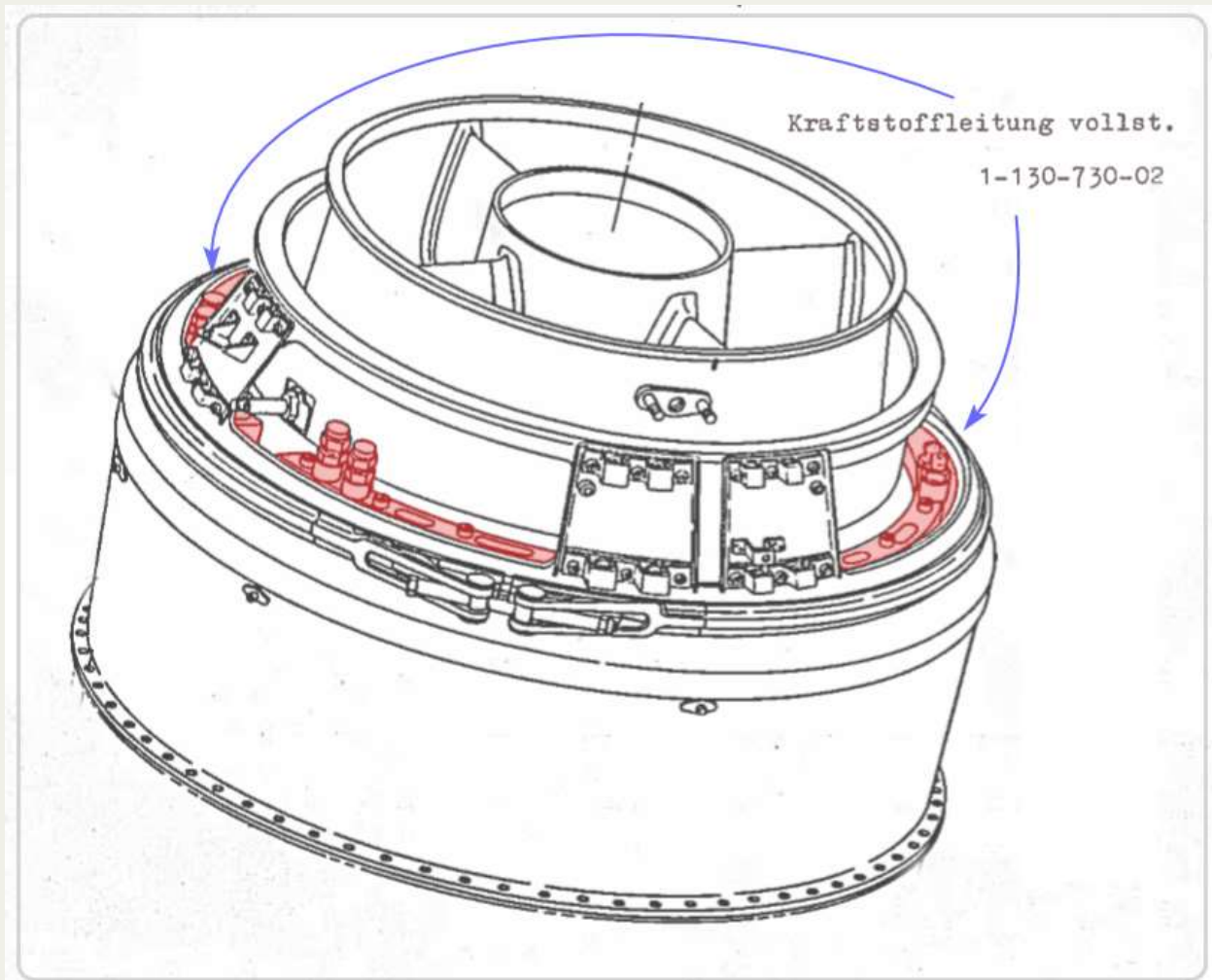


# Elektronenstrahlschweißen

gh 3.1.2019

Bereits 1879 wurden die Möglichkeiten der Materialbearbeitung mittels Elektronenstrahlen entdeckt. Bis zum industriellen Einsatz sollten aber noch Jahrzehnte vergehen, 1952 wurde von Karl-Heinz Steigerwald die erste Elektronenstrahl-Bohrmaschine gebaut (für die Uhrenindustrie); 1958 folgte die Elektronenstrahl-Schweißmaschine. Mit diesem Verfahren können Metalle mit unterschiedlichen Schmelzpunkten verschweißt werden; die Zugabe von Füllstoffen entfällt da der Grundwerkstoff selbst geschmolzen wird. Nur die Verbindungsstelle wird erhitzt, das ergibt eine schmale Schweißnaht mit hoher Eindringtiefe, der Wärmeverzug ist minimal. Die Bauteile können in der Regel ohne weitere Nachbearbeitung verwendet werden. (Quelle Wikipedia)

Dieses damals recht junge und technologisch anspruchsvolle Schweißverfahren wurde bei KHD in Oberursel erstmals für die Lizenzfertigung der T53 Triebwerke eingesetzt. U.a. wurden die Kraftstoffverteilerleitungen für die L13 Version geschweißt.





