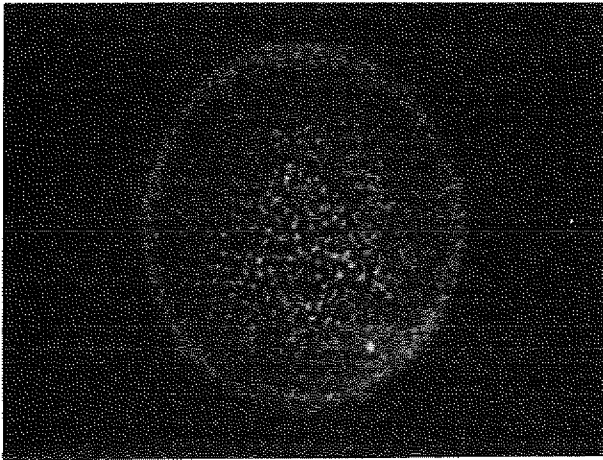
Hochspannungspulsgenerator 10 kV

Luft

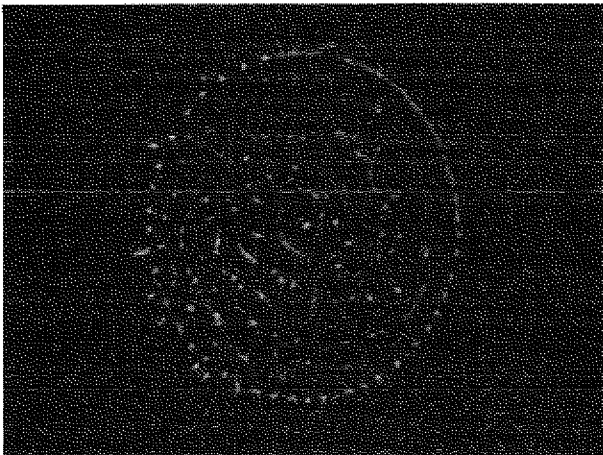
Spaltweite 2,5 mm

Barriere 2 mm Acrylglas

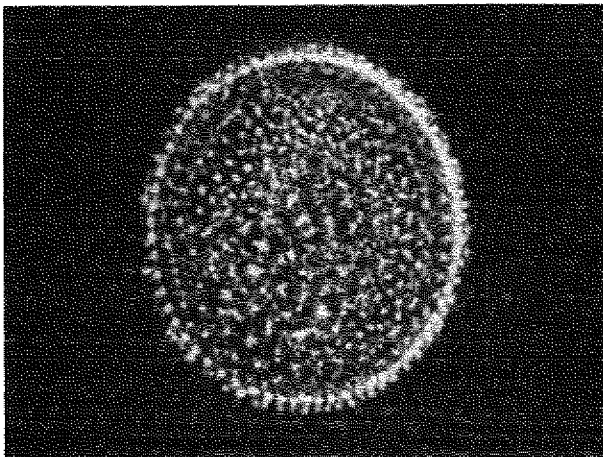
Bild 3-19: Gebiete unterschiedlichen Stromverlaufs
in Abhängigkeit von Frequenz und Druck



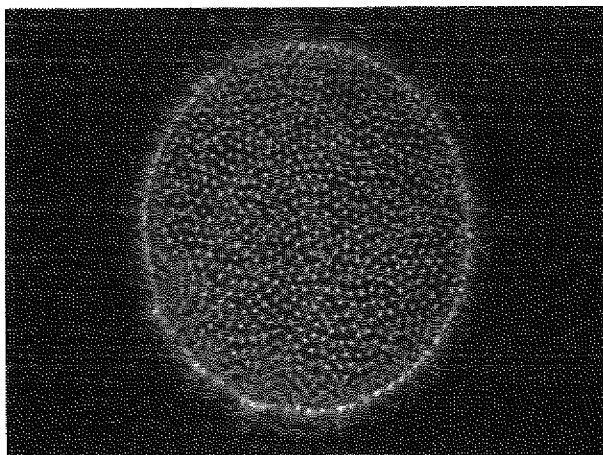
a)



b)



c)



d)

Bild 3-20:

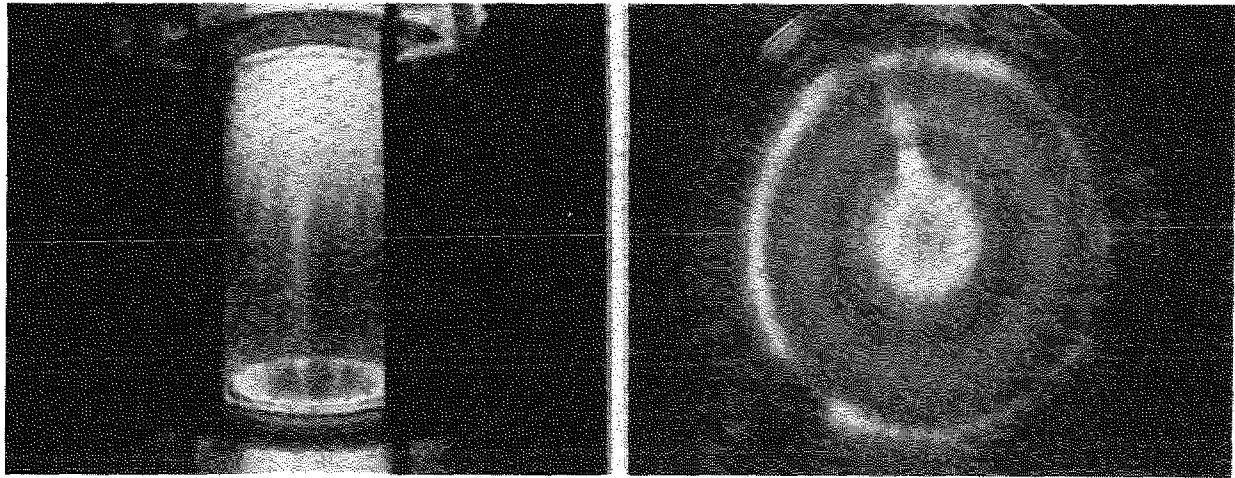
Entladungen bei
unterschiedlichen
Repetitionsfrequenzen

