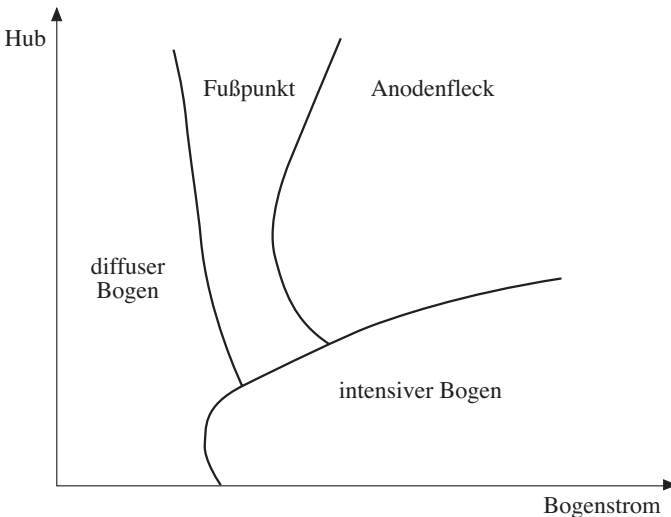


## 4 Vakuumbogen bei großen Strömen

Bei dem beschriebenen „diffusen“ Vakuumbogen ist die Stromdichte an der Anode über die gesamte Anodenfläche konstant. Wird eine bestimmte Stromstärke überschritten, die einige tausend Ampere beträgt und von der geometrischen Form und dem Kontaktwerkstoff abhängt, schnürt sich die diffuse Entladung vor der Anode ein. Es entsteht ein hell leuchtender Anodenfleck von einigen Millimetern Durchmesser mit der Siedetemperatur des Anodenwerkstoffs. Man spricht vom „kontrahierten“ Vakuumbogen.

In der Übergangsphase vom diffusen Vakuumbogen zum kontrahierten Lichtbogen werden Übergangsformen beobachtet. **Bild 4.1** zeigt die Klassifikation der Anoden-Phänomene als Funktion des Abstands der Kontakte, also des Hubs, und des Bogenstroms [4.1]. Unterhalb von 10 kA ändert sich die diffuse Bogenform bei wachsendem Strom fast unabhängig vom Hub. Es werden drei verschiedene Bereiche unterschieden, die eine Kontraktion vor der Anode gemeinsam haben: die Form mit Anoden-Fußpunkten, der Anodenfleck und der kurze, intensive Anodenfleck-Bogen.

Bei der Erscheinungsform mit Anodenfußpunkten beginnt die Anode eine aktive Rolle am Entladungsvorgang zu übernehmen. Die Fußpunkte sind leuchtend und



**Bild 4.1** Klassifikation der Anoden-Phänomene (nach H. C. Miller)

hinterlassen bereits Schmelzspuren auf der Anode. Die Brennspannung steigt stark an und wird unruhig. Es setzen Schwingungen ein.

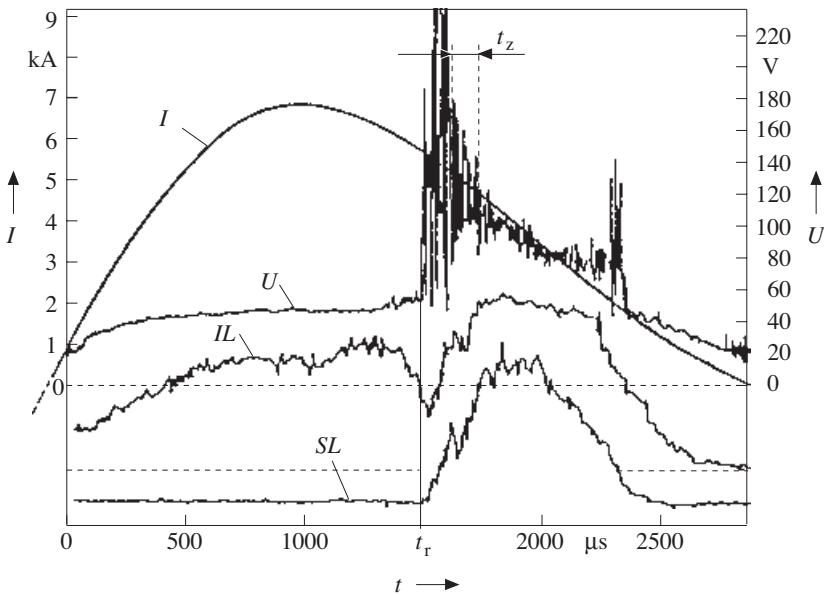
Beim Anodenfleck ist die Anode bereits aktiv an der Entladung beteiligt. Charakteristisch für den Anodenfleck ist seine Helligkeit. Die Temperatur im Fleckbereich auf der Anode liegt bereits in der Nähe des Siedepunkts des Anodenwerkstoffs und liefert Metaldampf und Ionen. Die Brennspannung bleibt meistens hoch und unruhig. Beim kurzen, intensiven Anodenfleck-Bogen findet eine starke Wechselwirkung zwischen Anode und Katode statt. Er unterscheidet sich vom Anodenfleck durch zwei Beobachtungen: Erstens tritt an Anode und Katode starker Abbrand auf. Zweitens ist die Brennspannung relativ niedrig und ruhig. Der kurze, intensive Anodenfleck-Bogen wird – wie die Definition sagt – vor allem bei kleinen Hüben beobachtet.

