



Thomas Rüther (Autor)
**Experimentelle Untersuchung der
Lichtbogenaufteilung an Löschblechen**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1548>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1. Einführung

Schaltgeräte der elektrischen Energietechnik haben die Aufgabe, Stromkreise zu verbinden und zu unterbrechen, sowie im eingeschalteten Zustand den Strom zu führen [Lin-87]. Je nach ihrer in den Vorschriften festgelegten Art kommt bei Niederspannungsschaltgeräten neben dem Schalten von Betriebsströmen auch das Schalten von Überlastströmen und Kurzschlussströmen hinzu. Sowohl der Überlast- als auch der Kurzschlussstrom sind Überströme, die nach DIN VDE 0641 Teil 11 [VDE-01] oberhalb des Bemessungsstromes des Schaltgerätes liegen.

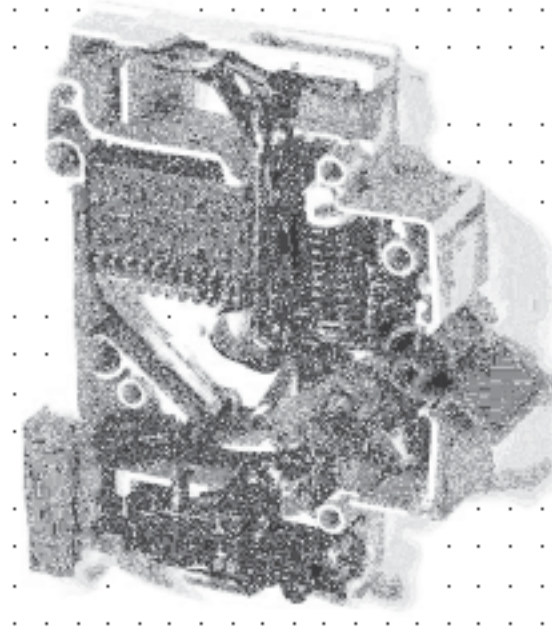


Bild. 1.1: Leitungsschutzschalter mit Löschblechpaket, Auslöseeinheit und Schaltschloss [Hag-06]

So müssen z.B. Leitungsschutzschalter, die in Haushalts- und Industrieinstallationen zum Schutz der elektrischen Leitungen und Verbraucher eingesetzt werden (Bild 1.1), Kurzschlussströme von 1,5 kA bis hin zu 25 kA bewältigen [VDE-01]. Bei Leistungsschaltern, die in Stationen der öffentlichen und industriellen Energieversorgung zum Kurzschlussschutz eingesetzt werden, sind Kurzschlussströme bis in die Größenordnung 200 kA zu schalten [VDE-02].

Die Unterbrechung des Stromkreises durch den Schutzschalter, das heißt der Übergang vom eingeschalteten in den ausgeschalteten Zustand geschieht durch Auftrennen eines metallischen Stromübergangs unter Ausbildung eines Lichtbogens. Dieser Schaltlichtbogen hat die Aufgabe, den Übergang von einem guten Leiter zu einem guten Isolator innerhalb kürzester Zeit zu bewerkstelligen [Lin-87]. Neben der Erkennung des Überstromes ist die Lichtbogenlöschung daher als zentrale Aufgabe eines Niederspannungsschaltgerätes zu sehen.

Die in Niederspannungsschaltgeräten am häufigsten eingesetzte Variante zur Lichtbogenlöschung ist die Unterteilung in mehrere in Serie geschaltete Teillichtbögen. Die Lichtbogaufteilung führt hierbei durch mehrere Faktoren

(Kapitel 1.4) zur raschen Erhöhung der Lichtbogenspannung. Die Lichtbogenaufteilung erfolgt durch mehrere, quer zur Lichtbogenwanderungsrichtung angebrachte, metallische Bleche, den so genannten Löschblechen. Die Löschbleche sind in Paketen aus mehreren einzelnen, voneinander isoliert befestigten Blechen zusammengefasst. Die Anzahl der Löschbleche variiert und hängt von der Spannungsebene ab, in der das Schaltgerät eingesetzt wird [Lin-87] [Burk-85]. Die durch Unterteilung an den Blechen generierte hohe Lichtbogenspannung wirkt strombegrenzend. Dadurch reduziert sich die dynamische und thermische Beanspruchung der den zu unterbrechenden Stromkreis bildenden Leitungen und der daran angeschlossenen elektrischen Verbraucher (Kapitel 1.2).