Hochspannungspuls-
generator 12 kV
Luft, 1000 hPa
Spaltweite 1,7 mm

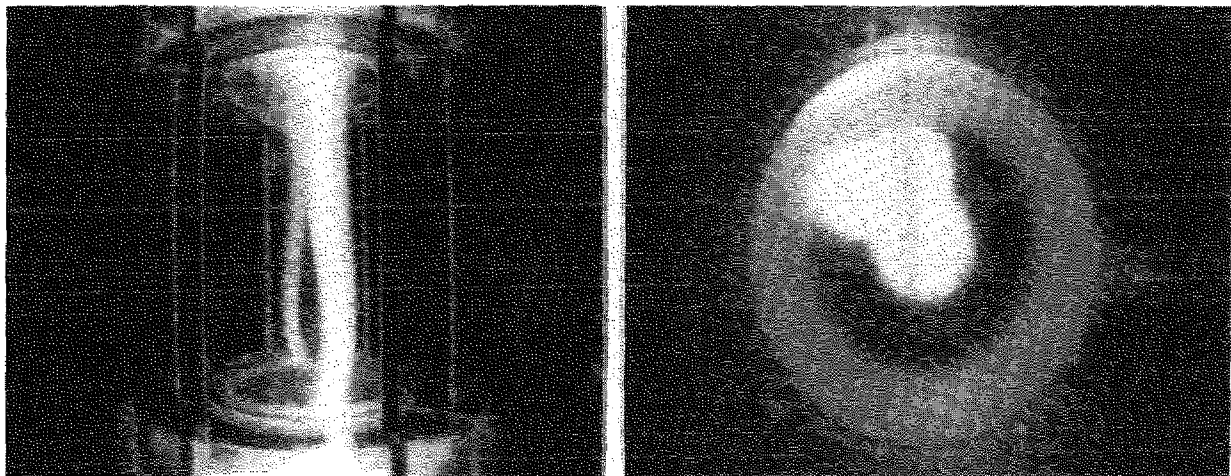
Repetitionsfrequenz:

- a) 1 kHz
- b) 1,5 kHz
- c) 3 kHz
- d) 25 kHz

zu d):
bei diesem Bild wurde
der Kontrast nicht
angehoben



- a) Beginn der Entladung
 links: Seitenansicht des Gefäßes
 rechts: Blick durch die transparente Erdelektrode



- b) Entladung nach einer halben Sekunde
 links: Seitenansicht des Gefäßes
 rechts: Blick durch die transparente Erdelektrode

Hochspannungspulsgenerator, 10 kV, 20 kHz
 Luft, 12 hPa
 Spaltweite 200 mm
 Barriere 2 mm Acrylglas, transparente Erdelektrode

Bild 3-21: Zeitliche und räumliche Entwicklung einer Barrierenentladung bei großer Spaltweite und 20 kHz Repetitionsfrequenz

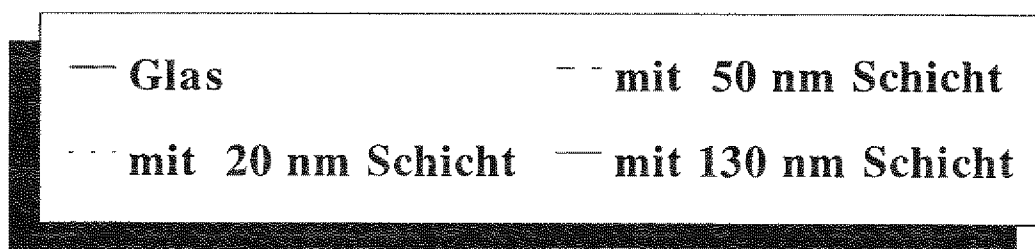
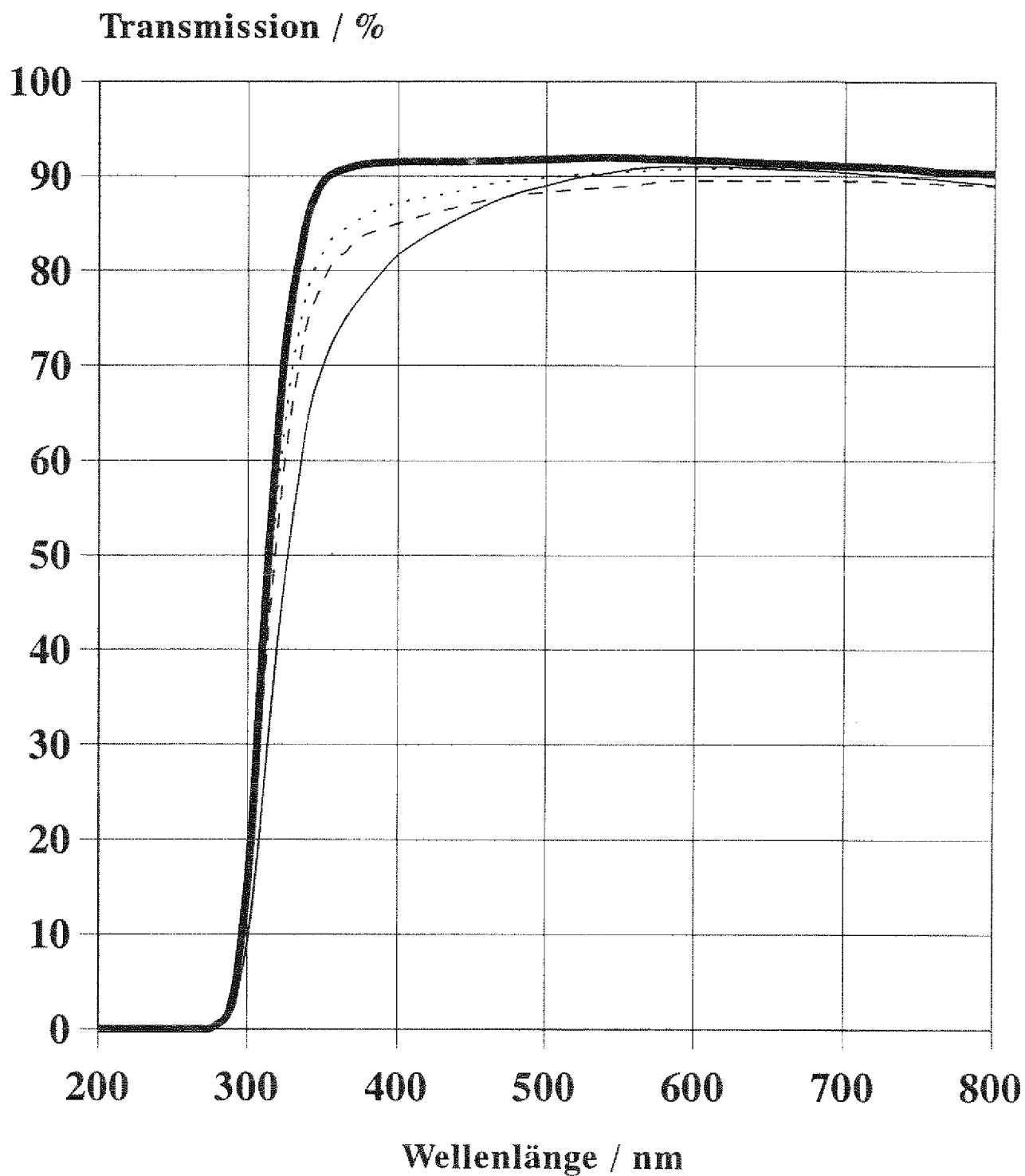


