

Regeneration der Emission einer Senderöhre (BBC T510-1) mit thorierter Wolframkathode

Rolf Schick, DL3AO

In Gedenken an Wolfgang Hummel, DJ3VW

Bei einem Rundgang auf der HamRadio 2012 traf ich meinen alten Freund und Funkfreund Wolfgang, DJ3VW. Mit freudigem Gesicht berichtete er über den gerade erfolgten Kauf einer Senderöhre auf dem Flohmarkt. Die Röhre, Type T510-1, wurde bis vor etwa 10 Jahren von der Fa. BBC (bzw. ABB) hergestellt. Sie entspricht in wesentlichen Eigenschaften der bekannten Zero-Bias Triode 3-500Z, ist jedoch im mechanischen Aufbau robuster. Vorteilhaft ist die maximale Gitterbelastung von 40 W, ein doppelt so großer Wert wie bei der 3-500Z. Die Röhre ist im Amateurfunk gesucht. Nach Angaben des Verkäufers sei die Röhre gebraucht, lange Jahre nicht benutzt, doch in brauchbarem Zustand. Man soll aber vor Inbetriebnahme die Röhre einige Tage nur mit Heizspannung betreiben.

Der Kauf von Elektronikröhren auf einem Flohmarkt ist immer eine kritische Angelegenheit. Neben einem allgemeinen Augenschein bleibt eigentlich nur eine oberflächliche Prüfung mit einem Ohmmeter auf Heizfadenbruch und Kurzschlüsse zwischen Gittern und Kathode übrig. Wolfgang ließ sich aber in seiner Begeisterung über die erworbene Röhre von meiner vorsichtig geäußerten Skepsis nicht abringen. Kein Problem meinte er, ich würde ihn in den nächsten Tagen mit der neu im Sender installierten Röhre und mit voller Ausgangsleistung hören.

Leider kam es nicht mehr dazu. Kurz nach Rückkehr von der HamRadio wurde Wolfgang in ein Krankenhaus eingeliefert, wo er wenige Tage später starb.

Es blieb mir überlassen, die Röhre auf ihre Tauglichkeit zu überprüfen. Den Test habe ich in einer Endstufe vorgenommen, welche ich schon 1961 gebaut habe, damals bestückt mit 2 Eimac Röhren 3-400Z. Mit 2 Regeltrafos auf der Netzseite kann ich Heizspannung und Anodenspannung in weiten Grenzen stufenlos regeln.

Die nominelle Heizspannung der Röhre beträgt 5 V mit 5% Toleranz. Wie vom Verkäufer empfohlen, habe ich die T510-1 Röhre 24h mit einer Heizspannung von 4.8 V betrieben und innerhalb der folgenden 24 h langsam auf 5.2 V erhöht. Die Maßnahme soll folgendes bewirken: Einen durch langes Nichtbenutzen der Röhre spröde gewordenen Heizfaden „weichglühen“, sowie eine „Entgiftung“ des Heizfadens vorzunehmen. Bei der langen Lagerung der Röhre können sich

Gasmoleküle auf dem Heizfaden niederschlagen, die beim Glühen u.U. entfernt werden. Eine „Getterung“, d.h. eine Adsorption von Restgas in der Röhre an ein Trägermaterial ist allerdings mit dieser Methode nicht möglich. Wie bei anderen Röhren mit Graphitanode ist zum „Gettern“ auf der Anode Zirkon aufgetragen (man erkennt dies an der grauen Anodenfarbe). Die Getterwirkung tritt allerdings erst bei Temperaturen von über 1000 C ein. Die Anode muss mindestens leicht rot glühen.

Jetzt kam die Zeit für den spannenden Moment. Eine Hand am Regeltrafo zum Hochdrehen der Anodenspannung, ein Auge auf die Röhre, ein Auge auf das Wattmeter am Senderausgang. Von 0- 1000 V Anodenspannung (bei -5V Gittervorspannung durch eine Zenerdiode in der Kathodenleitung) erhöhte sich der Anodenstrom langsam auf ca. 100 mA. Bei 2000 V wurden gerade 150 mA erreicht. Der Wirkungsgrad war miserabel. Die Ausgangsleistung betrug um 100 W (bei 300 W input). Nach etwa 20 s begann die Anode leicht zu glühen. In meiner Vorstellung war dies jetzt ein guter Zeitpunkt um die Anode einige Zeit dunkelrot glühen zu lassen. Unter permanenter Beobachtung und Regeln der Anodenspannung ließ ich die Anode etwa eine Stunde in einem kirschrot glühenden Zustand. Nur vom Gefühl her nahm ich an die Zeit müsste reichen, um Gasmoleküle in der Röhre weg zu gettern.

