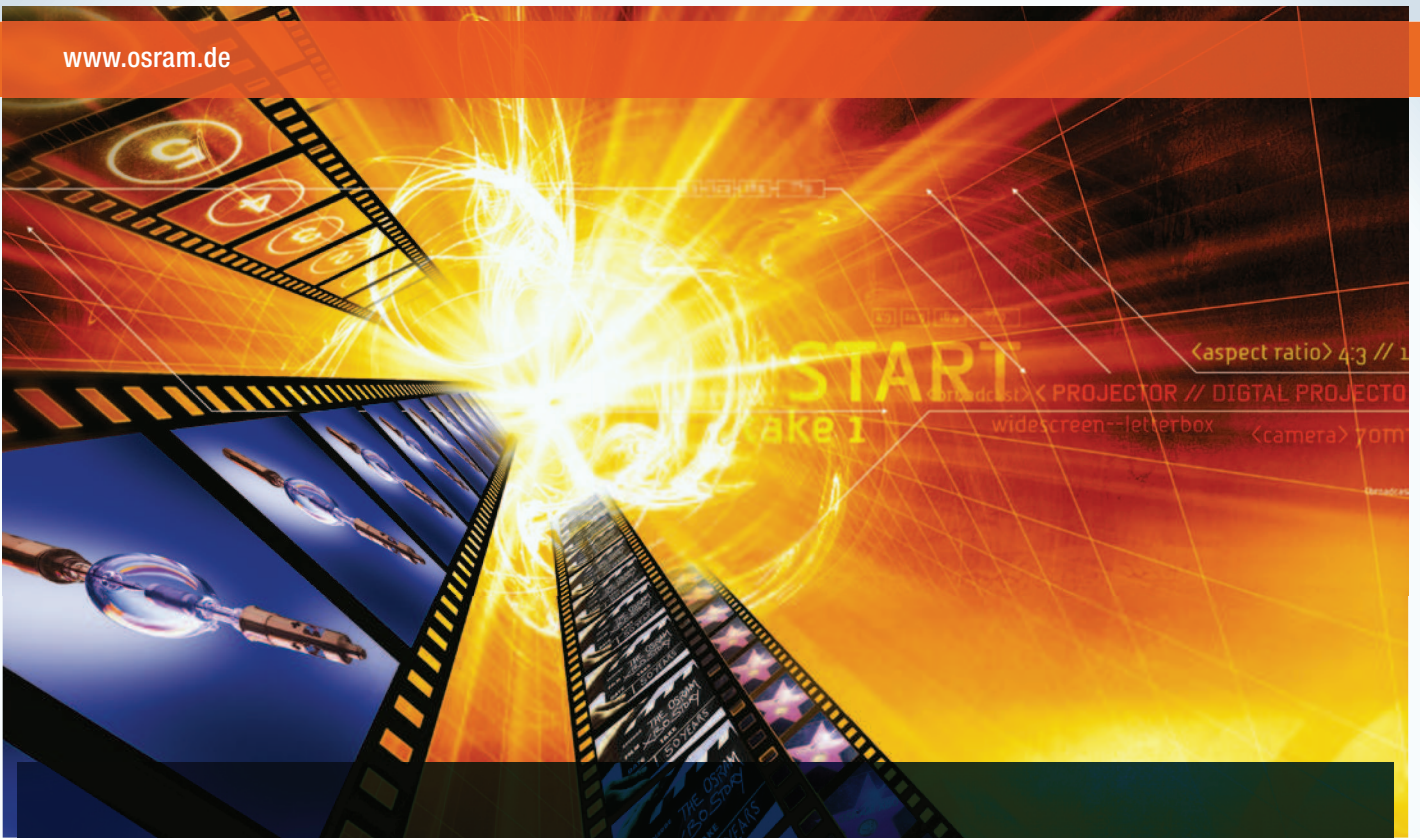




XBO® – Kinolampen.

Technologie und Anwendung.



SEE THE WORLD IN A NEW LIGHT

OSRAM



4 Einleitung

4 Geschichtlicher Überblick

5 Allgemeine Beschreibung von XBO®-Lampen

6 Lampenkonstruktion

- 6 Terminologie
- 6 Kolben
- 7 Elektroden
- 7 Einschmelzung
- 10 Sockel
- 10 Zündhilfsdraht
- 10 Füllung, Fülldruck
- 10 Geometrische Toleranzen

11 Lichttechnische Eigenschaften

- 11 Lichtstrom und Lichtausbeute
- 11 Leuchtdichte
- 13 Lichtstärkeverteilung
- 14 Spektrum und Farbeigenschaften

16 Elektrische Eigenschaften

- 16 Allgemeines
- 16 Stationärer Betrieb
- 17 Zündung
- 18 Anlaufverhalten
- 19 Strompulsation

22 Betriebsgeräte

- 22 Lampenhäuser
- 23 Vorschaltgeräte
- 23 Zündgeräte

25 Betriebsparameter

- 25 Brennlage
- 26 Magnetische Bogenstabilisierung
- 27 Drehung der Lampe
- 28 Kühlung
- 29 Stromsteuerbereich
- 30 Schalzhäufigkeit

31 Lampenverhalten

- 31 Lebensdauer
- 31 Schwärzung
- 33 Bogenstabilität und Flackern
- 37 Ozonerzeugung

39 Handhabung

- 39 Mechanische Installation
- 39 Elektrischer Anschluss
- 40 Säuberung der Lampe
- 41 Transport
- 41 Lagerung
- 41 Entsorgung

42 Probleme – Fehleranalyse – Tipps

- 42 Nicht-Zünder
- 42 Flackern
- 43 Kurze Lebensdauer
- 43 Falschpolung
- 43 Deformierte Elektroden
- 43 Lampenplatzer
- 44 Angelaufene Sockel, Kabel und Kabelschuhe
- 44 Zu wenig Licht
- 45 Ungleichmäßige Ausleuchtung
- 45 Lampe schrumpft
- 45 Dauer-Brenner

45 Sicherheit

- 45 Druck
- 45 Leuchtdichte
- 45 UV-Strahlung
- 45 Ozonerzeugung

46 Index

Einleitung

Mit dieser Anwendungsbroschüre soll ein möglichst umfassender Überblick gegeben werden zu allen Fragen, die im Zusammenhang mit der Verwendung und dem Betrieb von XBO®-Lampen stehen. Sie wendet sich daher sowohl an alle Betreiber und Anwender von XBO®-Lampen als auch an die Gerätekonstrukteure, sei es von Betriebsgeräten (Gleichrichter, Zündgeräte) oder von Lampenhäusern und optischen Systemen.

Im Mittelpunkt der Anwendungsbroschüre stehen nicht die physikalischen und lichttechnischen Grundlagen, die dem Lichterzeugungsprozess bei XBO®-Lampen zu Grunde liegen, oder die fotometrischen Eigenschaften der erzeugten Strahlung, sondern vielmehr die praxisbezogenen Anforderungen, die für einen sicheren und nutzbringenden Betrieb der Lampen erfüllt sein müssen; welche Probleme beim Betrieb auftreten, und wie sie gemeistert werden können.

Obwohl in den nachfolgenden Ausführungen vor allem die Anwendung der XBO®-Lampen in der Filmprojektion – dem kommerziell wichtigsten Verwendungszweck – berücksichtigt ist, sind viele Aussagen auch für andere Einsatzzwecke, wie der Solarsimulation oder bei Scheinwerfern, gültig. Der vorwiegenden Anwendung entsprechend bezieht sich die Broschüre vor allem auf XBO®-Lampen der höheren Leistungsstufen (> 450 Watt); wo deutliche Unterschiede zu den kleinwattigen XBO®-Lampen existieren, wird stets darauf hingewiesen. Um ihrem Zweck als Nachschlagewerk möglichst gerecht zu werden, steht dieser Broschüre ein ausführliches Inhaltsverzeichnis voran; darüber hinaus ist ein Index angefügt.

Geschichtlicher Überblick

XBO®-Lampen sind Kurzbogen-Entladungslampen auf der Basis einer stationären Hochstrom-Bogenentladung in reinem Xenongas. Sie wurden von OSRAM Mitte des 20. Jahrhunderts entwickelt. Am Anfang stand die Anwendung als Projektionslichtquelle für die kommerzielle Filmvorführung. In diesem Bereich wurde der Kohlebogen praktisch über Nacht ersetzt. Besondere Popularität gewannen XBO®-Lampen ab etwa 1970, als es gelang, Lampen zu konstruieren, die nicht nur – wie bis dato vorgeschrieben – in senkrechter Brennlage, sondern auch waagrecht betrieben werden konnten. Durch diesen Entwicklungsschritt konnte die Leinwandhelligkeit bei gleicher Lampenleistung um etwa 30 % gesteigert werden.



Abb. 1 1984 erhielt OSRAM von der Academy of Motion Picture Arts and Sciences für die Entwicklung und Vervollkommenung von XBO®-Lampen den begehrten OSCAR® überreicht. Foto: Academy of Motion Picture Arts and Sciences.

In den vergangenen 40 Jahren wurde die Zuverlässigkeit und das Lebensdauerverhalten der Lampen durch ständige Entwicklung an den Lampenkomponenten sowie der Herstellverfahren stetig verbessert. Heute wird ein Produktspektrum von 75 bis 12.000 W angeboten, aufgegliedert in eine Vielzahl von Leistungsstufen und Ausführungsvarianten.

Allgemeine Beschreibung von XBO®-Lampen

XBO®-Lampen gehören zu der Familie der Entladungslampen. Bei ihnen wird das Licht (die Strahlung) durch einen zwischen zwei Elektroden frei brennenden Entladungsbogen in reinem Xenongas erzeugt. Die Bogenlänge, das ist der Abstand der beiden Elektroden voneinander, beträgt nur wenige Millimeter – auch bei dem hohen Leistungsumsatz von einigen Kilowatt. Damit kommen die Lampen dem Ideal einer Punktlichtquelle sehr nahe.

Der Druck in dem Entladungsgefäß beträgt im Betrieb mehrere 10 bar, um zum einen zu der gewünschten hohen räumlichen Lichtkonzentration zu kommen, und zum anderen eine noch akzeptable Brenn-(Betriebs-)spannung der Lampe zu erreichen. Sie liegt schwerpunktmäßig in der Größenordnung 20–30 V (mit Extremwerten zwischen 15 und 60 V), was diese Lampen bei der üblichen elektrischen Leistungsaufnahme zu ausgesprochenen Hochstrom-Lampen macht: Stromstärken bis zu 200 A sind sinnvoll und notwendig. Diese Stromstärken müssen vom Versorgungsgerät als gut geglätteter Gleichstrom zur Verfügung gestellt werden.

Zu den wichtigsten lichttechnischen Vorteilen der XBO®-Lampen gehören neben der oben erwähnten hohen Leuchtdichte (Punktlichtquelle) vor allem die Tageslichtqualität der erzeugten Strahlung. Nicht nur, dass diese der Farbtemperatur der Sonne mit – im Mittel – 6.000 K sehr nahe kommt, sondern dass auch der Farbwiedergabeindex – d. h. das Maß, inwieweit Körperfarben „natürlich“ wiedergegeben werden – nur wenige Punkte unter dem Idealwert von 100 liegt und dass diese Farbqualität unverändert und unbeeinflussbar stets und immer gleich ist. Unabhängig vom Lampentyp, von der Lampenleistung, unabhängig von der Lebensdauer der Lampe und unabhängig von einem eventuellen Dimmen.

In einer Reihe von Anwendungen wird zudem ausgenutzt, dass die Lampen in jedem Abkühlzustand wiederzündbar sind und dass bei einem Lampen-Kaltstart praktisch sofort die volle Lichtleistung zur Verfügung steht.

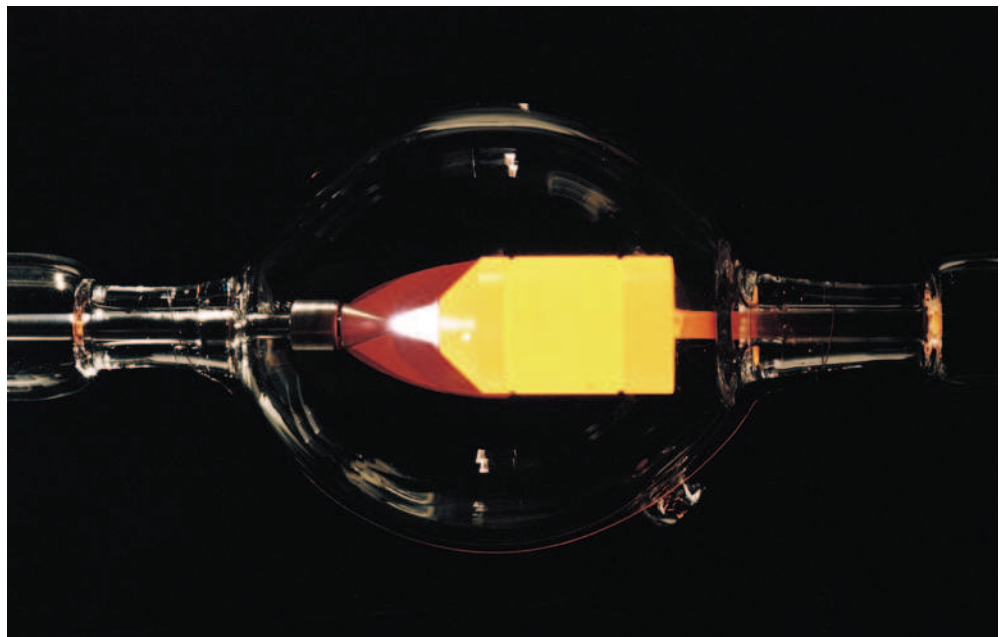


Abb. 2 XBO®-Lampe in Betrieb.

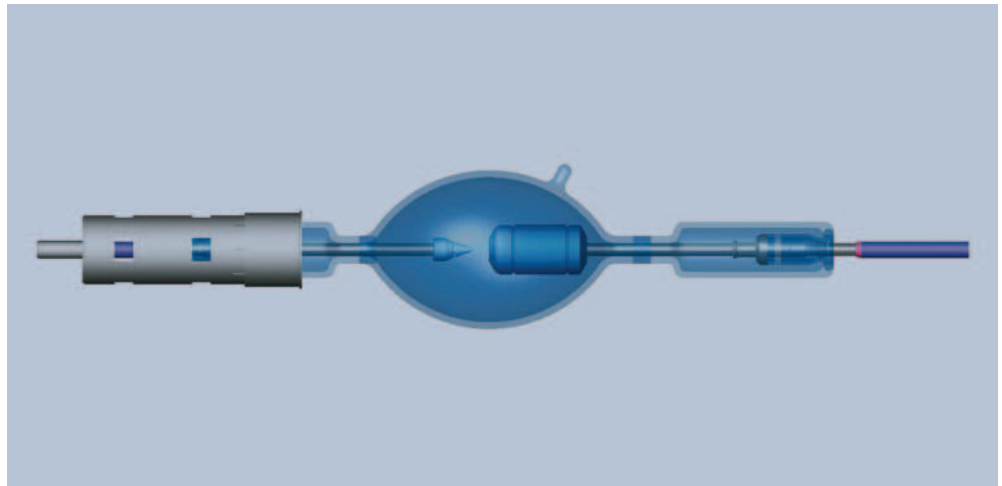


Abb. 3 Prinzipskizze einer XBO®-Lampe mit den wichtigsten Komponenten.

XBO®-Lampen sind zweiseitig gesockelte Entladungslampen. Abb. 3 zeigt eine Prinzipzeichnung mit den wichtigsten Komponenten:

Der **Lampenkolben** aus Quarzglas als Entladungsgefäß umschließt das **Elektrodensystem** und ist mit Xenongas gefüllt. Der bauchige Teil geht nach außen hin in die **Lampenschäfte** oder auch **Lampenhäule** über.

Der „Nabel“ der Lampe, über den sie während des Herstellprozesses gefüllt wurde, wird als **Pumpspitze** oder **Pumpstengelabzugsstelle** bezeichnet. Sie sitzt entweder auf dem Kolben oder auf einem der Lampenhäule.

Der Entladungsbogen brennt zwischen den beiden **Elektroden**, die in das Entladungsgefäß hineinragen und sich in einem kurzen Abstand, dem **Elektrodenabstand**, gegenüberstehen. Im (heißen) Betriebszustand wird aus dem Elektrodenabstand die Bogenlänge. Die kleinere Elektrode ist die **Kathode**, die größere die **Anode**.

Bei den meisten Lampentypen sind die Elektroden auf den **Elektrodenstäben** angebracht. Beide Elektroden sind hermetisch dicht über die **Einschmelzung** mit dem Entladungsgefäß verbunden. Der äußere elektrische Anschluss und auch die mechanische Halterung der Lampe erfolgt über die **Sockel**. Analog unterscheidet man auch hier Kathodensockel (Minuspol) und Anodensockel (Pluspol). Außen um den Kolben herum schlingt sich der **Zündhilfsdraht**, typabhängig entweder von Hals zu Hals oder von Hals zu Hals zu einem Sockel.

Kolben

Der Kolben von XBO®-Lampen besteht stets aus Quarzglas. Nur Quarzglas kann der hohen mechanischen Belastung durch den Betriebsdruck von einigen 10 bar und der thermischen Belastung bei Oberflächentemperaturen von mehr als 700 °C widerstehen. Abhängig von Typ und Verwendungszweck wird eine mehr ovale oder mehr kugelige Querschnittsform gewählt. Die Dicke der Quarzwandung beträgt einige Millimeter. Um eine hohe optische Abbildungsqualität des Bogens zu ermöglichen, werden nur beste schlierenfreie und bläschenarme Quarzsorten verwendet.

In der Regel ist das Quarzglas – für das menschliche Auge unsichtbar – in der Masse dotiert oder beschichtet, um unerwünschte UV-Strahlung zu absorbieren. Diese Lampen sind in der Typenbezeichnung mit OFR gekennzeichnet. XBO®-Lampen mit Kolben aus reinem Quarzglas erzeugen bei Betrieb in Luft Ozon, das in höheren Konzentrationen und über längere Zeit eingeatmet, der Gesundheit schadet.

Elektroden

Die Elektroden von XBO®-Lampen bestehen stets aus Wolfram.

Die kleinere Elektrode, die **Kathode**, ist der Strom- oder Elektronenlieferant. Um dieser Aufgabe möglichst gut gerecht zu werden, wird ein dotiertes Wolframmaterial verwendet. Zudem erleichtert die Geometrie der Kathode mit ihrer relativ scharfen Spitze und (bei einigen Typen) der sogenannten Wärmestaunut die Emission der Elektronen. Diese Formgebung unterstützt auch die Ausbildung eines stabilen und scharf begrenzten Bogenansatzes, Voraussetzung für eine hohe Konzentration der Lichterzeugung dicht vor der Kathodenspitze und für eine gute räumliche Stabilität des Fußpunktes des Bogens.

Die **Anode** nimmt die von der Kathode emittierten Elektronen wieder auf, die in sie mit hoher Geschwindigkeit eindringen. Dabei werden sie abgebremst. Die Bremsenergie wird in Wärme umgewandelt. Diese Wärmeenergie muss abgeleitet, zum überwiegenden Teil jedoch abgestrahlt werden. Um im Interesse einer langen Lebensdauer die Temperatur der Anode möglichst gering zu halten, ist sie groß und massig ausgeführt. Um ihre Abstrahleigenschaften für Infrarotstrahlung zu verbessern, ist die Oberfläche häufig behandelt: für das menschliche Auge entweder hochglanzpoliert oder grau bepastet.

Entscheidend dafür, wie lange die Anode dem Elektronenbombardement standhalten kann, ist neben ihrer Formgebung die Materialzusammensetzung und die Materialstruktur. Wurden früher reine Wolframaterialien höchster Dichte eingesetzt, können heute über Dotierung und eine streng geführte thermische und mechanische Bearbeitung des Metalls innere Strukturverteilungen erzeugt werden, die zu wesentlich besseren Anodeneigenschaften führen. Ausschlaggebendes Kriterium ist dabei stets, wie lange die Stirnfläche der Anode ihre Form beibehält. Dieser „Abnutzungsprozess“ ist jedoch auch deutlich gesteuert durch die speziellen Betriebsbedingungen einer Lampe. Durch spezielle Herstellverfahren ist es OSRAM möglich, die W-Materialien für ihre speziellen Anwendungen zu optimieren. Laufende Verbesserungen dieser Materialien ermöglichen eine kontinuierliche Verlängerung der Lebensdauer und der Effizienz.

Einschmelzung

Die Einschmelzung – jede XBO®-Lampe hat davon zwei – stellt die gasdichte Verbindung für den elektrischen Strom zwischen der Außenwelt und dem Inneren der Lampe her. Wolfram hat einen bei Metallen üblichen relativ hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Quarzglas dagegen dehnt sich bei Erwärmung fast gar nicht aus. Aus diesen Gründen kann ein Wolframstab – der Anodenstab beispielsweise – nicht in Quarzglas eingebettet werden; bei Erwärmung würde das sich ausdehnende Wolframmetall das Quarzglas sprengen. Um dennoch eine dichte Verbindung zwischen Glas und Metall herzustellen, müssen spezielle Verfahren angewendet werden.