Bild 4-1: Transmission von mit Barrierenentladungen beschichtetem Glas

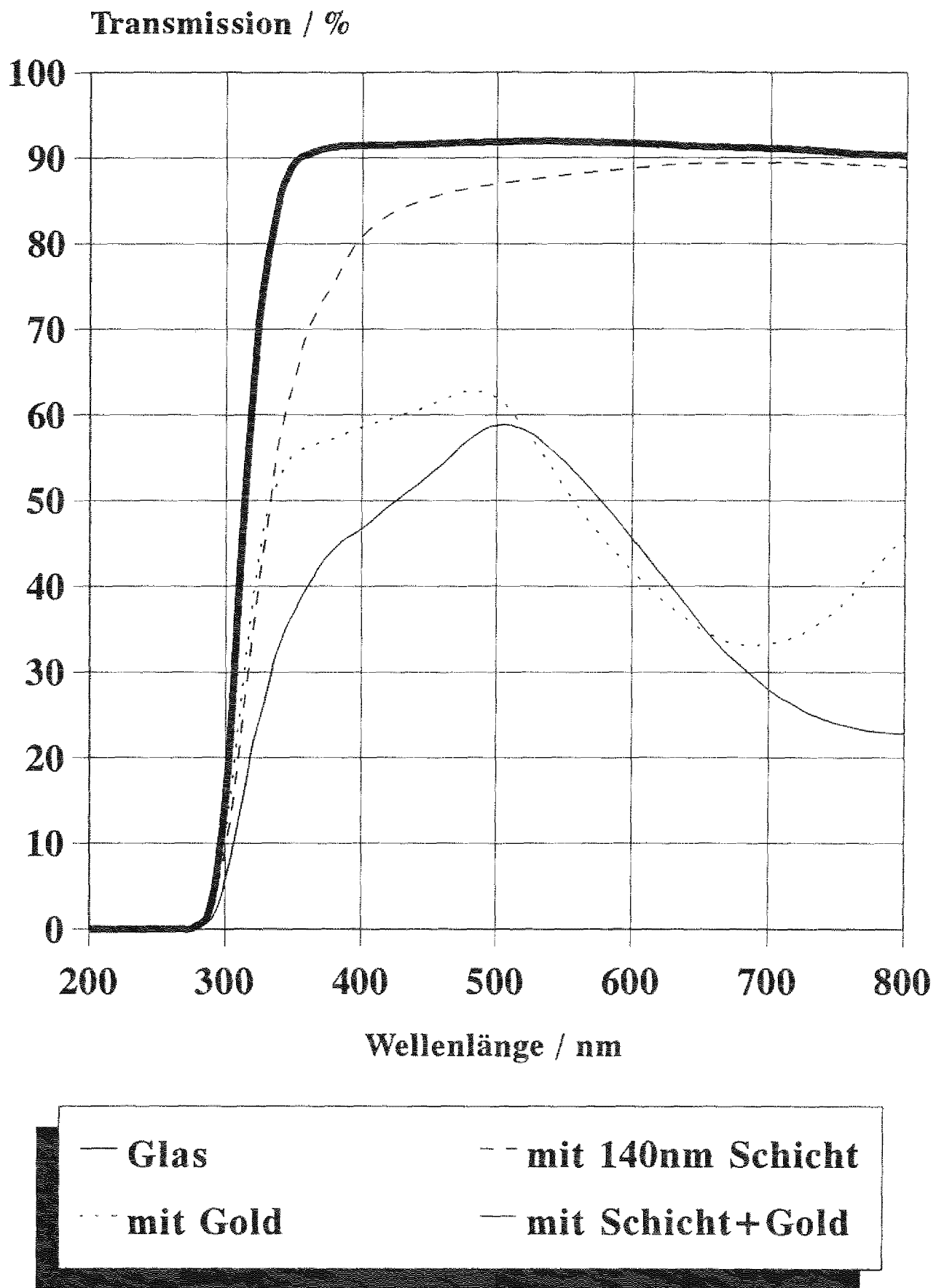


Bild 4-2: Transmission eines Schichtverbunds

