

Herstellung von Hochdrucklampen

von Peter Bentivoglio

Automatisierung und Miniaturisierung: Nach diesen Prinzipien werden bei ZORN seit 60 Jahren Glühlampen produziert

Glühlampen? Wer stellt denn so etwas heutzutage noch her, und dann auch noch in Deutschland? Inzwischen sind Glühlampen ab 60 Watt aus dem Handel, und ab September sind nur noch Glühlampen ab der Effizienzklasse C zugelassen. Doch die Lampen, um die es im Folgenden gehen soll, dienen nicht der Wohnraumbeleuchtung. Bei den von ZORN produzierten Lampen handelt es sich um Präzisionsleuchtmittel. Jede von uns entwickelte Lampe ist exakt auf den spezifischen Verwendungszweck abgestimmt. Das Haupteinsatzgebiet von ZORN-Lampen ist der medizinische Bereich, zum Beispiel als Dentallampe oder in Skiaskopen. Bei der Verwendung in Diagnostik-Instrumenten sind die Qualitätsanforderungen besonders hoch. Sollte Ihr Augenarzt oder Ihr Zahnarzt minderwertige Lampen benutzen, kann es zum Beispiel passieren, dass Ihr Implantat bei Tageslicht dann doch einen anderen Farbton hat als die anderen Zähne, oder dass Sie mit Ihrer neuen Brille auch nicht viel schärfer sehen als vorher.

Inzwischen bieten wir natürlich auch LED-Lösungen an. Für einige Anwendungen sind LEDs bereits eine gute Alternative. Doch bei einer Vielzahl an Lampen, insbesondere jene mit einem breiten Spektrum, ist von den LED-Entwicklern noch einiges an Arbeit zu leisten um mit Glühlampen konkurrieren zu können.

Im Folgenden gebe ich nun einen gerafften Überblick über die wesentlichen Arbeitsschritte bei der Herstellung einer Hochdruck-Lampe. Gerafft zum Einen, um den Umfang der VDG-Nachrichten nicht zu sprengen und zum Anderen unterliegt einiges auch der Geheimhaltung.



Glühlampen! Dies sind keine Glühbirnen! Birnen, so wurde mir beim erst- und einmaligen Gebrauch des verbotenen Wortes erklärt, wachsen am Baum. Wir stellen Glühlampen her.

Andere Dimensionen

3,8 mm – Manch Glasbläser denkt dabei an schwachwandige Rohre oder an den Toleranzbereich, bei uns ist das der gängige Durchmesser von Rohren. Die kleinste von ZORN produzierte Lampe hat einen Durchmesser von nur zwei Millimetern.



Ø = 3,8 mm L = 7,2 mm Linsenstärke: 2,1 mm

Aufbau einer Lampe

Lampenkolben

Zur Verwendung kommen zylindrische Kolben und formgeblasene Kolben aus unterschiedlichsten Gläsern. Beide Typen können mit Linsen versehen werden.

Fuß

Der Fuß trägt das Herzstück der Lampe, die Wendel. Wir unterscheiden zwischen Pumpfuß- und Maschinenfuß-Lampen. Bei Pumpfuß-Lampen sind die Glas-Metall-Durchführung sowie der Pumpstengel an einem separaten Bauteil. Maschinenfüße werden direkt in den Lampenkolben eingeschmolzen. Auf Pumpfuß-Lampen gehe ich hier nicht näher ein.

Pumpstängel

Zwischen Pumpstängel und Lampenkolben ist die Drahtdurchführung. Die Planheit der Schnittkanten, Wandstärke und Durchmesser sind kritische Größen für eine gute Einschmelzung.

Füllgas

Neben der Wendel sind Gasart, Druck und Reinheit entscheidend für die Eigenschaften der Lampe.



Mundgeblasene Kolben

Bei besonders hohen Anforderungen an die optische Qualität der Lampenkolben ist nach wie vor Handarbeit gefragt. Der Anteil der mundgeblasenen Kolben sinkt aber kontinuierlich, da die Qualität der maschinengeblasenen Kolben stetig steigt. Die Kosten eines mundgeblasenen Lampenkolbens übersteigen die eines maschinengeblasenen um ein Vielfaches.