1967 wurde für 335.970 DM von der Fa. Steigerwald eine Elektronenstrahlschweißmaschine gekauft und im Werkstofflabor aufgebaut.

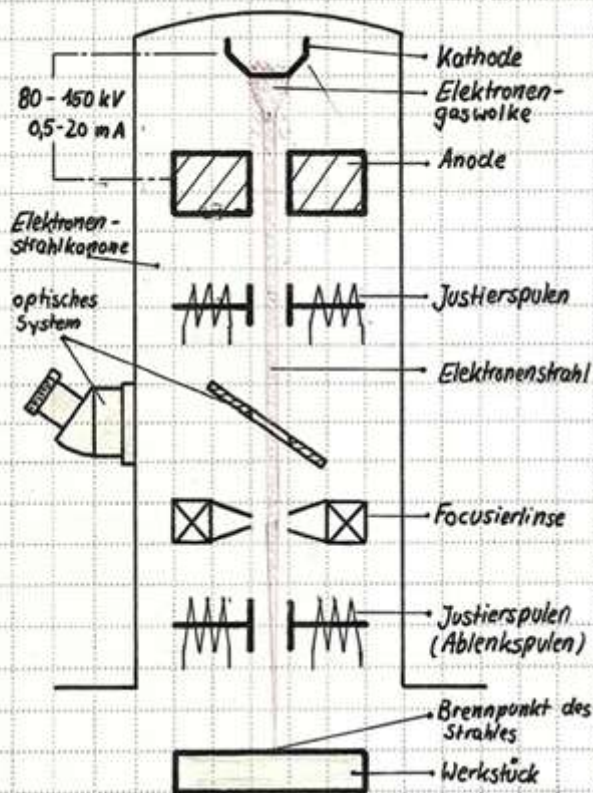
Auch in die Lehrlingsausbildung bei KHD Oberursel wurde das Elektronenstrahlschweißen integriert, der Werkzeugmacherlehrling Günter Hujer berichtet 1969 darüber:

### Elektronenstrahlschweißen I

(Benennung der Arbeit)

Dieses Verfahren hat gegenüber den üblichen Schweißverfahren viele Vorteile, ja es ermöglicht sogar Schweißungen die unter normalen Umständen überhaupt nicht möglich wären. Vorteile dieses Verfahrens ist die Erreichung großer Schweißtiefen (Stahl ca. 20-25 mm; Magnesium ca. 40 mm) bei kleinen Schmelz- und Erwärmungszonen. Auch können Werkstoffe, die sich mit den üblichen Schweißverfahren nicht schweißen lassen, miteinander verbunden werden. Das Elektronenstrahlschweißen ergibt kaum Wärmeverzug des Werkstückes, auch verzündert der Werkstoff während des Schweißvorganges nicht. Es entstehen saubere Nähte, die eine hohe Zugfestigkeit besitzen. Nachteile des Verfahrens sind: großer maschineller Aufwand und hohe Rüstzeiten.