Transmission / %

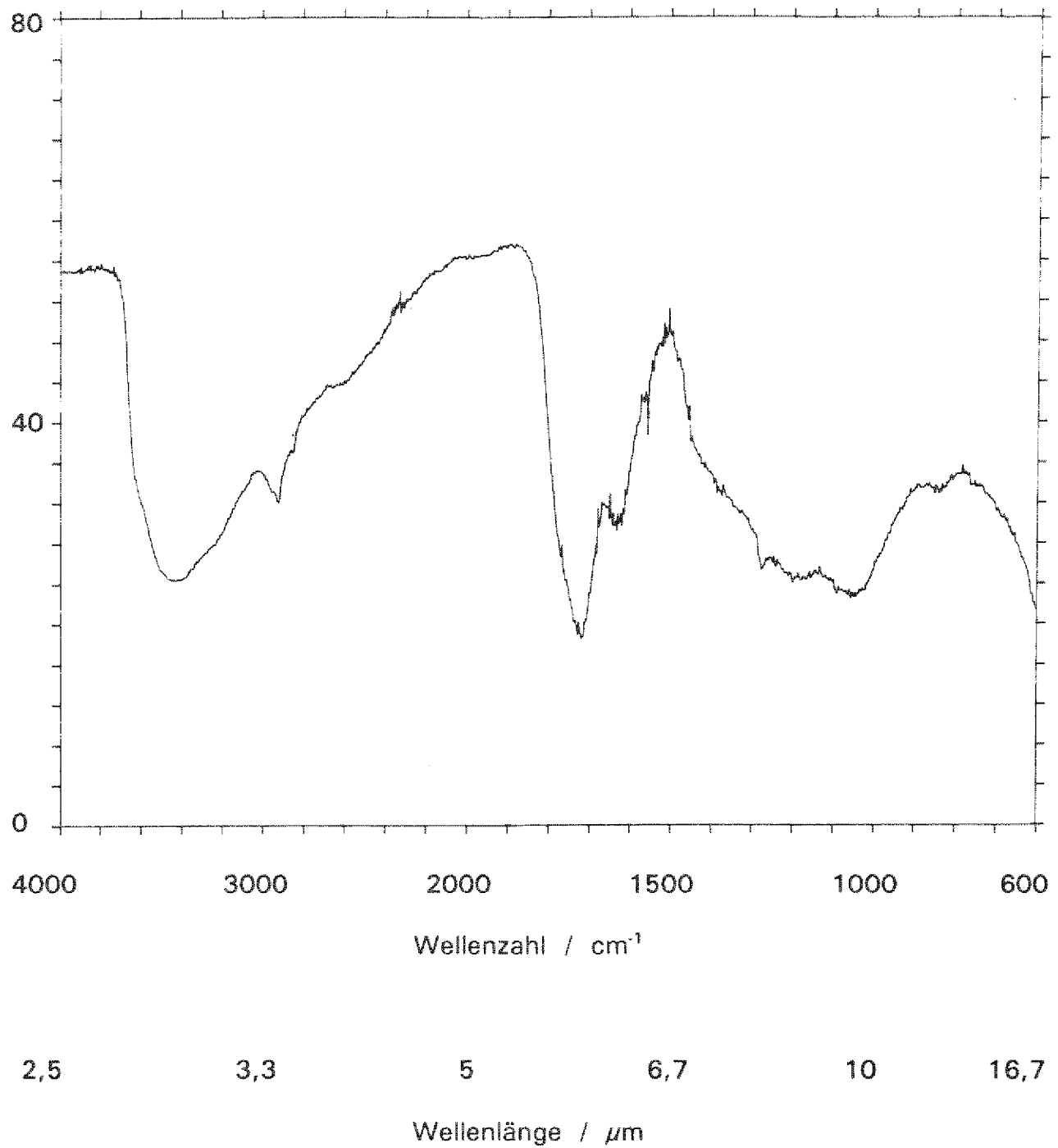


Bild 4-3: Infrarotspektrum der Schicht

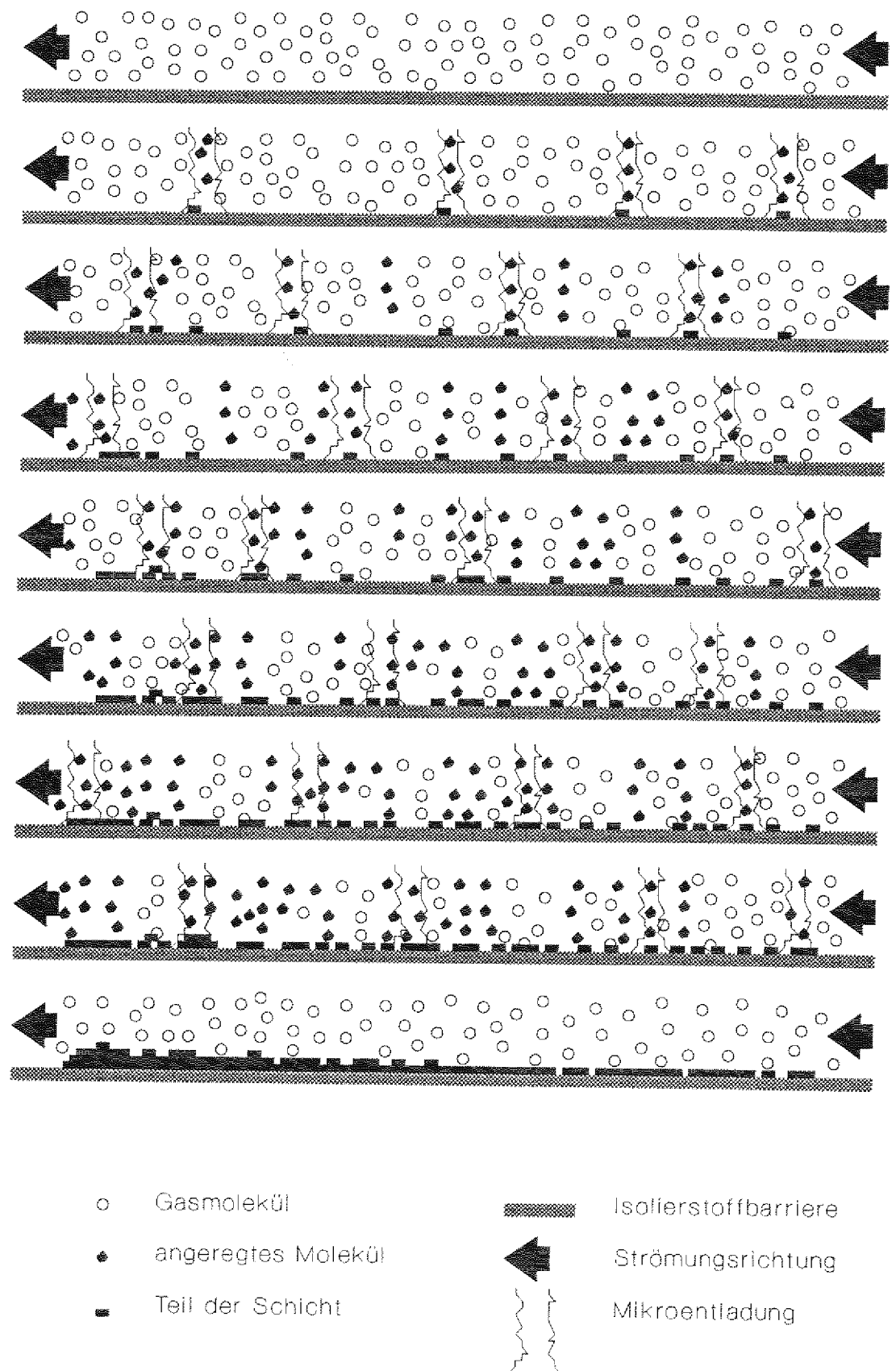


