

Alfred Ungelenk und die Entwicklung der Pantix-Röhre

Andreas Keller

Warum Drehanodenröhren?

In Röntgenröhren wird zwischen zwei elektrischen Anschlüssen, der Kathode (-) und der Anode (+), eine hohe Spannung zwischen 30.000 Volt und 150.000 Volt angelegt. Bei den anfangs genutzten Ionenröhren treten Elektronen aus dem Metall in ein verdünntes Gas aus. In modernen Elektronenröhren werden sie in ein Hochvakuum im Röhreninneren abgegeben. Die Kraft des elektrischen Feldes beschleunigt die Elektronen bis auf die halbe Lichtgeschwindigkeit. Auf einer kleinen Fläche, dem Brennfleck, treffen sie auf die Anode und werden auf der winzigen Strecke von einem tausendstel Millimeter im Anodenmaterial vollständig abgebremst. Nur aus 1 % der Energie entsteht dabei Röntgenstrahlung, 99 % werden in Wärme umgewandelt. An diesem schlechten Wirkungsgrad hat sich seit Röntgens Entdeckung bis heute nichts geändert. Der ungewollte Wärmeverlust resultiert aus den Gesetzmäßigkeiten des genutzten physikalischen Effektes. Jede Röntgenröhre muss deshalb beim Betrieb hohe Temperaturen vertragen, ohne dass sie zu heiß wird und kaputt geht.

In Röntgenbildern müssen auch kleine Einzelheiten erkennbar sein. Die hierzu notwendige Bildschärfe wird u.a. von der Größe des Brennfleckes bestimmt. Dessen Unschärfe verringert sich, wenn er möglichst klein ist. Sich bewegende Organe wie Lunge und Herz führen zu „verwackelten“ Bildern. Die Bewegungsunschärfe verringert sich, wenn die Aufnahmezeit

möglichst kurz ist. Zur Umwandlung der unsichtbaren Röntgenstrahlen in ein sichtbares Bild dienen Bildwandler. Wirksam wird in ihnen aber nicht die Strahlung, welche aus der Röntgenröhre austritt, sondern die im Wandler ankommt. Der durchstrahlte Patient schwächt die Röntgenstrahlung um bis zu 99 % ab! Damit im Bildwandler daraus eine gut belichtete, scharfe Aufnahme entsteht, muss in der Röntgenröhre über eine sehr kurze Aufnahmezeit eine sehr hohe elektrische Leistung wirksam werden. Im kleinen Brennfleck entsteht daraus fast nur Wärme. Ohne Schaden muss diese aufgenommen, verteilt, gespeichert und schnell wieder abgegeben werden. Das Material darf nicht schmelzen oder verdampfen. Viele technische Entwicklungen resultierten allein aus der Notwendigkeit dieses Problem zu lösen. Die Anode muss aus Metall sein, um den elektrischen Strom zu leiten. Besonders vorteilhaft erwies sich Wolfram wegen seiner hohen Schmelztemperatur von 3.360 °C. Schon 1904 wurden Wolframplättchen eingepresst in Kupferanoden. Das Kupfer war Wärmeleiter und -speicher. Luft oder Wasser kühlte die Anode zusätzlich. Aber in den 20er Jahren waren konstruktive und materialabhängige Möglichkeiten zur weiteren Leistungssteigerung weitgehend ausgeschöpft.