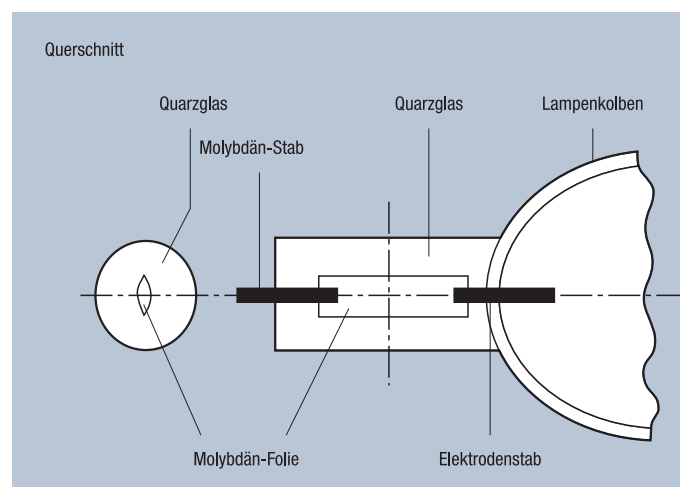


Abb. 4 Prinzipskizze einer Folieneinschmelzung (schematisch).

Verfahren Nummer 1:

Die Stromdurchführung durch das Quarzglas erfolgt mit Hilfe einer Molybdänfolie. Siehe Abb. 4 auf Seite 7. Die Folie ist nur etwa 20 µm dick (dünner als ein Haar) und ist an seinen Rändern schneidenförmig geätzt. Bei Erwärmung ist die absolute Ausdehnung der Folie in der Dicke so gering, dass das Quarzglas die Kräfte aufnehmen kann, in der Breite dagegen können sich die schneidenförmigen Kanten leicht in das Quarzglas hineingraben, ohne es zu sprengen. Diese Einschmelztechnik, die **Folieneinschmelzung**, wird für XBO®-Lampen kleiner Leistung eingesetzt. Für höhere Leistungen versagt sie, da die dünnen Folien nur bis etwa 10 Ampere belastet werden können.

Verfahren Nummer 2:

Statt eine Vielzahl von Folien in Parallelschaltung zu bemühen, kann mit einer ringförmigen Folie, die in die Form eines Bechers gepresst ist, gearbeitet werden; die sog. **Moly-Cup-Einschmelzung**. Im Grundsatz eine geniale Idee, wären da nicht die hohen Herstellkosten der topfförmigen Folie und die Unsicherheit in der Dichtigkeit entlang dem ringförmigen Schneidenrand.

Verfahren Nummer 3:

Die mechanisch und elektrisch sicherste Methode ist die direkte Leitung des Stroms durch den Stab, auf dem die Elektrode befestigt ist. Da aber die Einbettung des Stabs im Quarzglas unmöglich ist, muss zwischen dem Wolframmetall und dem Quarz in Bezug auf den Ausdehnungskoeffizienten „vermittelt“ werden. Dies gelingt durch eine Serie von Gläsern, die um den Wolframstab gelegt werden, und die, vom Wolfram aus gesehen, sukzessiv abfallende Ausdehnungskoeffizienten haben: hoher, metallähnlicher Koeffizient direkt auf dem Metall; geringer, quarzähnlicher Koeffizient angeschmolzen ans Quarzglas; dazwischen ein oder zwei „Vermittler“. Im deutschen Sprachgebrauch lapidar **„Stabeinschmelzung“**, im Englischen etwas detaillierter **„graded seal“**. Da die Einschmelzgläser nur auf Druck beansprucht werden dürfen, ergibt sich eine an einen umgestülpten Fingerhandschuh erinnernde Geometrie. Siehe Abb. 5. Der wichtige Bereich der Einschmelzgläser wird als „Dom“ der Einschmelzung bezeichnet.

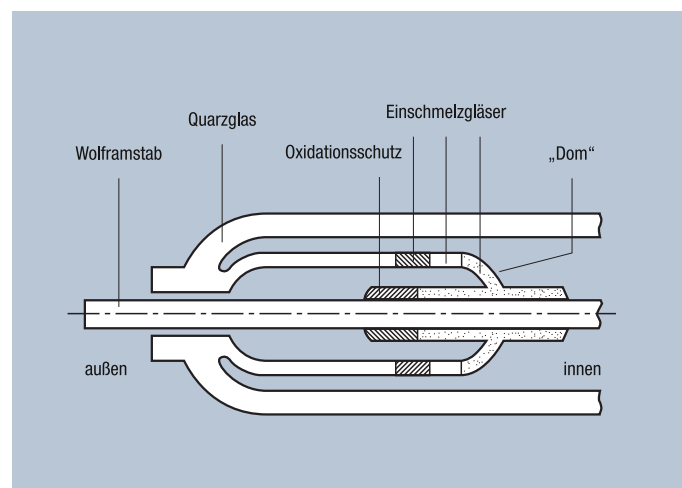
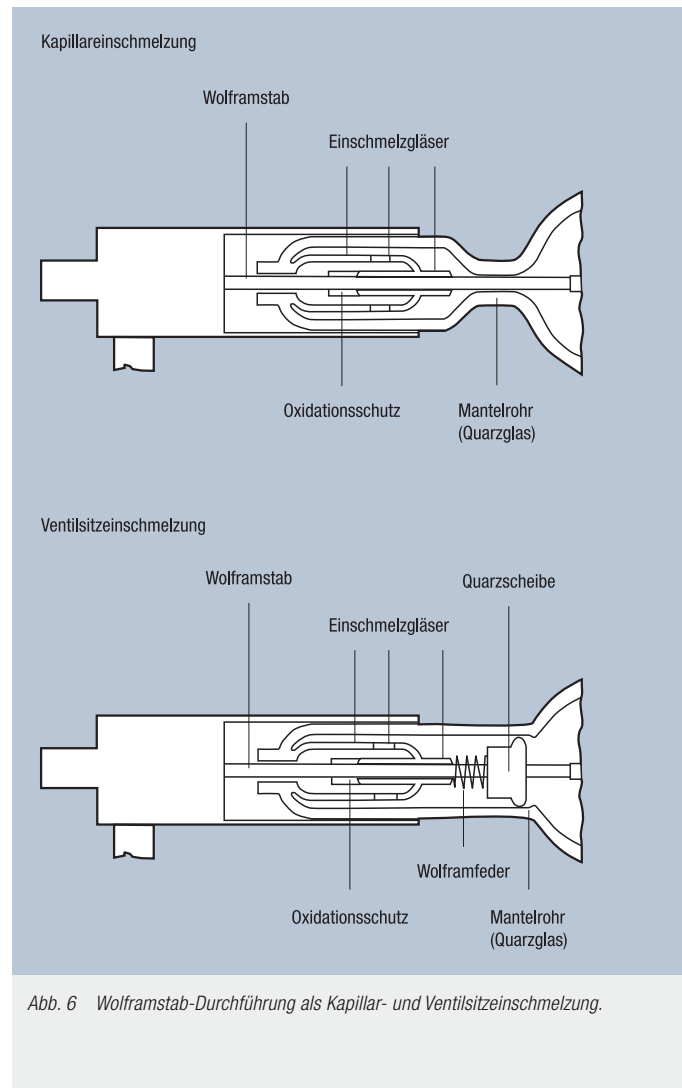


Abb. 5 Prinzipskizze der Stabeinschmelzung (graded seal).

Die Stabeinschmelzung gilt heute als sicherste und sauberste Art der Einschmelzung für Hochstrom-Lampen, wie es XBO®-Lampen sind. Da die Einschmelzgläser temperaturempfindlich sind, dürfen sie nicht zu nahe an den Wärmeerzeugern „Bogen“ und „Anode“ angebracht sein. Zur stabilen räumlichen Fixierung der (schweren) Elektroden im Lampenkolben werden eine Reihe konstruktiver Lösungen verwendet. Die wichtigsten in Abb. 6:



Bei der **Kapillareinschmelzung** wird das Mantelrohr über eine gewisse Länge bis dicht auf den Wolframstab herunter geschmolzen. Resultat: eine gute Führung des Wolframstabs, aber eine relativ zierliche mechanische Ausführung. Bei der **Ventilsitzeinschmelzung** wird in dem dicken, stabilen Mantelrohr der Elektrodenstab durch eine Scheibe zentriert, die in ihrer Form an einen Ventilkopf aus der Motorenindustrie erinnert. Eine Wolframfeder presst die Scheibe in ihren Sitz.

Wichtiges konstruktives Detail der Stabeinschmelzung ist der Oxidationsschutz. Er besteht aus einem speziellen, relativ niedrig schmelzenden Glas, das außen auf den Wolframstab an der Einschmelzung aufgetragen ist. Durch eine besonders innige chemisch-physikalische Verbindung mit dem Wolframstab wird eine gute zusätzliche Abdichtung gegen den Luftsauerstoff geboten, der versucht, das Einschmelzglas zu unterwandern.

Sockel

Die zwei Sockel von XBO®-Lampen dienen dem elektrischen Anschluss und der mechanischen Halterung. In der Regel bestehen sie bei den hochwattigen Lampen aus Metallhülsen, die mit einem Klemmring unter Zuhilfenahme eines Grafitbandes auf den Lampenschäften befestigt sind. In ihrem Innern sorgt eine flexible Leitung für eine zugentlastete Verbindung von Elektrodenstab und Sockel. Die Hülsen tragen entweder ein Kabel, einen Gewindestift, einen einfachen zylindrischen Stift oder eine Kombination davon. Für dauerhaft guten elektrischen und thermischen Kontakt sind sie hochglanzvernickelt. Meistens sind Polaritätskennzeichen eingestanzt, die zur Kennzeichnung, aber auch zur Kühlung des Sockelinnenlebens dienen.

Zündhilfsdraht

Der Zündhilfsdraht ist ein dünner (temperaturbeständiger) Eisen-Nickeldraht, der sich von Lampenhals zu Lampenhals schlingt und – typabhängig – ggf. bis zur Sockelhülse weitergeführt ist. Er erleichtert die Zündung der Lampe, vor allem wenn Vorschalt- und Zündgeräte mit zunehmendem Alter in ihrer Leistungsfähigkeit nachgelassen haben. Seine Funktion ist zweifach: Zum einen verzerrt er das elektrische Feld der zum Zünden angelegten Hochspannung, so dass es durch Inhomogenitäten zu Spitzen in der Feldstärkeverteilung kommt, die einen Überschlag begünstigen. Zum anderen treten an ihm Sprühentladungen auf, die durch Fotoeffekt Elektronen aus der Kathode schlagen können, die dann wiederum Initiator für den Durchschlag sind.

Füllung, Fülldruck

XBO®-Lampen sind mit reinem Xenongas gefüllt. Xenon ist das seltenste der (stabilen) Edelgase und kommt in der Luft zu einem sehr kleinen Prozentsatz ($< 0,00001\%$) vor. Durch weiterführende Verfahrensschritte lässt es sich bei der Verflüssigung von Luft aus dieser gewinnen. Verglichen mit den anderen Edelgasen wie Argon und Krypton, die ebenfalls aus der Luft gewonnen werden, ist es sehr teuer. Zur Sicherstellung einer hohen Lebensdauer der Lampen muss das Gas schärfsten Reinheitsbedingungen genügen. Aggressive Verunreinigungen dürfen nur im ppm-Bereich (ppm = parts per million) vorhanden sein.

Der Fülldruck der (kalten) XBO®-Lampen liegt je nach Ausführungsform zwischen 5 und 15 bar. Um diesen Überdruck in die Lampen einfüllen zu können, wird das Xenongas während des Herstellprozesses in den Lampenkörper hinein eingefroren. Im Betrieb steigt der Druck in der Lampe temperaturbedingt auf etwa den 4-fachen Wert an.

Geometrische Toleranzen

In ihrer Eigenschaft als Punktlichtquelle werden XBO®-Lampen häufig in hochwertigen optischen Systemen verwendet. Dies erfordert eine genaue Positionierung des Lichtbogens (genauer, seines „hot spots“, der Stelle höchster Leuchtdichte). Als handgearbeitete, erschmolzene Glasteile unterliegt die Gesamtgeometrie der Lampe naturgemäß größeren Toleranzen, als dies von rotationssymmetrischen Metalldrehteilen bekannt ist. Um die Justierung der Lampen jedoch in optischen Systemen zu erleichtern, bei größeren Anforderungen sogar entfallen zu lassen, ist die Lage des Bogens gegenüber einem Bezugssockel (meistens dem Kathodensockel) bezüglich Abstand und Axialität sehr eng toleriert (im Allgemeinen $\pm 0,5\text{ mm}$). Alle übrigen Maße können Toleranzen von mehreren Millimetern aufweisen. Dies ist bei der Konstruktion von Geräten und Lampenhäusern zu bedenken.

Eng toleriert ist bei einigen Lampentypen außerdem der Durchmesser des Sockelstiftes, wenn über ihn der elektrische Stromanschluss erfolgen soll. Eine enge Passungstoleranz erleichtert einen großflächigen Kontakt.

Lichttechnische Eigenschaften

Lichtstrom und Lichtausbeute

Die in XBO®-Lampen hineingesteckte elektrische Leistung wird – bei einer typischen mittleren Leistungsstufe – zu etwa 80 % in Strahlung umgewandelt. Der Rest geht durch Wärmeleitung und Konvektion verloren. Nur etwa 60 % der aufgenommenen Leistung wird durch den elektrischen Bogen abgestrahlt; und das auch noch zum größten Teil im nicht sichtbaren, nahen Infrarotbereich. Die restlichen 20 % Strahlung stammen von den Elektroden (vornehmlich der Anode) und vom Kolben, der immerhin auf eine Temperatur von ca. 700 °C kommt.

Bezogen auf das sichtbare Licht, liegt die **Lichtausbeute** von obigem Lampenbeispiel bei etwa 30 lm/W und ist damit vergleichbar mit höchstbelasteten, kurzlebigen Halogenlampen. Je geringer die Leistungsaufnahme der XBO®-Lampe (richtiger, je geringer die Brennspannung), umso schlechter die Lichtausbeute und umgekehrt. Sie reicht von nur 15 lm/W bis zu 50 lm/W. Lampen mit kürzerem Elektrodenabstand haben in der Regel auch den niedrigeren lichttechnischen Wirkungsgrad.

Wird bei einer vorgegebenen Lampe der elektrische Strom erhöht, so steigt der **Lichtstrom** etwa proportional zum Lampenstrom hoch 1,5. Diese Verbesserung des Wirkungsgrades ist durch die gleichzeitige Erhöhung der Lampenspannung über die höhere Leistungsaufnahme, die höhere Temperatur und den höheren Druck bestimmt.

Leuchtdichte

Wohl wichtigstes Charakteristikum von XBO®-Lampen ist für die meisten Anwendungen die **Leuchtdichte**. Dadurch, dass bei dieser Gleichstromlampe der Lichtbogen kurz vor der Kathode geometrisch stark zusammengedrängt wird (wofür die Formgebung der Kathode, ihr Wärmehaushalt und die elektro-magneto-dynamischen Kräfte im Bogenfeld verantwortlich sind), ergibt sich dort ein deutlich ausgeprägtes Leuchtdichtemaximum, das zur Anode hin rasch abfällt. Siehe Abb. 7.

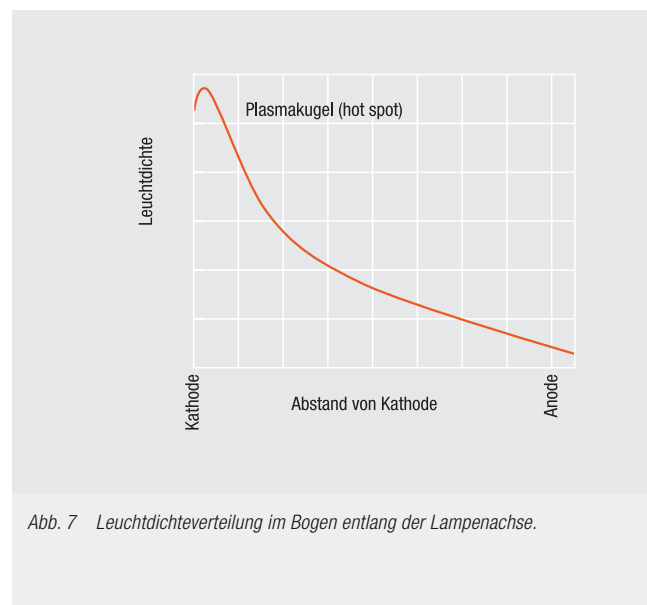
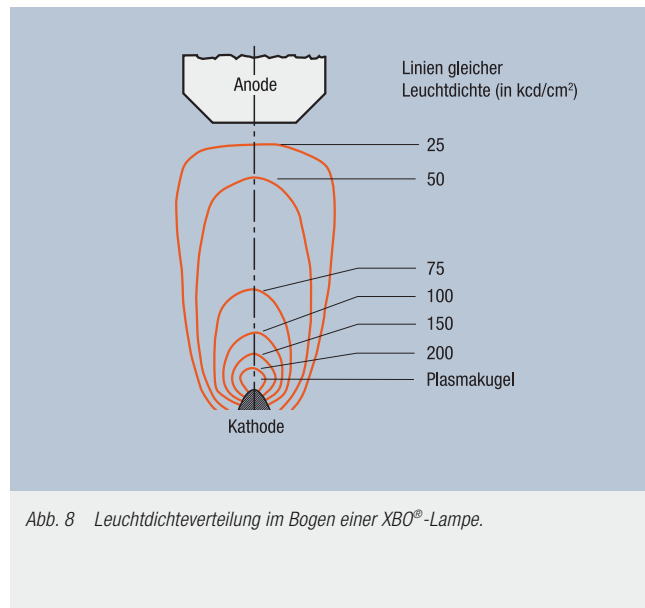


Abb. 7 Leuchtdichteverteilung im Bogen entlang der Lampenachse.

In senkrechter Brennlage ist die **Leuchtdichteverteilung** im Bogen streng rotationssymmetrisch; bei waagerechtem Betrieb wird der Bogen durch die Konvektion im Xenongas leicht nach oben abgelenkt. Die Stärke der Auslenkung ist proportional zum Elektrodenabstand und umgekehrt proportional zur Stromstärke.

Zur zahlenmäßigen Bewertung der Leuchtdichte einer gegebenen Lampe wird eine **Mittlere Leuchtdichte** definiert. Siehe hierzu Abb. 8.



Dabei gilt folgende Messvorschrift: entlang der Lampenachse wird über die gesamte Lichtbogenlänge eine schmale Messfläche mit einer Breite von ca. 0,02 mm ausgeblendet und deren Mittlere Leuchtdichte bestimmt. Damit ist die **Axialleuchtdichte** definiert. Daraufhin wird die Messfläche (der Spalt) zu beiden Seiten der Achse soweit verfahren, bis ein Wert der halben Axialleuchtdichte gemessen wird. Dieser Wert ist die Mittlere Leuchtdichte des Bogens. Die Leuchtfeldgröße ist aus der Bogenlänge und dem Abfall der Axialleuchtdichte auf diesen halben Wert gegeben.

Typische XBO®-Lampen erreichen Mittlere Leuchtdichten etwa vom halben Wert der Sonnenoberfläche. Hochgezüchtete Lampen für Sonderanwendungen mit besonders kurzem Elektrodenabstand können die Sonnenleuchtdichte sogar um einen Faktor 3 bis 4 übertreffen.

Die Tabelle (Abb. 9) stellt die Leuchtdichten einiger natürlicher und künstlicher Lichtquellen einander gegenüber.

Lichtquelle	Leuchtdichte (cd/cm ²)
natürliche	
Mittagssonne	100.000 bis 150.000
Vollmond	0,25 bis 0,35
Klarer Himmel	0,3 bis 0,7
Bedeckter Himmel	0,01 bis 0,1
künstliche	
Xenon-Kurzbogenlampe	20.000 bis 500.000
Kohlebogenlampe	20.000 bis 180.000
Glühlampe, klar	200 bis 5000
Natriumdampf-Hochdrucklampe, klar	300 bis 550
Leuchtstofflampe	0,3 bis 2

Abb. 9 Leuchtdichten ausgewählter natürlicher und künstlicher Lichtquellen.

Lichtstärkeverteilung

Wichtig für die Dimensionierung und Konstruktion von optischen Systemen für XBO®-Lampen ist neben der Leuchtdichte die räumliche **Lichtstärkeverteilung** um die Lampe herum.