Bild 4-4: Modellvorstellung zum Aufwachsen der Schicht

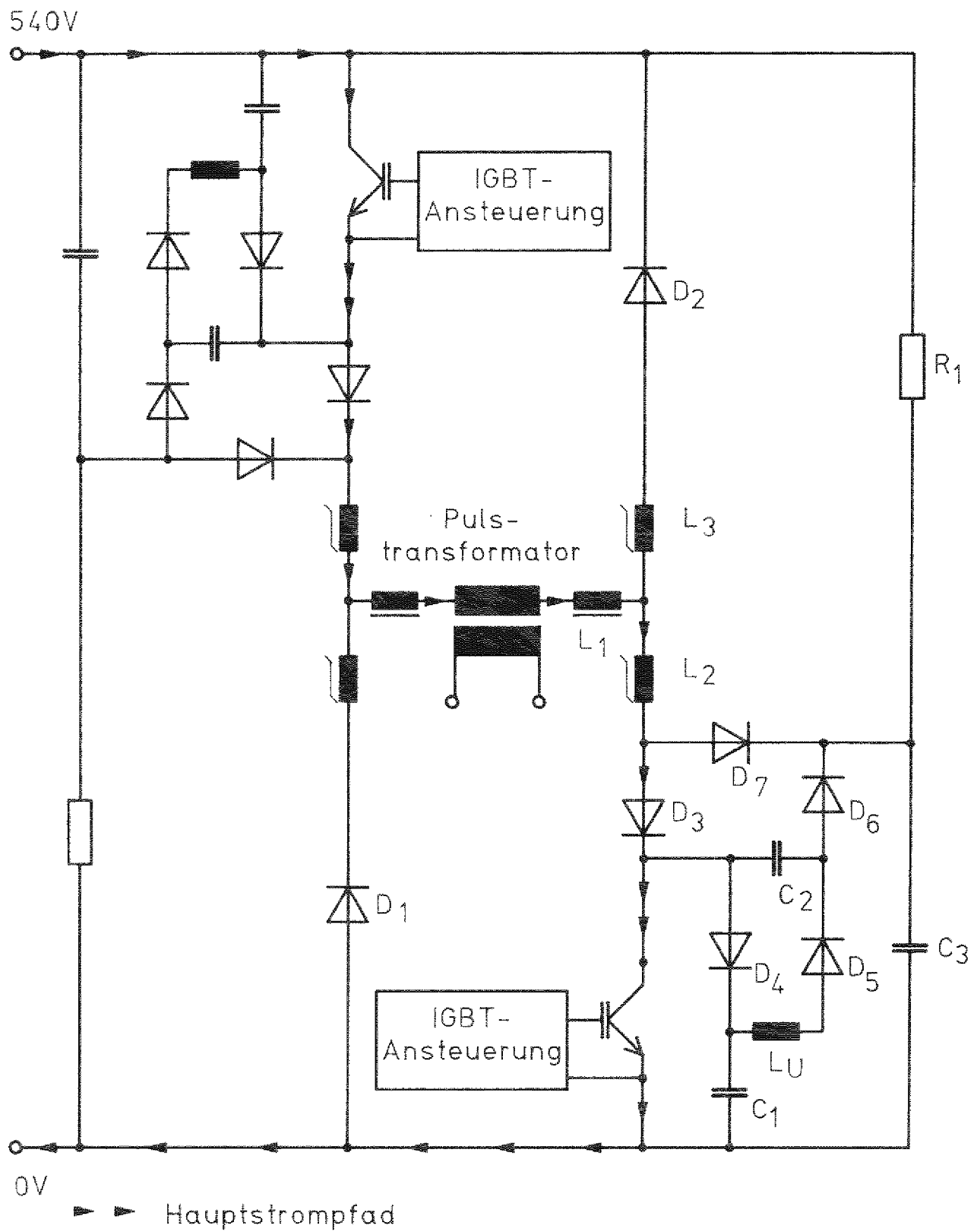


Bild A-1: Schaltbild der Halbbrücke

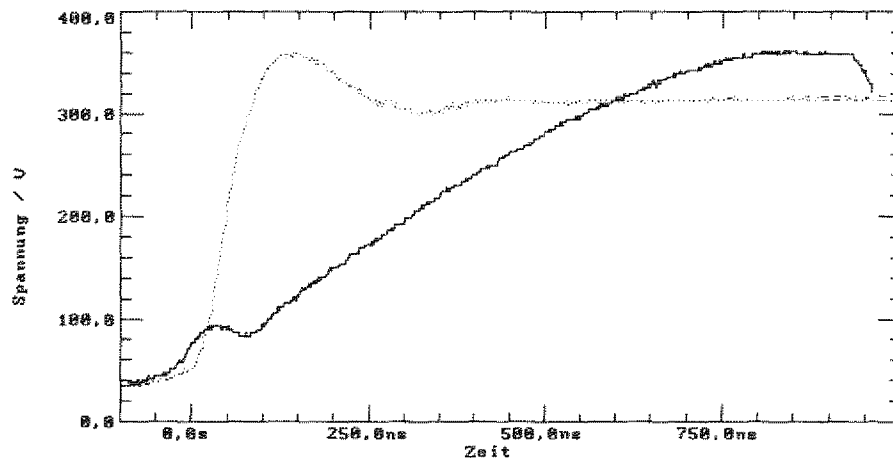