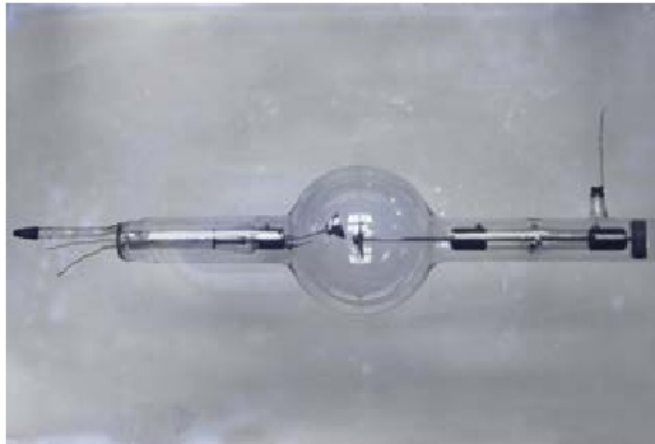
Bereits 1915 patentierte E. Thomson eine Röhre mit einer festen Kathode und einer drehbaren Anode. Die Elektronen trieben sie wie ein Wasserrad an. Diese Idee erschloss eine neue Qualität beim Umgang mit der Verlustwärme: Durch jede Bewegung

zwischen auftreffenden Elektronen und der Anode verteilt sich die entstehende Wärme auf eine Fläche, welche deutlich größer ist als der kleine, ruhende Brennfleck! Dies ermöglicht eine Leistungssteigerung der Röntgenröhre. In der Praxis waren die meisten dieser Ideen nicht nutzbar.

Alfred Ungelenks erste Versuche (1927)

In Rudolstadt begannen im März 1927 Entwicklungen zu Röhren mit bewegter Anode. Ungelenk nutzte hierzu eine Hochvakuum-Elektronenröhre mit Glühkathode. Die geheizte Kathode lässt die Elektronen aus dem Metall in das Vakuum austreten. Die gegenüberliegende Drehanode war ein kegelförmiger Teller aus dünnem Wolframblech von 4 cm Durchmesser. Er wurde über eine lange Achse mit drehendem Permanentmagneten bzw. durch den Rotor eines Elektromotors angetrieben. Die Elektronen aus der exzentrisch eingebauten Glühkathode trafen den Brennfleck auf dem umlaufenden Tellerrand. Die entstehende Verlustwärme verteilte sich auf der Brennfleckbahn.

Die Drehanode aus Wolfram ermöglichte höchste Temperaturen bis zum Schmelzpunkt nicht nur im Brennfleck, sondern für den ganzen Teller. Während der Einschaltzeit glüht er! Nach dem Boltzmannschen Strahlungsgesetz erhöht sich die abgegebene Wärmemenge mit der absoluten Temperatur zur vierten Potenz. Eine Verdreifachung der Telleratemperatur von 700 Kelvin (426 °C) auf 2.100 Kelvin (1.826 °C)



Experimentelle Drehanodenröhre (Juni 1927)

führt zur 81fachen Wärmemenge, die in derselben Zeit als Infrarotstrahlung abgegeben werden kann. Die lange, dünne Achse verhinderte, dass die hohe Temperatur der Drehanode zu den hitzeempfindlichen Kugellagern und zum Kupferrotor mit seiner viel niedrigeren Schmelztemperatur gelangte.

