

# EBOPULS



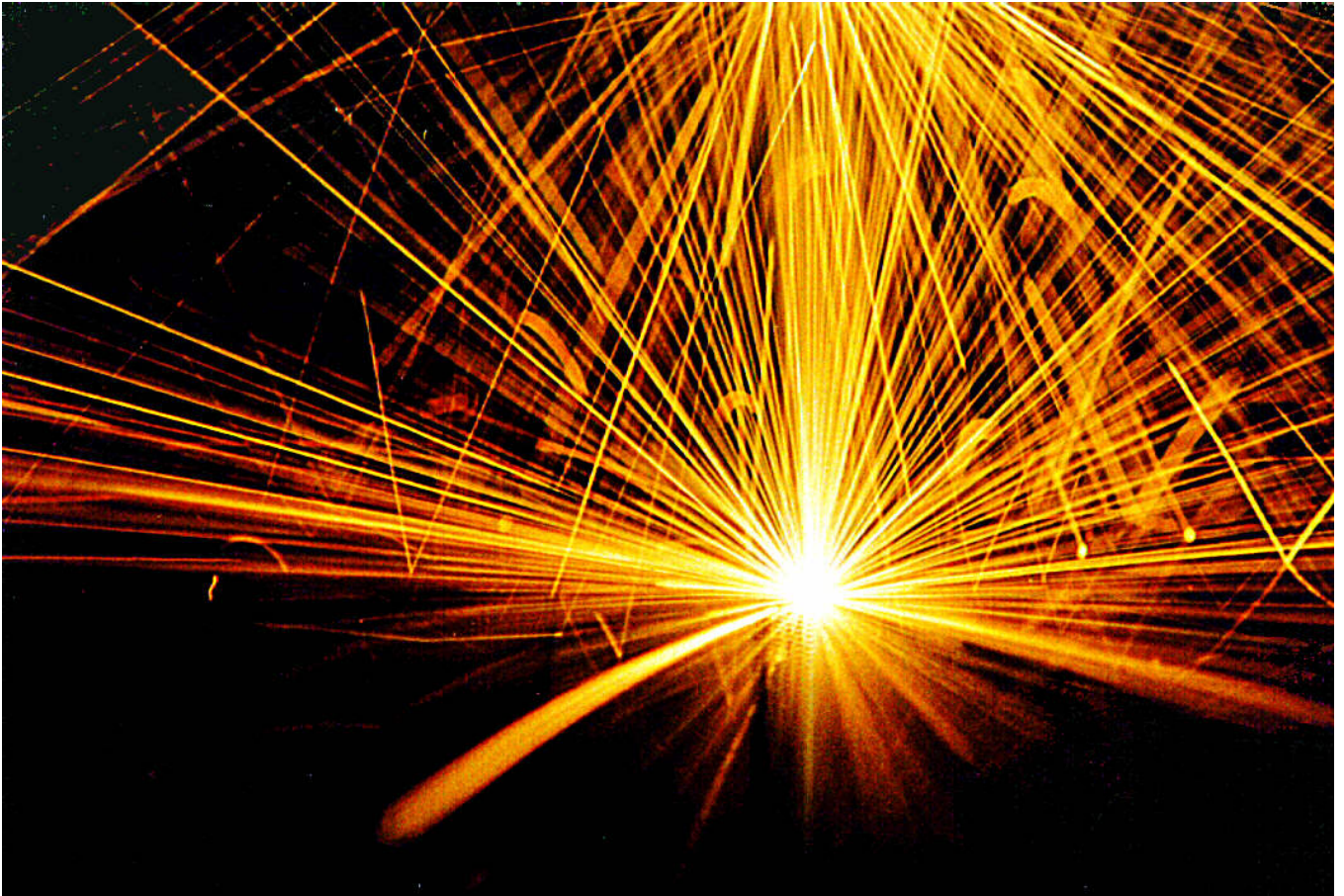
## Elektronenstrahl-Bohren

*Unkonventionelle Spitzentechnologie*



BEAM TECHNOLOGY WORLDWIDE

## Die Idee – Bohren ohne Verschleiß



EB-Bohrprozess

47.20.01e/16

Die erste Elektronenstrahlmaschine war eine Bohrmaschine, mit der Bohrungen in Lagersteine von Uhren gebohrt wurden. Entwickelt wurde sie vom Physiker Karl-Heinz Steigerwald Anfang der fünfziger Jahre bei der Firma Carl Zeiss.

Genutzt wurde die hohe kinetische Energie von beschleunigten Elektronen und deren Eigenschaft, sich zu hoher Energiedichte fokussieren zu lassen. Damit waren das Schmelzen und Verdampfen von Materialien möglich geworden.

Man nutzte auch den Vorteil, den Elektronenstrahl mit einfachen Mitteln nahezu trägheitslos ablenken zu können.

Damals wurden Einzelbohrungen je Werkstück erzeugt; heute ist das Elektronenstrahl-Bohrverfahren (EB-Bohrverfahren) besonders wirtschaftlich, wenn viele Bohrungen in ein Werkstück zu bohren sind. Werkstücke mit Zehntausenden, ja Millionen Bohrungen sind keine Seltenheit. Frequenzen bis zu 3000 Bohrungen je Sekunde sind keine Utopie.