Langsam wurde die Anodenspannung erhöht. Kein befürchteter blauer Blitz, doch der Anodenstrom nahm nur wenig zu. Bei 4000 V und einer Steuerleistung von 70 W nur 160 mA, statt der erwarteten 300- 400 mA. Immer noch schlechter Wirkungsgrad, die Anode begann jetzt besorgniserregend zu glühen. Der Versuch wurde abgebrochen.

Offenbar war der Anodenstrom in der Sättigung. Dies ließ nur die Vermutung zu, die Emissionsfähigkeit des Heizfadens war erschöpft. In der Röhrenzeit hieß das: Die Röhre ist „taub“. Ihr Schicksal schien vorgezeichnet: In nicht wenigen Shacks von Amateurfunkern findet man große Senderöhren zu Trophäen aufgereiht....

Ich erinnerte mich an frühere Zeiten. In den ersten Jahre nach Ende des 2. Weltkrieges besserten mein Freund Kurt (später DL1CR) und ich unser Schülertaschengeld durch Reparieren von Radiogeräten aus der Nachbarschaft und Verwandtschaft auf. Oft waren die Röhren „taub“ und Ersatzröhren Mangelware. Die Röhren mussten „regeneriert“ werden, ein damals gebräuchliches Verfahren. Konnte die T510-1 vielleicht auch „regeneriert“ werden? Zur Beantwortung der Frage war aber zuerst eine eingehende Information zur Art der thermischen Elektronenemission bei dieser Röhre erforderlich. Kathoden von Senderöhren höherer Leistung basieren auf anderen Materialien als die von Empfängerröhren.

Einige Grundlagen

Die Elektronenquelle einer Hochvakuumröhre muss speziell zwei Anforderungen genügen: Eine hohe Elektronenemission erfordert eine hohe Kathodentemperatur. Doch je höher die Betriebstemperatur der Kathode, umso größer die Abdampfung des Elektronen emittierenden Metalls. Dadurch wird die Lebensdauer der Röhre begrenzt. Zusätzlich kann sich das abgedampfte Metall auf die Gitter niederschlagen, was zu unerwünschten Effekten führt.

Die T510-1 Röhre benützt, wie viele andere Senderöhren, als Kathode einen direkt geheizten, etwa 2 % Thorium enthaltenen Wolframfaden (sogenannte thorierte Wolframkathode, engl. thoriated tungsten). Wolfram dient, dank seiner mechanischen Stabilität bei den erforderlichen Temperaturen von ca. 2000 K als Träger für das die Elektronen aussendende Thorium. Die Austrittsarbeit der Elektronen ist bei Thorium etwa $1/6$ der von Wolfram und verringert entsprechend die Heizleistung gegenüber den anfänglich reinen Wolframkathoden. Die Fertigung einer guten Kathode ist ein komplexer Prozess der viel praktische Erfahrung erfordert. Aus diesem Grund können Röhren vom gleichen Typ je nach Hersteller unterschiedliche Qualitäten aufweisen. Im allgemeinen geht die Röhrenfertigung von einem Wolframfaden mit 2 % Thoriumoxyd aus. Zusätzlich wird dem glühenden Wolframfaden in einer Schwefelwasserstoffatmosphäre Kohlenstoff zugeführt. Diese sog. Karbonisierung bewirkt, dass das Thorium auf der sich bildenden Wolframkarbidschicht wesentlich langsamer verdampft. Der Kohlenstoff befördert außerdem die Reduktion des Thoriumoxyds zu Thorium, das als Metall Elektronen als freie Ladungsträger enthält. Im Betrieb diffundiert das Thorium an die Oberfläche des Fadens, wo es in Abhängigkeit der Temperatur Elektronen in das Röhrenvakuum abgibt. Schon dieser kurze Abriss zeigt, dass die Elektronenquelle in einer Röhre ein sensibles Teil darstellt dem im Betrieb im Hinblick auf die Lebenszeit der Röhre besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist. Ein entscheidender Faktor ist das Einhalten einer optimalen Temperatur des Kathodenfadens. Sie hängt direkt mit der Heizleistung, bzw. der Heizspannung zusammen.