Entstehung des Elektronenstrahls: Die Kathode wird mit einem Heizstrom von 8 V zum Glühen gebracht, dabei entsteht um die Kathode eine Elektronengaswolke. Durch die hohe Spannung zwischen Kathode



und Anode werden die Elektronen zur Anode hingezogen. Ein Teil der Elektronen trifft die Anode und wird abgeführt. Der größte Teil der stark beschleunigten Elektronen fliegt durch die Anode (= Hohlzylinder aus hochwertigem Stahl) hindurch und bildet den Elektronenstrahl. Um den Strahl in eine bestimmte Richtung lenken zu können, sind nach der Anode Justerspulen angebracht. Mit Hilfe der Focusierlinse wird der Strahl

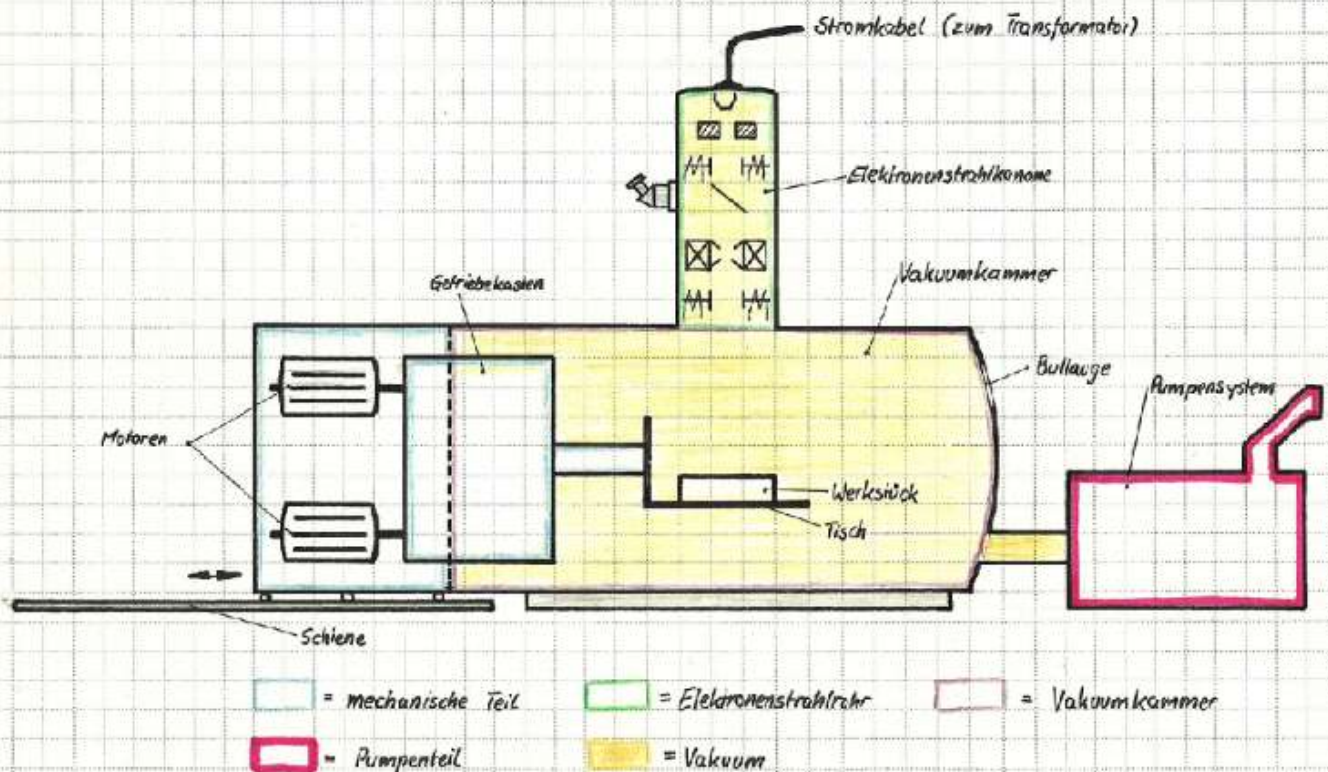
gebündelt; d.h. auf der Werkstückoberfläche trifft der Strahl mit seinem kleinstmöglichen Punkt auf. Die Justerspulen (Ablenkspulen) dienen dazu den Strahl auf einen bestimmten Punkt des Werkstückes zu richten. Mit dem optischen System kann man den Strahl beobachten und fokussieren. Die gesamte Elektronenstrahlkanone steht unter einem Vakuum; das ist nötig, da sich der Elektronenstrahl in Luft nicht bilden kann. Das Vakuum muß deshalb auch aufrechterhalten werden.