## Höchste Energiedichte und feinste Positionierung

### Strahlerzeugung

Eine elektrisch geheizte Kathode erzeugt Elektronen, die durch das zwischen Kathode und Anode angelegte elektrische Feld bei einer Spannung von 150 kV auf  $\frac{2}{3}$  der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Eine Wehnelt-Elektrode steuert die Intensität des divergierenden Elektronenstrahls, der durch eine elektromagnetische Linse zu Leistungsdichten

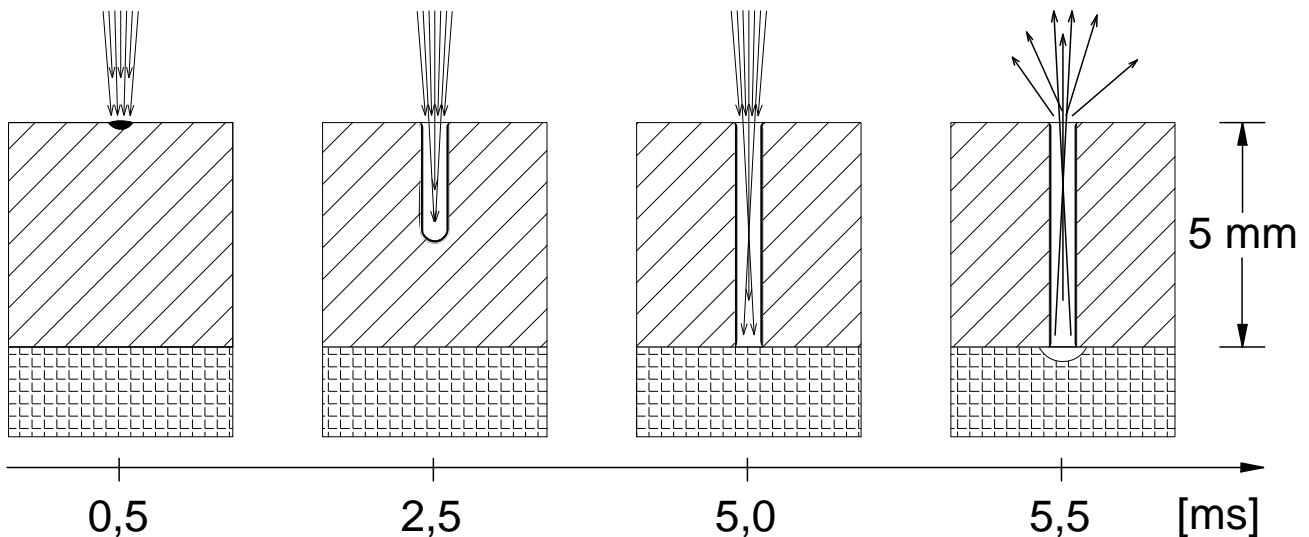
von  $10^8 \text{ W/cm}^2$  und mehr auf das Werkstück fokussiert wird.

### Bohr-Tiefeneffekt

Die Leistungsdichte von  $10^8 \text{ W/cm}^2$  reicht bei fast allen Werkstoffen aus, um eine Dampfkapillare im Material zu erzeugen, die von einem schmelzflüssigen Mantel umgeben ist. Die Dampfkapillare ist bereits das Basis-Loch.

### Backing-Material

Um geringe Durchmesser-Toleranzen von Bohrung zu Bohrung zu erzeugen, wird auf der Rückseite des zu bohrenden Werkstücks ein Backing-Material verwendet, das durch Einwirken des Elektronenstrahls ein Gasvolumen erzeugt. Dieses dehnt sich explosionsartig durch die Kapillare aus und schleudert den schmelzflüssigen Mantel, der die Kapillare umgibt, heraus.



Das Prinzip des EB-Bohrens

### Bohr-Puls

Der Elektronenstrahl wirkt an der Bohrposition mit steiler Anstiegs- und Abfallflanke. Dabei werden die Haupt-Bohrparameter sehr genau gesteuert. Pulszeit und Strahlstromhöhe bzw. -verlauf im Puls sorgen für eine Bereitstellung einer Energiemenge von höchster Wiederholgenauigkeit von Puls zu Puls, sofern keine Variation der Pulsenergie gewollt ist.

und einer Prozess-Steuerung, die allen Anforderungen der anspruchsvollen EB-Anwendung genügt.

Beim Bohrprozess wird das Werkstück kontinuierlich bewegt. Der Strahl wird während des Bohrvorgangs an der Werkstückoberfläche simultan mitgeführt. Zwischen zwei Bohrvorgängen wird der Strahl ausgeschaltet. Er startet erneut zum nächsten Bohrpuls an der neuen Bohrposition.

Für das maschinenmäßig nur von Steigerwald Strahltechnik beherrschte Bohrverfahren, gibt es zahlreiche industrielle Anwendungsfälle. Die besten Ergebnisse lassen sich hinsichtlich der Form der Bohrung, der Reproduzierbarkeit von Form, Rundheit und der Durchmessertoleranz von Bohrung zu Bohrung mit dem Einzelpulsverfahren erzielen, bei dem je Bohrung nur ein Puls verwendet wird. Dieses Verfahren setzt eine ausreichend große Leistung voraus.