Wegen der Rotationssymmetrie von Bogen und Lampe ist auch die Lichtstärkeverteilung praktisch in allen Ebenen durch die Lampenachse gleich. Siehe Abb. 10. Dies gilt auch für den Fall des horizontalen Betriebs der Lampen, obwohl der Bogen dabei mehr oder minder aus der Symmetrieachse der Lampe ausgelenkt ist; der Großteil der Strahlung kommt nämlich aus dem kathodennahen Bereich, dem Fußpunkt des Bogens, der durch konvektive Kräfte praktisch unbeeinflusst ist.

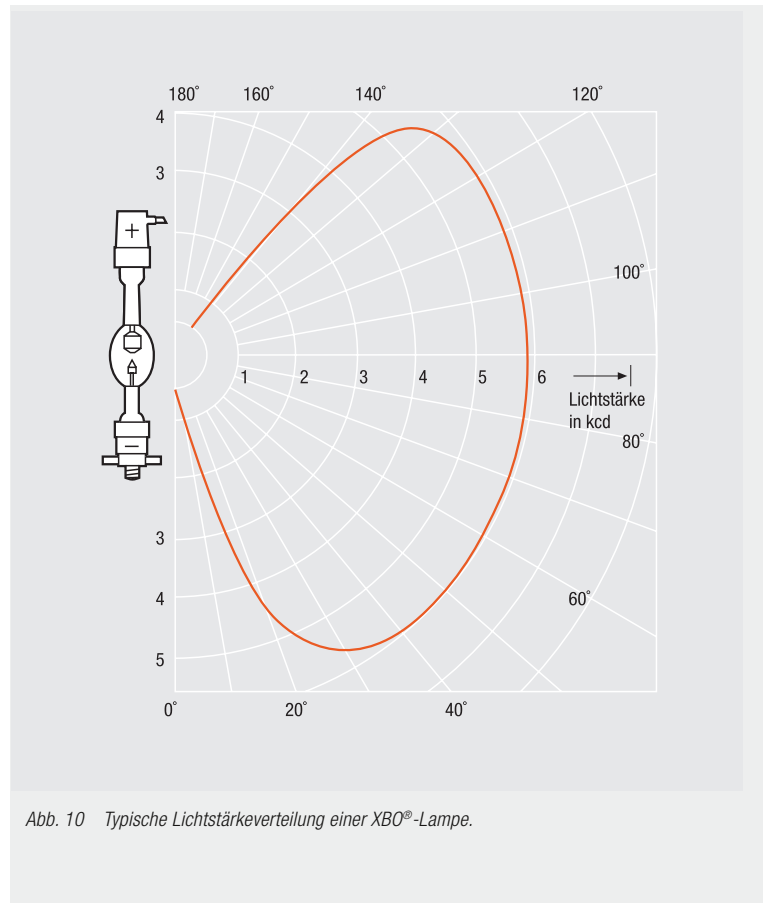


Abb. 10 Typische Lichtstärkeverteilung einer XBO®-Lampe.

Aufgrund der Geometrie von Kathode und Anode sowie ihrer geometrischen Anordnung füllt die Lichtstärkeverteilung bei den meisten Lampen fast gleichmäßig einen Gesamtraumwinkel von etwa 10 Steradian (Vollraumwinkel = $4 \cdot \pi = \text{ca. } 12$). Damit kann aus dem Lichtstrom einer gegebenen Lampe näherungsweise die Lichtstärke abgeleitet werden:

$$\text{Lichtstärke (cd)} = \text{Lichtstrom (lm)} \text{ geteilt durch zehn}$$

Umgekehrt kann aus einer Lichtstärkemessung leicht auf den Gesamtlichtstrom einer Lampe geschlossen werden.

Spektrum und Farbeigenschaften

Neben der hohen Leuchtdichte sind es die spektralen Farbeigenschaften, die XBO®-Lampen für eine Reihe von Anwendungen attraktiv machen. Im sichtbaren Bereich zwischen 380 und 780 nm folgt das **Xenonlampenspektrum** sehr gut dem spektralen Verlauf eines Schwarzen Strahlers von ca. 6.000 K. Siehe Abb. 11. Es ist damit reinweiß wie das Mittags-Sonnenlicht.

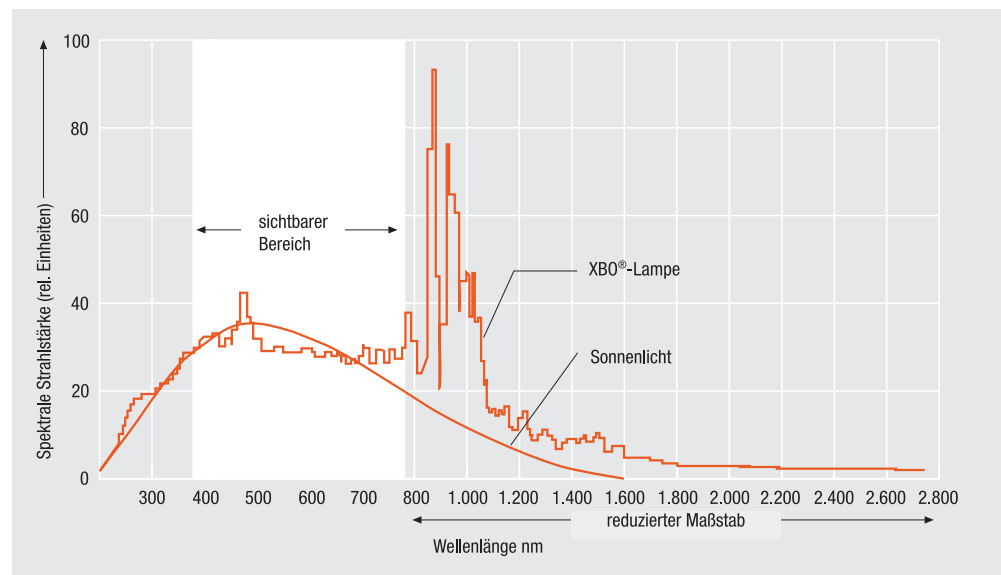


Abb. 11 Spektrale Strahlstärkeverteilung einer typischen XBO®-Lampe und des Schwarzen Strahlers von ca. 6.000 K.

Etwa 6 % der aufgenommenen elektrischen Leistung wird als **UV-Strahlung** unterhalb von 380 nm abgegeben. Das Spektrum endet bei etwa 170 nm durch die einsetzende Absorption von (normalen) Quarzgläsern. Durch Verwendung von synthetischem (besonders verunreinigungsarmem) Quarzglas Suprasil, lässt sich die zu kurzen Wellenlängen hin etwa exponentiell abklingende Bogenstrahlung bis etwa 155 nm nutzen. Für alle Anwendungen, bei denen die UV-Strahlung eher störend ist, werden Lampen mit dotierten oder beschichteten Quarzgläsern verwendet. Dadurch kann der Strahlungsbereich unter etwa 240 nm wirksam unterdrückt werden, mit dem Resultat, dass bei Betrieb in Luft(-sauerstoff) kein Ozon (O_3) erzeugt wird. Durch diesen Entwicklungsschritt zu „ozonfreien“ Lampen konnte vor allem der Ventilationsaufwand in engen Film-Projektionskabinen deutlich vermindert werden. Abb. 12 zeigt die spektrale Durchlässigkeit im UV-Bereich von verschiedenen Quarzglasstypen.

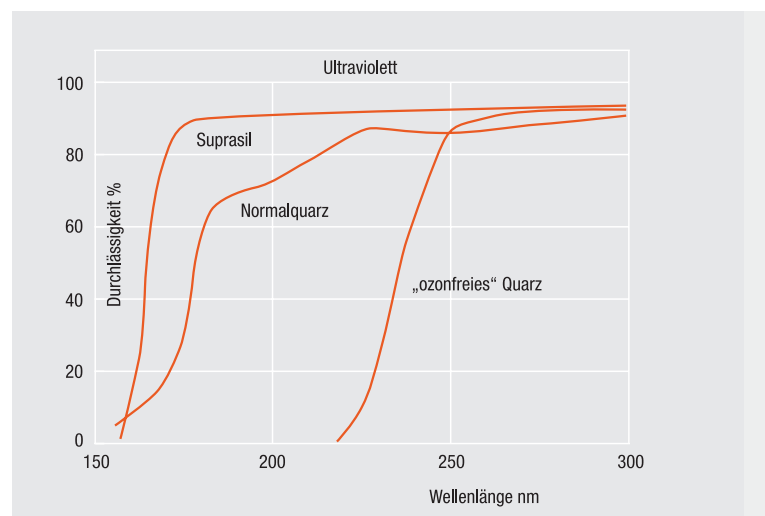


Abb. 12 Spektrale Durchlässigkeit verschiedener Quarzglas-Sorten im UV-Bereich.

Ein wichtiger Hinweis: Die Reduzierung der UV-Strahlung bei den „ozonfreien“ Lampen durch dotierte oder beschichtete Quarzgläser bedeutet nicht, dass die entsprechenden Lampen keine UV-Strahlung erzeugen! Auch die verbleibende UV-Strahlung oberhalb von 240 nm schadet der Gesundheit. Siehe dazu auch Kapitel „Sicherheit“, Seite 45.

Herausragend unter den Spektren von Entladungslampen ist bei XBO®-Lampen der Kontinuumscharakter im sichtbaren Bereich. Dies schlägt sich nieder in dem Farbwiedergabeindex von ca. 98.

Weiterhin ist bemerkenswert, dass sowohl Farbtemperatur als auch Farbwiedergabeindex praktisch unabhängig von speziellen Betriebsparametern sind. Lampenspezifische Unterschiede in der Farbtemperatur verschiedener Versionen werden im Wesentlichen durch den unterschiedlich hohen Anteil von Elektrodenstrahlung verursacht: hochwattige Lampen mit ihren großen Anoden haben in der Regel die geringere Farbtemperatur (höhere Rotanteile im Spektrum). Die Schwankungsbreite geht etwa von 6.000 bis 6.500 K.

Im Besonderen ist die Farbtemperatur praktisch unabhängig von:

- Lampentyp
- Leistungsstufe
- Lampenbrennspannung
- Lampenstrom
- Dimmen/Boosten
- Alter der Lampe

Diese Unempfindlichkeit des Farbcharakters von Xenon-Entladungslampen hat sie zur Lichtquelle der Wahl für alle anspruchsvollen Sonnensimulationssysteme gemacht.

Elektrische Eigenschaften

Allgemeines

XBO®-Lampen sind Gleichstromlampen. Alle Versuche, Lampen für den Wechselstrombetrieb zu entwickeln, scheiterten an kurzen Lampenlebensdauern und großer Bogeninstabilität. Der Grund dafür ist darin zu suchen, dass XBO®-Lampen Hochstrom-Lampen sind. Selbst im Kleinwattbereich (< 500 W) liegen die Lampenströme bis nahe an 30 Ampere. Solche Stromwerte verlangen, dass Kathode (Minus) und Anode (Plus) für ihre entsprechenden Aufgaben hochspezialisiert sind: die Kathode muss einen kräftigen Elektronenstrom liefern, die Anode ihn aufnehmen. Diese eindeutige Auslegung der Elektroden bedeutet auch, dass eine Falschpolung katastrophale Folgen hat: in Sekundenbruchteilen zerstört sich die Lampe, im Besonderen die Kathode.

In der Regel wird der Lampengleichstrom durch Gleichrichter, angeschlossen an das Wechselstromnetz, zur Verfügung gestellt. Das Verhalten, besonders das Lebensdauerverhalten von XBO®-Lampen, ist stärker als bei anderen Lampentypen durch die Parameter und Charakteristik der Betriebsgeräte geprägt. Zum Bau solcher Geräte ist daher ein gutes Verständnis des elektrischen Lampenverhaltens unumgänglich.

Stationärer Betrieb

Wird zunächst der Zünd- und Anlaufvorgang von XBO®-Lampen außer Acht gelassen, so können die elektrischen Eigenschaften der Lampen durch eine stationäre Strom-Spannungskennlinie beschrieben werden. Im Betriebsbereich, d. h. um den Nennstrom herum, ist diese **Kennlinie** linear und kann mit folgender Gleichung beschrieben werden

$$U_L = U_G + I_L \cdot R_L$$

mit

U_L = Lampenspannung

U_G = Grundspannung

I_L = Lampenstrom

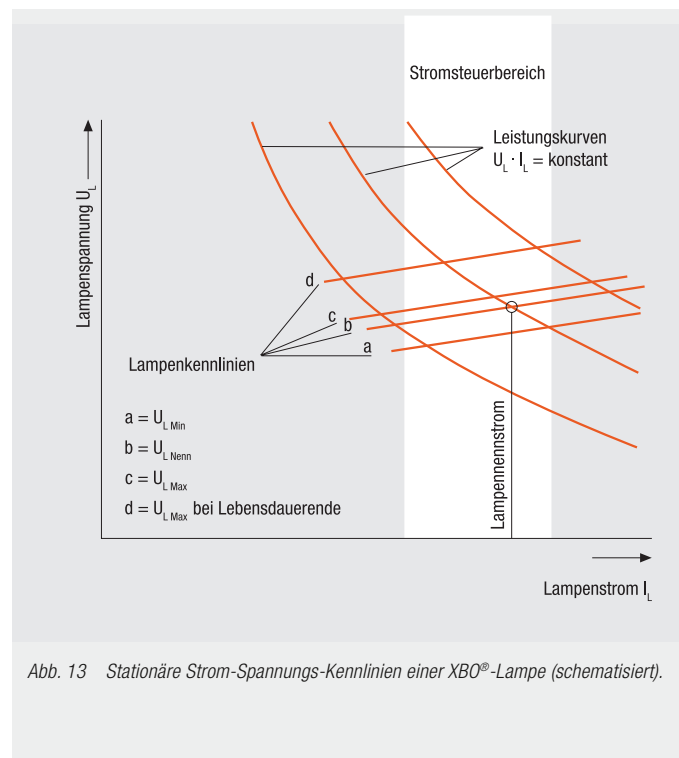
R_L = statischer differentieller Innenwiderstand

Die Grundspannung ist eine Rechengröße, die gebraucht wird, um den im Betriebsbereich praktisch linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung zu beschreiben. Wie Abb. 13 zeigt, verlaufen die Kennlinien zu größeren Strömen hin leicht ansteigend. Die Fertigungstoleranzen für einen Lampentyp drücken sich in einer Plus-Minus-Toleranz für die Grundspannung aus. Sie liegt typischerweise bei ± 2 Volt. Im Laufe der Lebensdauer der Lampen wächst die individuelle Lampenspannung als Folge einer leichten Erosion der Kathodenspitze und der damit verbundenen größeren Bogenlänge etwas an. Dies ergibt die oberste Toleranzgerade. Auch dieser Zuwachs liegt in der Größenordnung von 2 Volt.

Die meisten XBO®-Lampen sind **Konstant-Strom**-Lampen, d. h. sie sollen bei einem vorgegebenen Strom betrieben werden. Die Lampenspannung stellt sich dann je nach individueller Kennlinie ein.

Wiederum bei den meisten XBO®-Lampen wird ein **Strom-Steuer-Bereich** um den Nennstrom herum angegeben. Dieser kann dazu benutzt werden, die Helligkeit einer Lampe den individuellen Bedürfnissen anzupassen, oder den leichten Lichtstromverlust über die Lebensdauer durch mehr Strom und damit höhere Leistung auszugleichen.

Um einen möglichst stabilen Lampenbetrieb zu ermöglichen, soll die Ausgangskennlinie des Gleichrichters die Lampenkennlinie möglichst unter 90° schneiden.



Zündung

Im kalten Zustand sind XBO®-Lampen hervorragende Isolatoren. Das Anlegen der Lampenversorgungsspannung (z. B. der Gleichrichter-Leerlaufspannung) von beispielsweise 100 Volt bewirkt nichts. Zum Betriebsstart ist es erforderlich, durch besondere Maßnahmen die isolierende Gasstrecke zwischen den beiden Elektroden leitend zu machen, zu ionisieren. Dies geschieht in aller Regel durch eine Hochspannungsentladung, einen Blitz. Damit ein solcher Blitz überleitet in die stabile, stationäre Bogenentladung, müssen eine Reihe von Randbedingungen erfüllt sein. Dazu gehören:

- Eine genügend hohe Stoßspannung (Zündspannung) des Zündgerätes
- Ein ausreichend lang andauernder Zündimpuls
- Eine genügend hohe elektrische Energie im Zündfunken
- Ein genügend rasch einsetzender Stromfluss des Gleichrichters
- Eine ausreichende Leerlaufspannung des Gleichrichters

Reicht die **Stoßspannung** des Zündgerätes nicht aus, den Elektrodenabstand zu überbrücken, kommt es zu keinem Durchschlag in der Lampe. Reicht die Zündspannung aus, um einen Durchschlag zu erzielen, ist aber nicht genügend **Energie im Zündfunken** versammelt, erlischt der Funke wieder, ehe die Lampe in die Nähe ihres stationären Arbeitsbereiches kommt und der Gleichrichter für die Aufrechterhaltung der Entladung sorgen kann. Im praktischen Fall erkennt man ein kurzzeitiges Aufblitzen der Lampe.

Kann der Gleichrichter nach erfolgtem Durchschlag nicht schnell genug den erforderlichen Strom bereitstellen, verlöscht die Lampe ebenfalls wieder; ihr Aufblitzen hat gegenüber dem zweiten Fall unter Umständen nur unmerklich länger gedauert. Damit ein glatter Übergang von Funkenentladung zu stationärem Gleichstrombetrieb erfolgen kann, muss der Gleichrichter Minimalanforderungen bezüglich seiner **Leerlaufspannung** erfüllen. Diese liegt typischerweise bei einem Faktor 3 bis 4 über der Lampenspannung.

Aus praktisch-konstruktiven Erwägungen heraus wird die Zündspannung normalerweise als Serie von **Hochfrequenzimpulsen** erzeugt. Folgen die Impulse genügend schnell aufeinander (z. B. mit einer Wiederholfrequenz von 300 Hz), wird die Zündung der Lampe dadurch erleichtert, dass der durch den ersten Durchschlag erzeugte leitende Kanal zwischen den Elektroden durch die nachfolgenden Impulse aufrechterhalten und erweitert wird. Ist die Zündung der Lampe erfolgt, sollte das Zündgerät abgeschaltet werden. Wenn auch relativ klein, so kann doch die Zündenergie der Funken über längere Zeit die Elektroden schädigen. **Betriebszeiten** für das Zündgerät von 0,2 bis 0,5 s sind sinnvoll.

Grundsätzlich können XBO®-Lampen auch mit einem einzigen Impuls gezündet werden. Diese Methode wird mehr und mehr favorisiert, zum einen, um das ansonsten schnarrende Zündgeräusch zu reduzieren, zum anderen, um elektromagnetische Einstreuungen in Umfeldelektronik zu minimieren. Für **Ein-Impuls-Zündgeräte** gelten um etwa 20 % erhöhte Stoßspannungen, da bei ihnen der Unterstützungseffekt der Impulskette entfällt.

Der positive Einfluss eines **Zündhilfsdrahtes** wurde schon im Kapitel „Lampenkonstruktion“ beschrieben und ist dort nachzulesen (Seite 10).

Anlaufverhalten

Im stationären Zustand, nach Einprägen eines konstanten Stromes, haben XBO®-Lampen eine positive, leicht ansteigende Strom-Spannungskennlinie. Für die Zündung, die Einleitung einer Entladung zwischen den Elektroden, wurden die Parameter im vorigen Kapitel dargestellt. Sehr komplex ist das Lampenverhalten, unmittelbar nachdem durch den Zündfunken ein leitender Kanal, ein Ionisierungskanal, gelegt ist.

Betrachtet man die Lampe als ohmschen Widerstand (was sie natürlich nicht ist), so sinkt dieser nach dem Zünddurchschlag innerhalb sehr kurzer Zeit vom Wert „unendlich“ auf den sehr kleinen Wert von etwa einem zehntel Ohm. Wie er dorthin kommt, und dass bei diesem explosiv dynamischen Vorgang die Lampe nicht wieder ausgeht, hängt entscheidend von den Eigenschaften des Betriebsgerätes (Gleichrichter oder EVG) und der Verkabelung ab.

Einen typischen **Einschaltstromverlauf** für die ersten 3 ms bzw. 30 ms nach dem „Start“ zeigen Abb. 14 und 15.

Wichtig ist, dass der durch den Zündfunken geschlagene Kanal schnell genug ausreichend „Elektronen-Nahrung“ bekommt, um „am Leben erhalten“ zu werden, und dass andererseits die (noch kalten) Elektroden nicht durch zu hohe Ströme geschädigt werden.