Der für diese Anforderungen bereitgestellte Raumbedarf wird stetig geringer. So besteht der Trend, immer mehr Leistung auf immer weniger Raum zu beherrschen bzw. zu schalten. Dies setzt eine genaue Kenntnis über das Lichtbogenverhalten in Schaltkammern und die damit verbundenen physikalischen Prozesse voraus. Hinzu kommt, dass die zunehmend kürzeren Entwicklungszeiten die Hersteller dazu drängen, den Entwicklungsprozess von mechanischen Prototypen hin zu computergestützten FEM-Simulationsmodellen umzustellen. Die Herausforderung liegt dabei in einer möglichst genauen, mit hinreichenden Vereinfachungen versehenen, physikalischen Nachbildung des Schaltlichtbogens.

1.1. Zielstellung der Arbeit

Die in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsreihen und die dabei gewonnenen Ergebnisse dienen der Modelldatengewinnung für ein in Arbeit befindliches Simulationsmodell zur Komplettsimulation von Schaltlichtbögen [Lin-03], [Lin-04], [Rue-06]. Des Weiteren werden im Umkehrschluss Simulationsergebnisse an experimentellen Anordnungen überprüft.

Die von Mutzke [Lin-03], [Lin-06], durchgeführten Simulationen sollen zu einer Lichtbogenkomplettsimulation führen. Dies bedeutet, dass die Simulation eine Lichtbogenunterteilung an Löschblechen beinhaltet. Zur Lichtbogenaufteilung durch Löschbleche gehört jedoch zwingend die Ausbildung neuer Elektrodenfallgebiete auf den Löschblechoberflächen (Kapitel 1.4.2). Mutzke betrachtet zunächst nur ein Löschblech [Lin-06], an dem sich ein Lichtbogen in zwei in Reihe geschaltete Teillichtbögen aufteilt. Des Weiteren sind im Simulationsmodell keine bewegten Komponenten implementiert. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen daher auch an Modellschaltkammern ohne bewegliche Komponenten.

Die in dieser Arbeit untersuchten Stromstärken liegen mit 500, 1000 und 2000 A eher im unteren Strombereich der in [VDE-01] aufgeführten Kurzschlussströme. Der untere Stromstärkebereich wurde für die experimentellen Untersuchungen gewählt, da die im Simulationsmodell verwendeten Ströme (zurzeit) im Bereich von einigen 100 A liegen.

Die Ergebnisausgabe zeitvarianter Vorgänge bei Simulationsprogrammen wie ANSYS und CFX erfolgt in der Regel in Bildform anhand von Filmsequenzen. Die berechneten elektrischen Größen wie Stromdichte, elektrisches Potential oder die physikalischen Größen wie Temperatur, Druck, Geschwindigkeit werden dabei anhand von Grafiken in Falschfarben dargestellt.

Einen Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen bilden die optischen Aufzeichnungen der im Labor erzeugten Lichtbögen mittels einer digitalen Hochgeschwindigkeitskamera. Dabei werden die Lichtbogenbewegung innerhalb der Modellschaltkammer, sowie die Unterteilung des Lichtbogens an einem und zwei Löschblechen beobachtet und ausgewertet.

Einen weiteren Untersuchungsschwerpunkt bilden die durch die Lichtbogenfußpunkte aufgeschmolzenen Löschblechoberflächen. Hier interessieren

die Größe, die Form und der Ort der Löschblechaufschmelzungen bei verschiedenen Löschblech- und Modellschaltkammervarianten. Fußpunktspuren auf den Löschblechen geben zwar keine direkten Hinweise auf die Stromdichte in den Lichtbogenfußpunkten, lassen aber im Zusammenhang mit Simulationen Rückschlüsse darauf zu. In den Simulationen von Mutzke [Lin-03], [Rue-06] werden die Aufschmelzungen auf bzw. der Materialabtrag von den Löschblechen durch den einwirkenden Lichtbogen zurzeit noch nicht behandelt. Die experimentellen Betrachtungen sollen daher zukünftigen Vergleichen dienen.