Mundgeblasen! Allerdings gilt bei uns nicht der Spruch der Kunstglasbläser: "Jedes Stück ein Unikat"

Maschinengeblasene Kolben

Die Oberfläche der Lampenkolben muss bei vielen Lampentypen frei von Bearbeitungsspuren sein. Daher können die Kolben auch bei der maschinellen Herstellung nicht in Formen geblasen werden. Die engen Toleranzen von Längenmaß und Wandstärke müssen also beim freien Blasen der Kolben eingehalten werden. Und auch der Radius ist vorgegeben. Bei einem perfekten Lampenkolben ist am Ende des zylindrischen Kolbens eine Halbkugel. Jeder, der eine Glasbläserlehre absolviert hat und entsprechend das eine und auch das andere Reagenzglas geblasen hat weiß, worin hier die Schwierigkeit besteht: Meist ist am Übergang vom zylindrischen auf den rundgeblasenen Teil

ein leichter „Knick“, der runde Boden ist keine perfekte Halbkugel. Wenn aber der Übergang zum Rundboden schön rund ist, ist meist der Rohrdurchmesser schon leicht überschritten. Wohlgedemert, ich spreche hier von wenigen hundertstel Millimetern, ein Zehntel wäre schon deutlich zu ungenau. Dass das Glas blasen- und schlierenfrei sein muss, die Wandstärke gleichmäßig und der Kolben rotationssymmetrisch, versteht sich von selbst. Die Umsetzung dieser auch manuell nicht einfachen Arbeit auf einer Maschine ist nicht nur für die Maschinenbauer keine leichte Aufgabe. Auch das Einstellen und Betreiben der Automaten stellt hohe Anforderungen an die Maschinenführer. Um robuste Maschineneinstellungen zu finden, ist ein tiefgehendes Verständnis sowohl der Glasbearbeitung als auch der Möglichkeiten der maschinellen Verarbeitung nötig.

Linsenkolben

Die Formgebung der Linsen erfolgt ausschließlich thermisch unter Ausnutzung der Oberflächenspannung des Glases und der Schwerkraft. Schwankungen des Durchmessers und der Wandstärke der verwendeten Glasrohre haben einen großen Einfluss auf die Linsenradien, die zusammen mit dem Wendelabstand das Leuchtfeld der Lampe festlegen.

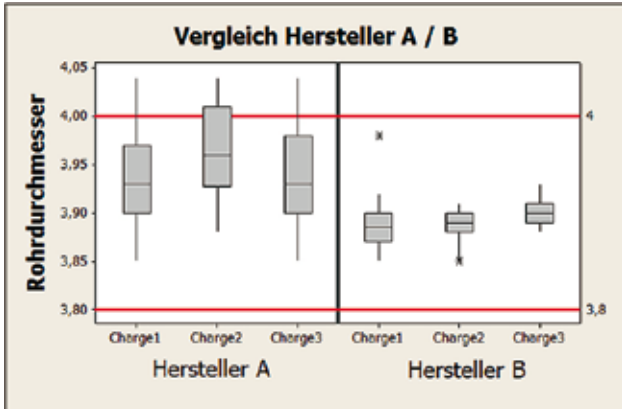


Kontinuierlich arbeitender Flachläufer bei der Produktion von Linsenkolben

Toleranzen

Die Anforderungen an die optischen Eigenschaften der Lampen erfordern eine sehr enge Tolerierung der Abmessungen. Insbesondere die Lage der Wendel erfordert höchste Präzision. Die Toleranzen der verwendeten Glasrohre sind im besten Fall etwa in dem Bereich, in dem auch die Produkttoleranzen liegen. Daher ist eine Selektion der Vorprodukte unumgänglich. Zwei Möglichkeiten bieten sich an: Die für die Lampenkolben und Pumpstengel verwendeten Glasrohre können vor der Verarbeitung nach Durchmesser und Wandstärke sortiert werden. Dabei ist es leider nicht ausreichend ganze Glasrohre zu klassifizieren, denn die Variation der Abmessungen ist auch innerhalb einzelner Längen