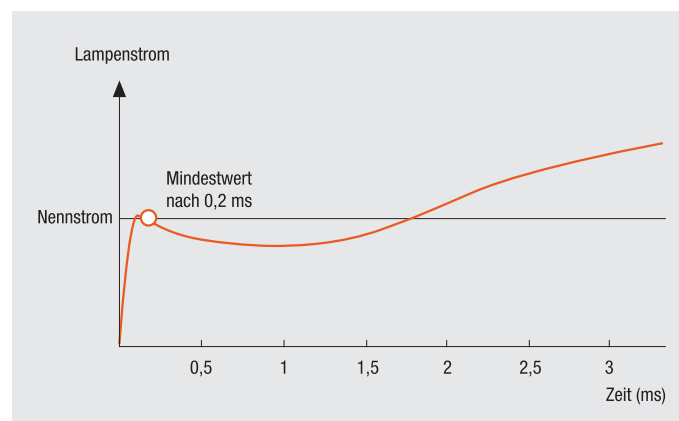
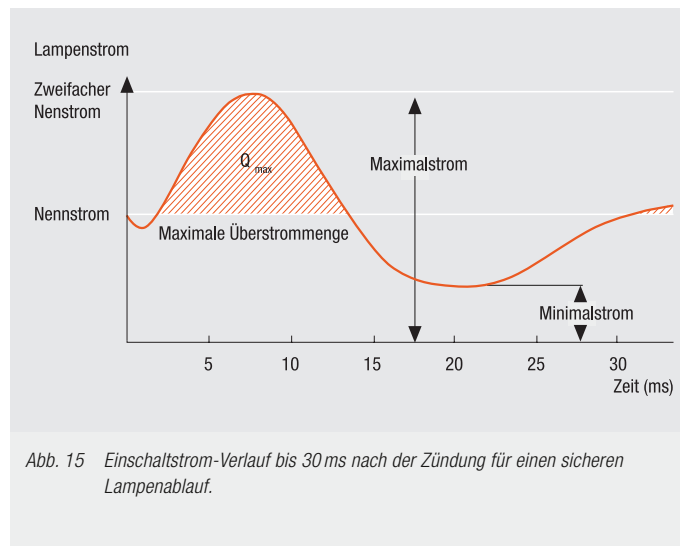


Abb. 14 Einschaltstrom-Verlauf bis 3 ms nach der Zündung für einen sicheren Lampenablauf.



Für einen sicheren Bogenaufbau müssen folgende Randbedingungen erfüllt sein:

1. Spätestens 0,2 ms nach dem Durchschlag muss der Lampennennstrom erreicht sein.
2. Der Einschaltstromstoß soll – für einen schonenden Anlauf – das Doppelte des Nennstromes nicht überschreiten; auf keinen Fall den in den Datenblättern genannten maximalen Spitzenwert.
3. Während der Anlaufphase darf der Strom nicht unter den halben Nennstrom sinken.
4. Die gesamte Überstrommenge (Ampere-Sekunden), die der Lampe in der ersten Sekunde zugemutet wird, darf nicht wesentlich mehr als 50 % über dem Nennwert (d. h.: Nennstrom mal Zeitdauer) liegen.

Forderung 1 lässt sich normalerweise nur mit einem **Zündhilfskondensator** parallel zu der Lampe erreichen. Damit auch Forderung 2 erfüllt wird, muss ihm in Reihe ein passend dimensionierter Entladewiderstand eingebaut sein. Forderung 3 bedeutet, dass innerhalb der Entladezeit des Zündhilfskondensators der Gleichrichter selbst schon genügend Strom liefern muss, um den Bogen aufrechtzuerhalten. Einhaltung von Forderung 4 dient zum Schutz der Kathode.

Moderne EVG können heute so dimensioniert werden, dass kaum oder gar kein Überstrom durch die Lampe fließt. Dieses Verhalten ist deutlich lampenfreundlicher und führt zu längerer Lampenlebensdauer.

Strompulsation

Grundvoraussetzung für den Betrieb von XBO®-Lampen ist Gleichstrom; Gleichstrom, wie er eigentlich nur von Batterien geliefert wird. Technischem, durch Gleichrichtung erzeugtem Gleichstrom merkt man immer seine Herkunft an. Diese äußert sich in einer Welligkeit, die dem Gleichstrom mehr oder minder stark überlagert ist. Die „Güte“ eines Gleichstroms wird als Prozentzahl seiner Welligkeit angegeben.

Der Begriff „Welligkeit“ muss schärfer gefasst und präzisiert werden. Ausschlaggebend für das Verhalten von XBO®-Lampen ist die unter dem Begriff „**Lampenstrom-Pulsation p_i** “ wohldefinierte Welligkeit:

$$p_i = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max}} \cdot 100\%$$

mit $i_{\max}$ und $i_{\min}$ dem Höchst- bzw. Tiefstwert des zeitlichen Stromverlaufes. Siehe Abb. 16.

Diese Pulsation muss so niedrig wie technisch möglich und kostenmäßig verträglich sein. Je geringer die Pulsation, umso besser das Langzeitverhalten der Lampen. Zu hohe Strompulsation ist der maßgebliche Faktor für reduzierte Lampenlebensdauer. Als maximal zulässige Werte sind festgeschrieben:

$P_i < 10\%$ für Lampen bis zu 3.000 W

$P_i < 5\%$ für Lampen über 3.000 W

Abb. 31 auf Seite 36 zeigt die Zerklüftung einer Kathode nach längerer Betriebszeit unter zu hoher Pulsation.

Reduziert werden kann die Pulsation des Lampenstroms durch **Glättungsglieder** im Gleichrichter; bis zu einem gewissen Grade sind Drosseln verwendbar, der überwiegende Teil der Glättung muss durch Kondensatoren hoher Kapazität bewerkstelligt werden. Diese Kondensatoren unterliegen einem Alterungsprozess, bei dem sie ihre Kapazität verlieren. Damit wird die Überwachung und Messung der Pulsation zu einem wichtigen Thema für den störungsfreien Betrieb der Lampen.

Technisch einwandfrei ist die **Messung der Pulsation** über einen induktionsarmen „Shunt“ (ein Serienwiderstand von einem zehntel Ohm oder weniger) im Strompfad der Lampe. Der Spannungsabfall über diesem wird mit einem Oszilloskop analysiert. Die Pulsation wird nach oben angegebener Formel berechnet.

Wichtig ist, dass wirklich die Strompulsation aufgenommen wird. Die Messung der Spannung über der Lampe oder gar der Leerlaufspannung des Gleichrichters führt unter Umständen zu völlig falschen Ergebnissen. XBO®-Lampen benehmen sich zum einen gegenüber dem Wechselstromanteil ähnlich wie reaktive Bauelemente (Induktivität, Kapazität), zum anderen ist selbst die stationäre Kennlinie (siehe Seite 16) sehr viel flacher als bei einem ohmschen Widerstand. Die **Spannungswelligkeit** ist deshalb stets deutlich kleiner als die Strompulsation.

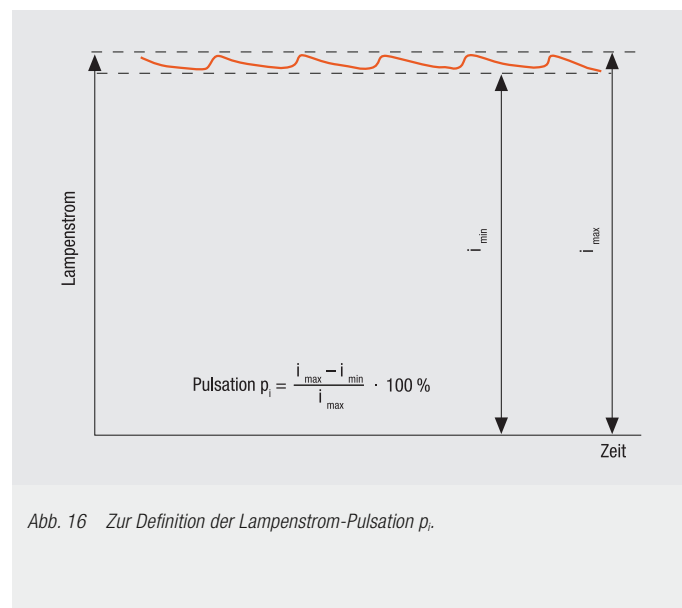
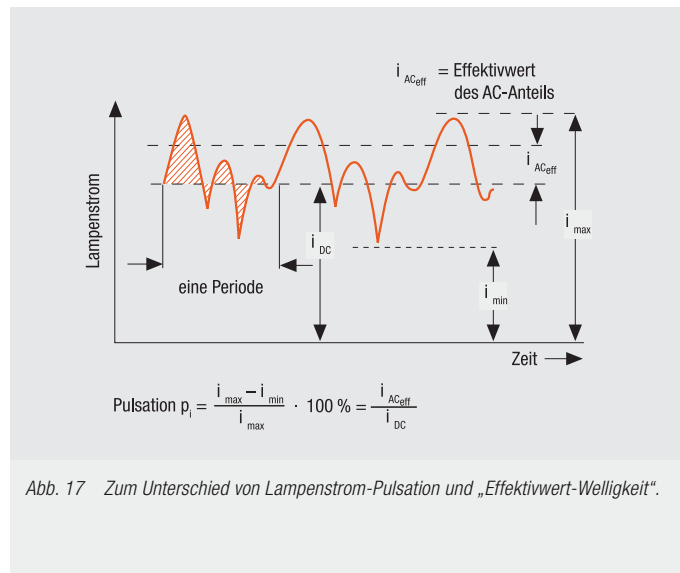


Abb. 16 Zur Definition der Lampenstrom-Pulsation p_i .



Ferner muss davor gewarnt werden, den Wechselstromanteil des Gleichstroms mit einem **Effektivwert**-Messgerät zu bestimmen. Abträglich dem Lampenverhalten sind die eigentlichen Stromspitzen auf dem Gleichstrom und nicht der Effektivwert des Wechselanteils. Zur Verdeutlichung des Unterschiedes von Effektivwert und momentanem Spitzenwert siehe Abb. 16 und 17. Bei in der Praxis vorkommenden Pulsationskurven ist ein Unterschied von einem Faktor 10 nicht unüblich.

Besser ist dagegen die Abschätzung der Pulsation über das Licht. Mit einer ausreichend schnellen Fotozelle und einem Oszilloskop lässt sich ohne großen apparativen Aufwand durch eine **Lichtmessung** rasch ermitteln, ob die Pulsation in der richtigen Größenordnung liegt. Bei Pulsationen im Bereich 5 bis 10 % beträgt die Überhöhung im Licht etwa 50 % (der Lichtstrom ist proportional dem Lampenstrom hoch 1,5).

Moderne, gut dimensionierte EVG können Strom von sehr geringer Welligkeit erzeugen. Werte deutlich unter 1 % sind die Regel. Diese geringe Welligkeit schont die Elektroden und führt zu maximaler Lampenlebensdauer. Problematisch kann sich die Fehlersuche bei defekten EVG gestalten. Da die Elektronik im Kilohertzbereich arbeitet, kann auch die Strompulsation sehr hohe Frequenzen aufweisen. Messungen der Strompulsation bei hohen Frequenzen erfordern hochwertiges und schnelles Messequipment und Erfahrung.

XBO®-Lampen sind Lichtquellen hoher Leuchtdichte, erzeugen eine nicht unerhebliche Menge IR- und UV-Strahlung und stehen unter hohem inneren Druck. Aus diesen 3 Gründen dürfen XBO®-Lampen nur in geschlossenen Gehäusen betrieben werden.

Dem speziellen Anwendungszweck – ob für die Filmprojektion, die Videoprojektion, als Scheinwerfer oder in der Solarsimulation – angepasst, werden diese Geräte zweckentsprechend konstruiert sein. Folgende Merkmale müssen ihnen allen jedoch gemeinsam sein:

Schutz vor **Blendung**: Die Lampenhäuser müssen so gestaltet sein, dass der Lichtbogen nicht ungeschützt betrachtet werden kann. Die Leuchtdichte des Bogens ist so hoch, dass es zu Netzhautzerstörungen kommen kann.

Schutz vor IR- und **UV-Strahlung**: Die Lampenhäuser müssen so gestaltet sein, dass Strahlung von der Lampe weder direkt noch als Streustrahlung ungefiltert das Gehäuse verlassen kann. Ausnahmen sind natürlich eigens für die Nutzung dieser Strahlung konstruierte Leuchten.

Schutz vor **Quarzglassplittern**: Die Lampenhäuser müssen so gestaltet sein, dass bei einem eventuellen Platzen der Lampe im Betrieb keine Quarzglassplitter nach außen treten können.

Zum Ein- und Ausbau der Lampe soll genügend Platz vorgesehen werden, so dass die **Schutzhülle** der Lampe erst im letzten Moment vor dem Schließen des Lampenhauses abgenommen werden muss.

Der **mechanischen Halterung** der Lampe ist besondere Sorgfalt zu widmen. Um Ausdehnung und Verwindung des Gehäuses beim Aufheizen durch den Lampenbetrieb zu kompensieren, darf die Lampe nur einseitig fest eingespannt werden. Das andere Ende muss frei beweglich sein; bei größeren Lampen in waagerechter Brennlage ist eine nachgebende, weiche Unterstützung notwendig.

Zur **Beobachtung des Bogens** ist es sinnvoll, geeignete Bohrungen und Sichtscheiben vorzusehen; dies gilt vor allem für waagrecht betriebene Lampen, bei denen ein Magnet zur Bogenstabilisierung justiert werden muss.

Der **elektrische Aufbau** muss den einschlägigen Regeln und Sicherheitsanforderungen folgen. Nützlich ist ein Türkontakt, der die Versorgungsspannung bei Öffnen des Lampenhauses vollständig unterbricht. Zu beachten sind die hohen Stromstärken, die XBO®-Lampen verlangen, und die hohen Spannungen (10–60 kV) die zu ihrer Zündung notwendig sind. Da der Entladungsbogen durch Magnetfelder leicht ablenkbar ist, muss Sorge getragen werden, dass keine Streufelder von der elektrischen Verdrahtung und den Komponenten am Bogenort wirken können. Das gilt natürlich gleichermaßen für remanente Felder aus dem Lampengehäuse selbst.

Die hohe Leistungskonzentration von XBO®-Lampen macht eine passende **Kühlung** unumgänglich. Bei großen, offenen Lampenhäusern wird in einigen Fällen eine günstig geführte Konvektionskühlung ausreichen. Bei engen Geräten und bei sehr gedrungen aufgebauten Lampen ist generell eine Zwangskühlung unumgänglich. Einzelheiten zur Kühlung der Lampen siehe Kapitel „Betriebsparameter – Kühlung“, Seite 28.

Zur Unterstützung der lampenhausinternen Kühlung ist häufig eine zusätzliche Absaugung des Gehäuses durch einen externen Ventilator angebracht. Notwendig ist diese bei nicht „ozonfreien“ Lampen, damit keine Belästigung und Gefährdung des Bedienpersonals entsteht.

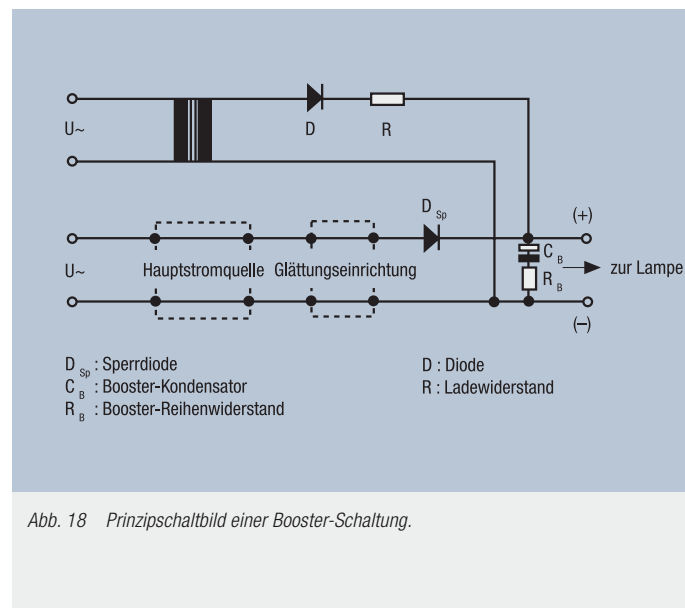
Vorschaltgeräte

XBO®-Lampen werden in der Regel an Gleichrichtern oder EVG betrieben. Grundsätzlich ist ein Betrieb direkt an einer **Batterie** auch möglich. Probleme ergeben sich hierbei u. a. durch die häufig geringe Spannung der Batterie und bei der Regelmöglichkeit für den Strom.

Die generellen Anforderungen, denen Vorschaltgeräte genügen müssen, um sie für den Betrieb von XBO®-Lampen geeignet zu machen, sind in dem Kapitel „Elektrische Eigenschaften“, Seite 16, dargelegt.

Gleichrichter werden sowohl für den Einphasen-Betrieb als auch für den **Mehrphasen-Betrieb** hergestellt. Im letzteren Fall ist die notwendige Glättung des Lampenstromes weniger aufwendig. Allerdings können extrem schiefe Drehstromnetze unbemerkt zu erhöhter Strompulsation führen. Auch müssen Warneinrichtungen vorgesehen werden, dass bei Ausfall einer Phase die Lampe nicht mit deutlich zu hoher Pulsation weiter betrieben wird.

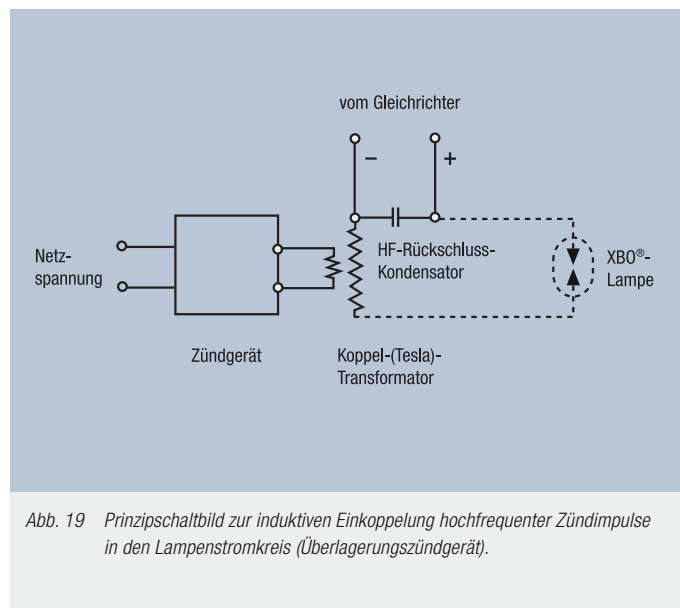
Da bei konventionellem (nicht elektronischem) Aufbau des Gleichrichters die Höhe der Leerlaufspannung ein deutlicher Kostenfaktor ist, werden häufig sogenannte **Booster**-Schaltungen eingesetzt. Siehe Abb. 18. Hierbei wird die Hauptstromquelle, die für den Dauerbetrieb bei Nennleistung ausgelegt ist, für eine Leerlaufspannung deutlich unterhalb der Mindestanforderung konzipiert. Die (nur) im Augenblick der Zündung notwendig höhere Spannung wird von einem Zusatzgleichrichter geliefert. Aus Dimensionierungsgründen der elektrischen Bauteile sollte die Leerlaufspannung des Boosters deutlich über der Mindestanforderung für normale Gleichrichter liegen.



Zündgeräte

Zur Zündung von XBO®-Lampen wird Hochspannung benötigt. Einzelheiten sind in dem Kapitel „Elektrische Eigenschaften – Zündung“ dargelegt, Seite 17.

Die gängigsten Typen von Zündgeräten sind sogenannte Überlagerungszündgeräte auf Hochfrequenzbasis. Eine typische Schaltung von Gleichrichter – Überlagerungszündgerät – Lampe zeigt Abb. 19 auf Seite 24. Durch einen Tesla-Transformator wird die Hochspannung in den Lampenstromkreis eingekoppelt. Auch heute noch wichtige Komponente für diese Zündgeräte ist eine **Funkenstrecke**, die als Hochspannungsschalter funktioniert. Aufgrund ihrer Konstruktion ist sie einer gewissen Abnutzung unterlegen; sie muss deshalb in regelmäßigen Abständen entweder ausgetauscht oder nachjustiert werden. Bei Veränderung des Abstandes der Elektroden der Funkenstrecke verändern sich sowohl Höhe als auch Zahl der Zündimpulse – im Regelfall zu schlechteren Werten.



Moderne Zündgeräte sind vollelektronisch aufgebaut und unterliegen keinem Verschleiß. Häufig sind sie vom Typ Ein-Impuls-Zündung, und damit wegen ihrer reduzierten elektromagnetischen Streustrahlung besonders schonend zur übrigen peripheren Elektronik.

Alle Zündgeräte sollten sich nach erfolgter Zündung der Lampe selbsttätig abschalten, um die Lampe nicht zu beschädigen. **Mindestbetriebszeiten** sollten bei 0,2 s, maximale Betriebszeiten bei 0,5 s liegen.

Um (hochfrequente) Hochspannungsverluste auf dem Weg vom Zündgerät zur Lampe zu minimieren, soll der Abstand dieser beiden Komponenten so klein wie möglich – in keinem Fall größer als 50 cm – sein.