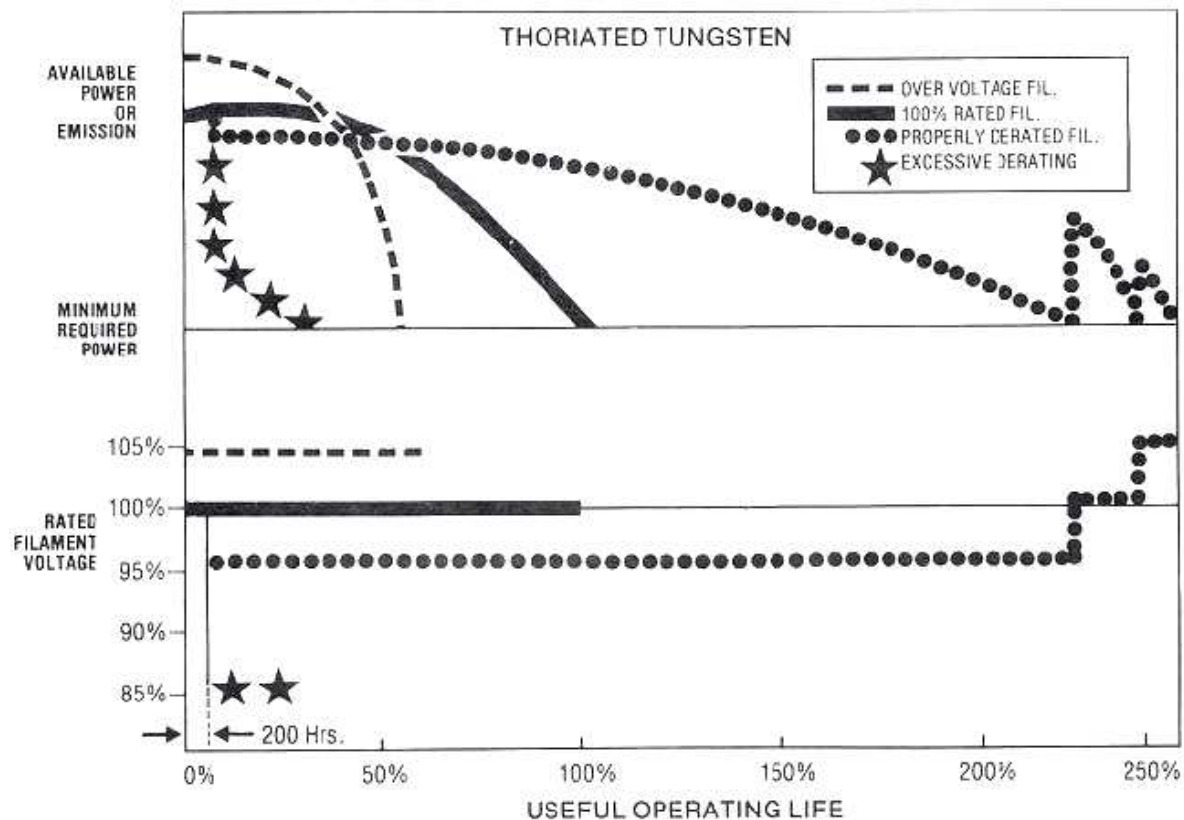


Abb. 1: Diagramm aus Application Bulletin, No. 18, Sep 2010, Fa. EIMAC.

Die Fa. EIMAC zeigt in einem Diagramm (Abb. 1) den Einfluss der Heizspannung auf die mittlere Lebensdauer von Senderöhren mit thoriertem Wolframheizfaden. (unterer Bildteil). Bezugswert (100%) ist die für die Röhre im Datenblatt angegebene nominelle Heizspannung. Für die Röhren 3-500Z, oder die Röhre T510-1, beträgt sie 5 V. Wird die Röhre mit 96% der nominellen Heizspannung betrieben (für den beschriebenen Fall 4.8 V), so wird die mittlere Lebensdauer mehr als verdoppelt. Allerdings muss dann streng dafür gesorgt werden, dass dieser Wert nicht weiter unterschritten wird (z.B. durch Netzspannungsschwankungen). Wie die Abb. zeigt, wird bei einer Heizspannung von 85 % (4.25 V) die Röhre in kurzer Zeit (200 h) unbrauchbar.

Gleichmaßen, allerdings weniger dramatisch, verringert ein Überheizen der Röhre die Lebensdauer. Bei einem Überheizen auf 105 % (5.25 V) verringert sich die Lebensdauer auf ca. 65 %.