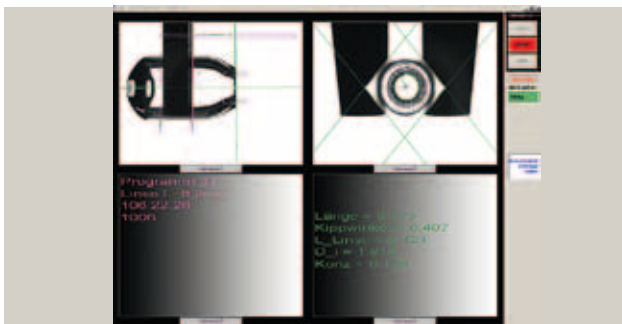
noch zu groß. Es werden daher möglichst kurze Rohrsegmente selektiert. Alternativ sind unsere Automaten aber auch in der Lage, aus unklassifiziertem Glas Lampenkolben in guter Qualität zu produzieren (zumindest bei Hersteller B). In diesem Fall werden die Lampenkolben vor der Weiterverarbeitung klassifiziert. Beim anschließenden Einschmelzen der Wendel werden dann die Maschinenparameter an die Abmessungen jeder Charge präzise angepasst.



Der Boxplot zeigt sehr schön die gewaltigen Qualitätsunterschiede zweier Hersteller von Glasrohren.

Optische Überwachung

Jeder Lampenkolben wird vor der Weiterverarbeitung mit einem Bildverarbeitungssystem auf Maßhaltigkeit und Fehlerfreiheit überprüft. Eine Roboterzelle, die im Übrigen auch vom hauseigenen Maschinenbau entwickelt und hergestellt wurde, sortiert die geprüften Kolben in Chargen mit sehr engen Toleranzfenstern. In einer Datenbank ist für jeden Kolbentyp ein Datensatz mit den entsprechenden Typenparametern hinterlegt.



Hohe Qualität, geringe Ausschusszahlen: Ohne Bildverarbeitungssysteme geht heute nichts mehr.

Draht strecken und zuschneiden

Für die Elektroden der Glühlampen wird sogenannter Dumet-Draht verwendet. Dabei handelt es sich um einen kupferummantelten Draht mit einem Eisen-Nickel-Kern und einem an das verwendete Glas angepassten Ausdehnungskoeffizienten. Da der Kupfermantel beim

Einschmelzprozess stark oxidiert, wird für Zorn-Lampen heute fast ausschließlich vernickelter Dumet-Draht verwendet. Der Nickelmantel wird beim Einschmelzen nicht beschädigt. Daher können so weitere Arbeitsschritte wie das Reinigen und Verzinnen der Elektroden überflüssig gemacht werden.

Für die vollautomatische Verarbeitung zu Füßen, also zu den in die Lampenkolben einzuschmelzenden Elektroden, werden sehr gerade, präzise abgelängte Drahtsegmente benötigt. Da der Draht für gewöhnlich auf Spulen geliefert wird, ist es also zunächst notwendig, den Draht zu strecken. Der geringe Durchmesser von nur 0,2 mm verlangt auch bei diesem Arbeitsschritt höchste Präzision. Bei zu starker Streckung kann der Nickelmantel beschädigt werden, wodurch die Qualität der Glas-Metall-Durchführung herabgesetzt wird. Bei nicht hinreichender Streckung sind die Drahtsegmente nicht hinreichend gerade und somit nicht maschinen-tauglich für den anschließenden Prozessschritt.