1.2. Strombegrenzendes Schalten

Bei Abschaltvorgängen in Niederspannungsgeräten kommen im Wesentlichen zwei Löschrinzipien zum Tragen: das Wechselstrom- und das Gleichstromlöschrinzip.

Das Wechselstromlöschrinzip beruht darauf, dass im Nulldurchgang des Wechselstromes der Lichtbogen so beeinflusst wird, dass er seine Leitfähigkeit verliert. Das kann durch Energieentzug aus der Lichtbogensäule, im Prinzip wie bei einem Hochspannungsschalter, geschehen. Die zweite Möglichkeit beruht darauf, dass sich nach einem Abschaltvorgang unmittelbar vor der neuen Kathode eine Raumladungsschicht (Kathodenschicht) bildet, die in der Lage ist, die wiederkehrende Netzspannung aufzunehmen [Lin-87]. Sofern die wiederkehrende Einschwingspannung die als Wiederverfestigungsspannung bezeichnete Kathodenschicht-Durchschlagspannung nicht überschreitet, kommt es zu keiner erneuten Wiederzündung des Lichtbogens. Zuvor beschriebenes Prinzip findet in Niederspannungs-Wechselstromschaltern ohne besondere Löschrinzipien, z. B. bei Lichtschaltern, sowie bei jedem nicht-strombegrenzenden Schaltgerät mit Löschrinzipien, z. B. Schützen oder nicht-strombegrenzenden Leistungsschaltern, Anwendung. Bei den zuletzt genannten Schaltern werden durch die Löschrinzipien mehrere sofort verfestigende Strecken in Reihe geschaltet.