### „Fliegendes Bohren“

Die hohen Frequenzen beim Bohren mit dem Elektronenstrahl resultieren aus einer optimalen Kombination der Ablenkung des Strahls, der Bewegungseinrichtung für das Werkstück

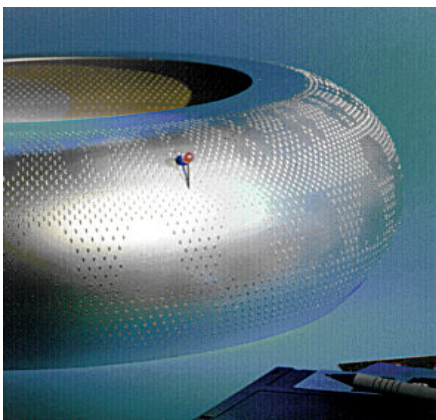
Dieses sogenannte fliegende Bohren wird von keinem konkurrierenden Bohrverfahren angewendet. Es bildet die Basis für die hohe Wirtschaftlichkeit der EB-Bohrtechnik.

Steigerwald-Bohrgeneratoren mit einer direkten Wehnelt-Steuerung und Mittelfrequenz-Hochspannungsanlage bieten Leistungsbereiche wie sie sonst bei keiner anderen Bohrtechnik zur Verfügung stehen.

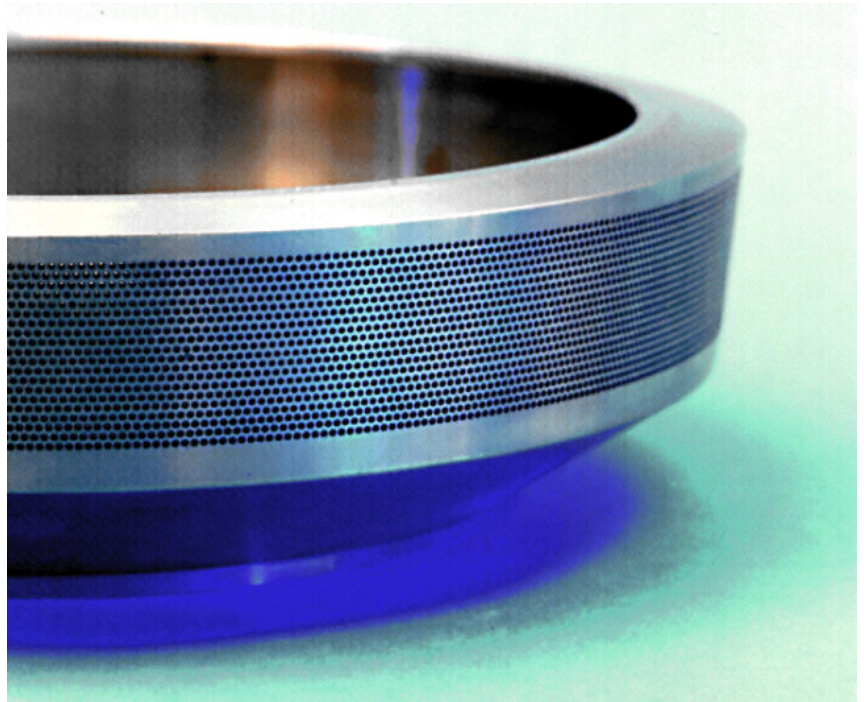
# Das EB-Bohren meistert komplexe Werkstücke

## Hartes Material - kein Problem

Nahezu alle metallischen Werkstoffe, aber auch Keramik, können mit dem Elektronenstrahl gebohrt werden, unabhängig von Härte, Reflexionsverhalten, besonderen Legierungsbestandteilen oder hoher Wärmeleitfähigkeit. Die Abbildungen zeigen Werkstücke aus



Brennkammergehäuse 47.45.01  
3.746 Bohrungen mit 0,9 mm Durchmesser

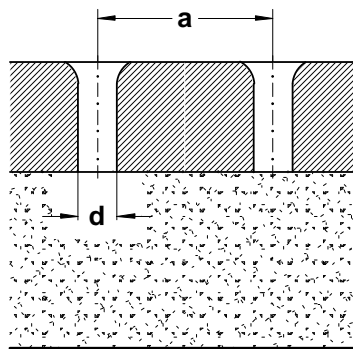


Spinnkopf zur Glasfaserherstellung 47.45.01b/7  
25.600 Bohrungen mit 0,55 mm Durchmesser

thermisch hochfesten Legierungen, die mit anderen Bohrverfahren nur sehr unwirtschaftlich oder gar nicht gebohrt werden können.

## Lochdichte, Lochlage - positionieren nach Wunsch

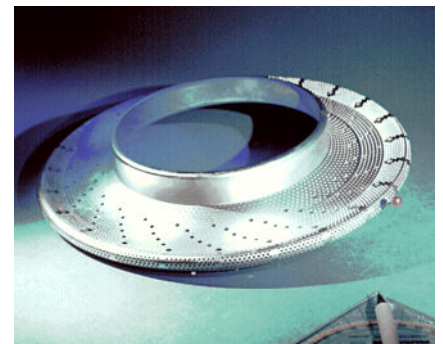
Der zulässige Mindestabstand von Bohrung zu Bohrung liegt im Bereich des doppelten bis dreifachen Lochdurchmessers und ist von den Lochdimensionen abhängig. So können z.B. in 7 mm dickes Material Bohrungen mit 0,9 mm Durchmesser im doppelten Durchmesserabstand eingebracht werden. Bei extrem kleinen Bohrungen mit freien Durchmessern von 0,1 mm in 0,5 mm dickem Blech liegt der minimale Bohrungsabstand beim dreifachen Durchmesser. Die Konizität kleiner Bohrungen bei großen Schachtverhältnissen (>1:5) begrenzen bei diesem Beispiel den Bohrungsabstand. Verwendet man die dichtmöglichste Bohrungsanordnung, so ergeben sich



Grenzen für den Bohrungsabstand

realisierbare, offene Flächen zwischen 22 % und 10 %.