Der mechanische Greifer entnimmt einen Draht aus der Vereinzelungsvorrichtung

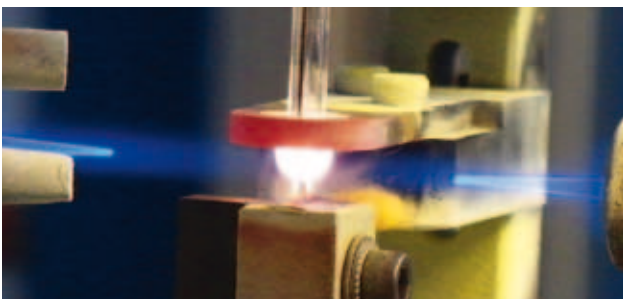
Fußherstellung: Vereinzelung, Biegen

Der im Bild dargestellte Fuß besteht aus den beiden Elektroden, der Glasperle und dem Glühfaden. Die Glasperle fixiert die Lage der Elektroden und stellt so sicher, dass der Glühfaden beim Einschmelzprozess nicht deformiert wird. Zum Aufschmelzen der Glasperle wird der Drahtabschnitt zunächst zu einem U gebogen, sodass das Rohrsegment, aus dem die Perle entsteht, der sog. Pressling, aufgesteckt werden kann. Anschließend wird der Pressling mit zwei gegenüber liegenden Mikrobrennern auf die Elektroden aufgeschmolzen. Um hinreichende Festigkeit zu gewährleisten, muss die Perle die Elektroden gut benetzen. Es muss ein Glas mit möglichst hohem Erweichungspunkt gewählt werden, da die Perle beim Einschmelzen des Fußes in die Lampe wieder sehr hohen Temperaturen ausgesetzt wird. Bei der Verwendung eines zu weichen Glases besteht die Gefahr der Deformation der Wendel, wenn beim Einschmelzen des Fußes die Perle erweicht, und die Stellung der Elektroden nicht mehr hinreichend fixiert. Viele der verwendeten Hochleistungswendeln sind sehr eng gewickelt, sodass bereits

eine kleine Deformation der Wendel zu Wendelschlüssen (Kurzschlüssen) und somit zum Ausfall der Lampe führen kann. Da die Perle sehr nah an der Einschmelzung ist, ist es notwendig, den Bereich in dem später die Glas-Metall-Durchführung liegt, durch Kühlung und Schutzgas vor Oxidation zu schützen, um eine gute Metalleinschmelzung gewährleisten zu können.



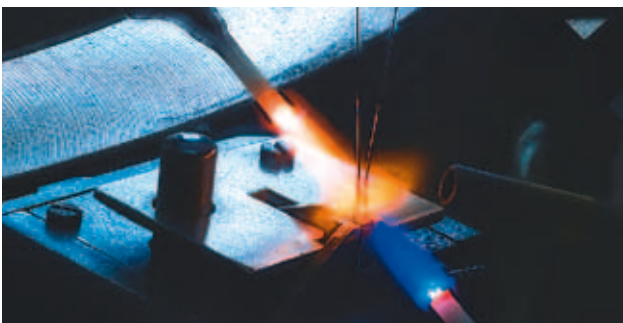
Fuß mit gestrecktem Glühfaden für Skiaskope



Hartglas-Molybdän-Einschmelzung bei einem Pumpfuß für Hochdruckhalogenlampen

Fußherstellung: Aufschmelzen der Glasperle

Nach dem Aufschmelzen der Glasperle werden auf dem gleichen Automaten noch die weiteren notwendigen Biegungen der Elektroden durchgeführt. Damit sind die Fußrohlinge fertig. Im nächsten Arbeitsschritt wird nun die Wendel auf die Elektroden gepresst.