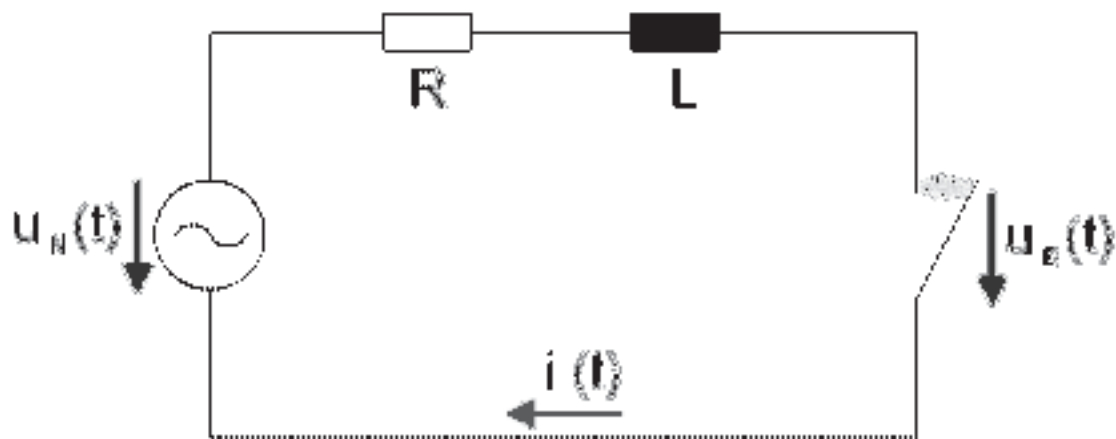


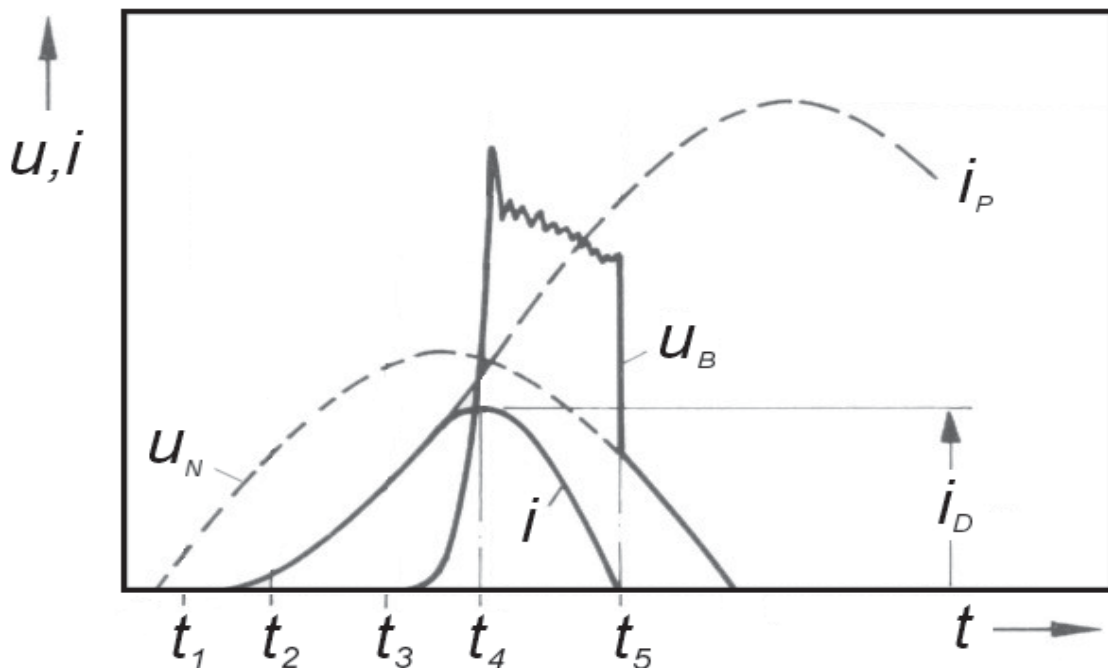
Bild 1.2: Ersatzschaltbild eines induktiven Kurzschlusskreises

Beim Gleichstromlöschrinzip wird der Stromverlauf im Kurzschlusskreis während eines Ausschaltvorganges durch die Lichtbogenspannung und die Eigenimpedanz beeinflusst [Erk-74]. Es findet seinen Ursprung in der Abschaltung von Gleichstromkreisen, wird aber auch zum strombegrenzenden Abschalten von

Wechselstromkreisen eingesetzt. Dabei wird der Kurzschlussstrom durch die rasche Erhöhung der Lichtbogenspannung (Kap. 1.4) über die treibende Netzspannung hinaus vor seinem natürlichen Nulldurchgang gelöscht. Hierdurch wird der Scheitelwert des Kurzschlussstromes auf kleinere Werte reduziert, als der unbeeinflusste Strom hätte.

Zur Erklärung der strombegrenzenden Wirkung wird die vereinfachte Ersatzschaltung eines Kurzschlussstromkreises in Bild 1.2 herangezogen.

Der Stromkreis enthält einen geringen ohmschen Widerstand und wird hauptsächlich von der induktiven Impedanz bestimmt. Ohne Schaltgerät bestimmen die treibende Spannung und die im Kurzschlusskreis liegende Impedanz aus R und L den prospektiven Kurzschlussstrom $i_P(t)$.



- | | |
|--|---------------------------------|
| u_B : Lichtbogenspannung | t_1 : Kurzschlusseintritt |
| u_N : treibende Netzspannung | t_2 : Auslösung des Schalters |
| i : Stromverlauf unter Einfluss der Lichtbogenspannung | t_3 : Kontaktöffnung |
| i_P : unbeeinflusster Wert des prospektiven Stromes | t_4 : $di(t)/dt = 0$ |
| i_D : Durchlassstrom (beeinflusster Wert des Kurzschlussstromes) | t_5 : Stromunterbrechung |

Bild 1.3: Strombegrenzendes Abschalten eines induktiven Stromkreises; Strom und Spannungsverlauf (schematisch)

Bild 1.3 zeigt schematisch den Verlauf der im Kurzschlusskreis auftretenden elektrischen Größen. Im Falle eines Kurzschlusseintritts (t_1) vergeht eine bestimmte Zeitspanne, bis der Kurzschluss detektiert wird, die Auslösemechanik das Schaltschloss entriegelt (t_2) und die Kontakte bei t_3 öffnen und getrennt werden. Durch die Kontakttrennung entsteht ein Lichtbogen im Schaltgerät, dessen Bogenspannung u_B der Netzspannung u_N entgegenwirkt. Die dazugehörige Gleichung ergibt nach einem Spannungsumlauf (Bild 1.2) wie folgt:

$$u_N(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + u_B \quad (1.1)$$

u_N	: Netzspannung	u_B	: Lichtbogenspannung
i	: Kurzschlussstrom	R	: Widerstand
L	: Induktivität	t	: Zeit

Der im Kurzschlusskreis fließende Strom i erreicht seinen Scheitelwert, wenn die Gleichung

$$\frac{di(t)}{dt} = 0 \quad (1.2)$$

erfüllt ist.