Die Genauigkeit der Bohrungspositionen ist sowohl von den Werkstückdimensionen und Toleranzen wie auch von der Positioniergenauigkeit der Bewegungseinrichtungen abhängig. So wird z.B. auf einem Blech, das auf eine Drehschiebevorrichtung mit der

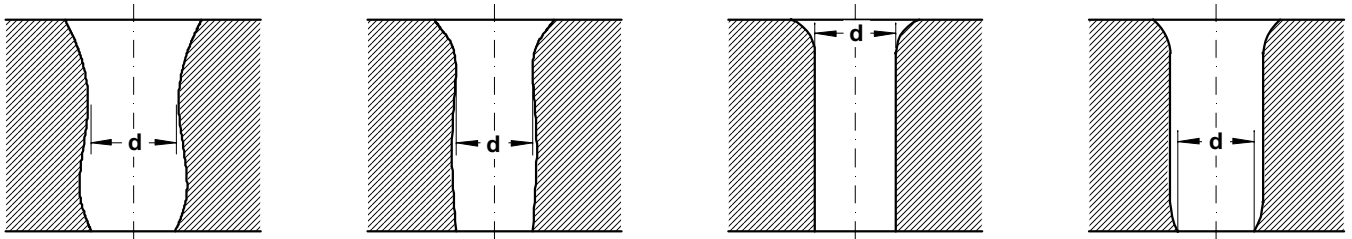


Mischerscheibe 47.45.01g/03  
2.340 Bohrungen mit 0,9 mm Durchmesser

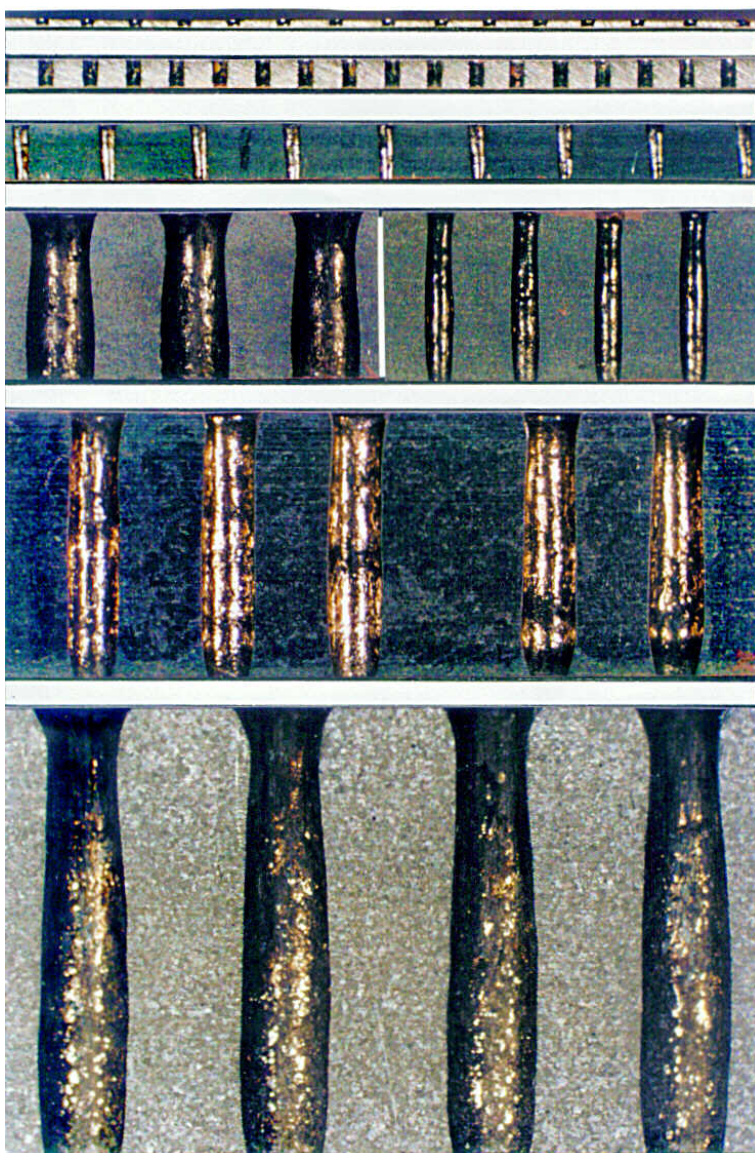
630 mm-Trommel gespannt ist, eine Positionstoleranz von  $\pm 14 \mu\text{m}$  erreicht.

Die Mittelachse der gebohrten Löcher kann in einem großen Bereich zur Oberfläche des Werkstückes geneigt sein. Winkel zur Oberfläche von  $25^\circ$ , in Ausnahmefällen von  $20^\circ$ , können erreicht werden.

# Bohrungsformen



Charakteristische Bohrungsformen



EB-Bohrungen in CrNi-Stahl

## 0,1 mm *Bohrungsformen*

0,5 mm

1,0 mm

3,0 mm

5,0 mm

8,0 mm

Beim EB-Bohren können Lochformen erzeugt werden, wie es das Schema zeigt. Wünsche nach bestimmten Formen können durch eine Variation und Optimierung der Arbeitsparameter in weiten Grenzen erfüllt werden. Das Verhältnis Durchmesser zu Länge beeinflusst die Bohrungsform ebenfalls.