Vollautomatisches Aufschmelzen der Perle auf einen Maschinenfuß

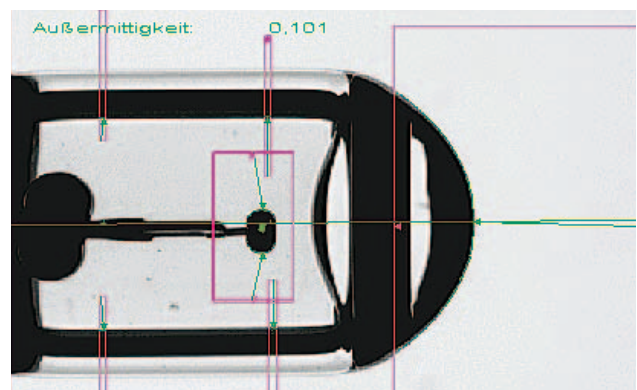


Fertige Füße mit aufgequetschter Wendel

Einschmelzen der Füße in den Lampenkolben

Viele der bei Zorn hergestellten Miniaturlampen werden im medizinischen Bereich eingesetzt, zum Beispiel als Dentallampen oder Lampen in Diagnostikinstrumenten. Die Qualitätsanforderungen sind in diesem Bereich besonders hoch. Neben der Maßhaltigkeit sind auch die Vorgaben für die elektrischen und optischen Eigenschaften eng toleriert. An Handarbeit ist bei vielen Arbeitsschritten daher nicht mehr zu denken. Die notwendige Übertragung der kritischen Arbeitsschritte auf Automaten hat den hauseigenen Maschinenbau vor große Herausforderungen gestellt. Die daran gewachsenen Kompetenzen wissen seit vielen Jahren auch externe Kunden verschiedenster Industriezweige zu schätzen. Neben den Qualitätsanforderungen macht natürlich auch der Kostendruck eine Automatisierung unumgänglich.

Auf einem Rundläufer werden die Lampenkolben und Pumpstängel mit dem Fuß „verheiratet“. Auch hier erfolgt mit Bildverarbeitungssystemen eine 100%-Überwachung. Nicht den Anforderungen entsprechende Lampen werden automatisch aussortiert. Steigende Fehlerraten werden sofort erkannt, und der Maschinenführer kann direkt eingreifen und die Maschinenparameter entsprechend korrigieren.



Automatische Vermessung der eingeschmolzenen Lampen



Wer einen besseren Eindruck von der Funktionsweise des dargestellten Automaten haben will, kann sich auf youtube dazu dieses Video ansehen:

http://www.youtube.com/watch?v=JHDw0L8ZV_8

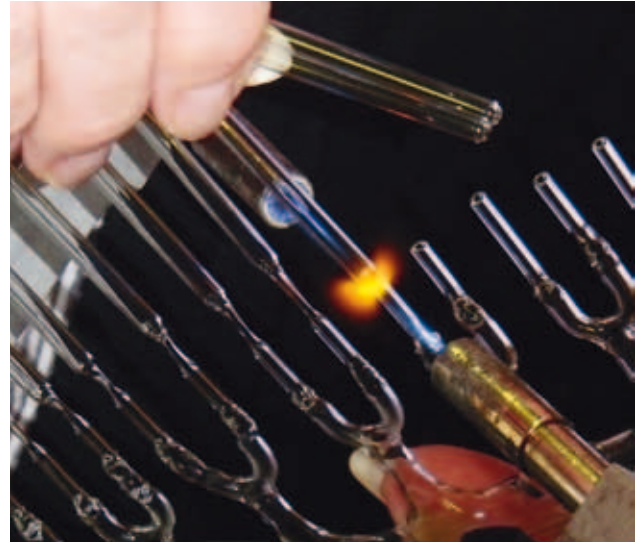
Pumpen

Über Verteiler-Rechen werden die Lampen an den Hochvakuumpumpstand angeschlossen. Das Ansetzen der Lampen an die Rechen ist eine der immer noch zahlreichen manuellen Tätigkeiten. Bei Hochdrucklampen muss bei diesem Arbeitsgang der Ansatz zu einer Kapillare gezogen werden. Die Abmessungen dieser Kapillare sind eng toleriert. Abhängig vom Vakuumbereich hat der Rohrdurchmesser einen unterschiedlich hohen Einfluss auf die Pumpzeit bzw. bei konstanter Pumpzeit auf das erreichte Vakuum. Beim Pumpen der Lampen bewegen wir uns wegen der relativ kurzen Taktzeit im Wesentlichen im Druckbereich zwischen 10^{-3} und 1 mbar. In diesem Bereich ist der Übergang zwischen laminarer Strömung und molekularer Strömung, die so genannte Knudsen-Strömung. Bei diesem Strömungszustand entspricht die mittlere freie Weglänge λ in etwa dem Rohrdurchmesser. Länge und Durchmesser des Rezipienten, des Weges von der Lampe bis zur Turbopumpe, sind von entscheidender Bedeutung für das erreichbare Vakuum. Es ist also ein möglichst großer Durchmesser für die Kapillaren zu wählen, die auf diesem Weg den Flaschenhals darstellen. Wenn das in Pumpennähe angebrachte Vakuummeter, bei einem Wert von 10^{-7} mbar ankommt, bewegt sich das Vakuum in den Lampen noch im 10^{-3} -er-Bereich. So sinnvoll wie es ist, die Kapillaren an den Pumpstängeln möglichst weit zu dimensionieren um so die Pumpzeit zu verkürzen, umso schwerer wird es mit einer weiten Kapillare, beim Abnehmen der Lampen vom Pumpstand sauber geformte Pumpzapfen zu erzielen. Bei schlecht verarbeiteten Pumpzapfen kann es leicht zur Rissbildung kommen.