Der obere Teil von Abb. 1 stellt die erzielbare Ausgangsleistung in Abhängigkeit der Heizspannung dar. Ein Überheizen ergibt kurzzeitig ein erhöhte Ausgangsleistung, welche aber dann schnell abfällt. Bei 4% Unterheizen

fällt die Ausgangsleistung gleichmäßig ab (punktierte Kurve). Am Ende dieser Betriebszeit kann durch Erhöhen der Heizspannung nochmals für ca. 1000 h eine genügende Ausgangsleistung erzielt werden.

Die Abb. zeigt den gegensätzlichen Einfluss von Überheizen und Unterheizen. Überheizen ergibt eine erhöhte Elektronenemission, welche vom Grundsatz her gewünscht ist. Allerdings nimmt das Verdampfen der Wolframkarbidschicht zu (entkarbonisieren). Wie schon erwähnt, ist die Karbonschicht für die Reduktion des (nichtleitenden) Thoriumoxid zu Thorium und für die Diffusion des Thorium an die Oberfläche des Heizfadens verantwortlich.

Beim Unterheizen werden von der negativen Kathode durch die zu geringe, sie umgebende Elektronenwolke positive geladene Ionen der Restgase im Röhrenkolben (Sauerstoff, Stickstoff) angezogen. Diese schlagen sich auf der Oberfläche der Kathode nieder und verhindern die Elektronenemission. Die Kathode wirkt als unerwünschtes Getter.

Der in Abb. 1 von der Fa. EIMAC dargestellte Verlauf gilt für Röhren im Dauerbetrieb. Angesprochen werden hier vor allem die Besitzer der in USA zahlreichen Mittelwellensender. Diese Sender sind oft rund um die Uhr in Betrieb. Bei Einhalten des „filament management“ erreichen die teuren Röhren Betriebszeiten von meist über 10 000 h, bevor sie vorbeugend ausgewechselt werden (und dann auf dem Amateurflohmarkt landen!).

Im zeitlich zyklischen Amateurfunkbetrieb wird viel seltener eine Röhre durch Emissionserschöpfung wegen langer Betriebsdauer unbrauchbar. Die Emissionsfähigkeit hängt ja von dem aufsummierten Produkt aus Anodenstrom und Betriebszeit ab. Fraglich ist, ob hier ohne Stabilisierung der Heizspannung das Risiko einer leicht unterheizten Röhre zur Lebenszeiterhöhung eingegangen werden soll.

Weit häufiger wird im Amateurfunk eine Senderöhre unbrauchbar durch den gefährlichen „in-rush current“ beim Anlegen der Heizspannung. Der kalte Heizfaden besitzt einen ohmschen Widerstand der weit unter ein Ohm liegt. In der Folge kann bei „steif“ ausgelegten Netzteilen kurzzeitig ein Einschaltstrom fließen, welcher den nominellen Heizstrom (14.5 A bei 3-500Z und T510-1) um ein Vielfaches übersteigt. Zusammen mit dem Erdmagnetfeld führt dies zu einer Auslenkung des Heizfadens. Folge kann ein Kurzschluss Heizfaden-Steuergitter sein oder ein Heizfadenbruch infolge Materialermüdung. Nach EIMAC darf der Heizfadenspitzenstrom den doppelten nominellen Heizstrom nicht übersteigen.

Die Praxis.

Die neu gewonnenen, bzw. aufgefrischten Erkenntnisse wurden nun in weiteren Tests auf die T510-1 angewandt.

Nach den ersten Versuchen war kein übermäßiger Gasgehalt im Röhrenkolben zu vermuten. Bei einer Anodenspannung bis 4000 V trat im Anfangstest, wie geschildert, kein gefürchteter „blauer Blitz“ noch Glimmleuchten auf. Das vorgenommene Anodenglühen müsste sich zusätzlich positiv ausgewirkt haben.