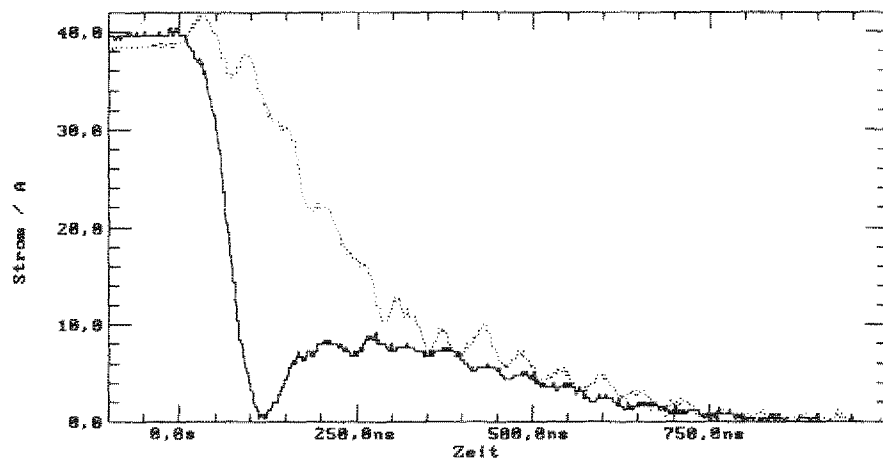


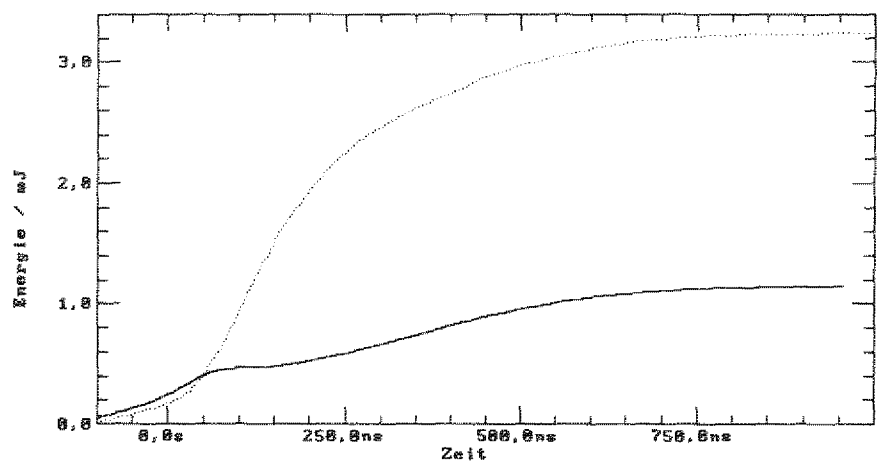
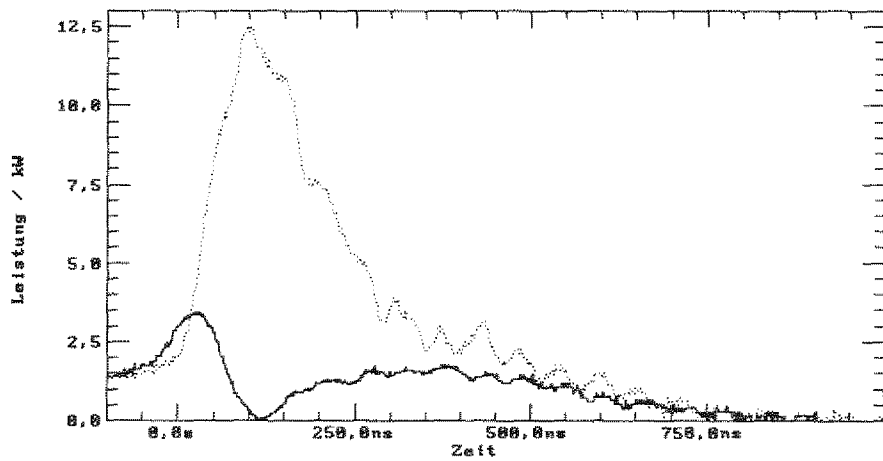
Bild A-2:
Abschalten
des IGBT