Aufsetzen

Jede Lampe wird noch von Hand auf die Verteilerrechen gesetzt. Eine besondere Schwierigkeit bei dieser Arbeit besteht darin, dass dabei nicht in die Rechen

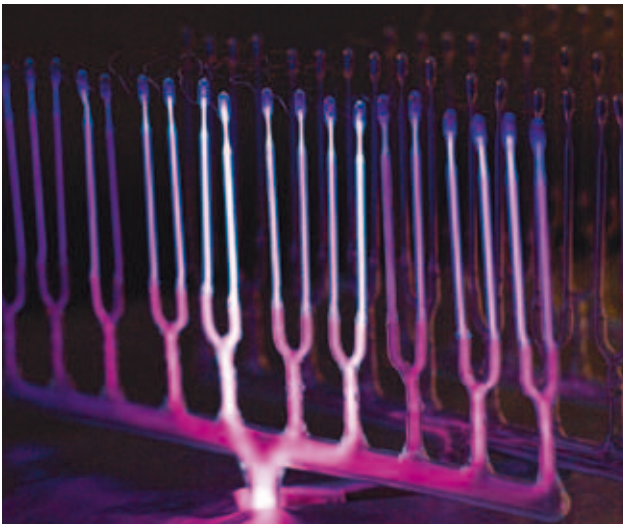
hinein geblasen werden darf, um jedes Einbringen von Feuchtigkeit oder sonstigen Verunreinigungen zu vermeiden. Daher werden die Ansätze mit hochreinem Stickstoff verblasen. Über ein Fußpedal wird der Blasdruck gesteuert.



Aufsetzen der Lampen auf die Verteilerrechen

Evakuieren

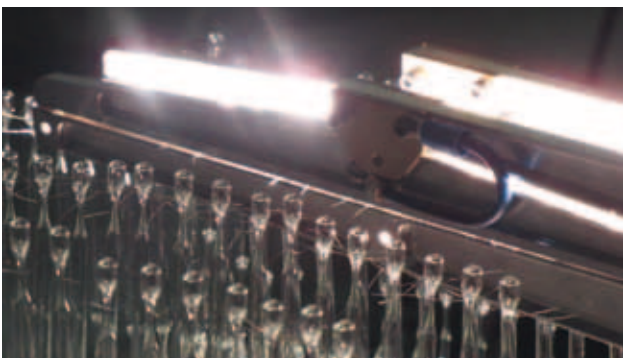
Vor dem Befüllen erfolgt unter Hochvakuum das Ausheizen der Lampen. Dies dient in erster Linie dazu, die Wasserhaut von der Glasoberfläche zu beseitigen. Dazu reicht eine Temperatur von 100°C keineswegs aus. Das Wasser haftet auch noch bei deutlich höheren Temperaturen am Glas. Jeder Rechen wird mit einem Hochfrequenzgenerator auf Dichtigkeit überprüft. Die durch ein Leck einströmende Luft wird durch die Gasentladung sichtbar gemacht und das Leck kann lokalisiert werden. Das funktioniert natürlich nur im gläsernen Teil des Pumpstandes. Darum muss der gesamte Pumpstand regelmäßig auch mit einem Heliumlecksuchgerät auf Leckfreiheit überprüft werden, ein gutes Endvakuum alleine ist noch kein hinreichender Kennwert für eine geringe Leckrate. Kleine Lecks werden von der Turbopumpe einfach weggepumpt und machen sich nicht so wie größere durch einen Druckanstieg im Rezipienten bemerkbar. Wenn Lecks zwar detektiert, aber nicht lokalisiert werden, kann es sich um sogenannte virtuelle Leckstellen handeln. Dabei handelt es sich um Ausgasungen, die zum Beispiel von den Innenwänden des Rezipienten abgegeben werden können. Auch eine ungünstige Geometrie des Rezipienten kann als virtuelle Leckstelle wirken. Daher gehören in den Pumpraum keine Passungen, Gewinde oder sonstige enge Räume. Bei virtuellen Leckstellen helfen nur lange Pumpzeiten und wiederholte Spülvorgänge. Besser ist es natürlich, gleich beim Aufbau des Pumpstandes an eine geeignete Materialwahl und eine günstige Geometrie zu denken.