Am Strahleintritt zeigen die Bohrungen normalerweise eine leichte Verrundung. Der Rand am Strahlaustritt ist immer scharfkantig und gratfrei.

## *Metallurgie - geringste thermische Einwirkung*

Das Bohrverfahren mit dem Elektronenstrahl ist ein thermischer Prozess. Das abzutragende Material wird lokal erwärmt, geschmolzen und zum Teil verdampft. Obwohl der größte Teil des geschmolzenen Materials rund um die Dampfkapillare ausgeblasen wird, bleibt eine dünne, 5 – 10 µm dicke, wiedererstarrte Schicht an der Wand der Bohrung zurück.

Oxidation ist in diesen Schichten nicht zu erwarten, da der Bohrvorgang im Vakuum abläuft.

# Die EB-Bohrtechnik – Lochgrößen und Bohrgeschwindigkeiten

## Anwendungsbereich

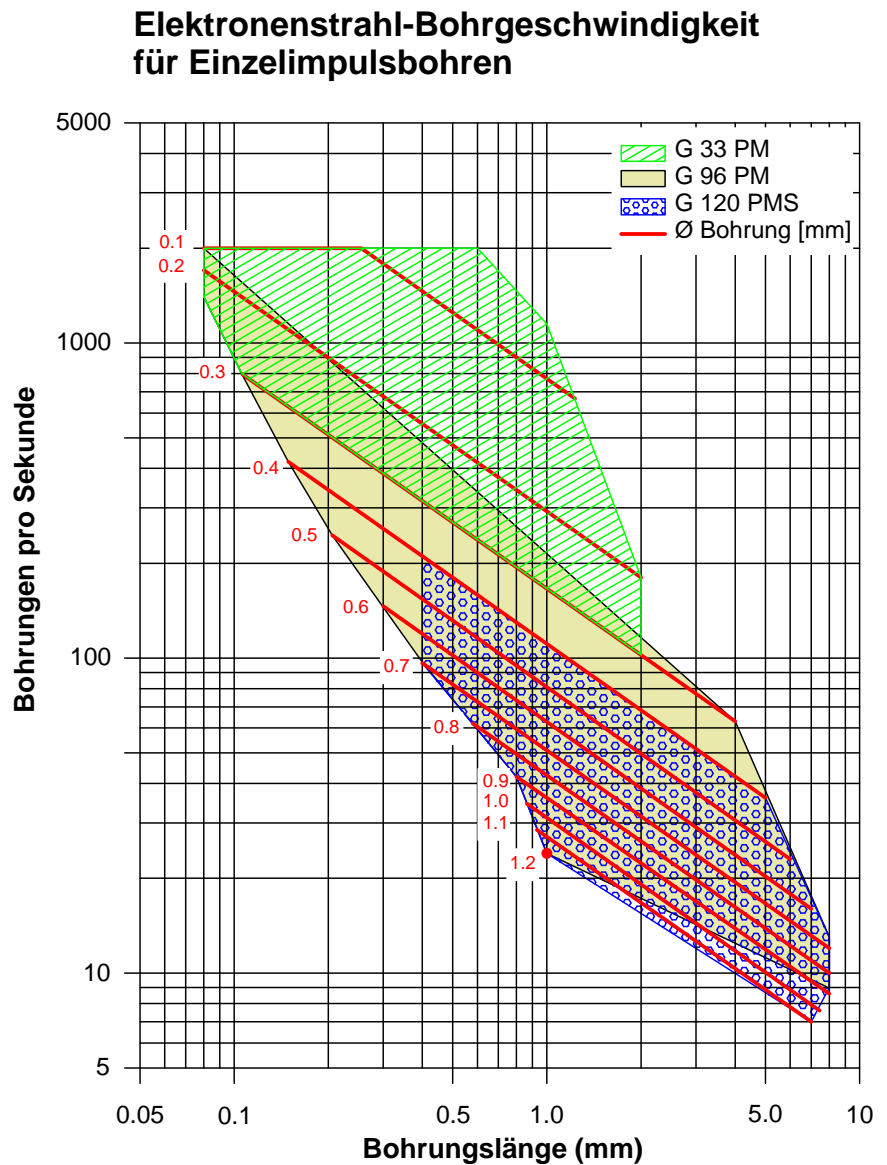
Der grün markierte Diagrammbereich kennzeichnet das Anwendungsfeld des Standardbohrgenerators G 96 PM für Eisenwerkstoffe.

Für das Bohren sehr kleiner Löcher wie z.B. mit einem Durchmesser von nur 50 µm in 0,3 mm dickem Edelstahlblech steht der Bohrgenerator G 33 PM zur Verfügung. Der Bohrbereich für große Löcher mit Durchmessern bis zu 1,1 mm und Längen von 7 mm wird durch den Hochleistungsbohrgenerator G 120 PMS erweitert. Bei anderen Basiswerkstoffen können sich die Bereichsgrenzen verschieben.