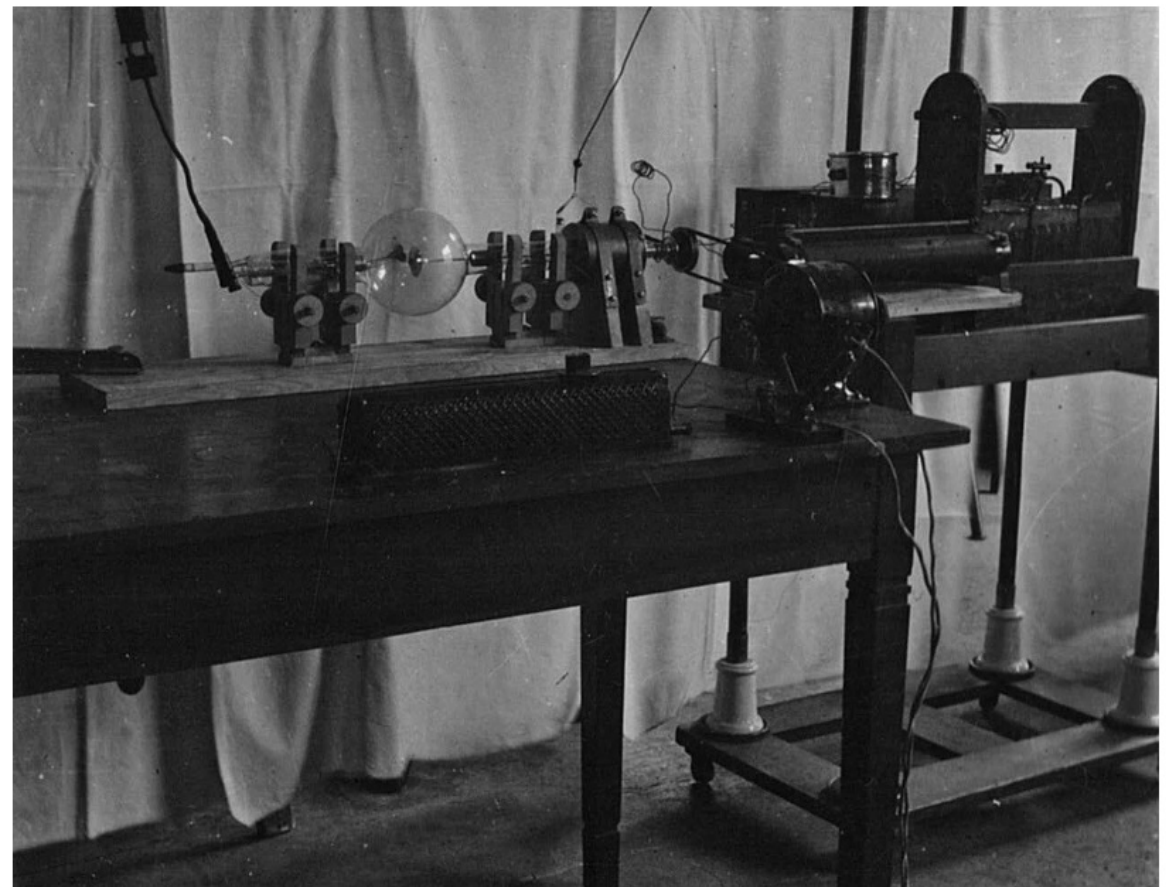
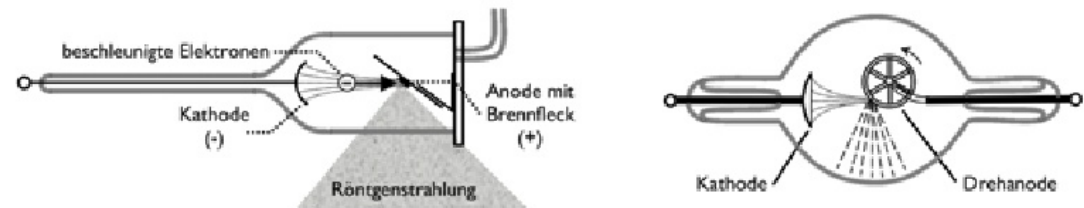
Tests erbrachten aber das enttäuschende Ergebnis, dass diese strahlungsgekühlte Hochtemperatur-Drehanodenröhre von 1927 keine höheren Leistungen zuließ als die Festanodenröhren. Sie wäre nur teurer geworden. Aus heutiger Sicht war die Strahlungskühlung hervorragend, aber das Wärmespeichervermögen zu klein! Ein Leitungsbeschluss führte im selben Jahr zur Einstellung der Entwicklungsarbeiten.