Dichtheitsprüfung am Pumpstand mit einem Hochfrequenz-Lecksuchgerät. Die Aufnahme wurde direkt zu Beginn des Pumpvorgangs gemacht, sodass noch eine starke Gasentladung zu sehen ist.

Erstes Brennen der Wendel

Noch auf dem Pumpstand wird jede einzelne Lampe kurz unter Nennspannung gesetzt. Eventuell vorhandene Verunreinigungen der Wendel werden so weggedampft.



Parallel geschaltet – die Lampen erwachen zum Leben

Füllung

Nach dem ersten Brennen der Lampen erfolgt der Füllvorgang. Entsprechend den Anforderungen werden verschiedene Füllgase verwendet. Bei Zorn kommen unter anderem Xenon, Krypton und Argon zum Einsatz sowie verschiedene Halogengase und auch einige Vakuumlampen werden weiterhin hergestellt. Neben dem verwendeten Gas hat auch der Fülldruck großen Einfluss auf die lichttechnischen Eigenschaften der Lampe.

Vakuumlampen und Normaldrucklampen können direkt am Pumpstand fertig gestellt werden. Bei Hochdrucklampen ist das nicht möglich, denn die Lampen können nur vom Pumpstand abgeschmolzen werden, wenn der Innendruck noch etwas unter dem Atmosphärendruck liegt.

Wie also verschmilzt man eine Lampe, die schon bei Zimmertemperatur unter einem Druck von einigen bar steht?

Abfrieren

Die für Hochdrucklampen zusätzlich benötigte Gasmenge befindet sich in einem Zusatzvolumen, in dem bisher nur als Pumpstängel bezeichneten Ansatzrohr der Einschmelzung. Hochdrucklampen werden wie auch die Normaldrucklampen bis knapp unter Atmosphärendruck gefüllt, und zusammen mit dem Hilfvolumen vom Pumpstand abgenommen. Auf einem weiteren Rundläufer durchlaufen die Lampen nun ein Bad mit flüssigem Stickstoff. Dabei kondensiert das enthaltene Gas im untergetauchten Lampenkolben. Nun erfolgt das finale Abschmelzen der Lampe, die Hochdrucklampe ist fertig. Das Verhältnis des Lampenvolumens zum Zusatzvolumen ist entscheidend für den Enddruck in der Lampe.



Eingetaucht in flüssigen Stickstoff wird das Zusatzvolumen der Hochdrucklampe abgeschmolzen

Fast fertig

Das Abfrieren der Lampe ist der letzte Schritt der Glasverarbeitung bei der Herstellung einer Hochdrucklampe. Nun müssen die Lampen nur noch gesockelt werden. Nur noch? Die genaueste Lampe ist nichts mehr wert, wenn sie ein Zehntel Millimeter zu tief, verdreht oder schief im Sockel sitzt. Auch hier wird bei uns jede Lampe kundenindividuell der Anwendung entsprechend verarbeitet, so dass sie im Einsatz die bestmöglichen Ergebnisse erzielt. Abschließend werden die Lampen in der QS-Abteilung ein weiteres Mal auf die Einhaltung der elektrischen, geometrischen und lichttechnischen Eigenschaften kontrolliert.



Strom: 700 mA, Spannung: 3,35 V, Lichtstrom: 30 Lumen, Farbtemperatur: 2940 Kelvin, Beleuchtungsstärke: 19600 Lux

ZORN GmbH & Co.KG

Standort: 78333 Stockach
Gründungsjahr: 1951
Mitarbeiterzahl: 95

Produktionsfläche: 3.000 m²

Produktbereiche:
Industrieautomaten, Präzisions-Glühlampen,
LED-Lösungen