Entstehung der hohen Temperaturen: Die hohe Geschwindigkeitsenergie der Elektronen wird beim Auftreffen auf das Werkstück in Wärmeenergie umgewandelt, und erwärmt die zu schweißenden Teile bis zur Schmelztemperatur.

Aufbau der Maschine: Er gliedert sich im wesentlichen in sechs Hauptteile:

- |                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| 1.) Die Elektronenstrahlkanone | 4.) Das Pumpensystem   |
| 2.) Die Vakuumkammer           | 5.) Der Transformator  |
| 3.) Der mechanische Teil       | 6.) Der Bedienungsteil |

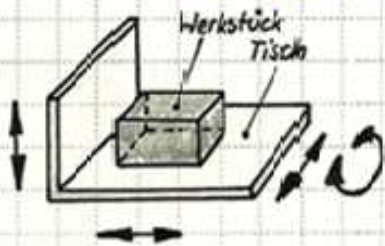
Elektronenstrahlschweißmaschine



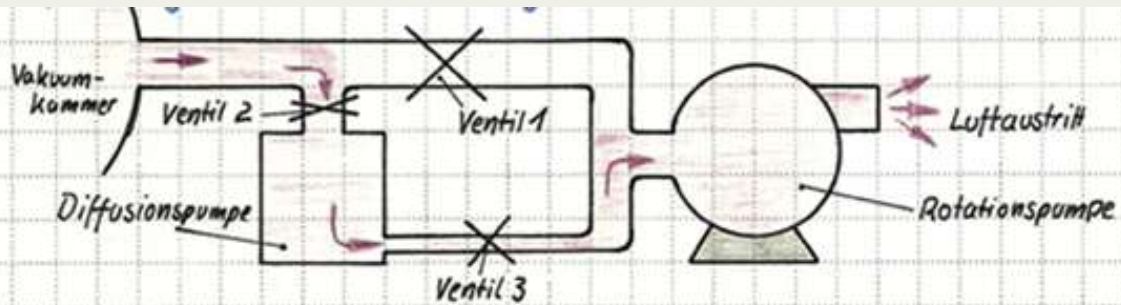
1.) Die Elektronenstrahlkanone: Sie besteht aus einem, an einer Seite geschlossenem Hohlzylinder. In ihr sind die Kathode, die Anode, die Justierspulen, die Focuserlinse, die Ablenkspulen und das optische System untergebracht. Funktionsweise siehe Teil I.

2.) Die Vakuumkammer: Sie besteht aus einem, an beiden Seiten geschlossenen Stahlzylinder. Auf der Kammer ist die Elektronenstrahlkanone angebracht. Um das Werkstück während des Schweißvorganges beobachten zu können, sind an der Kammer 3 „Bullaugen“ angebracht. Um das Vakuum herstellen und aufrechterhalten zu können muß die Kammer vollkommen dicht (luftdicht) sein.

3.) Der mechanische Teil: Er dient dazu die zum Schweißen notwendigen Bewegungen auszuführen. Es können Vor- und Rückwärtsbewegungen, Seitwärtsbewegungen, Auf- und Abgehende Bewegungen und eine Drehbewegung des Werkstückes um seine Längsachse ausgeführt werden. Für jede Bewegung ist ein gesonderter Motor notwendig.