## 4.1 Kontrahierter Vakuumbogen

Der Übergang des Vakuumbogens von der diffusen Form zur anodisch kontrahierten Form wurde von zahlreichen Autoren für Gleich- und Wechselstrom untersucht. Mitchell [4.2] beobachtete bei Wechselstrom mit Kontakten aus Kupfer ein mit steigendem Strom langsames Ansteigen der Brennspannung von etwa 20 V auf 40 V. Bei Erreichen eines von den Entladungsbedingungen abhängigen Stroms von einigen kA steigt die Brennspannung mit steigendem Strom rasch an. Es treten hochfrequente Oszillationen auf. Diese beiden Erscheinungen werden der Bildung von Anodenfußpunkten zugeschrieben. Bei weiterer Steigerung des Stroms sinkt die Brennspannung wieder ab, und die überlagerten Schwingungen verschwinden. Dies ist charakteristisch für den Anodenfleck. Der Bogen zieht sich an der Anode zu einem Anodenfleck zusammen. Das Anodenmaterial schmilzt, was mit starkem Abbrand verbunden ist. Die Messungen von Mitchell zeigen, dass der kritische Strom, von dem ab die Brennspannung stark ansteigt, proportional zum Anodendurchmesser und umgekehrt proportional zum Kontaktabstand ist.

Einen charakteristischen Strom-Spannung-Verlauf während der Bildung eines Anodenflecks zeigt **Bild 4.2**, es entstammt einer Arbeit von Fischer [4.3]. Das Oszillogramm wurde an scheibenförmigen Kontakten mit 40 mm Durchmesser gemessen, wobei der katodenseitige Kontakt aus Cu und der anodenseitige aus CrCu bestand. Der Bogenstrom mit einer Halbperiode von nur 3 ms wurde mit Hilfe einer synthetischen Prüfschaltung erzeugt.

Zunächst wird beim Anstieg des Stroms ein relativ glatter, mit dem Strom leicht ansteigender Verlauf der Brennspannung zwischen 20 V und 40 V beobachtet. Die höherfrequenten Spannungsschwankungen betragen in diesem Bereich nur wenige Volt. Während dieser Zeitspanne ist der von mehreren Katodenflecken gespeiste Lichtbogen diffus. Die Anode ist zu diesem Zeitpunkt nicht aktiv an der Entladung beteiligt und stellt keine Ladungsträger zur Verfügung. Die von der Katode kommenden Ionen und Neutralteilchen müssen nicht generell auf der Anode rekombinieren oder kondensieren. Für sie besteht vielmehr auch eine gewisse Wahrscheinlichkeit der Reflexion.



**Bild 4.2** Strom-Spannung-Verlauf eines Vakuumlichtbogens und der Verlauf der spektralen und integralen Lichtintensität (Hub  $d = 9$  mm)

Im Zeitpunkt  $t_r$  ändert sich das Erscheinungsbild der Brennspannung des Lichtbogens vollständig. Die vormals glatte Lichtbogenspannung wird von einer hochfrequenten Rauschspannung überlagert, deren Spitzenwerte abhängig von Kontaktwerkstoff und Geometrie einige kV bei Frequenzen bis über 3 MHz betragen können. Während dieser Phase bildet sich auf der Anode eine kleine, hell leuchtende Zone, der Anodenfußpunkt. Aus diesem aufgeschmolzenen, aber nicht siedenden Bereich gelangen geringe Mengen von Anodenmaterial in flüssigem, dampfförmigem oder ionisiertem Zustand in den Entladungsraum. Die Bildung des Anodenflecks ist mit einem starken Anstieg der gleichzeitig registrierten Intensität des spektralen Lichtsignals (Kurvenzug SL) verbunden. Etwa  $5 \mu\text{s}$  bis  $10 \mu\text{s}$  nach Einsetzen der hochfrequenten Rauschspannung steigt das spektrale Signal steil an. Da für die Anode ein Sinterwerkstoff aus Kupfer und Chrom verwendet wurde, wird die Verzögerungszeit zwischen Einsetzen der Rauschspannung und Anstieg des spektralen Lichtsignals durch die unterschiedliche Schmelztemperatur von Kupfer ( $T_S = 1356 \text{ K}$ ) und Chrom ( $T_S = 2163 \text{ K}$ ) gedeutet. Beim Entstehen des Anodenfußpunkts wird zuerst Cu und erst nach einem weiteren Temperaturanstieg der Anodenoberfläche Cr aufgeschmolzen. Aus der Verzögerungszeit und der Schmelztemperaturdifferenz von Cu und Cr ergibt sich eine Temperaturanstiegsgeschwindigkeit  $\Delta T/\Delta t$  von etwa  $100 \text{ K}/\mu\text{s}$ . Einige