Erste Röhren der Mitbewerber

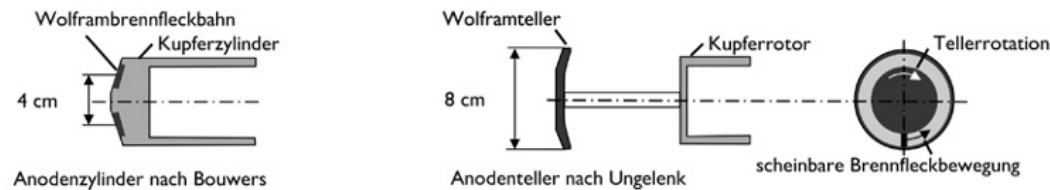
Ab 1929 bestimmte die von Albert Bouwers bei Philips entwickelte Drehanodenröhre weltweit den Stand der Technik. Als Anode diente ein drehbar gelagerter Kupferzylinder. Seine zur Glühkathode zeigende

Experimentierröhre von Prof. W. C. Röntgen (1896)

Drehanodenröhre von 1915



Versuchsaufbau für Drehanodenröhren im Rudolstädter Werk (Mai 1927)



Deckfläche war bedeutend dicker als die Wand und abgeschrägt. Auf ihr befand sich die Brennfleckbahn aus Wolfram. Den Anodenzyylinder versetzte ein 50 Hz Drehfeld in Rotation. Die lokale hohe Erwärmung im Brennfleck verteilte sich auf der umlaufenden Brennfleckbahn im Wolfram. Von dort wurde sie in das Kupfer des Anodenzyinders übertragen, gespeichert und durch Strahlung wieder abgegeben.

Die massive Kupferanode wirkte als leistungsfähiger Wärmespeicher. Die Belastbarkeit stieg im Vergleich mit Festanoden fast um den Faktor 7! Die Kurzzeitnennleistung über 0,1 s lag bei ca. 4.000 Watt. Aber nicht das Wolfram der Brennfleckbahn, sondern die niedrigere Schmelztemperatur des Kupfers begrenzte die maximale Temperatur des ganzen Zylinders. Bouwers selbst gab sie in mit 450 °C an. Die Strahlungskühlung erfolgte langsam. Der Nutzen der hohen Wärmespeicherfähigkeit überwog diesen Nachteil bei weitem. Die Rotalix war die erste am Markt erfolgreiche Drehanodenröhre. Sie setzte die Rudolstädter Entwickler unter enormen Druck.

Wiederaufnahme der Entwicklung (1929)

In der Zwischenzeit entwickelte Rudolstadt weitere Röhrentypen: Röhren mit schwingender Anode und

Wasserkühlung, Drehkolbenröhren mit fixierter Kathode und mit fixiertem Elektronenstrahl nahmen teilweise Entwicklungen vorweg, welche erst nach Jahrzehnten technisch realisiert werden konnten. Keine brachte damals die erhoffte Lösung. Durch die Erfolge der Rotalix initiiert, begannen im Herbst 1929 Arbeiten zur Weiterentwicklung der Drehanodenröhre von 1927. Die Wolframanode war konstruktiv mit einem schweren Anodenzyylinder aus Kupfer verbunden. Über dessen größeres Wärmespeichervermögen erhöhte sich die Röhrenleistung. Wegen der niedrigeren Betriebstemperatur verlangsamte sich aber die Strahlungskühlung. Damit hätte die Rotalix höchstens erreicht, aber nicht überholt werden können. Ungelöste Probleme verzögerten die Entwicklungsarbeiten.

Ungelenk gestand nach vier Jahren erfolgloser emühungen in einem Brief vom 26. Juni 1933 an den Siemens & Halske Vorstand v. Buol: „Für mich als den Mitschöpfer der Rudolstädter Röhrenfabrik wurde wegen des Fehlens einer Drehanodenröhre ... eine ernste Lebensgefahr für das Werk ... erkennbar.“ Im selben Schreiben konnte Ungelenk aber erleichtert hinzufügen: „Bei dem Suchen ... führte Anfang Mai 33 ein glücklicher Gedanke zurück zu den ersten Anfängen. ... Ich denke, das Ding hat die besten Aussichten, ein „Weltschlager“ zu werden.“