Betriebsparameter

Brennlage

Die ersten XBO®-Lampen waren allein für senkrechten Betrieb ausgelegt und geeignet. Nur in dieser Brennlage konnten ausreichend gute Lampeneigenschaften (Bogenstabilität) erreicht werden. Zur optimalen Nutzung des Lichtstroms wurde ein Doppel-Spiegelsystem benutzt, bestehend aus einem elliptischen Hauptspiegel und einem sphärischen Hilfsspiegel. Erst um 1970 gelang es, die Lampen auch für die waagerechte Brennlage zu bauen. Diese Brennlage ermöglichte die Verwendung von Beleuchtungssystemen mit tiefgezogenen elliptischen Spiegeln (wie sie schon für Kohlebogen üblich waren), die einen um ca. 30 % höheren Beleuchtungswirkungsgrad bieten. Abb. 20 zeigt Prinzipskizzen der beiden Gerätevarianten.



Abb. 20 Optische Konfiguration von „senkrechtem“ und „waagrechtem“ Lampenhaus für Kinoprojektoren.

Die funktionsmäßig günstigste Brennlage für XBO®-Lampen ist der **senkrechte Betrieb**, Anode oben. Hier ist alles rotationssymmetrisch. Die aus der Kathode austretenden Elektroden reißen zum einen Gasteilchen mit, zum anderen bewirkt die Aufweitung des heißen Bogens einen Gasstrom, einen Jet, in Richtung Anode. Bei der Brennstellung „Anode oben“ wirkt die auf den Bogen ausgeübte Konvektionskraft in gleicher Richtung. Das Ergebnis: ein äußerst ruhig brennender Bogen, der durch elektromagnetische und thermodynamische Kräfte gleichermaßen stabilisiert wird.

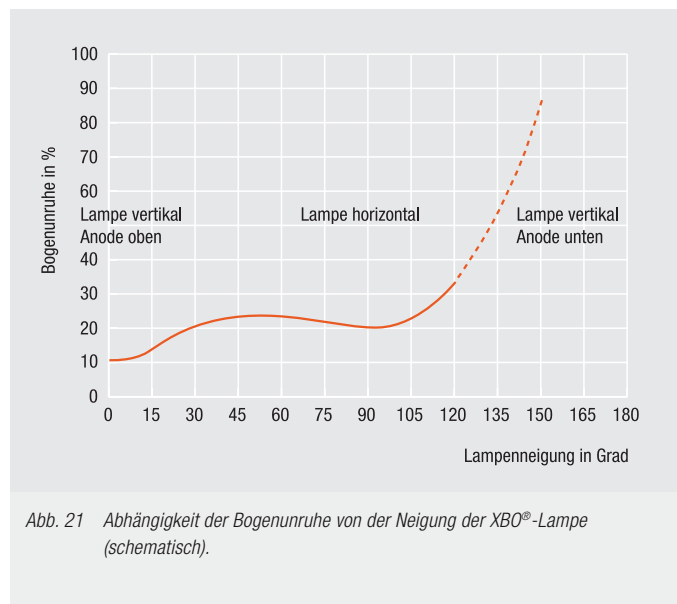
Wird eine Lampe verkehrt herum eingesetzt, Anode unten, wirken Gasjet und Konvektion gegeneinander. Der Bogen zappelt, die Lampe ist aufgrund der Bogenunruhe unbrauchbar.

Es ist klar, dass jede Neigung der Lampe die stabilisierende Symmetrie stören muss. Je größer die Neigung, umso größer die Störung. Bei Lampen für den senkrechten Betrieb ist deshalb die **zulässige Neigung** typischerweise auf $\pm 30^\circ$ begrenzt.

Bei **waagerechter Brennlage** greift die Konvektionskraft senkrecht zur Flussrichtung des heißen Xenongases an; der Bogen wird nach oben abgelenkt und brennt halb an der Anode vorbei. Erst durch Einführen der magnetischen Bogenstabilisierung und der Entwicklung von Lampen mit sehr kurzen Elektrodenabständen bei hohen Strömen und neuer Kolbengeometrie wurde diese Betriebsweise ermöglicht.

Je kürzer bei einem vorgegebenen Strom die Bogenlänge, umso steifer ist der Bogen; umso weniger leicht lässt er sich beispielsweise von der Konvektion ablenken.

Nach der reinen senkrechten Brennlage ist die waagerechte diejenige mit noch den größten Symmetriefaktoren. Abweichungen vom horizontalen Betrieb, vor allem die **Neigung** nach unten, wird zu deutlich verstärkter Unruhe des Bogens führen. Siehe Abb. 21 auf Seite 26. Von größtem Nachteil ist die Neigung der Lampe mit der Anode nach unten. In diesem Fall wirkt die Konvektionskraft zunehmend gegen die Strömung des Xenongases; die Bogenunruhe wird dramatisch schlechter.



In Anwendungsfällen, in denen eine größere Neigung nach unten sich nicht vermeiden lässt, ist daher zu erwägen, die Lampe in dem optischen System umzudrehen, so dass die Kathode nach unten zu liegen kommt. Das kann unter Umständen im Einzelfall zu einem Nutz-Lichtverlust führen (abhängig von der Auslegung des optischen Beleuchtungssystems), führt aber auch zu einem deutlich besseren Lampenverhalten.

Jede Lampe für waagerechten Betrieb kann in der Regel auch senkrecht betrieben werden.

Magnetische Bogenstabilisierung Wie im vorigen Kapitel dargelegt, wirkt bei waagerechtem Betrieb die thermische Konvektion auf den Bogen senkrecht zu seiner Strömungsrichtung. Abhängig von der Steifigkeit des Bogens ergibt sich eine mehr oder minder große Ablenkung des Bogens aus der Achse Kathode-Anode heraus.

Zu einem großen Teil kann diese Ablenkung kompensiert werden. Dabei macht man sich zu Nutze, dass der Gasstrom gekoppelt ist mit dem Elektronenfluss. Elektronen lassen sich durch magnetische Kräfte ablenken. Ein passend installiertes Magnetfeld mit Kraftkomponente nach unten kann daher die Wirkung der Konvektionskraft (fast) vollständig aufheben.

Die notwendige **Größe des Magnetfeldes** am Ort des Bogens ist klein und liegt nur wenig oberhalb des Erdmagnetfeldes. Erzeugt werden kann das Feld praktischerweise mit einem kleinen stabförmigen Permanentmagneten (von ca. 5 cm Länge), der möglichst senkrecht unter dem Bogen, quer zur Lampenachse angebracht wird. Bei Blick entlang der Lampe von der Kathode zur Anode muss dabei der Nordpol rechts liegen; im umgekehrten Fall würde der Bogen erst recht nach oben gedrückt werden. Ist die Montage senkrecht unter der Lampe aus räumlichen Gründen nicht möglich, kann der Magnet auch in Richtung der Lampenachse vor- oder zurückversetzt werden.

Die Anbringung des Magneten unterhalb der Lampe hat zwei Vorzüge. Zum einen hat sich herausgestellt, dass ein „Herunterziehen“ des Bogens zu stabileren Verhältnissen führt als ein „Hinunterdrücken“. Zum anderen ist die Aufheizung des Magneten durch die Lampe besser zu kontrollieren. Erreicht dieser eine Temperatur von ca. 600 °C (materialabhängig), kann er seine Magnetisierung verlieren.

Zur einwandfreien Kompensation der Konvektionskraft ist eine **Justierung des magnetischen Feldes** unumgänglich. Die Stärke des Magnetfeldes am Bogenort kann durch Abstandsänderung Magnet-Bogen variiert werden; je näher, desto stärker ist die magnetische Kraft. Vereinzelt werden auch „aktive“ Magneten, stromdurchflossene Spulen mit Eisenkern, verwendet. Bei ihnen kann die Feldänderung sehr einfach durch Einstellung der Stromstärke verändert werden. A und O der Justierung ist jedoch, dass die Bogenform und -lage beobachtet werden kann.

Am wichtigsten ist der Blick auf die horizontale Lage des Bogens. Um aber sicherzugehen, dass nicht aus Versehen durch ein schiefes Magnetfeld der Bogen quer zur Achse gelenkt wird, ist auch eine Beobachtungsmöglichkeit von oben empfohlen. Im Allgemeinen wird es nötig sein, entsprechende Beobachtungsöffnungen in den Reflektor sowie die Außenwand des Lampenhauses einzubringen.

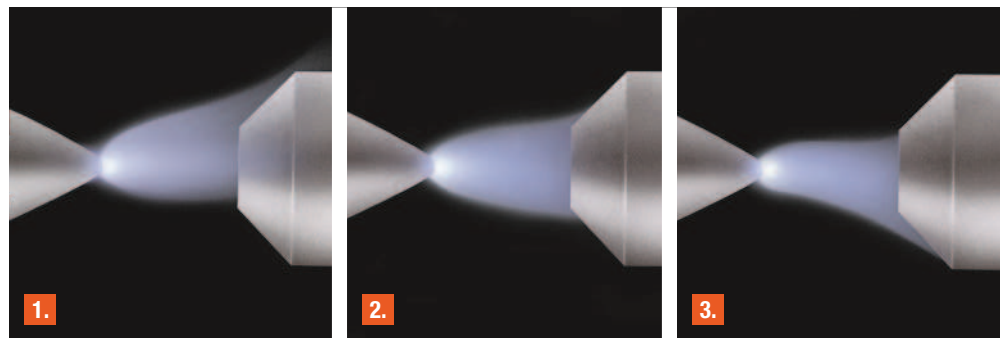


Abb. 22 Zur magnetischen Bogenstabilisierung. Unstabilisiert (1.) Gut stabilisiert (2.) Überstabilisiert (3.)

Abb. 22 zeigt, wie sich die Bogenform beim Justieren des Magnetfeldes verändert. Erstrebenswert ist ein gut mittiges Auftreffen des Bogens auf der Anodenvorderfläche. Abb. 35, Seite 43, zeigt eine typische Anodendeformation (nasenförmige Aufwachsung), wie sie sich bei länger andauerndem Betrieb ohne oder mit falsch eingestellter magnetischer Stabilisierung ergibt.

Für einen Teil des Typenspektrums waagerechter Lampen wird keine magnetische Stabilisierung verlangt; der Bogen ist steif genug, um ein ausreichend gutes Lampenverhalten über die Lebensdauer zu ermöglichen. Durch eine optimal ausgerichtete magnetische Stabilisierung lässt sich zwar auch das Verhalten dieser Lampen noch verbessern. Dennoch gilt in diesem Fall der Grundsatz: keine magnetische Stabilisierung ist besser als eine schlechte (schlecht justierte).

Drehung der Lampe

Als in den 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts die horizontale Brennlage eingeführt wurde, war die Kolbenschwärzung noch das Lebensdauer begrenzende Phänomen bei XBO®-Lampen. Durch die horizontale Brennlage hat sich der Kolbenbelag nicht mehr im abgeschatteten Bereich hinter der Anode abgeschieden, sondern verteilte sich auf den oberen Bereich des Kolbens, im sichtbar relevanten Bereich. Die Folge war zum einen eine Verminderung des Lichtstromes, und zum anderen starke Kolbenaufheizung durch Absorbierung der Strahlung im geschwärzten Bereich.

Aus dieser Zeit stammt die **Empfehlung**, die Lampe nach halber Lebensdauer um 180° um die Lampenachse zu drehen. Dadurch wurde die Schwärzung gleichmäßiger über den Kolben verteilt und lokale Überhitzung vermieden.

Moderne Elektrodenmaterialien sind mittlerweile derart verbessert, dass Schwärzung unter normalen Umständen nicht mehr auftritt. Das Drehen der Lampe während der Lebensdauer ist nicht mehr nötig.

Heute ist in der Regel die Bogenunruhe das Lebensdauer begrenzende Phänomen. Im Hinblick darauf kann das Drehen der Lampe sogar nachteiligen Einfluss haben. Durch die Drehung muss der Bogen an der Kathode an einer neuen Stelle ansetzen. Dies kann vorübergehend, bei manchen Lampen auch dauerhaft, zu stärkerer Bogenunruhe führen.

Kühlung

Ein Teil der XBO®-Lampentypen kommt ohne forcierte Kühlung aus. Vor allem dann, wenn die Lampen in großen, offenen Lampenhäusern betrieben werden und durch günstige konstruktive Auslegung eine Kaminwirkung erreicht wird. Bei anderen Lampentypen ist die Leistungskonzentration jedoch so hoch, dass eine forcierte Kühlung der Sockel-(Anschluss-)teile und ggf. auch eine Kühlung des Quarzglaskolbens unumgänglich ist.

Gekühlt wird mit Luft. Der durch geeignete Ventilatoren erzeugte Kühlluftstrom soll dazu möglichst zylindersymmetrisch zur Lampenachse geführt werden. In der Regel wird in horizontalen Kinolampenhäusern, bei denen die Lampen mit der Kathodenseite im Spiegel stecken, von dieser her in Richtung Anode geblasen. Blasen ist günstiger als Saugen, weil sich so recht einfach ein definiert fließender Luftstrom einstellen lässt. Bei senkrechtem Lampenbetrieb ist die Kühlung von der (oberen) heißen Anodenseite her insgesamt günstiger; der Kolben wird so durch schon vorgewärmte Luft gekühlt, was mögliche Turbulenzen im Lampeninnern reduziert.

Kriterien für eine ausreichende Kühlung sind in erster Linie die **Sockeltemperaturen**. Diese dürfen 230 °C nicht überschreiten. Messmittel sind praktischerweise Temperaturaufkleber oder Temperaturmessfarben. Die Grenztemperaturen dürfen auch unter ungünstigen Umständen, wie hohe Umgebungstemperatur oder Verschmutzung von Filtern im Kühlluftstrom, nicht überschritten werden. Unter Umständen ist ein speziell auf die Sockel ausgerichteter Kühlluftstrom sinnvoll.

Bei den Lampentypen, die von Haus aus eine **Kolbenkühlung** benötigen, soll die Luftgeschwindigkeit am Lampenäquator im Abstand von 5 mm von der Oberfläche etwa 5–8 m/s betragen. Messmittel ist dazu ein handelsübliches Anemometer. Von einer Messung der Kolbentemperatur ist abzuraten. Erstens liegt sie mit 600–900 °C recht hoch, zweitens muss dazu das Lampenhaus bei brennender Lampe geöffnet sein. Das ist zumindest potentiell gefährlich (UV-Strahlung, Platzerisiko). Vermieden werden muss ein einseitiges Anblasen des Kolbens. Dadurch werden zusätzliche Spannungen im Quarzglas und eine zu Turbulenzen führende Unsymmetrie der inneren Konvektion erzeugt. Bogenunruhe und Platzergefahr wären die Folge.

Eine zu **starke Kühlung** ist ungünstig, da sie ebenfalls durch Turbulenzen im Lampenkolben zu erhöhter Bogenunruhe führen kann. Sinkt die Lampenspannung mit Kühlung um deutlich mehr als 1 Volt gegenüber dem ungekühlten Betrieb, ist in der Regel die Kühlung zu kräftig.

Einige Lampentypen werden mit speziellen **Kühllufttrichtern** für die Sockel geliefert, die einen Teil des Luftstroms in das Innere der Sockel leiten sollen. Sorgfalt ist nötig bei der korrekten Anbringung der Trichter, die abhängig ist von der Richtung des Kühlluftstromes. Zu beachten ist sowohl die Öffnungsrichtung als auch die Größe der beiden Trichter. Siehe Abb. 23.

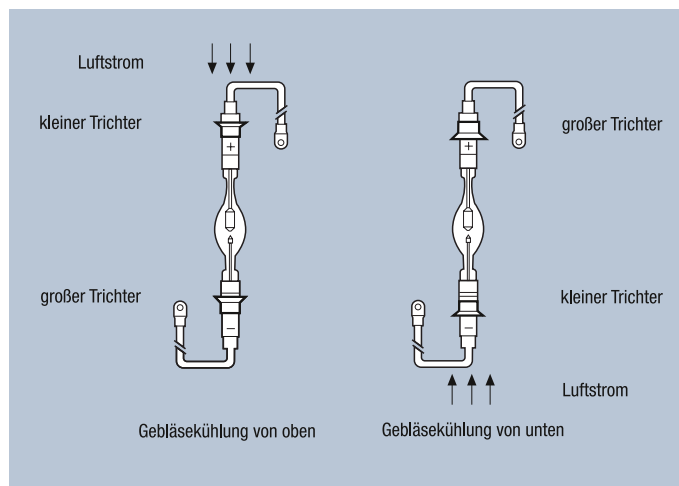


Abb. 23 Zur korrekten Anbringung der Kühl-Trichter bei Kühl-Luftstrom von oben oder unten.

Neben dem inneren Kühlkreislauf hat sich in vielen Fällen eine externe (genügend stark dimensionierte) Absaugung des gesamten Lampenhauses bewährt. Bei nicht „ozonfreien“ Lampen ist eine Absaugung des Lampenhauses ins Freie zum Schutz vor Ozonschädigungen vorgeschrieben. Abb. 24 zeigt eine Prinzipskizze zum Thema.

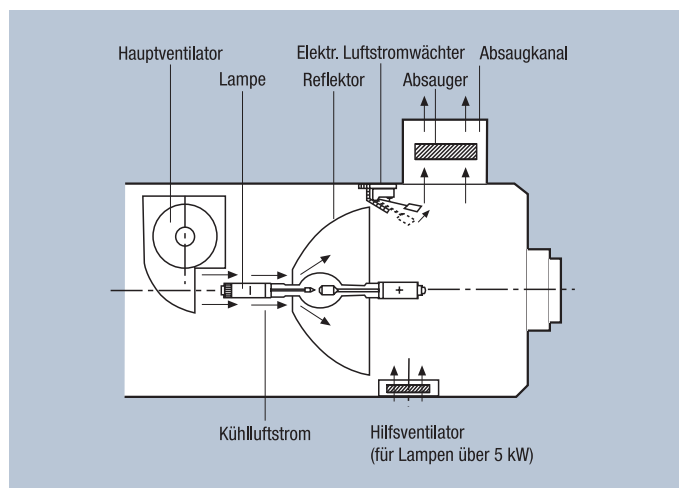


Abb. 24 Prinzip-Querschnitts-Skizze einer typischen Kühlungsanordnung in einem Kinolampenhaus mit innerem Ventilator und externer Absaugung.

Stromsteuerbereich

Die weitaus meisten XBO®-Lampen verfügen über einen Stromsteuerbereich. Dies ist ein Bereich um den Nennstrom herum, in dem die Lampen betrieben werden können, um sich den individuellen Erfordernissen der Anwendung anzupassen. Mehr Strom bedeutet mehr Licht, aber in der Regel auch etwas kürzere Lebensdauer (durch stärkere Belastung der Elektroden). Beste Lebensdauerergebnisse ergeben sich in der Regel dann, wenn die Lampen anfänglich mit leichtem Unterstrom betrieben werden, der dann bis zum Ende der Nutzungsdauer bis auf den Maximalwert getrieben wird. Ausgleich des leichten Lichtverlustes durch Schwärzung während der Lebensdauer ist der primäre Sinn des Stromsteuerbereiches. Dauerhaft die Lampen mit **Minimalstrom** zu betreiben, ist nicht sinnvoll. Eine erwartete Lebensdauer-Verlängerung tritt häufig nicht ein, da der Bogen an der Kathode sich kontrahiert, ein kleineres Gebiet heißer macht, und damit mögliche Gewinne in Lebensdauer durch erhöhte Schwärzung wieder kompensiert. Wird die Minimalleistung gefahren, weil die Lampe zu hell ist, ist es in den meisten Fällen sinnvoll, den nächstniedrigeren Leistungstyp einzusetzen.

Dauerhaft die Lampen mit **Maximalstrom** zu betreiben, ist in der Regel nicht sinnvoll. Gegenüber dem Nennstrombetrieb ergibt sich in jedem Fall eine Lebensdauerverkürzung. Wo diese Betriebsart unumgänglich ist, muss auch geprüft werden, ob sich nicht die nächsthöhere Leistungsstufe rentiert.