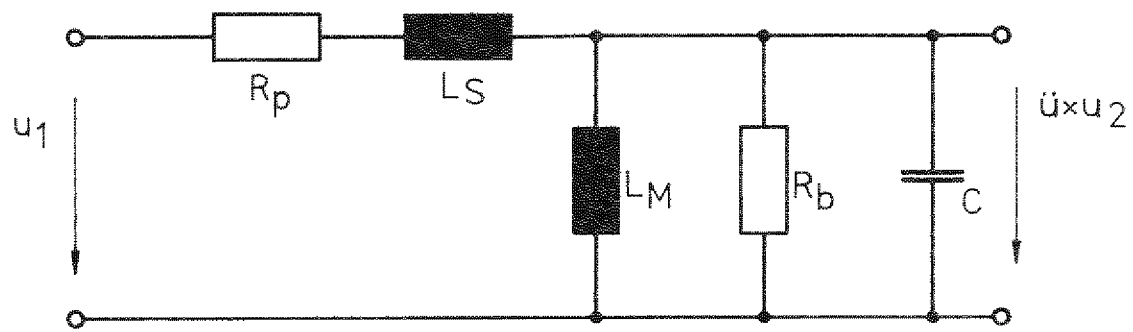
— mit und
..... ohne
Entlastungs-
beschaltung



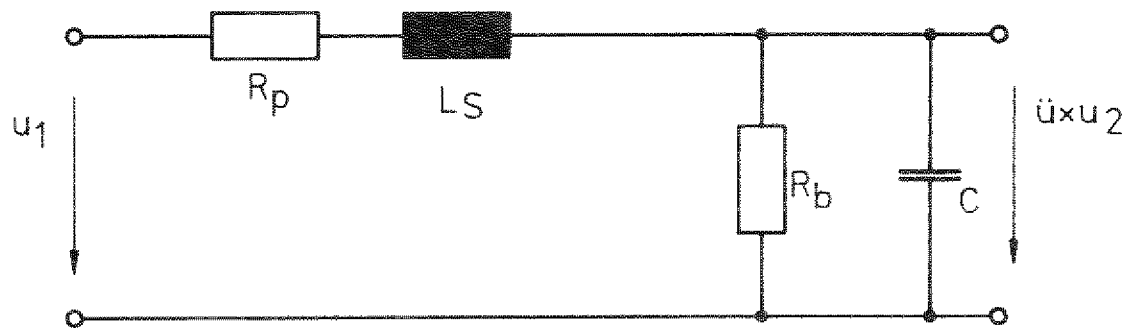
Abschaltstrom
40 A

Sperrspannung
300 V

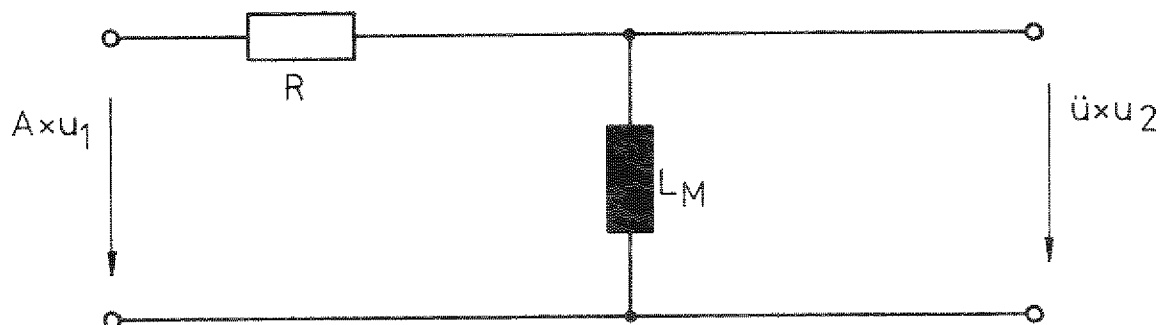




a) Grundform



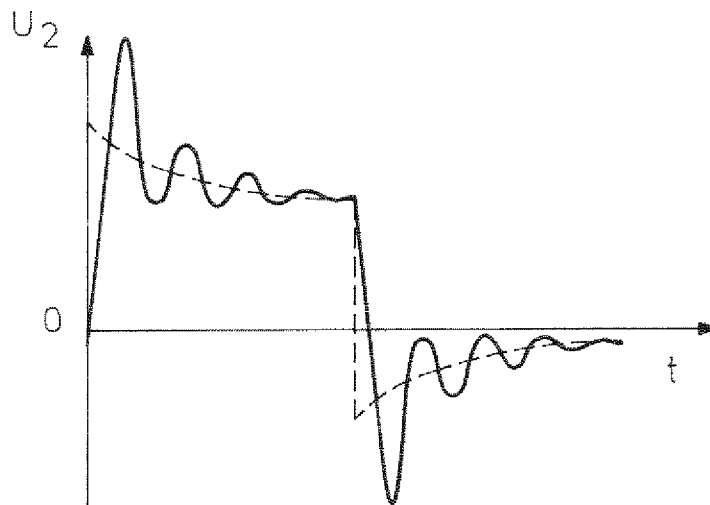
b) Hochfrequenz-Ersatzschaltbild für Impulsanstieg und -abfall



$$\text{mit } R = \frac{R_p \times R_b}{R_p + R_b} \quad A = \frac{R_b}{R_p + R_b}$$