## Geschwindigkeit - bis zu 2000 Bohrungen je Sekunde

Ein wesentlicher Vorteil des Elektronenstrahlbohrens liegt in den hohen Bohrfrequenzen, die mit keinem anderen Verfahren erreicht werden können. Das Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Bohrfrequenz von der Bohrungslänge. So können z.B. in 0,5 mm dickes Filterblech Bohrungen mit 100 µm Durchmesser mit Frequenzen von 1500 bis 2000 Löchern pro Sekunde gebohrt werden. Die Einzelbohrung hat in diesem Beispiel ein Volumen von etwa 0,004 mm<sup>3</sup>. Bei größeren Bohrungen von beispielsweise 0,7 mm Durchmesser und 5 mm Länge sind Frequenzen von fast 20 Hz möglich. Hier beträgt das Lochvolumen gerade 2 mm<sup>3</sup>.

Eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Diagramms ist eine geeignete Bohrungsanordnung auf einem zylinderförmigen Werkstück, so dass die Möglichkeit des fliegenden Bohrens genutzt werden kann. Selbst bei hohen Bohrgeschwindigkeiten besteht die Möglichkeit, die Prozessparameter von Bohrung zu Bohrung zu variieren, da alle Parameter als elektrische Größen ausgegeben werden.



Anwendungsfeld für das EB-Bohren

Labor-Untersuchungen sind bei Steigewald Strahltechnik auch für das Bohren mit Mehrfachpulsen durchgeführt worden. Industriell wird diese Technik nur in Einzelfällen angewendet.

Beim Perkussionsverfahren zum Erstellen tiefer Löcher mit mehreren Pulsen wird der Fokus des Elektronenstrahls in die Tiefe der Bohrung hinein nachgeführt. Beim hochfrequenten Trepannieren werden die Pulse rechnergesteuert entlang vorgegebener Konturen positioniert. Besonders einfach ist das Bohren von Langlöchern in dünnen Blechen.

## Der Elektronenstrahl-Bohrgenerator

Der EB-Generator, die Arbeitskammer mit der Bewegungseinrichtung für die Werkstücke und die Steuerung sind die Hauptbaugruppen einer Bohranlage.

### Generator

Der EB-Generator ist bei Standardmaschinen vertikal auf der Arbeitskammer montiert. Er besteht aus mehreren Sektionen.

Die oberste Sektion enthält das Strahlerzeugungssystem, bestehend aus thermisch betriebener Kathode, Wehnelt-Zylinder und Anode. Zwischen Kathode und Anode wird eine Beschleunigungsspannung von 120 kV angelegt.

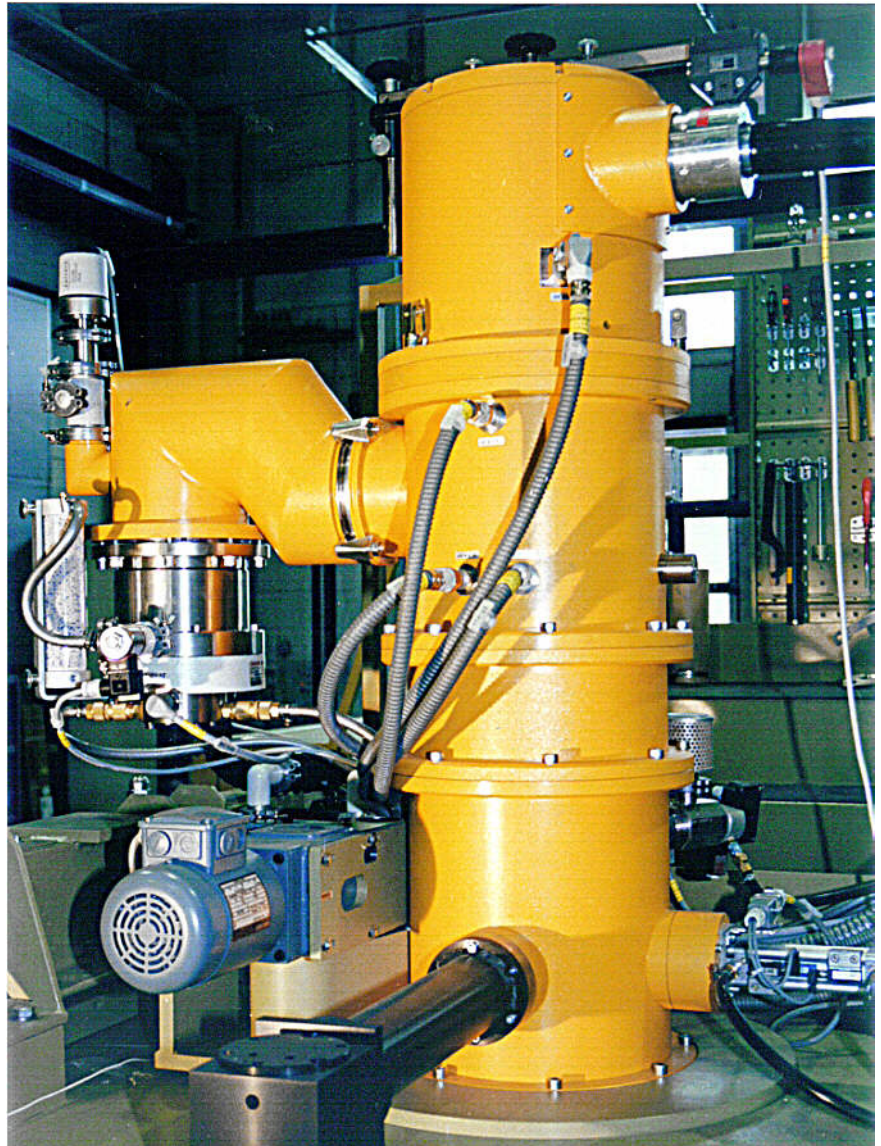
An die zweite Sektion ist das Vakuumsystem des Generators, bestehend aus Turbo-Molekularpumpe, Vorpumpe, Messzellen und Ventilen angeschlossen. Wenn die Arbeitskammer zum Werkstückwechsel belüftet wird, schließt ein Ventil den Strahlerzeugungsraum von der Arbeitskammer vakuumdicht ab.