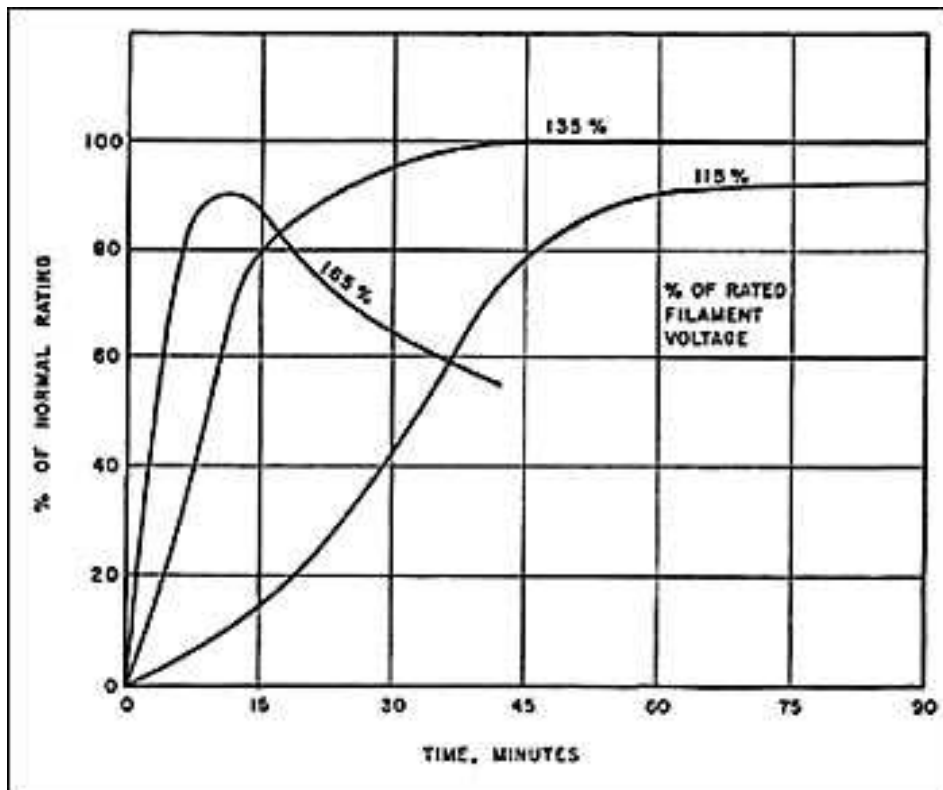
Die schwache Elektronenemission kann zwei Ursachen haben:

1. Die Röhre wurde in einem Industriesender (Diathermie, Plasmaerzeugung) eingesetzt und die Kathode ist durch eine hohe Betriebsstundenzeit „ausgelutscht“. Mit etwas Glück könnte durch Erhöhung der Heizspannung auf 5.25 V- 5.3 V noch ein weiterer Betrieb der Röhre über vielleicht 1000 h möglich sein (entsprechend Abb. 1).
2. Die Kathode ist „vergiftet“. Entweder durch Überlastung im Betrieb, durch Unterheizen oder auch durch lange Lagerung haben sich auf der monomolekularen Thoriumschicht Gasmoleküle angelagert welche die Elektronenemission behindern.

Es sprach vieles dafür, nun die Emission unter ständiger Erhöhung der Heizspannung zu messen.

Im Internet fand ich den Abdruck eines Artikels von Lane S. Upton. Lane regenerierte erfolgreich eine ganze Anzahl von Senderöhren mit Thorium-Wolfram Kathoden. Es war also naheliegend, sich nach seinen Erfahrungen zu richten.

Das folgende Bild und der nachfolgende englische Text wurden einem Bericht von Lane S. Upton: The Rejuvenation of Vacuum Tubes, entnommen.



Summary of data accumulated by author on rejuvenation of thoriated tungsten filaments. Best results are obtained at 135% of rated filament voltage. At 115%, rejuvenation time is very significantly increased; at 165%, the tube is quickly destroyed.

1. Operate the filament at 135% of rated voltage for 30 minutes. Test the tube. If it has improved but is still not up to rating, continue for another hour. If, at the end of this time, the tube is still not up to specification, move on to procedure 2.

3. In this procedure the filament is run white hot to strip the emitting surface completely clean, then the surface is restored using the above procedure. Operate the filament for 15 to 20 seconds at 350% of rated voltage with no other voltages applied. (Do not attempt to test at this point as there will be no emission.) Now operate the tube under the conditions given in the first procedure. Test the tube every 30 minutes, and if the tube is not up to rating after two hours it has reached its maximum emission capability. Although a tube does not meet its full transconductance specification, it still may be useable in many applications.

Unter Vorsicht habe ich zunächst eine Heizspannungs - Zeit Kurve durchfahren welche in der Form der 115% Kurve von Upton entspricht, jedoch nur bis zu einer maximalen Spannung von 110 %. (5.5 V). Die Maßnahme erbrachte eine deutliche Emissionsverbesserung. Es sprach nichts dagegen, ein Wagnis mit einer Heizspannung bis 120 % (6 V) zu versuchen (ängstliche Gemüter schauen besser nicht auf die Röhre: die Helligkeit des Fadens lässt nichts gutes vermuten!).