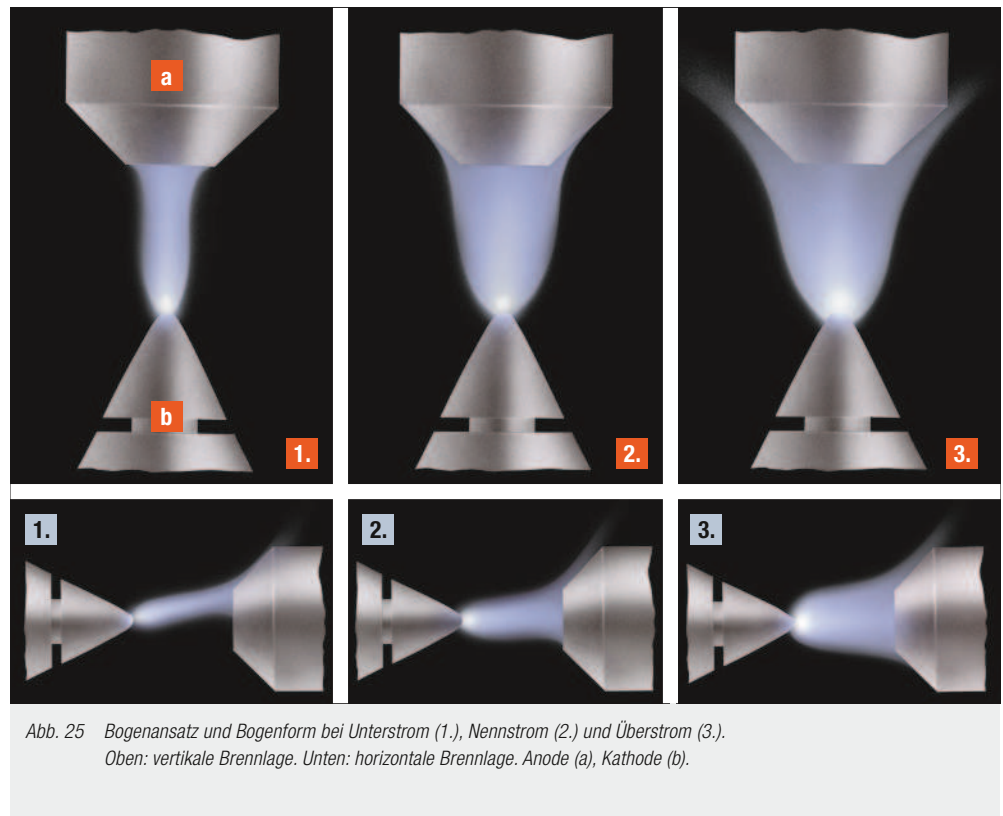


Abb. 25 zeigt schematisch die Veränderung der Bogenform und des Bogenansatzes an der Kathode bei Abweichungen vom Nennstrom für vertikalen und horizontalen Betrieb der Lampe.

Häufig besteht der Wunsch, z. B. in Vorführpausen, die Lampen mit einem Standby-Strom zu fahren: um Strom zu sparen, um die Aufheizung des Gerätes zu vermindern, um die Lebensdauer der Lampe zu erhöhen. Grundsätzlich sinnvoll ist der Standby-Betrieb in Hinblick auf die vorstehend angeführten Gründe, solange die Stromabsenkung nicht weiter als bis auf den Minimalstrom des Stromsteuerbereiches hinab erfolgt. Mit geringeren Strömen – im Bereich zwischen Minimalstrom und **unterem Grenzwert** – über längere Zeit zu fahren, ist kritisch zu beurteilen. In den meisten Fällen dürften negative Elektrodeneffekte einen erhofften Gewinn mehr als kompensieren.

Schalthäufigkeit

XBO®-Lampen werden für ihre jeweilige Anwendung optimiert. Durch die konstruktiven Unterschiede ergeben sich auch Unterschiede in Bezug auf den Betriebszyklus. Lampen für die konventionelle Kinoanwendung sind für einen mittleren Betriebszyklus von etwas 90 Minuten optimiert und erreichen unter diesen Umständen ihre maximale Lebensdauer. In der Videoprojektion, bei Effektlichtanwendungen oder der Solarsimulation werden die Lampen auf längere Zykluszeiten optimiert. Wird die Lampe für eine kurze Pause nicht benötigt, empfiehlt es sich im Allgemeinen, die Lampe brennen zu lassen, wenn die Pause weniger als 10 Minuten beträgt. Bei Lampen mit extrem kurzen Bögen, wie sie in der Videoprojektion üblich sind, kann es im Dauerbetrieb zu Überlastungen der Anode kommen. Hier kann die Lebensdauer deutlich verlängert werden, wenn die Lampe nach einigen Stunden eine Abkühlphase erfährt. Zündungen sind zwar auch bei XBO®-Lampen nicht Lebensdauer verlängernd, schädigen die Lampen aber deutlich weniger, als dies bei Lampen mit Quecksilberfüllung der Fall ist. Lampen mit Quecksilberfüllung arbeiten während der Zündphase im Unterdruckbereich, während XBO®-Lampen auch im kalten Zustand bei 5–15 bar Gasdruck starten. Der hohe Druck erleichtert die Anlaufphase für die XBO®-Kathode.

Lampenverhalten

Lebensdauer

Unter der Mittleren Lebensdauer von XBO®-Lampen versteht man diejenige Betriebsdauer, nach der die Hälfte der Lampen eines Typs, aus einer nicht zu geringen Anzahl, nicht mehr den spezifizierten Werten genügen muss. Für die hier betrachteten Lampen bedeutet das, dass nach dieser Zeit die Lampen einen **Lichtstromrückgang** von 30 % aufweisen dürfen.

Vorausgesetzt ist dabei, dass die Lampen an ordnungsgemäßen Geräten (Gleichrichter, Zündgerät, Lampenhaus) und gemäß ihrer Spezifikation (Strom, Brennlage, Schaltrhythmus) betrieben werden.

Lebensdauer verkürzende Faktoren sind vor allem:

- Überstrom
- Unterstrom
- Schalthäufigkeit (typenabhängig)
- Hoher Einschaltstrom
- Hohe Strompulsation
- Ungünstige Brennlage, Neigung
- Falsche oder ungenügende magnetische Bogenstabilisierung
- Ungenügende Kühlung

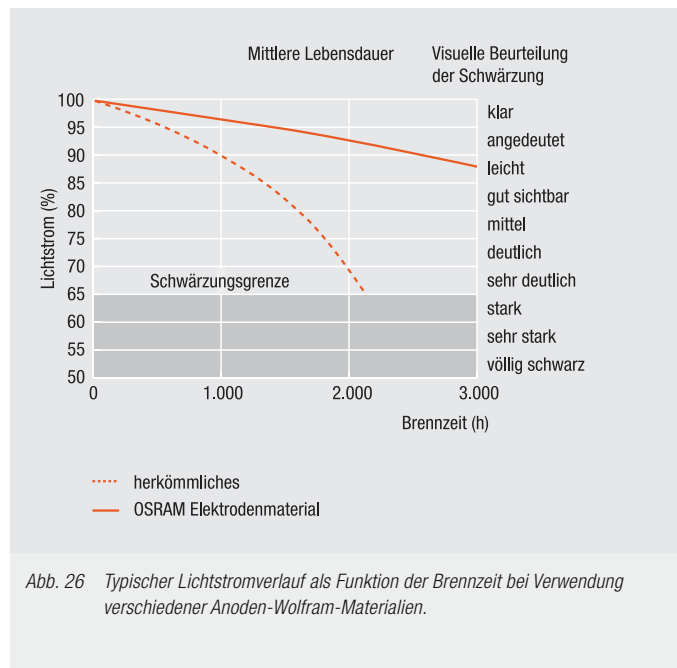
Normalerweise können XBO®-Lampen über ihre Mittlere Brenndauer hinaus betrieben werden, solange sie der Anwendung noch genügen. Allerdings sollten sie nach Überschreiten dieses Wertes um 25 % ausgetauscht werden. Nach einer solchen Betriebszeit ist, auch bei noch akzeptabler Schwärzung, die Rekristallisation des Quarzglases meistens soweit fortgeschritten, dass das Platzerisiko deutlich ansteigt. Rekristallisation bedeutet, dass unter dem Einfluss der hohen Kolbentemperatur und des Temperaturzyklus beim Ein- und Ausschalten, die Struktur des Quarzglases sich verändert: sie geht von der glasförmigen Phase in die kristalline Phase über. Damit verliert das Quarzglas zunächst seine Festigkeit. In einem fortgeschrittenen Zustand wird es dann auch milchig trüb. Dieser Faktor kommt immer deutlicher zum Tragen, da durch grundlegende Entwicklungen in der Wolframmetallurgie die Schwärzung immer stärker unterdrückt wird. Siehe nächsten Abschnitt.

Schwärzung

XBO®-Lampenkolben schwärzen über die Lebensdauer. Diese Schwärzung wird hervorgerufen durch von den Elektroden allmählich verdampfendes Wolframmaterial, das sich auf dem „kühlere“ Kolben niederschlägt. Dieser Niederschlag erfolgt dort, wohin der „Wolframdampf“ durch die innere Gasströmung hingetragen wird. Bei senkrecht brennenden Lampen ist dies meistens der „dunkle“ Bereich hinter der Anode. Damit ist die Kolbenschwärzung praktisch unschädlich für den Lichtstrom, den die Lampe abgibt. Anders bei waagrecht brennenden Lampen: von den Elektroden abdampfendes Material wird mit dem Gasjet von Kathode zu Anode und der Konvektionsströmung geradewegs auf den oberen Kolbenbauch getragen.

Schwärzung hat den Nachteil der **Lichtminderung** und zusätzlich der erhöhten Aufheizung des Quarzglases durch die Strahlungsabsorption.

Da die Schwärzung von den Elektroden kommt, sind deren **Eigenschaften** und Zustand von ausschlaggebender Bedeutung. Durch grundlegende metallurgische Entwicklungen ist es in den letzten Jahren gelungen, die Standzeit der Elektroden – in diesem Zusammenhang vor allem der Anode – deutlich zu verbessern.



Die Abb. 26 zeigt exemplarisch, welche Erfolge erzielt wurden. Schlüssel dabei ist vor allem, neben Zusammensetzung und Dichte des Materials, die Beherrschung der **Struktur des Wolframmetalls**. Größe, Form und Orientierung der einzelnen mikroskopisch kleinen Wolframkristallite bestimmen, wie die Anode sich makroskopisch während der Lebensdauer verhält. Siehe Abb. 27.

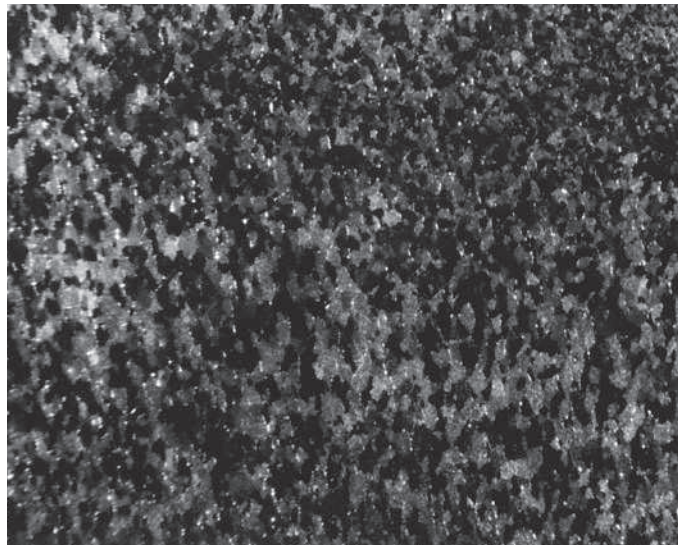


Abb. 27 Kornstruktur des Wolframmaterials im oberflächennahen Bereich einer Anode.

Eine gleich bleibende Geometrie sichert ein gutes Schwärzungsverhalten. Eine leichte Kolbenschwärzung, die ab der Hälfte der Lebensdauer sichtbar wird und dann kontinuierlich zunimmt, ist normal.

Eine schlagartig einsetzende, meistens **komplette Schwärzung** des Kolbens, einhergehend auch zuweilen mit tiefblauen oder hellgelben Belägen, ist ein Fehler und deutet auf einen Luft-einbruch hin. Ursache für sofortige Schwärzung kann auch eine Falschpolung sein. Dabei wird der schmalen Kathode die thermische Belastung der Anode aufgebürdet. Innerhalb von Sekunden schmilzt ihre Spitze rund. Siehe Abb. 34, Seite 40. Die Verdampfungsprodukte finden sich auf der Kolbenwand und die Lampe ist irreversibel unbrauchbar geworden.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die übliche Schwärzung ausbildet, hängt von einer ganzen Reihe von Faktoren ab. Beschleunigt wird der Schwärzungsprozess durch folgende Betriebsparameter:

Überstrom: Dadurch werden Anode und Kathode heißer und verdampfen schneller. In krassen Fällen kann es zu einer Erosion der Elektrodenoberfläche kommen mit starker lokaler Überhitzung, die den Schwärzungsprozess weiter beschleunigt.

Unterstrom: Dadurch zieht sich der Bogen auf der Kathodenspitze zusammen. Es kommt zu einer lokalen Überhitzung der Kathodenoberfläche mit entsprechend höherer Verdampfung.

Lampenstrom-Pulsation: Je höher diese, umso schneller wird die Kathodenoberfläche zerklüftet und die Anodenfrontfläche deformiert. Der Bogen setzt dann bevorzugt an den Spitzen und höchsten Erhebungen an, die aufgrund der verminderten Wärmeleitung in den Elektrodenkörper hinein besonders heiß werden. In krassen Fällen bildet sich sogar ein Wolframsee aus. Zu hohe Strompulsation ist der maßgebliche Faktor bei der Elektrodenzerklüftung.

Einschaltstromspitze: Bei Zündung der Lampe muss die kalte, noch emissionsunwillige Kathode den hohen Einschaltstrom liefern. Besonders wenn dieser oberhalb des Zulässigen liegt (siehe Kapitel „Elektrische Eigenschaften – Anlaufverhalten“, Seite 18), bilden sich kleine, sehr heiße Bogenfußpunkte, die zu lokaler Aufschmelzung des Kathodenmaterials führen. Das aufgeschmolzene Material wird bei weiterer Energiezufuhr explosionsartig verdampft und kann auch Schmelzperlen zur Anode schleudern.

Bogenstabilität und Flackern

Bei XBO®-Lampen ist der Entladungsbogen im Wesentlichen elektrodenstabilisiert. Das bedeutet, dass seine Lage und Form maßgeblich durch die Position und Geometrie von Anode und Kathode bestimmt ist. Zu dieser mechanisch-statischen Fixierung kommt die Eigenstabilisierung durch elektromagnetische sowie gasdynamische Kräfte. Der Elektronenstrom hat eine auf seine Achse gerichtete Kraft zur Folge; in gleicher Weise wirken die thermodynamischen Kräfte des heißen Gasjets im Mantel des ihn umgebenden kühleren Xenongases. Die Gesamtheit dieser Phänomene machen XBO®-Lampen zu sehr stabil brennenden Entladungslampen und sind damit auch Grundpfeiler für ihre Anwendung als Projektionslichtquelle.

Dennoch ist der Bogen nicht absolut ortsfest. Vor allem der anodennahe Schweif, die Bogenfahne, ist leichten Schwankungen unterworfen, die zum Beispiel durch Gasturbulenzen (siehe Abb. 28 auf Seite 34) in der Lampe ausgelöst sind. Des Weiteren können sich die Emissionsbedingungen an der Kathodenspitze ändern, so dass auch der Fußpunkt des Bogens durchaus wandern kann. Zur Beurteilung der Bogenstabilität oder der Bogenunruhe ist eine Definition bzw. ein Messverfahren notwendig.

Leuchtdichte-Zwei-Kammer-Verfahren:

Mit einem Objektiv wird der Bogen auf zwei Fotodetektoren abgebildet, die durch eine lichtundurchlässige Wand optisch voneinander getrennt sind. Siehe Abb. 29 auf Seite 34. Elektrisch analysiert wird das Differenzsignal. Zum Messstart wird das Signal durch Justierung der Abbildung über den beiden Kammern auf Null abgeglichen; das bedeutet, dass jede Fotodiode genau eine Hälfte des Lichtbogens sieht, geteilt entlang seiner Achse. Bewegt sich in der Messzeit dann der Bogen auf der Kathodenspitze oder wandert seine Fahne, so ergibt sich ein Signal ungleich Null, weil eine Fotozellenkammer mehr Licht erhält als die andere. Zur quantitativen Festlegung der Bogenunruhe wird die maximal gemessene Signalgröße ins Verhältnis gesetzt zum Signal, das sich einstellt, wenn der Bogen vollständig nur auf eine Fotodiode allein abgebildet wird. Dieses Verfahren erlaubt eine gut reproduzierbare Bestimmung der räumlichen Bogenstabilität; es hat den Vorteil, dass elektrisch verursachte Lichtstrom- oder Leuchtdichteschwankungen – hervorgerufen etwa durch die Strompulsation des Gleichrichters – das Messergebnis nicht beeinflussen.

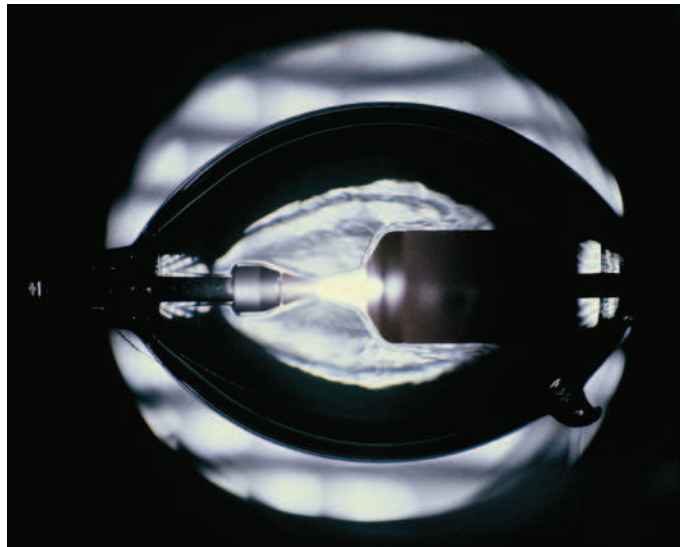


Abb. 28 Schlierenoptische Aufnahme der Gasströmung in einer brennenden Lampe.

Abb. 30 zeigt im oberen Teil den realen zeitlichen Verlauf der Bogenauslenkungen, im unteren Teil die Veränderung der Bogenunruhe (innerhalb eines festgelegten Intervalls) im Laufe der Brenndauer sowie eine statistische Auswertung derselben.

Neben diesem sehr aufwendigen Messverfahren sind in der Literatur weitere, weniger aufwendige vorgeschlagen, wie z. B. Messung der zeitlichen Fluktuation der Lichtstärke oder des Hot Spots (Leuchtdichtemaximum vor der Kathode).

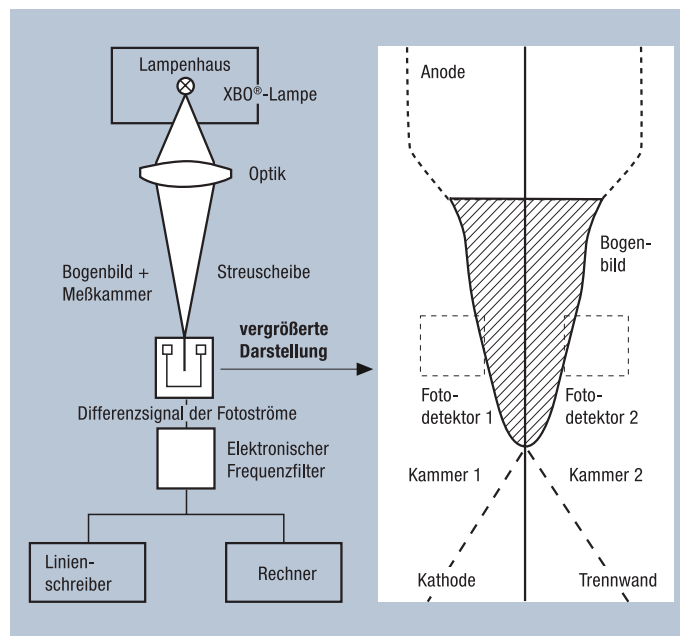
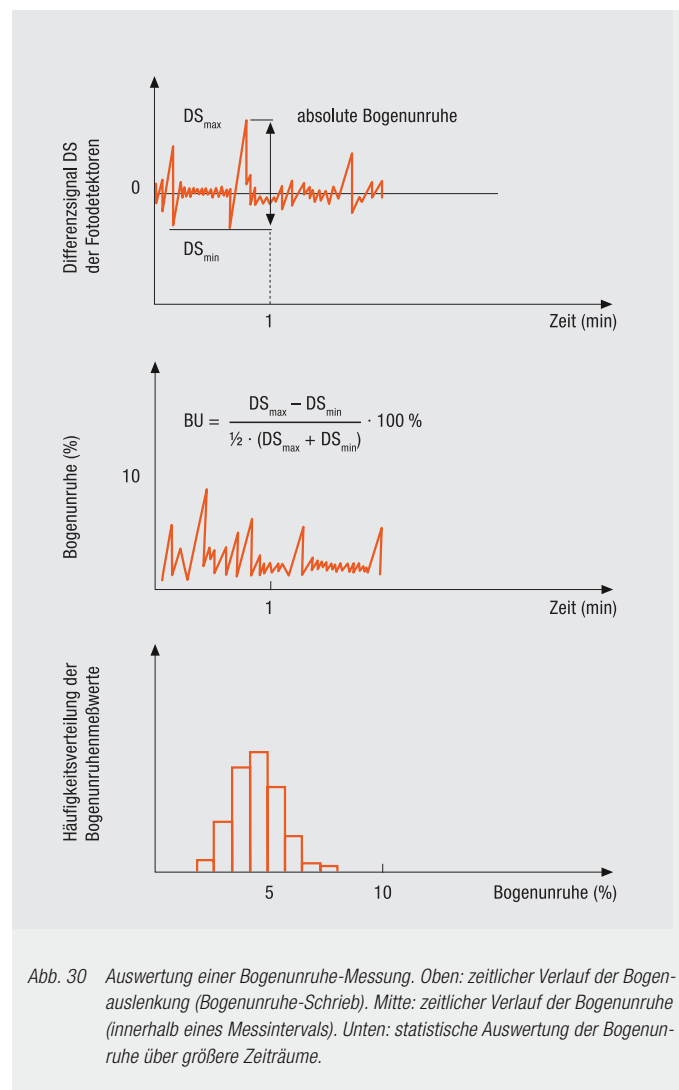


Abb. 29 Prinzipskizze des Messverfahrens der Bogenunruhe nach dem Leuchtdichte-Zwei-Kammer-Verfahren.