4.) Das Pumpensystem: Es dient dazu, das zum Schweißen notwendige Vakuum herzustellen. Es besteht aus 2 Pumpen: der Drehschieberrotationspumpe (Vorpumpe) und der Diffusionspumpe. Zu Beginn arbeitet nur die Vorpumpe, sie pumpt den größten Teil der Luft heraus, die restliche Luft wird von beiden Pumpen gemeinsam herausgepumpt. (Vakuum  $5 \times 10^{-4}$  Torr)



Luftverlauf wenn beide Pumpen arbeiten (Ventil 1 geschlossen)

5.) Der Transformator: Er dient dazu den Strom auf die notwendige Hochspannung umzuwandeln.

6.) Der Bedienungsteil: Er von ihm aus werden sämtliche Bewegungsvorgänge gesteuert. Auch die Stromspannung und Stromstärke werden von ihm aus geregelt.

Lehrling  
Unterschrift und Datum

Lehrherr bzw. Ausbilder  
Prüfvermerk und Datum

Berufsschule  
Sichtvermerk und Datum

Gesetzlicher Vertreter  
Sichtvermerk und Datum



Mittlerweile ist dieses Verfahren in der Triebwerksfertigung etabliert, es gibt sicherlich kein Triebwerk ohne elektronenstrahlgeschweisste Bauteile.

Ende

## Anhang\_Quellen:

### Elektronenstrahl-Materialbearbeitung (Wikipedia 1.1.2019)

#### Historisches[Bearbeiten | Quelltext bearbeiten]

Die Möglichkeit, mit dem damals so genannten Kathodenstrahl Material zu bearbeiten, wurde bereits 1879 entdeckt ([Johann Wilhelm Hittorf](#) und [William Crookes](#)), und 1949 begann die Ära der bewussten thermischen Werkstoffbearbeitung mit dem Elektronenstrahl ([Karl-Heinz Steigerwalds](#)). 1952 wurde durch Steigerwald die erste Elektronenstrahl-Bohrmaschine gebaut und 1958 die erste Elektronenstrahl-Schweißmaschine. Im Laufe der folgenden Jahrzehnte betraten einige Unternehmen die Szene ([Zeiss](#) als erstes), und heute stellen diverse High-Tech-Unternehmen in verschiedenen Ländern der Welt (insbesondere [Deutschland](#), [Großbritannien](#), [Frankreich](#), [USA](#) und [Japan](#)) EB-Maschinen her.

Das Spektrum und der Umfang der Elektronenstrahl-Materialbearbeitung (Schweißen, [Bohren](#), [Oberflächenmodifikation](#)) hat sich seit den Anfängen kontinuierlich entwickelt, s. o. Forschung und technische Entwicklung führen nicht nur zu immer „raffinierteren“ Geräten und Prozessen, sondern auch zu völlig neuen Anwendungen.

**Karl-Heinz Steigerwald** (\* [10. September 1920](#) in [Koblenz](#)) ist ein deutscher Physiker.<sup>[1]</sup>

Der Lehrerssohn besuchte das Kaiser-Wilhelm-Realgymnasium (heute: [Eichendorff-Gymnasium Koblenz](#)) und studierte Physik an den Technischen Hochschulen in Darmstadt bei [Otto Scherzer](#) und in Berlin, wo er als Diplom-Physiker abschloss. 1942–1946 war er Assistent am Institut für theoretische Physik an der TH Darmstadt. Im Zweiten Weltkrieg wirkte er an der Entwicklung eines deutschen Radargerätes mit.

1947 trat er eine Stelle in einer Splittergruppe des AEG-Forschungsinstituts im badischen [Mosbach](#) an. Entgegen einem Verbot der Besatzungsmächte experimentierte er mit elektronenoptischen Geräten. Als er feststellte, dass auf seinem Forschungsgebiet, der Elektronenmikroskopie, „Sauregurkenzeit“ herrschte, versuchte er, mit den ultrakurzen Strahlen aus der Elektronenröhre Metalle zu bohren und zu schweißen.