Das Ergebnis zeigt Abb. 2. Oberhalb von 5 V Heizspannung ist noch ein leichter Anstieg der Ausgangsleistung zu verzeichnen. Der Knickpunkt in der Kurve liegt um 4.4 V. (Bedeutung des Knickpunkts muss noch genauer untersucht werden).

Schlussfolgerung

Bei der betrachteten Röhre aus dem Flohmarkt handelt es sich vermutlich um eine Röhre die längere Zeit im Einsatz war, Betriebsstundenzeit sicher >5000 h. Die Kathode war leicht vergiftet, vermutlich durch die vom Flohmarktverkäufer erwähnte lange Lagerung. Der vorgenommene Regenerationsprozess zum Abdampfen der die metallische Thoriumschicht überlagernden Fremdmoleküle war erfolgreich, und nach Upton relativ „mild“. Die Röhre ist somit durchaus verwendungsfähig bei der nominellen Heizspannung von 5 V. Offen bleibt, wie viele Betriebsstunden die Röhre die gemessene Emission noch einhält.

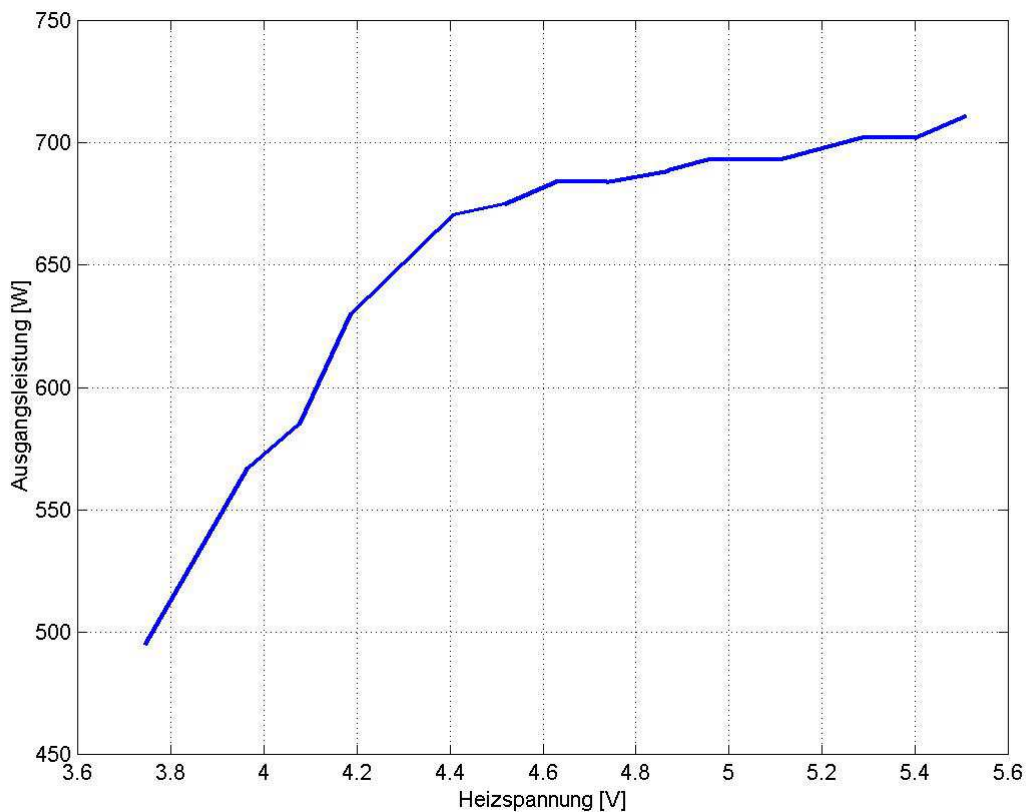


Abb. 2 : Ausgangsleistung [W] gegenüber Heizspannung [V] , T510-1, nach Regeneration. Frequenz 14 MHz, Steuerleistung 70 W, Anodenspannung 3000 V. Anodenstrom 420 mA bei Heizspannung 5 V und Ausgangsleistung 690 W, entsprechend Wirkungsgrad von 55%. Bei der Ausgangsleistung ist allerdings die Steuerleistung abzuziehen (Grounded-Grid Betrieb), so dass der

Wirkungsgrad eher bei 50 % liegt. (Die Fluktationen in der Messkurve rühren von der gedrängten Skala meines Wattmeters her)

!