Zu diesem Zeitpunkt t_4 wird der begrenzte Strom als Durchlassstrom i_D bezeichnet. Wird im folgenden Zeitverlauf die Summe aus der Lichtbogenspannung u_B und den ohmschen Spannungsfällen im Kurzschlusskreis $R \cdot i(t)$ größer als der Momentanwert der treibenden Netzspannung $u_N(t)$, so wird der Term $L \cdot (di(t)/dt)$ in Gleichung (1.1) negativ. Letztlich sinkt der im Kreis fließende Kurzschlussstrom sowohl im Scheitelwert als auch in seiner Flussdauer bis auf 0 ab. Die Abschaltung erfolgt strombegrenzend zum Zeitpunkt t_5 .

Kleinere Durchlassströme reduzieren die thermischen und dynamischen Beanspruchungen sowohl des Schaltgerätes selbst als auch der nachgeschalteten Komponenten, die es durch das Schaltgerät zu schützen gilt. Die wirksamste Energiebegrenzung im Kurzschlusskreis erhält man, wenn die Bogenspannung über die Netzspannung hinaus erhöht wird, noch vor dem Scheitelwert des prospektiven Wechselstromes eintritt.

Für eine strombegrenzende Abschaltung muss die Bedingung

$$u_B \geq u_N - i \cdot R \quad (1.3)$$

erfüllt sein.

1.3. Lichtbogen

Der Lichtbogen unterteilt sich in mehrere Gebiete (Bild 1.4): die Lichtbogensäule, und das sich jeweils zu den Elektroden anschließende Anoden- und Kathodenfallgebiet.

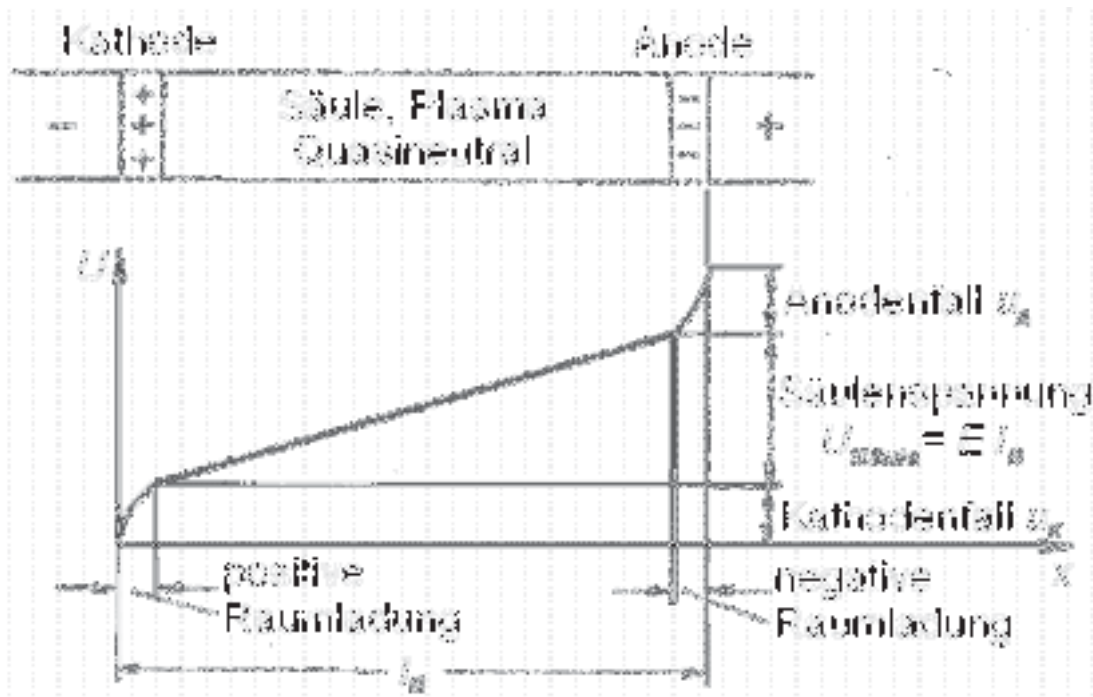


Bild 1.4: Gebiete eines Lichtbogens (oben) und dazugehöriger Potentialverlauf (unten), schematisch