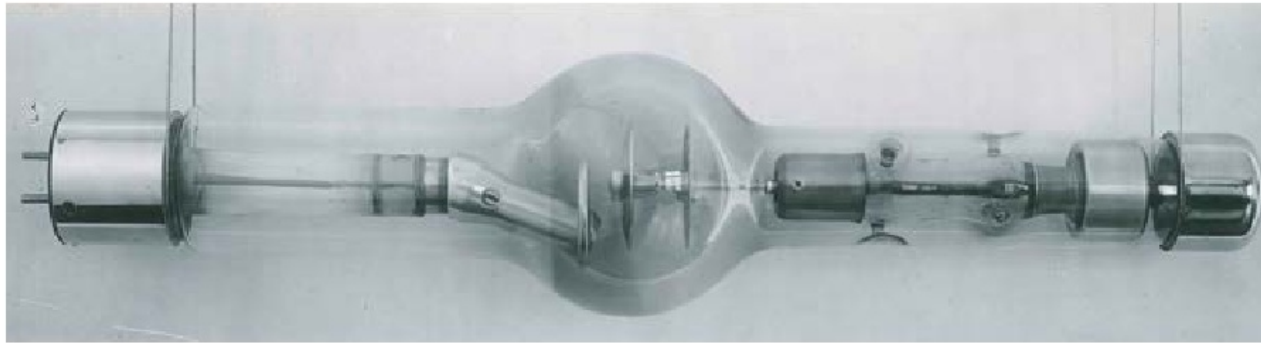
Erste Pantix-Prototypen (1933)

Der Anodenteller bestand wie 1927 ganz aus Wolfram. Er war aber größer und schwerer. Mit dem wachsenden Durchmesser (1927: 4 cm; 1934: 8 cm) verlängerte sich die Brennfleckbahn. Die größere Dicke (von weniger als 1 mm auf 3 mm) erhöhte die Masse. Die speicherbare Wärmemenge stieg drastisch an! Bei den erreichbaren hohen Temperaturen glühte der Teller. Über die größere Oberfläche ließ sich die gespeicherte Wärme in kurzer Zeit wieder abstrahlen.

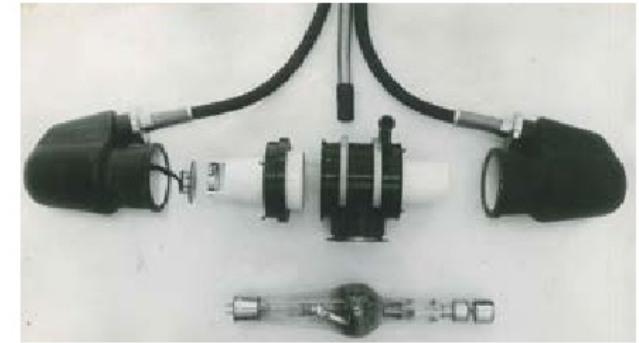
Die Idee war naheliegend: Die Hochtemperatur-Strahlungskühlung musste um das notwendige Wärmespeichervermögen ergänzt werden! Das schwierige Problem bestand in der Fertigung solch großer und dicker Teller. Wolfram lässt sich mit seinem hohen Schmelzpunkt weder gießen, schmieden noch sonst thermisch formen. Letztlich ließ sich dies in Rudolstadt mit Erfolg lösen. So erreichte die Belastung der größeren Drehanode



Rotalix Drehanodenröhre



Frühe Serienform der Pantix-Drehanodenröhre (November 1933)



Tuto-Haube P für Siemens-Drehanodenröhre (1934)

konsequent die physikalisch-technischen Grenzen des Wolframs. Gegenüber der Rotalix des Wettbewerbers ergab sich eine Leistungssteigerung um den Faktor 26! Röntgenaufnahmen mit der Pantix benötigen nur kurze Belichtungszeiten. Weitere Aufnahmen können nach kurzen Pausen folgen. Kontinuierliche Röntgendurchleuchtungen sind über Minuten möglich. Damit gelang Ungelenk und seinen Mitarbeitern der entscheidende Schritt zu den heutigen Hochleistungs-Drehanodenröhren.