Die dritte Sektion ist aus elektronenoptischen Gründen hinzugefügt

Die vierte Sektion enthält das Strahl-diagnosesystem, das die Intensität des Strahls überwacht, sowie einen schwenkbaren Strahlauffänger.

An die vierte Sektion schließt sich das elektromagnetische System mit Fokussierlinse, Stigmatoren und Strahlmitführungssystem an, das das fliegende Bohren möglich macht.

Eine Abschirmvorrichtung unterhalb des Generators sorgt dafür, dass das beim Bohrvorgang ausgeschleuderte Material nicht in den Generator gelangt und dort Störungen verursacht.



Bohrgenerator G 120 PMS

P47.20.02 f2

Ein EB-Bohrgenerator hat keine Verschleißteile - im Gegensatz zum Festkörperlaser. Als billiges Verbrauchsteil existiert nur das Heizband der Kathode.

### Strahlqualität - die Grundlage für Bohrungsqualität

Exzellente Strahleigenschaften sind wichtige Voraussetzungen für ein gutes

Bohrergebnis. Die Rundheit des Strahls, die Konstanz seines Durchmessers und die Symmetrie der Energieverteilung im Strahl wirken sich dabei am meisten aus. Deshalb sind die Anforderungen an einen Elektronenstrahl zum Bohren wesentlich höher als an einen Elektronenstrahl zum Schweißen

## Die Bohranlage - anspruchsvolle Modularechnik

### Kammer

Die Größe der Arbeitskammer wird von der Werkstückgröße und der Bohraufgabe bestimmt. Je nach Werkstückart und Bohraufgabe werden verschiedene Bewegungseinrichtungen für die Werkstücke verwendet. Als Standard-Bewegungseinrichtungen haben sich Dreh-Schiebeeinheiten (PDS) für flächige Werkstücke (Bleche) und 4- oder 5-Achsen-Manipulatoren für symmetrisch und unsymmetrisch geformte Werkstücke bewährt.

Die PDS-Einrichtung (Bild) mit z-Verstellung an der Arbeitskammer nimmt das zu einem Zylinder geformte Blech auf einer Trommel oder andere zylinderförmige Werkstücke auf. Das Backing-Material wird von innen entweder mechanisch oder pneumatisch angepresst oder auf die Blechrückseite haftend aufgegossen. Während des Bohrvorgangs dreht sich die Trommel kontinuierlich unter dem Strahl. Ist eine Lochreihe fertig, verschiebt die x-Bewegung die Trommel in die Position der nächsten Reihe. Eine mechanische Höhenverstellung der Trommelwelle erlaubt es, den optimalen Arbeitsabstand abhängig vom Trommel- oder Werkstückdurchmesser einzustellen.

Anders geformte Werkstücke können mit Mehrachsen-Manipulatoren in die Bohrposition gebracht werden. Zwei oder drei Linear-Achsen und zwei um 90° gegeneinander versetzte Drehachsen erlauben nahezu alle Bohrungspositionen relativ zur Strahlachse, auch solche mit Bohrwinkeln schräg zur Oberfläche.

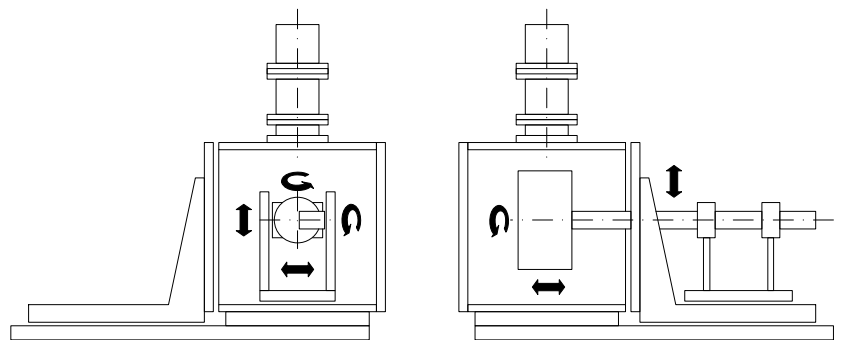
PDS-Einheit und 4-Achsen-Manipulator lassen sich auch gemeinsam an einer Kammer kombinieren. Dann ist der 4-Achsen-Manipulator auf einem fahrbaren Schlitten mit eigener Kammertür an der linken Kammerseite angeordnet und auf der rechten Seite eine Dreh-Schiebeeinheit, ebenfalls mit eigener Kammertür.

Für Bohraufgaben, die sich nicht mit Standardeinrichtungen bearbeiten lassen, können kundenspezifisch angepasste Maschinenkonzepte geschaffen werden.