Während in der Lichtbogensäule das Plasma quasineutral ist, so herrscht vor der Kathode eine stark positive und vor der Anode eine stark negative Raumladungsdichte. Daraus resultieren eine sehr große Feldstärke und ein starker Potentialabfall. Die Dicke bzw. Länge der Schicht beträgt bei Atmosphärendruck etwa $10^{-7} \dots 10^{-6}$ m [Hertz-65]. Dies entspricht ungefähr einer mittleren freien Elektronenweglänge [Lin-87]. Mit zunehmendem Druck sinken die Fallraumlängen [Hertz-65]. Der Spannungsbedarf der an den Elektroden befindlichen Fallgebiete liegt zwischen 5 und 30 V für die Kathode und 1 und 40 V für die Anode (abhängig von Gas und Metall) [Hertz-65]. Lindmayer [Lin-87] nennt vom Elektrodenmaterial abhängige Werte von ca. 10-20 V für die Summe aus Anoden- und Kathodenfall.

Für die Bestimmung der Stromdichten ist der Fallraumdurchmesser von Interesse. Dieser entspricht der Fläche, die der Fallraum auf den Elektroden bedeckt. Metalle mit hohen Schmelz- und Siedetemperaturen (z. B. Wolfram) weisen einen großflächigeren Fallraum auf als Metalle mit niedrigeren Temperaturen. Bei gleicher Stromstärke ergeben sich daher Stromdichten von $10^6 \dots 10^8$ A/m² (für Metalle hoher

Schmelz- und Siedetemperatur) bis hin zu Werten von 10^{11} A/m² [Lin-87]. Burkhard [Burk-85] nennt polaritätsunabhängige Stromdichten im Bereich von $10^8 \dots 10^{11}$ A/m², wohingegen Hertz [Hertz-65] polaritätsabhängige Stromdichtewerte von $10^6 \dots 10^9$ A/m² für den Kathodenfall und $10^3 \dots 10^7$ A/m² für den Anodenfall an.

Im Übergang des jeweiligen Elektrodenfallgebietes zur Plasmasäule liegt ein Gebiet, in dem sich die physikalischen Parameter wie Temperatur und Ladungsträgerdichte des Plasmas stark ändern.

1.3.1. Plasmasäule

Die Achsentemperatur des Bogenplasmas liegt im Bereich zwischen $4 \cdot 10^3$ und $50 \cdot 10^3$ K [Hertz-65]. Das den Stromfluss treibende elektrische Feld E ist in der Lichtbogensäule in Achsrichtung praktisch konstant, wodurch sich der Spannungsbedarf einer Säule der Länge l zu $U_{\text{Säule}} = E \cdot l$ ergibt (Bild 1.4). Im Allgemeinen wächst die Feldstärke mit zunehmendem Druck und sinkt mit zunehmender Stromstärke. Charakteristische Feldstärkewerte liegen im Bereich von 5 bis 30 V/cm [Hertz-65].

Auf Grund der sehr viel höheren Beweglichkeit der Elektronen kann der Beitrag der Ionen zum Stromtransport gegenüber dem Beitrag der Elektronen vernachlässigt werden [Lin-87]. Der Stromtransport im Plasma/Lichtbogen erfolgt zu etwa 99 % durch Elektronen.

1.3.2. Kathodisches Fallgebiet (Kathodenfall)

Der kathodische Fallraum ist für die Aufrechterhaltung der Entladung verantwortlich, da hier die für den Stromtransport durch das Plasma notwendigen Elektronen erzeugt werden [Hertz-65]

Im kathodischen Fallraum werden die positiven Ionen so stark in Richtung der Kathode beschleunigt, dass sie die Kathodenoberfläche allmählich durch Stöße erhitzen. Sowohl die durch die Raumladungsschicht verursachten hohen Feldstärken als auch die Temperaturanhebung der Kathodenoberfläche durch die auftreffenden Ionen führen zu einer Emission von Elektronen aus der Kathodenoberfläche. Man spricht zum einen von einer Thermoemission, zum anderen von einer Feldemission [Lin-87], [Erk-74]. In der Regel liegt eine kombinierte Thermo-Feldemission als Mechanismus der Ladungsträgererzeugung

an der Kathode vor. Die Eigenschaften des Elektrodenmaterials bezüglich des Schmelz-, des Siedepunktes und der Austrittsarbeit, sowie die Beschaffenheit der Elektrodenoberfläche hinsichtlich der Rauigkeit haben hierbei einen sehr großen Einfluss auf die Höhe des Feldemissionsstromes [Burk-71].