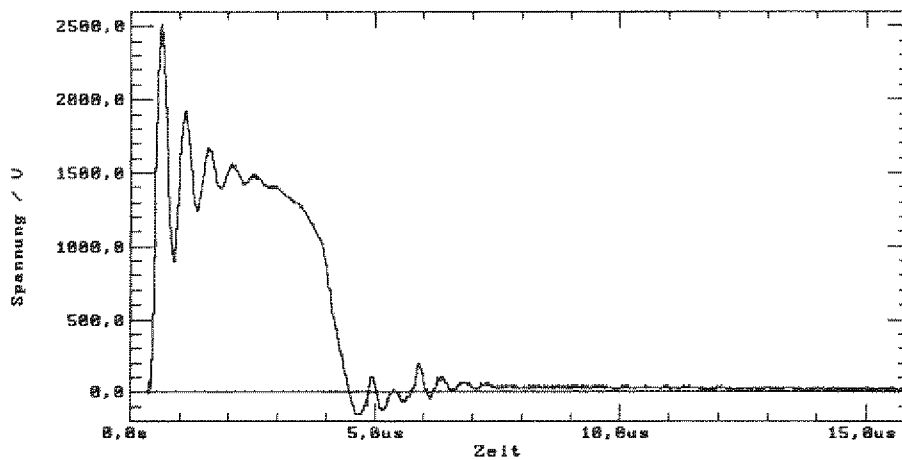
c) Niederfrequenz-Ersatzschaltbild für Impulsdach

Bild A-3: Ersatzschaltbilder eines Pulstransformators nach /Millmann, Taub 1963/

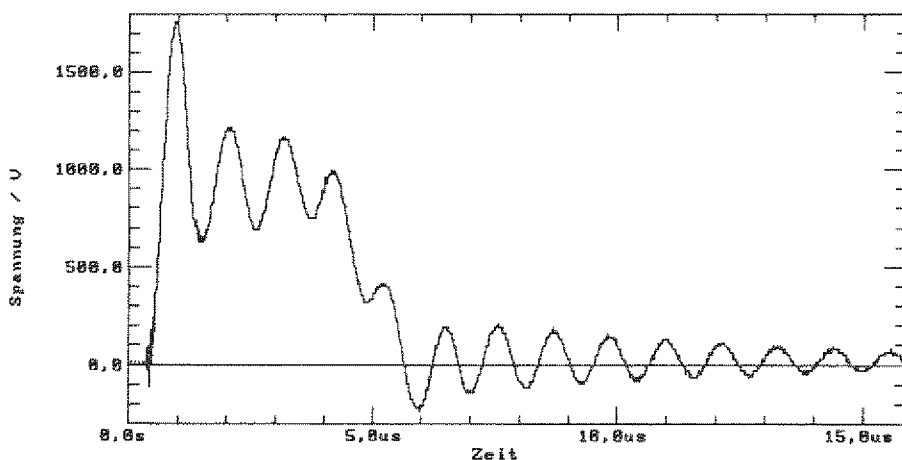


— — — Verlauf entsprechend Niederfrequenz-Ersatzschaltbild

a) prinzipieller Verlauf entsprechend Ersatzschaltbild

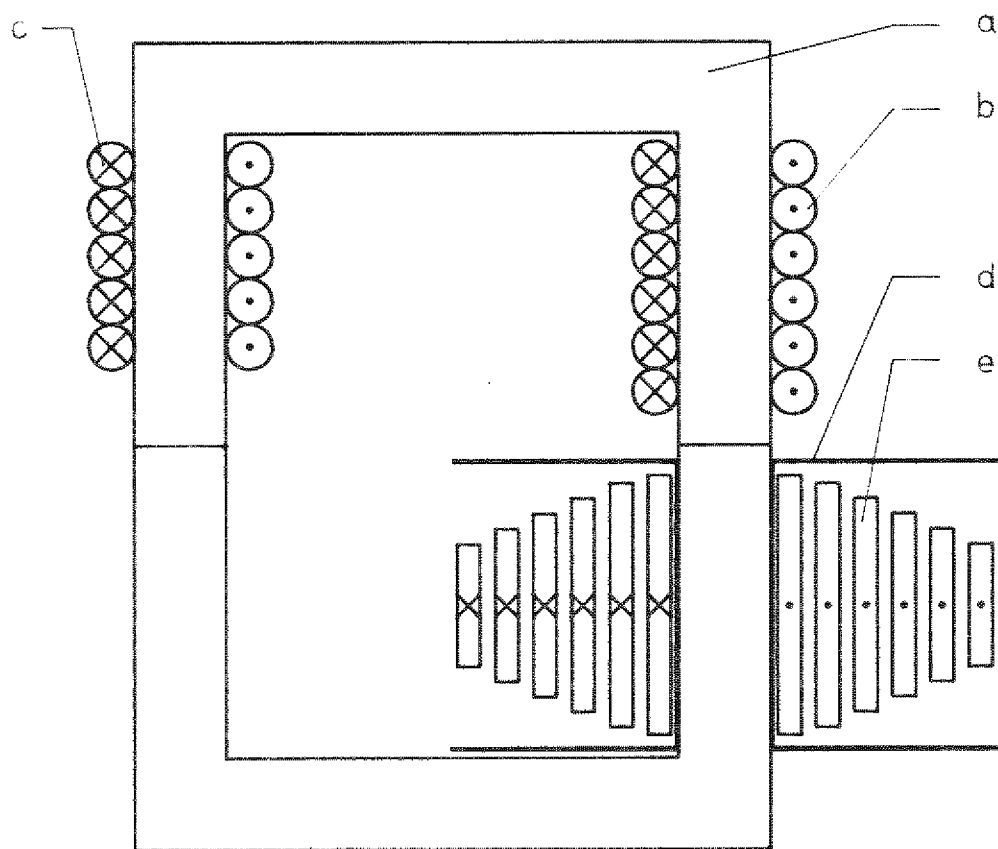


b) Pulstransformator mit 3 Primär-, 20 Sekundärwindungen
Leerlauf



c) Pulstransformator mit 5 Primär-, 20 Sekundärwindungen
kapazitive Last 136 pF

Bild A-4: Sekundärspannung eines Impulsübertragers



- a Doppel-U-Kern (SiFerrit N27)
- b Primärwicklung (25 Windungen)
- c Dämpfungswicklung (5 Windungen)
- d Wickelkörper
- e Hochspannungswicklung (300 Windungen)

Bild A-5: Aufbau des Pulstransformators

Jül-2613

April 1992

ISSN 0366-0885