Serienproduktion der Pantix in den 1930er Jahren

Von Juli 1933 bis Februar 1934 lieferte Rudolstadt 28 Röntgendiagnostikeinrichtungen mit der Pantix aus. Jahr für Jahr erhöhte sich die Produktion. Im Geschäftsjahr 1937/1938 konnten bereits 908 Stück hergestellt und verkauft werden. Die Pantix holte nicht nur den Entwicklungsrückstand auf, sie erreichte die Marktführerschaft. Nun war deren neue Qualität genau und wiederholt auch bei großen Stückzahlen zu sichern. Neben dem Produkt mit seinen grenzwertigen physikalischen und technischen Eigenschaften wurde in Rudolstadt gleichzeitig eine leistungsfähige, hochkomplexe

Technologie entwickelt und erfolgreich zur Serienproduktion genutzt! Welche enormen Probleme dabei zu lösen waren, sollen wenige Beispiele zeigen: Wegen des hohen Schmelzpunktes von 3.360°C werden die Anodenteller aus Wolframpulver mit speziellen Pressen gesintert. Dies führt im Vergleich mit gegossenen Teilen zu deutlich geringeren Festigkeiten. Trotzdem muss die schwere Drehanode bei hohen Drehzahlen sehr große Fliehkräfte aufnehmen ohne zu zerreißen. Die Verlustwärme wird nur im kleinen, schnell umlaufenden Brennfleck erzeugt. So verteilt sich die Temperatur im Teller örtlich und zeitlich extrem ungleichmäßig. Dabei darf er sich weder verziehen noch springen. Die ganze Anode muss ohne Unwucht rotieren, um die Kugellager zu schonen. Diese müssen kalt ein Lagerspiel zeigen, damit sie bei Betriebstemperatur nicht klemmen. Im Vakuum ist eine besondere Trockenschmierung erforderlich. Alle im Röhreninneren eingebauten Teile müssen beim Evakuieren glühen, damit Restgas aus deren Gefüge entweicht und beim Betrieb das Hochvakuum nicht verdirbt.

Titelseite der „SRW-Nachrichten“ vom April 1934 mit der hier noch als Siemens-Turbix-Röhre bezeichneten Drehanodenröhre



Weiterentwicklungen

Die Drehanodenröhren werden in ein Röntgenröhrenschutzgehäuse eingebaut, welches gleichzeitig den Strahlenschutz, den Hochspannungsschutz und die Wärmeabfuhr sichert. Die Infrarotstrahlung erwärmt das Gehäuseinnere. Ein Ventilator sorgte anfangs für Kühlung. Luft ist kein guter Isolator. Damit bei anliegender Hochspannung keine Überschläge auftreten, musste zwischen Kathode und Anode ein Mindestabstand eingehalten werden. Die Pantix im Bild zuvor hatte eine Länge von immerhin 55 cm. Das Schutzgehäuse war noch sperriger. Trotzdem traten bei feuchter Luft immer wieder Hochspannungsüberschläge auf.

Schon 1937 plante Ungelenk, das Röntgenröhrenschutzgehäuse mit Transformatorenöl zu füllen und dafür eine Öl-Pantix zu entwickeln. Ein erster experimenteller Strahler wurde schon 1939 aufgebaut. Zwischen 1941 und 1944 liefen weitere Arbeiten hierzu. Sie wurden danach eingestellt und erst 1950 wieder aufgenommen. Öl ist ein viel besserer Isolator als Luft. Die Öl-Pantix samt Schutzgehäuse war viel kleiner. Die Röhre im Bild unten ist nur noch 27 cm

lang. Die Wärmestrahlung erhitzt das Öl und das ganze Gehäuse, welches die Wärme an die Raumluft abgibt. Die Tellerdurchmesser wuchsen weiter. Schon 1938 betrug er 10 cm. Hochleistungsröhren arbeiten heute mit Anoden bis ca. 20 cm Durchmesser. Bei ihnen wird das Öl mit Wasser zwangsgekühlt. Sie können über 0,1 s die Wärmeenergie von 100.000 Watt schadlos aufnehmen.