Die Beschleunigung der aus der Kathode ausgelösten Elektronen in Richtung der Bogensäule durch das im Fallgebiet herrschende hohe elektrische Feld führt durch direkte Stoßionisation mit Teilchen und/oder durch Aufheizung des Plasmas am Übergangsgebiet zur Bogensäule zu einer zusätzlichen Ladungsträgergeneration [Erk-74], [Lin-87].

Die zum Stromtransport im Plasma notwendigen Elektronen werden folglich sowohl an der Kathodenoberfläche durch kombinierte Thermo-Feldemission (mindestens 80 % des Gesamtstromes [Erk-74]) als auch zusätzlich durch Thermoionisation am Übergangsgebiet des kathodischen Fallgebietes zur Lichtbogensäule erzeugt.

1.3.3. Anodisches Fallgebiet (Anodenfall)

Der am Gesamtstrom fehlende minimale Anteil ($\sim 1\%$) negativen Ionenstromes wird im Fallraum vor der Anode erzeugt [Erk-74]. Zur Bildung eines Ions stehen die sich aus der Säule in Richtung Anode bewegendem Elektronen zur Verfügung, deren Anzahl um den Faktor $10^2 - 10^3$ über dem der zur Ionisierung zur Verfügung stehenden Neutralteilchen liegt. Die Ausbildung eines anodischen Fallraumes ist daher weitaus weniger schwierig als die eines kathodischen Fallraumes.

1.3.4. Kontraktion der Lichtbogens und die Ausbildung von Plasmastrahlen

Der Lichtbogen kann als ein vom Strom durchflossener Leiter aufgefasst werden, der von seinem Eigenmagnetfeld umgeben ist. Das Eigenmagnetfeld übt eine Kraft auf die den Lichtbogen durchfließenden Ladungsträger aus, welche den Lichtbogen in Richtung seiner Achse komprimiert. Die Kraft ist umso stärker, je höher die Plasmastromdichte ist. Speziell an der Kathode ergibt sich eine, durch die den Elektronenaustrittsprozess bedingte, hohe Stromlinienkontraktion und damit verbunden eine hohe Stromdichte. In der Lichtbogensäule herrscht eine geringere Stromdichte, wodurch ein zusätzlicher Druckgradient in Richtung der Lichtbogensäule entsteht. Dieser magnetisch erzeugte Druckgradient ruft von den Elektroden weg gerichtete Plasmastrahlen hervor [Lin-87].

Eine Ausbildung der Plasmastrahlen geschieht nach [Fink-56] und [Amft-75] jedoch erst beim Überschreiten einer gewissen Mindeststromstärke bzw. Mindeststromdichte. Das an den Elektroden abströmende Plasma wird durch umgebendes Gas ersetzt, welches durch Kühlung des Kontraktionsgebietes dieses noch mehr kontrahieren lässt [Ried-67]. Die von den Elektroden ausgehenden Plasmastrahlen können bei geringen Elektrodenabständen aufeinander treffen und sich gegenseitig beeinflussen [Erk-74], [Bur-85].

Grundsätzlich ergibt sich demnach aus dem Unterschied der Stromdichten in den Fallgebieten gegenüber der Stromdichte in der Lichtbogensäule immer eine gewisse Kontraktion an den Elektroden. Die Kontraktion erscheint in den Filmaufnahmen als eine Art Brennfleck, der im Folgenden als Fußpunkt bezeichnet wird. Der Fußpunktdurchmesser entspricht dabei der Fläche, die der Fallraum auf den Elektroden bedeckt.

Der anodische Bogenansatz ist nach Ecker [Eck-54] weit weniger kontrahiert als der Kathodische.