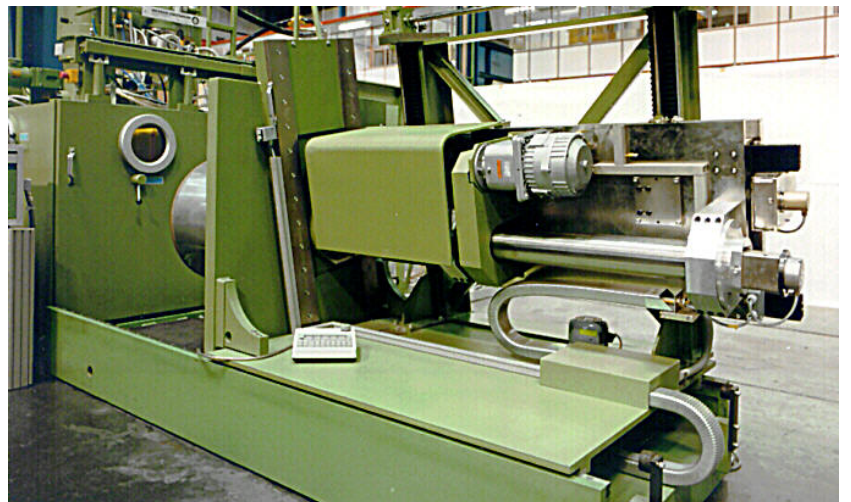


4-Achsen-Manipulator Oszillant

47.20.01b/3



Darstellung der Bewegungseinrichtungen





## Die Anlagensteuerung

Zwei miteinander kommunizierende Steuerungssysteme bilden die Kommandozentrale einer Bohrmaschine: Eine frei programmierbare Steuerung (SPS) für die logischen Abläufe der Maschine und eine Prozess-Steuerung (CNC), die den Bohrprozess steuert.

Die Prozess-Steuerung und die SPS sind über einen Daten- und Signalaustausch so miteinander verknüpft, dass ein automatischer Arbeitsablauf mit einer EB-Bohrmaschine möglich ist. Das Bedienpersonal muss außer der Beobachtung der Maschine lediglich den Werkstückwechsel vornehmen.

Das Bedienpult einer Bohrmaschine besteht aus:

- dem CNC & SPS-Monitor
- dem CNC-Tastenfeld
- einer kleinen Bedienkonsole
- einem Video-Monitor (Option)

### CNC Prozess-Steuerung

Die CNC EBCON® P ist eine speziell zur Anwendung der EB-Technik für Bohraufgaben entwickelte Steuerung.

Nur mit ihr ist die wirtschaftliche Nutzung der EB-Technik, die Präzision des Verfahrens und die Flexibilität der Bohranlagen für unterschiedliche Bohraufgaben zu realisieren.

Dabei ist die Handhabung der CNC einfach. Programme können entweder über die Tastatur der Steuerung direkt eingegeben werden oder an einem externen Programmierplatz erstellt werden. Interne Rechenprogramme erleichtern das Programmieren wesentlich. So muss, z.B. bei einer Lochreihe auf dem Umfang eines Werkstücks, lediglich die Zahl der Bohrungen eingegeben werden. Die CNC berechnet daraus die Positionen der Einzelbohrungen.



Bedienpult einer EB-Bohrmaschine

47.20.02 f29

Sollte während des Bohrvorgangs eine Störung auftreten, die zu ungebohrten Löchern führt, so merkt sich die CNC die Stelle der letzten Bohrung und startet nach dem Beheben der Störung positionsgenau mit dem nächsten Bohrimpuls.

Alle für den Bohrprozess wichtigen Parameter werden von der CNC gesteuert. Dies sind Pulsstrom und -dauer, Bohrfrequenz und Strahlmitführung ebenso wie der Strom der Fokussierlinse.

Die Befehle zur Steuerung der Bewegungsachsen übernimmt ebenfalls die CNC, insbesondere die Position und Geschwindigkeit der Achsen.

### Der Kontroll-Monitor

Der Monitorbildschirm zeigt alle für den Betrieb der Maschine wichtigen Informationen an. Verschiedene Programm-Menüs mit zugeordneten Untermenüs stehen zur Verfügung und ermöglichen eine benutzerfreundliche Bedienung der Maschine. Der Monitor gibt z.B. Status der Einschalt- und Abschalt routine sowie des Pumpstanddiagramms wieder, besitzt ein Einricht- und Justiermenü für den Generator und zeigt auch die elektrischen und mechanischen Ist-Werte der Generatorparameter und der Bewegungseinrichtungen an sowie Fehlermeldungen und Wartungshinweise.

## Technische Daten

Generator		Typ		
		G 33 PM	G 96 PM	G 120 PMS
Beschleunigungsspannung	kV	120		
Strahlstrom am Werkstück	mA	1 – 28	1 – 80	1 – 100
Maximale Pulsleistung am Werkstück	kW	3,3	9,6	12,0
Arbeitsabstand	mm	35 – 100	35 – 150	35 – 150
Pulsdauer	µs	50 - 30.000		
Maximale Frequenz der Strahlmitführung	Hz	3.000		

Kammer		Typ				
		K 6	K 12	K 16	K 19	K 24
Kammervolumen	m <sup>3</sup>	0,63	1,28	1,63	1,91	2,54
Maximal bearbeitbare Werkstückdimensionen						
Durchmesser	mm	320	637	1.000	1.000	637
Länge	mm	400	600	500	500	950

Bewegungseinrichtungen	Typ	
		Dreh-Schiebe-Vorrichtung PDS

EBOPULS-D  
 Die in dieser Druckschrift enthaltenen Beschreibungen, Gerätedaten und Abbildungen dienen der Kundeninformation und sind nicht bindend. Der Hersteller ist zur Änderung seiner Produkte jederzeit berechtigt.  
 © Steigerwald Strahltechnik GmbH 06/2010