Allen Verfahren allerdings haftet der Makel an, dass nicht unbedingt diejenige Bogenunruhe gemessen wird, die ausschlaggebend für die Anwendung ist. Praktisch alle XBO®-Lampen werden in optischen Systemen – Projektoren oder Scheinwerfer oder Lichtleiter – verwendet; alle optischen Systeme reagieren unterschiedlich auf die verschiedenen Anteile der Bogenunruhe – und das auch noch abhängig von der individuellen Justierung der Lampe. Allgemein-gültige Aussagen lassen sich aber nur bei einem standardisierten Messverfahren machen.

Sollen die Auswirkungen einer Bogenunruhe analysiert werden, muss eine Trennung von kathodischer und anodischer Unruhe erfolgen. **Kathodische Unruhe** liegt vor, wenn der Bogenfußpunkt auf der Kathodenspitze nicht ortsfest ist, sondern wandert, springt oder seine Form ändert. Diese Art der Unruhe ist wesentlich durch den Zustand des Kathodenmaterials und seiner Oberfläche bestimmt. **Anodische Unruhe** ist die durch das Wehen der Bogen-fahne hervorgerufene Unruhe. Sie ist vor allem eine Funktion der Gasströmungen und -turbu-lenzen, ist aber auch beeinflusst durch die Geometrie der Anodenvorderfläche.



Durch die folgenden Faktoren wird die lampenbezogene Bogenstabilität beeinflusst:

Lampenstrom: Je höher der Lampenstrom, umso steifer und stabiler der Bogen. Umso weicher und großflächiger auch der Ansatz des Bogens an der Kathode. Die Kathode wird insgesamt heißer. Je geringer der Strom, umso mehr kontrahiert der Bogenfußpunkt auf der Kathode; es kommt zu lokalen Überhitzungen, dadurch zu einer lokalen Verarmung an Emittermaterial und zur Zerklüftung der Oberfläche. Resultat: der Bogen springt, unruhig versucht er die jeweils günstigsten Emissionsbedingungen zu finden. Abb. 25 auf Seite 30 zeigt die Bogenform in Abhängigkeit vom Lampenstrom.

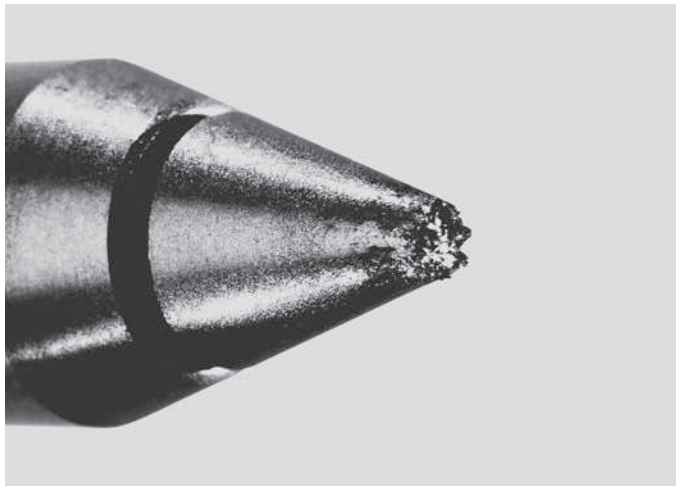


Abb. 31 Zerklüftung der Kathodenspitze durch überhöhte Strompulsation.

Lampenstrom-Pulsation: Sie ist ein Zeiteffekt. Hohe Strompulsation führt zur Zerklüftung von Kathodenspitze (siehe Abb. 31) und im weiteren Verlauf auch zur Verwerfung der Anodenoberfläche. Zu hohe Pulsationswerte dürfen als wichtigste Ursache für ungenügende Bogenstabilität angesehen werden.

Einschaltstrom: Überhöhte Einschaltstromspitzen verbunden mit häufiger Schaltung der Lampe erodieren die Kathodenspitze. Die Folge: kathodische Bogenunruhe.

Kolbenkühlung: Zu stark forcierte Kolbenkühlung erhöht den Temperaturgradienten zwischen Bogen und Kolbenwandung. Resultat: verstärkte radiale Gasströmungen und -turbulenzen, die vor allem an der Bogenfahne angreifen.

Einschaltzeit: Kurz nach dem Zünden der Lampe, wenn noch alle Komponenten (mit Ausnahme des Bogens) kalt sind, wird eine erhöhte Bogenunruhe beobachtet; vor allem durch Turbulenzen im anodischen Bereich, aber auch im kathodischen, solange die Kathode noch nicht ihre Arbeitstemperatur erreicht hat. Dieser Effekt ist nach wenigen Minuten Einbrennzeit vorüber.

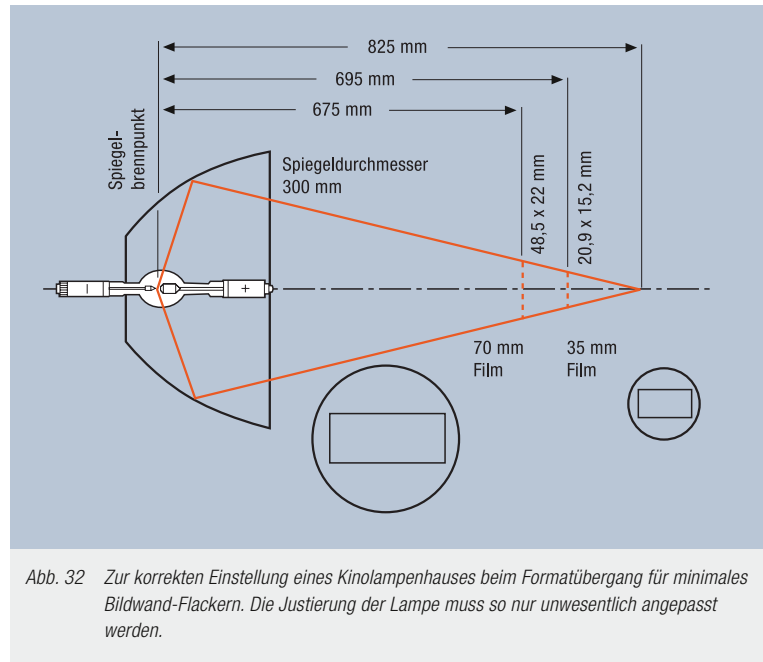
Brennlage: Optimale Brennlage in puncto Bogenstabilität ist die senkrechte Stellung, Anode oben. Mit zunehmender Neigung steigt die Bogenunruhe an (bei einigen Lampentypen mit einem flachen Maximum bei etwa 45). Wird die Lampe über die Waagerechte hinaus weiter geneigt, so dass die Anode zunehmend nach unten zu hängen kommt, steigt die Bogenunruhe dramatisch an. Siehe Abb. 21, Seite 26.

Lebensdauer: Auch bei optimalen Betriebsbedingungen unterliegen Kathoden- und Anodengeometrie und -struktur Veränderungen, die zu einem allmählichen Anstieg der Bogenunruhe führen.

Im Unterschied zu der durch die Lampe bestimmten Bogenunruhe, soll **Flackern** definiert werden als zeitliche, sprunghafte Änderung des Nutzlichtes, wie es in der Anwendung auftritt. Im Falle der Kinoprojektion wäre das beispielsweise die Unruhe des von der Leinwand reflektierten Lichtes. Wie schon weiter oben beschrieben, reagieren verschiedene optische Systeme deutlich unterschiedlich empfindlich auf eine vorhandene Bogeninstabilität. Häufig kann diese anwendungsbezogene Instabilität vom Anwender durch geeignete Maßnahmen verstärkt oder gemindert werden.

Zwei Beispiele seien herausgegriffen:

Dejustierung: Die meisten optischen Systeme für XBO®-Lampen nutzen das (stabile) Leuchtdichtemaximum vor der Kathode aus. Licht aus der (relativ unstabilen) Bogenfahne trägt üblicherweise kaum zum Nutzlichtstrom bei (siehe auch „Leuchtdichtevertellung im Bogen“, Abb. 7, Seite 11). Wird jedoch das optische System so dejustiert, dass auch – oder sogar wesentlich – die Bogenfahne mit zum Nutzlichtstrom herangezogen wird, kann Flackern die Folge sein. Häufig kommt dieser Fall in der Kinoprojektion beim Formatübergang vor. Siehe dazu Abb. 32.



Korrekterweise müsste beim Übergang von Normalformat auf Cinemascope (oder ein anderes größeres Filmfenster) das Auflagemaß, d. h. der Abstand Reflektor zu Bildfenster, geändert werden. Wird stattdessen, bequemerweise, nur die Lampe im Reflektor dejustiert, kann auch eine (noch) genügende Ausleuchtung des größeren Formats erreicht werden; allerdings tragen dann auch kathodenferne Bogenbereiche zum Nutzlichtstrom bei. Ein verstärktes Flackern ist die Folge.

Einbrennzeit: Kurz nach dem Zünden von XBO®-Lampen durchlaufen diese, aufgrund des noch nicht ausgeglichenen thermischen Haushaltes, eine Phase erhöhter Bogeninstabilität, die nach wenigen Minuten vorüber ist. Wird der eigentlichen Nutzzeit eine kurze Einbrennphase vorgeschaltet, sind Flackereffekte häufig beseitigt.

Ozonerzeugung

Eine elektrische Entladung in Xenongas erzeugt ein Spektrum, das von etwa 140 nm im UV bis weit in das Infrarote hineinreicht. Ist der Quarzglas Kolben im UV-Bereich mindestens zwischen 180 und 220 nm transparent, so wandelt diese Strahlung den Luftsauerstoff (O_2) zu einem kleinen Teil in Ozon (O_3) um. Ozon, selbst ein farbloses, geruchloses Gas (was man riecht, sind Reaktionsprodukte des sehr aggressiven Ozons mit den Verunreinigungsbestandteilen der Luft und Stickstoffverbindungen), ist – in höheren Konzentrationen und über längere Zeit eingeatmet – lungenschädigend.

Unterdrückt werden kann die Ozonproduktion durch Verwendung von Quarzglas, das den entsprechenden UV-Strahlungsbereich absorbiert. Das Resultat sind sog. „ozonfreie“ Lampen; sie sind durch den Zusatz „OFR“ in der Lampenbezeichnung gekennzeichnet. Die verwendeten Quarzgläser sind entweder in Masse dotiert oder beschichtet. Vergleich der UV-Strahlungsleistung in Abb. 33.

In Einzelfällen kann es auch bei „ozonfreien“ Lampen dazu kommen, dass kurz nach der Zündung ein „Ozongeruch“ wahrgenommen wird. Dies kann zwei Ursachen haben: entweder stammt die Ozonproduktion aus der (kurzzeitigen) Strahlung der zur Zündung verwendeten Funkenstrecke oder aus dem Umstand, dass im kalten Zustand des Quarzkolbens die Absorptionskante verschoben, geringe Strahlungsanteile zur Ozonproduktion den Kolben verlassen konnten. Beide Effekte sind nach Anlauf der Lampe vorüber und harmlos.



Handhabung

Mechanische Installation

XBO®-Lampen sind mechanisch äußerst stabil aufgebaut. Sie müssen der mechanischen Beanspruchung durch die schweren Elektroden, besonders der bis zu 800 g schweren Anode, und dem hohen Innendruck von bis zu 60 bar (bei kleinwattigen Lampen sogar noch mehr) gewachsen sein. Dennoch bestehen sie aus Glas (Quarzglas) und verlangen eine dementsprechende Behandlung, d. h. sie sind vor Stoß, Schlag und rohen Kräften zu schützen. Ihre Handhabung soll daher gewissen Sorgfaltskriterien unterworfen sein.

Alle XBO®-Lampen werden in einer Schutzhülle geliefert. Diese schützt den Benutzer vor einem Lampenplatzer. Die im Lampenkolben gespeicherte Energie reicht aus, Quarzsplinter meterweit durch den Raum zu schleudern.

Beim Einbau der Lampe darf die **Schutzhülle** erst nach der erfolgten Installation im Lampenhaus – kurz vor dem Schließen desselben – abgenommen werden. Das Tragen einer Schutzbrille, ggf. eines ganzen Gesichtsschutzes (z. B. durchsichtige Kunststoffmaske), der vor allem die Halsschlagadern abdeckt, und von Stulpenhandschuhen aus Leder ist selbstverständlich.

In keinem Fall dürfen bei der Montage Kräfte auf die Lampe als solche ausgeübt werden. Einschrauben beispielsweise des Kathodensockels, indem die Lampe am Anodensockel angefasst und gedreht wird, ist in höchstem Maße fahrlässig.

Um Ausdehnungen und Verwindungen des Gehäuses zu kompensieren, darf die Lampe nur an einem Ende fest eingespannt sein. Bei kleinen (kurzen) Lampen kann das andere Ende frei und ungestützt bleiben. Bei größeren (längeren) Lampen ist eine flexible, weiche Unterstützung notwendig, die einigen mechanischen Aufwand erfordert. Sie soll die Lampe abstützen, aber Ausdehnungen, auch senkrecht zur Lampenachse, unbeschränkt zulassen.

Sollte versehentlich die Lampe innerhalb ihrer Schutzhülle in Betrieb genommen werden, so schmilzt diese innerhalb weniger Sekunden zusammen und macht die Lampe in der Regel unbrauchbar.

Beim Ausbau der Lampen ist in umgekehrter Reihenfolge zu verfahren: erst Schutzhülle um die Lampe, dann Ausbau.

Elektrischer Anschluss

Beim elektrischen Anschluss von XBO®-Lampen sind die gleichen Sorgfaltskriterien zu beachten wie bei ihrer rein mechanischen Handhabung.

Bei Lampenversionen ohne Kabelanschluss wird das „lose“ Ende der Lampe häufig über eine Klemmbacke mit dem Versorgungsgerät verbunden. In diesen Fällen ist zuerst die Klemmbacke zu befestigen, erst dann darf die Lampe im festen Anschluss fixiert werden (auch wenn das manchmal etwas umständlich ist). Ansonsten besteht die Gefahr, dass ungewollt starke Biegekräfte auf die Lampe ausgeübt werden, unter denen sie zerbricht.

Die elektrische Verbindung muss an den dafür vorgesehenen Sockelteilen, also beispielsweise den Sockelstiften oder den Kabeln, erfolgen. In keinem Fall dürfen Kabel abgeschnitten werden und der Stromanschluss über die Sockelhülse geführt werden. Ein nicht zulässiger Strompfad kann dann zur Zerstörung der Lampe führen.

Alle elektrischen Anschlüsse müssen den Kriterien einer Hochstrom-Verbindung genügen. Die Anschlussstücke müssen sauber sein und möglichst großflächigen Kontakt bieten. Im Zweifelsfall lieber nacharbeiten oder noch besser austauschen, statt einen Lampenausfall durch korrodierende und sich überhitzende Kontakte zu riskieren. Guter elektrischer Kontakt ist in den meisten Fällen auch gleichbedeutend mit gutem thermischen Kontakt zur Ableitung der von der Lampe produzierten Wärmeenergie.

Als Material kommen vor allem Messing und Bronze (vernickelt oder verchromt) in Frage; Aluminium z. B. ist ungeeignet.

Sorge zu tragen ist für eine korrekte Polung der Lampe: Pluspol des Gleichrichters an den mit einem „+“-Zeichen versehenen Sockel, Minuspol an den mit einem „-“-Zeichen versehenen. Falschpolung führt innerhalb von Sekundenbruchteilen zu einem totalen Lampenausfall. Die Kathode überschmilzt durch Überbelastung als Anode sofort. Siehe Abb. 34.

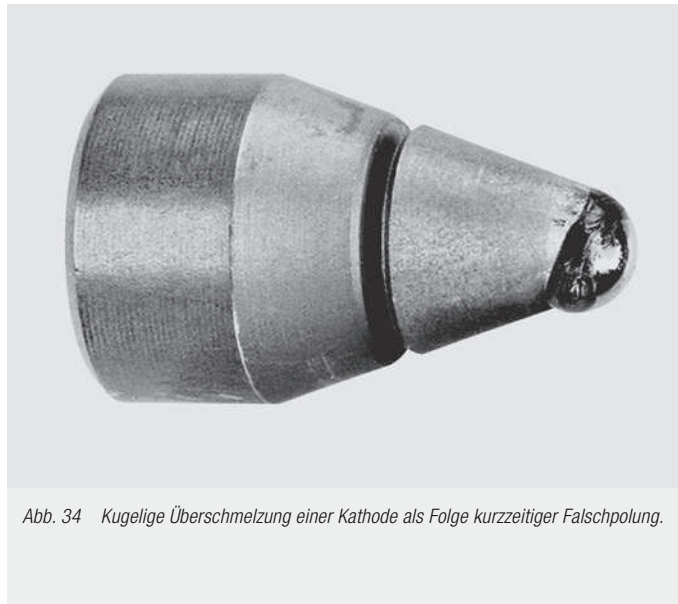


Abb. 34 Kugelige Überschmelzung einer Kathode als Folge kurzzeitiger Falschpolung.

Beim Verlegen der Hochspannung führenden Leitungsteile (vom Zündgerät zur Lampe) sind die einschlägigen Isolationsabstände einzuhalten (Schutz vor Überschlügen und vor kapazitiven HF-Verlusten gegen Masse).

Säuberung der Lampe

XBO®-Lampen dürfen nur an den Sockeln angefasst werden. Sollte es einmal vorkommen, dass der Quarzkolben oder die Schäfte versehentlich mit bloßen Fingern berührt wurden – ein Fall der eigentlich nie eintreten sollte, da die offene Lampe in jedem Fall nur mit Lederhandschuhen gehandhabt werden darf – so sind die Fingerabdrücke unverzüglich zu entfernen. Dazu dient zweckmäßig ein mit Spiritus angefeuchtetes fusselfreies Tuch; trocken nachreiben! Sorge muss dabei getragen werden, dass die Quarzglas-Oberfläche nicht angekratzt wird. Verletzungen der Quarzglas-Oberfläche können später im Betrieb zu einem Lampenbruch führen.

Werden die Fingerabdrücke nicht entfernt, brennen sie in die Quarzglas-Oberfläche ein und sind Keim für eine sich stetig ausbreitende Rekristallisation des Glases. Damit verliert das Quarzglas seine Festigkeit; das Platzerisiko steigt.

Transport

XBO®-Lampen werden in einer Transportverpackung geliefert. In diesem Zustand sind die Lampen unbeschränkt postversandfähig. Die Dämpfungseigenschaften sind so eingestellt, dass auch bei rauem Transport und unter Einfluss von mechanischen Vibrationen keine Schädigung der Lampe eintreten kann.

Müssen XBO®-Lampenhäuser transportiert werden, sollen die Lampen, vor allem bei den höheren Leistungsstufen, ausgebaut und separat in ihren Originalkartons transportiert werden.

Lagerung

XBO®-Lampen sind grundsätzlich unbegrenzt lagerfähig – soweit dies von einem Produkt, das erst 50 Jahre auf dem Markt ist, bestimmt werden kann. Voraussetzung sind jedoch nicht-aggressive Umfeldbedingungen; d. h. zum Beispiel keine Lagertemperaturen größer als 50 °C, keine Betauung und eine nicht korrosive Atmosphäre. Unter diesen Umständen ändern sich die Materialeigenschaften von Quarzglas und Wolfram so langsam, dass eine Alterung der Lampen nicht merklich ist. Treten Lagereffekte auf, so greifen diese vor allem bei den „äußeren“ Lampenteilen wie dem Innenleben der Sockel, den Sockeln selbst und den Stromzuführungen an.

Entsorgung

Ausgebrannte XBO®-Lampen können entweder an den Hersteller zur fachgerechten Entsorgung – unter Beachtung moderner Recycling-Gesichtspunkte – zurückgesandt werden (wenn möglich in der originalen Transportverpackung – beispielsweise der neuen Ersatzlampe) oder sie sollten durch den Anwender zerstört werden.