1948 bis 1951 entwickelte er das Bohrverfahren für Uhrsteine und Ziehdüsen mit dem Elektronenstrahl (englisch: Electron Beam, EB). Mit der Entdeckung des Tiefschweißeffektes in den 1950ern wurde weltweit das Schweißen, Bohren, Härten und Umschmelzen mittels des hochenergetischen Elektronenstrahls im Vakuum und auch an Atmosphäre erforscht. Für sein Schweißverfahren fand er weder bei AEG noch bei Zeiss, für die er seit 1954 arbeitet, Interesse. [Irving Rossi](#) kaufte der AEG die Weltrechte ab und bestellte zwei Maschinen, sodass Steigerwald weiterarbeiten konnte.

1963 baute er im württembergischen [Wasseralfingen](#) einen eigenen Betrieb auf. Von Zeiss durfte er seinen zehnköpfigen Entwicklungsstab mitnehmen, vom Land Baden-Württemberg erhielt er einige hunderttausend D-Mark Startkapital. 1965 verlegte er seinen wachsenden Betrieb nach München, wo Steigerwald heute etwa 200 Wissenschaftler, Techniker und Facharbeiter beschäftigt. Anfang 1969 gründete er zusammen mit der Münchner Maschinenfabrik Krauss-Maffei eine Tochtergesellschaft.

## Elektronenstrahlschweißen

Elektronenstrahlschweißen ist eine spezielle Füge­technik zur Herstellung dichter Verbindungen mit minimalem Verzug.

### **Vorteile Geringe Wärmezufuhr**

- Minimaler Verzug
- Schmale Schmelzzone (MZ) und schmale Wärmeeinflusszone (HAZ)
- Tiefer Einbrand zwischen 0,05 und 200mm (0,002" bis 8") in einer Lage
- Hohe Schweißgeschwindigkeit
- Schweißen von Metallen mit hoher thermischer Leitfähigkeit möglich
- Schweißen von Metallen mit unterschiedlichen Schmelzpunkten möglich
- Vakuumschweißen sorgt für eine saubere und reproduzierbare Umgebung
- Natürliche Verschweißung von oxophilen Werkstoffen wie Titan, Zirkonium und Niobium möglich
- Zuverlässige und reproduzierbare Schweißumgebungen
- Kosteneffektive und automatisierbare Schweißprozesse und
- Keine Notwendigkeit zur Nachbehandlung – Komponenten können im geschweißten Zustand verwendet werden

### **Prozessdetails**

Beim Elektronenstrahlschweißen werden hochenergetische Elektronen mittels eines Heizstabes auf die Oberfläche der zu verschweißenden Komponenten geschossen, wo sie ihre kinetische Energie in Wärme umwandeln. Da nur die Verbindungsstelle erhitzt wird, bleibt der Rest der Komponente kalt und somit stabil. Im Ergebnis erhält man eine schmale Schweißnaht mit minimaler Wärmeeinflusszone. Die Zugabe von Füllstoffen ist nicht erforderlich, da der Grundwerkstoff selbst geschmolzen wird. Da Elektronenstrahlschweißen eine Line-to-Sight-Methode ist, ist es nicht möglich, einspringende Ecken zu verschweißen. Die Schweißtiefe kann bis zu 30mm betragen und wird mit Hilfe eines Computers kontrolliert, wodurch der Bedienungsaufwand reduziert wird. Auch wenn das Verfahren zur Fertigung einzelner Teile eingesetzt wird, zeichnet es sich durch eine gute Reproduzierbarkeit für Serienteile aus. Da Bauteile lokal erhitzt werden, können auch bereits wärmebehandelte Komponenten verschweißt werden. So ist es z. B. möglich, Getriebewellen aus ein­satzgehärtetem Getriebeteilen und einer gehärteten und angelassenen Welle kostengünstig herzustellen.