Bei 1 Ampere Röhrenstrom und 100.000 Volt Röhrenhochspannung landen 6,4 Trilliarden Elektronen pro Sekunde mit der Geschwindigkeit von 214.000 km/s auf dem Brennfleck. Beim Aufschlagen wandeln sie ihre Bewegungsenergie fast völlig in Wärme um. Der Brennfleck strahlt weiß bei einer Temperatur bis 2.700 °C! Die Brennfleckbahn leuchtet gelb und rosa. Der ganze Anodenteller glüht rot. Das Bild unten zeigt die Hochtemperatur-Strahlungskühlung – ein schon ästhetisches Bild technisch beherrschter physikalischer Grenzen!

Das erste Röntgenbild 1895, die Hand von Berta Röntgen, war völlig unscharf und erforderte eine Belichtungszeit von 24 Minuten. Heutige Röntgenaufnahmen zeigen 0,1 mm große Details.

Aufnahmezeiten liegen im Millisekunden Bereich. Zu dieser Erfolgsgeschichte der Röntgendiagnostik lieferte die Pantix einen entscheidenden Beitrag.

Bedeutung der Erfindung Ungelenks für die Röhrenentwicklung bis heute

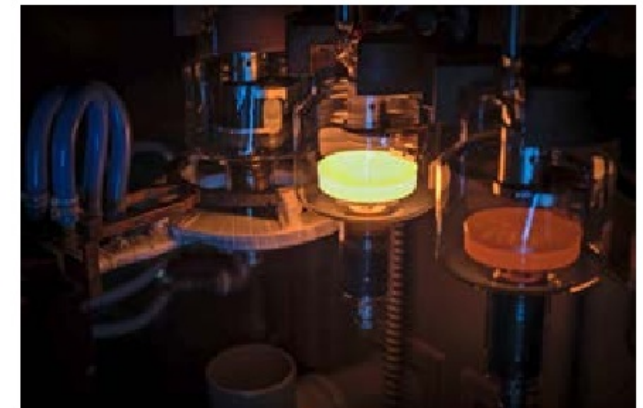
Ende der 40er Jahre übernahmen auch die anderen Röntgenröhrenhersteller die Rudolstädter Konstruktion. Schutzfristen von Patenten waren abgelaufen. Und selbst Philips nutzte in der Rotalix den Rudolstädter Wolframteller: „Es hatte sich daher als notwendig erwiesen, auf ein anderes Drehanodensystem überzugehen. ... Die ersten Röhren dieser Bauart wurden als „Pantix“ Röhren von den Siemens-Reiniger-Werken auf den Markt gebracht.“ Ungelenks Pantix ist Vorbild aller strahlungsgekühlten Hochtemperatur-Drehanodenröntgenröhren weltweit! Allein in Deutschland sind aktuell einige Zehntausend Stück dieser Art im Einsatz. In der 100jährigen, erfolgreichen Rudolstädter Innovationsgeschichte ist dies aus Sicht des Autors die bedeutendste, zeitlich und geographisch weitreichendste Produktentwicklung überhaupt.



Mitarbeiterin bei der Prüfung von Pantix-Drehanodenröhren (Anfang 1940er Jahre)



Drehanodenröhre Optitop 150/40/80-HC (Fertigung ab 1996)



Rotglühender Anodenteller mit gelb leuchtender Brennfleckbahn (2019)