Dazu werden die Lampen unter Beachtung aller Vorsichtsmaßnahmen (siehe Kapitel „Mechanische Installation“, Seite 39) zweckmäßigerweise in die Schutzhülle eingewickelt und an den Enden mit den beiliegenden Klettbändern fest verschlossen. Die Klettbänder müssen das Vlies fest auf die Lampensockel drücken. Die Lampen können dann durch freien Fall aus etwa 1–2 m Höhe auf festen Untergrund sicher entlastet werden (Schutzbrille und Schutzkleidung tragen!). Das entweichende Xenongas ist ungiftig, und geht zurück, woher es gekommen ist: in die Atmosphäre. Die Lampenreste – sofern das Wolfram der Elektroden und Stäbe nicht einem Recycling zugeführt wird – können als Sondermüll entsorgt werden.

**Probleme – Fehleranalyse –
Tipps
Nicht-Zünder**

Zur Zündung von XBO®-Lampen müssen folgende Parameter beachtet werden:

- Höhe der vom Zündgerät abgegebenen Hochspannung
- Zahl der Zündimpulse pro Zeiteinheit
- Energieinhalt des Zündimpulses
- Höhe der Gleichrichter-Leerlaufspannung

Bei schlecht oder gar nicht zündender Lampe sollten folgende Prüfungen erfolgen:

- Arbeitet die Zündfunkenstrecke (Hör- und Sichtkontrolle)?
- Stimmt der Abstand der Elektroden der Funkenstrecke?
- Geht die Hochspannung auf dem Weg vom Zündgerät bis zur Lampe durch Sprühentladungen verloren?
- Ist die Zuleitung zwischen Zündgerät und Lampe zur Vermeidung kapazitiver Verluste so kurz wie möglich?
- Hat der Zündhilfskondensator noch seine vorgeschriebene Kapazität (Alterung!)?
- Ist der Entladewiderstand in Reihe mit dem Zündhilfskondensator richtig bemessen?
- Ist der Zündhilfsdraht ordnungsgemäß angebracht?
- Wird vom Gleichrichter die Mindestversorgungsspannung geliefert?
- Hat die Lampe die Lebensdauergrenze erreicht?
- Ist eine Lampe eingebaut?
- Ist die Stromzuführung unterbrochen?

Flackern

Flackern des Nutzlichtes kann seine Ursachen in einer fehlerhaften Lampe, ungeeignetem Betriebsgerät oder unzulässiger Betriebsweise haben. Lesen Sie bitte das Kapitel „Lampenverhalten – Bogenstabilität und Flackern“, Seite 33.

Bei Beobachtung von Flackereffekten nach Installation einer neuen Lampe ist Folgendes zu prüfen:

- Ist die Lampe zur thermischen Stabilisierung lange genug (5–10 min) eingebrannt?
- Wird die Lampe mit dem korrekten Nennstrom betrieben?
- Ist der eventuell vorhandene Magnet zur Bogenstabilisierung korrekt eingestellt (visuelle Bogenbeobachtung in 2 Ebenen!)?
- Ist der für das Lampenhaus vorgesehene korrekte Lampentyp eingesetzt?
- Stimmt die Justierung der Lampe im optischen System (im Reflektor)?
- Ist der Abstand Reflektor – Bildfenster an die Größe des Bildformates angepasst? (Siehe Abb. 32, Seite 37.)

Bei Beobachtung von Flackereffekten im Laufe der Lebensdauer der Lampe ist Folgendes zu prüfen:

- Ist die Kathodenspitze zerklüftet und haben sich auf der Anode Aufwachsungen entwickelt?

Wenn ja:

- Genügt die Strompulsation den Anforderungen?
- Wird der Maximalwert des Einschaltstromstoßes eingehalten?
- Ist die magnetische Bogenstabilisierung (wo vorhanden und vorgeschrieben) korrekt eingestellt?
- Wird die Lampe in zulässiger Brennlage betrieben?
- Wird die Lampe innerhalb des (zulässigen) Stromsteuerbereichs betrieben?
- Wird die Lampe zu stark oder unsymmetrisch gekühlt?
- Stimmt die Justierung der Lampe im optischen System (im Reflektor)?
- Ist der Abstand Reflektor – Bildfenster an die Größe des Bildformates angepasst? (Siehe Abb. 32, Seite 37.)

Kurze Lebensdauer

Das Lebensdauerende von XBO®-Lampen wird in der Regel durch Elektrodenalterung und damit verbunden durch Bogenunruhe erreicht. Seltener führen Nicht-Zünder oder Schwärzung zum Lebensdauerende. Tritt das Ende der Lebensdauer vorzeitig ein, können die jeweiligen Kapitel die Fehlersuche erleichtern. In allen Fällen kurzer Lebensdauer sind die elektrischen Daten der Betriebsgeräte und die Betriebsbedingungen der Lampe genauestens zu prüfen, bevor eine neue Lampe eingesetzt wird.

Falschpolung

XBO®-Lampen sind reine Gleichstromlampen. Das bedeutet u. a., dass Kathode und Anode gezielt auf die für sie geltende Aufgabe ausgelegt sind. Diese Spezialisierung erlaubt es nicht, die Lampen mit umgekehrter Polarität zu betreiben. Sollte dies versehentlich passieren, ist die Kathode in Sekundenbruchteilen zerstört (siehe Abb. 34, Seite 40). Die Lampe ist damit unbrauchbar. Meistens verlöscht die Lampe bei Falschpolung nach dem Zünden von selbst.

Deformierte Elektroden

Materialstruktur und Formgebung der Elektroden von XBO®-Lampen sind sorgfältig auf ihre entsprechenden Aufgaben abgestimmt. Im Laufe der Lebensdauer kommt es – auch bei völlig ordnungsgemäßigem Betrieb – zu leichten bis deutlich sichtbaren Veränderungen der Oberfläche und Geometrie der Elektroden.

Starke Veränderungen sind häufig ein Symptom für Fehler. Entweder im Elektrodenmaterial (äußerst selten) oder in der Betriebsart (selten) oder in den (elektrischen) Betriebsbedingungen (häufig). Der Fachmann kann aus Art und Stärke der Veränderungen wichtige Rückschlüsse auf die Fehlerursachen ziehen. Einfach zu diagnostizieren ist die Verkugelung der Kathodenspitze (Abb. 34, Seite 40) als Falschpolung (siehe oben). Abb. 31, Seite 36, zeigt eine Kathodenspitze, die durch erhöhte Strompulsationswerte zerklüftet wurde. Abb. 35 zeigt eine Anodenvorderfläche, deren Aufwachsung durch einen schief ansetzenden Bogen bei waagrechtem Betrieb (fehlerhafte magnetische Stabilisierung) verursacht wurde.



Abb. 35 Nasenförmige Aufwachsung auf der Anodenvorderfläche.

Lampenplatzer

XBO®-Lampen bestehen zwar aus Glas (Quarzglas) und stehen unter einem hohen inneren Druck (im Betrieb ca. 40 bar), sind aber dennoch sehr betriebssicher. Lampenplatzer sind selten. Meistens geht ihnen eine Schädigung der Lampe voraus.

Mögliche Auslöser für Platzer:

- Überschreiten der Lebensdauer um mehr als 25 %; fortschreitende Rekristallisation schwächt die mechanische Festigkeit des Quarzglases.
- Kratzer auf der Außenhaut des Quarzglases durch unsachgemäße Handhabung (Herumrollen auf Werkbank).

- Mikroskopisch feine Kratzer, die durch stark staubhaltige Kühlluft hervorgerufen werden.
- Rekristallisation auf der Oberfläche des Quarzglaskolbens ausgelöst durch nicht entfernte und damit eingebrannte Fingerabdrücke.
- Überleistung, zu hoher Strom. Je höher die Leistungsaufnahme, umso höher der innere Druck.
- Schwärzung. Durch die Schwärzung wird ein großer Teil der Strahlung der Lampe im Quarz absorbiert. Damit ergibt sich eine Temperatur- und Druckerhöhung, die zum Platzen führen können. Zu den Ursachen der Schwärzung, siehe Seite 31ff.

Angelaufene Sockel, Kabel und Kabelschuhe

XBO®-Lampen sind Gebilde einer äußerst hohen Leistungskonzentration: auf relativ kleinem Raum, dem Lampenkolben, werden bis zu 12.000 Watt umgesetzt. Der größte Teil der elektrischen Leistung muss als Wärme über Konvektion und Strahlung abgeführt werden. Dabei muss vermieden werden, dass es zu Wärmestaus oder Übertemperaturen kommt.

Guter Indikator für einen korrekten und ausgeglichen Temperaturhaushalt der Lampe ist die Sockeltemperatur. Siehe Kapitel „Betriebsparameter – Kühlung“, Seite 28. Wird der obere Grenzwert von 230 °C überschritten, laufen die Sockel farblich an. Bei geringer Temperaturüberschreitung leicht gelb, dann zunehmend strohgelb, gelborange, braun, blau.

Werden Lampen mit solchen Sockeln gefunden, muss als Erstes die Kühlung der Lampe überprüft werden.

Zweite Überprüfung sind die elektrischen Anschlüsse. Dazu gehören unter Umständen auch die in die Sockel eingeschraubten Kabel. Lockere Verschraubungsstellen geben zum einen einen schlechten thermischen Kontakt (ungenügende Wärmeableitung über das Anschlusskabel), zum anderen wirken sie über den mangelhaften elektrischen Kontakt mit seinem höheren Übergangswiderstand als zusätzliche Hitzequelle. Schmorstellen und damit dann galoppierende Überhitzung sind die Folge.

Dritte Überprüfung ist gegebenenfalls die Justierung der Lampe in ihrem Lampenhaus, ihrem Scheinwerfer. Bei Fokussierung der Strahlung durch optische Komponenten (z. B. dem tiefgezogenen Spiegel) auf einen Sockel, kann es ebenfalls zu Übertemperaturen kommen.

In seltenen Fällen sind die im Innern des Sockels vorhandenen verschiedenen elektrischen Verbindungsstellen zwischen dem Elektrodenstab und dem Sockel verantwortlich für eine Überhitzung. Vor Einbau einer neuen Lampe sollte in jedem Fall die Ursache für die angelaufenen Sockel gefunden sein. Laufen die Kabelschuhe einer Lampe blau an oder sind gar verzundert, handelt es sich stets um lockeren elektrischen Kontakt.

Zu wenig Licht

Im Laufe der Lebensdauer darf der Lichtstrom von XBO®-Lampen um 30 % zurückgehen (Definition der Lebensdauer). Bei stärkeren oder schnelleren Rückgängen ist folgendes zu prüfen:

- Ist die Lampe deutlich geschwärzt?
Wenn ja:
 - Überprüfung der elektrischen Daten des Gleichrichters und des Zündgerätes
 - Wurde die Lampe mit Überstrom (Überlast) betrieben?
- Wird die Lampe mit korrektem Strom betrieben?
- Ist der Elektrodenabstand durch Aufwachsungen auf der Anode deutlich reduziert?
– Wenn ja, ist die Lampenspannung reduziert und die Lampe nimmt zu wenig Leistung auf. Die Gründe für die Elektrodenaufwachsungen sind zu eruieren. Siehe unter dem Stichwort „Flackern“, Seite 42.
- Ist der Lampenkolben durch unsaubere Atmosphäre äußerlich verschmutzt?
- Ist das optische System (Reflektor, Linsen) verschmutzt?
- Stimmt die optische Justierung der Lampe?

Ungleichmäßige Ausleuchtung	Dieser Fehler bezieht sich auf die Anwendung in der Dia- und Filmprojektion. In den meisten Fällen ist eine ungleichmäßige Ausleuchtung der Leinwand (dunkle Bildmitte oder Ecken) auf unvollkommene Justierung der Lampe in dem optischen System (Reflektor) oder auf ein falsches Auflagemaß (Abstand Reflektor – Bildfenster) zurückzuführen.
Lampe schrumpft	In der Vergangenheit hat es den einen oder anderen Fall während des Betriebs (in senkrechter Brennlage) kürzer werdender Lampen gegeben. Dieses Phänomen konnte darauf zurückgeführt werden, dass unter dem Einfluss ganz leichter, aber dauernder Vibration (z. B. durch einen starken Lüfter verursacht) die Klemmung des Lampenschaftes im unteren Sockel sich leicht löste und die Lampe stückchenweise in den Sockel hineinrutschte. Diese Art Schrumpf-Lampen könnten repariert werden. Das Lampenhaus sollte zudem auf abnorm große Vibrationen untersucht werden.
Dauer-Brenner	XBO®-Lampen, die auch nach Ziehen des Netzsteckers nicht ausgehen wollen, sind äußerst selten. Häufiger allerdings kommt es vor, dass die Mittlere Lebensdauer deutlich überschritten wird. Vorsicht ist geboten bei allen Betriebszeiten, die 25 % der Mittleren Lebensdauer überschreiten, da dann die Platzermöglichkeit durch Rekristallisationseffekte im Quarzglas signifikant verstärkt ist. Lebensdauerrekorde sind nicht ohne Risiko!
Sicherheit Druck	XBO®-Lampen stehen auch im kalten Zustand unter hohem inneren Druck (etwa 10 bar), der sich im Betrieb bis auf ca. 40 bar erhöhen kann. Damit sind Lampenplatzer nicht auszuschließen. XBO®-Lampen dürfen deshalb nur in der Schutzhülle gehandhabt werden. Bei allen Arbeiten mit und an XBO®-Lampen sind zudem Stulpenhandschuhe aus Leder zu tragen, die auch wirkungsvoll die Pulsadern abdecken, sowie Sicherheitsschutzbrillen oder besser noch Sicherheitsschutzmasken, die auch die Halsschlagadern schützen.
Leuchtdichte	XBO®-Lampen sind fast ideale Punktlichtquellen. Die Leuchtdichte des Bogens kann die der Sonne übersteigen. Ein direktes Hineinblicken in den Bogen mit dem ungeschützten Auge kann deshalb zu schweren Netzhautschädigungen führen. Geräte müssen deshalb so konstruiert sein, dass der direkte Blick auf den Entladungsbogen verhindert wird.
UV-Strahlung	XBO®-Lampen emittieren neben der sichtbaren und infraroten Strahlung etwa 6 % ihrer aufgenommenen Leistung im UV-Bereich unter 380 nm. Diese Strahlung ist gesundheitsschädlich. Sie kann Verbrennungen der Haut (Erythem) sowie Augenschädigungen (z. B. Konjunktivitis) hervorrufen. Der ungeschützte Betrieb von XBO®-Lampen ist damit unzulässig. Betriebsgeräte (Lampenhäuser) müssen so konstruiert sein, dass weder direkte Bogenstrahlung noch Streustrahlung ungefiltert austreten können. Bei Geräten, die bauartmäßig die UV-Strahlung ausnutzen (z. B. Solarsimulation), trägt der Betreiber die Verantwortung, durch geeignete zweckgerichtete Maßnahmen das Bedienpersonal vor der UV-Strahlung (und auch vor Blendung, siehe oben) zu schützen.
Ozonerzeugung	Einige wenige XBO®-Lampentypen erzeugen während des Betriebs Ozon. Siehe Kapitel „Lampenverhalten – Ozonerzeugung“, Seite 37. Es sind dies vor allem Lampenversionen, die (auch) zur Solarsimulation verwendet werden. Sie sind dadurch erkennbar, dass in ihrer Lampenbezeichnung der Zusatz „OFR“ fehlt. Bei diesen Lampentypen muss durch eine passende Absaugung des Lampenhauses (ins Freie) und/oder des Betriebsraumes dafür gesorgt werden, dass keine Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit erfolgt. In keinem Fall dürfen die gültigen MAK-Werte (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration) überschritten werden.

A

Absaugung	22, 29, 45
Absorption	14
Anemometer	28
Anlaufverhalten	18, 33
Anode	6, 7, 9, 11, 13, 16, 25, 27, 30, 31, 32, 36, 39, 40, 42, 43, 44
Arbeitstemperatur	36
Ausdehnung	8, 22
Ausleuchtung	37, 45

B

Betriebsbedingungen	7, 36, 43
Betriebsdruck	6
Betriebsgeräte	16, 22, 43, 45
Betriebsparameter	22, 25, 33, 44
Bildfenster	37, 42, 45
Bogen	9, 11, 13, 19, 25, 26, 27, 28, 29, 33, 35, 36, 37, 45
Bogenlänge	5, 6, 12, 16, 25
Bogenstabilisierung	22, 25, 26, 31, 42
Bogenstabilität	25, 33, 35, 36, 42
Bogenstrahlung	14, 45
Bogenunruhe	25, 28, 33, 34, 35, 36, 43
Booster-Schaltung	23
Brennlage	4, 11, 22, 25, 27, 31, 36, 42, 45

D

Dotierung	7
Drehung der Lampe	27
Druck	5, 8, 10, 11, 22, 30, 43, 44, 45
Durchschlag	10, 17, 19

E

Ein-Impuls-Zündung	24
Einbrennzeit	36, 37
Einschaltstrom	31, 33, 36
Einschaltzeit	36
Einschmelzgläser	8, 9
Einschmelzung	6, 7, 8, 9
Elektrische Eigenschaften	16, 23, 33
Elektrodenabstand	6, 11, 12, 17, 44
Elektrodenmaterial	43
Emissionsbedingungen	33, 35
Entladungsbogen	5, 6, 22, 33, 45
Entsorgung	41

F

Falschpolung	16, 32, 40, 43
Farbeigenschaften	14
Farbtemperatur	5, 15
Flackern	33, 36, 37, 42, 44
Folieneinschmelzung	8
Forcierte Kühlung	28
Fülldruck	10
Funkenstrecke	23, 42

G

Glättung	20, 23
Gleichrichter	4, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 31, 33, 42
Graded seal	8

I

Infrarotstrahlung	7
Innenwiderstand	16

K

Kabelanschluss	39
Kapillareinschmelzung	9
Kathode	6, 7, 10, 11, 13, 16, 19, 20, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 40, 43
Kolbenkühlung	28, 36
Kolbenschwärzung	27, 31, 32
Kolbentemperatur	28, 31
Konvektionskühlung	22
Kratzer	43, 44
Kühlung	10, 22, 28, 31, 44

L

Lampenbruch	40
Lampenhaus	25, 28, 31, 39, 42, 44, 45
Lampenkolben	6, 9, 28, 31, 39, 44
Lampenplatzer	39, 43, 45
Lampenspannung	11, 16, 17, 28, 44
Lampenstrom	11, 15, 16, 20, 21, 33, 35, 36
Lampenstrom-Pulsation	20, 21, 33
Lebensdauer	5, 7, 10, 16, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 36, 42, 43, 44, 45
Leerlaufspannung	17, 20, 23, 42
Leuchtdichte	5, 10, 11, 12, 13, 14, 22, 33, 34, 45
Leuchtfeldgröße	12
Lichtausbeute	11
Lichtbogenlänge	12
Lichtstärkeverteilung	13
Lichtstrom	11, 13, 21, 31, 33, 44
Lichtstromrückgang	31

M

Magnetische	31, 42
Bogenstabilisierung	
Mittlere Lebensdauer	45
Moly-Cup-Einschmelzung	8

N

Neigung	25, 26, 31, 36
Nennstrom	16, 19, 29, 30, 42
Nicht-Zünder	43

O

Oxidationsschutz	9
------------------	---

P

Platzerrisiko	28, 31, 40
Pumpspitze	6

Q

Quarzkolben	40
-------------	----

R

Reflektor	27, 37, 42, 44, 45
Rekristallisation	31, 40, 43, 44

S

Säuberung der Lampe	40
Schalzhäufigkeit	30, 31
Scheinwerfer	22, 35, 44
Schutzbrille	39, 41
Schutzhülle	22, 39, 41, 45
Sicherheit	15, 45
Sockettemperatur	44
Solarsimulation	4, 22, 30, 45
Stabeinschmelzung	8, 9
Stationärer Betrieb	16
Stoßspannung	17
Strahlung	4, 5, 6, 11, 13, 14, 15, 22, 27, 28, 37, 38, 44, 45
Strom-Spannungs-Kennlinie	16
Strompulsation	19, 20, 21, 23, 31, 33, 36, 42
Stromsteuerbereich	29
Suprasil	14

T

Temperatur	7, 11, 26, 44
Tesla-Transformator	23
Transport	41

U

Überdruck	10
Überhitzung	28, 33, 44
Überlagerungszündgerät	23, 24
Überstrom	19, 30, 31, 33, 44
Überstrommenge	19
Unterstrom	29, 30, 31, 33
UV-Strahlung	6, 14, 15, 22, 28, 45

V

Ventilator	22, 29
Vorschaltgeräte	23

W

Welligkeit	19, 21
Wirkungsgrad	11
Wolfram	7, 8, 32, 41

X

Xenon	10, 12, 15
-------	------------

Z

Zündgerät	18, 24, 31, 40, 42
Zündhilfsdraht	6, 10, 42
Zündhilfskondensator	19, 42
Zündspannung	17, 18