

(51) Internationale Patentklassifikation ⁶ : H05G 1/36, G01K 11/30	A1	(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 99/48342 (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 23. September 1999 (23.09.99)
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE99/00695 (22) Internationales Anmeldedatum: 12. März 1999 (12.03.99) (30) Prioritätsdaten: 198 11 014.3 13. März 1998 (13.03.98) DE (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, D-80333 Munich (DE). (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SCHOLZ, Bernhard [DE/DE]; Brunnenstrasse 19, D-91336 Heroldsbach (DE). (74) Gemeinsamer Vertreter: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT; Postfach 22 16 34, D-80506 Munich (DE).	(81) Bestimmungsstaaten: DE, JP, US. Veröffentlicht <i>Mit internationalem Recherchenbericht.</i> <i>Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche zugelassenen Frist; Veröffentlichung wird wiederholt falls Änderungen eintreffen.</i>	

(54) Title: METHOD AND LOAD CALCULATOR TO CALCULATE THE TEMPERATURE DISTRIBUTION OF AN ANODE OF AN X-RAY TUBE

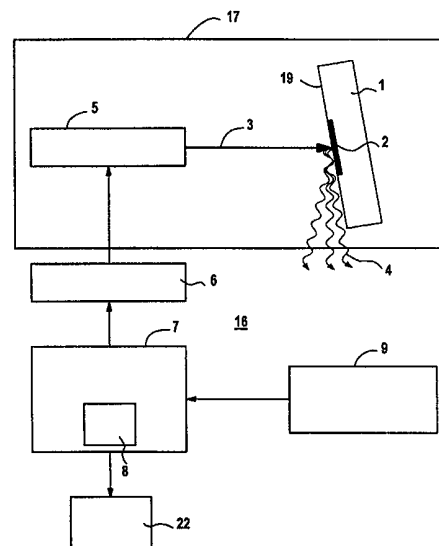
(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND LASTRECHNER ZUR BERECHNUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG EINER ANODE EINER RÖNTGENRÖHRE

(57) Abstract

The invention relates to a method and load calculator to calculate the space-time temperature distribution in or on an electron (3) irradiated anode (1) of an X-ray tube (16). The load calculator (8) calculates the short rise in temperature that occurs in a surface layer (11) in and around a focal spot (10) of the anode (1) of the X-ray tube (16) both during and immediately after irradiation of said focal spot (10) by the electrons. The load calculator (8) subsequently calculates the long-term temperature distribution in the total volume of the anode (1) by taking heat diffusion emanating from the focal spot and heat dissipation (21) emanating from the surface (19) of the anode (1) into account. The results of both calculations are added together in order to determine the temperature distribution on and in the anode (1). They are indicated on a display device (22) and used to control the X-ray tube (16).

(57) Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren sowie einen Lastrechner zur Berechnung der raumzeitlichen Temperaturverteilung in bzw. auf einer mit Elektronen (3) bestrahlten Anode (1) einer Röntgenröhre (16). Dabei wird der kurzzeitige Temperaturhub in einer Oberflächenschicht (11) in und um einen Brennfleck (10) auf der Anode (1) der Röntgenröhre (16) für den Zeitraum während und unmittelbar nach der Elektronenbestrahlung (3) des Brennflecks (10) durch den Lastrechner (8) berechnet. Dann berechnet der Lastrechner (8) die langzeitige Temperaturverteilung im gesamten Volumen der Anode (1) unter Berücksichtigung der Wärmeausbreitung, die von dem Brennfleck ausgeht, sowie der Wärmeabstrahlung (21) von der Oberfläche (19) der Anode (1). Die Ergebnisse der beiden Berechnungen werden zur Ermittlung der Temperaturverteilung auf und in der Anode (1) addiert und einerseits an einer Anzeigevorrichtung (22) angezeigt und andererseits zur Ansteuerung der Röntgenröhre (16) verwendet.



LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidshan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland			TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	ML	Mali	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MN	Mongolei	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MR	Mauretanien	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MW	Malawi	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	MX	Mexiko		
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CG	Kongo	KE	Kenia	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CM	Kamerun			PL	Polen		
CN	China	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CU	Kuba	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CZ	Tschechische Republik	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
DE	Deutschland	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DK	Dänemark	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
EE	Estland	LR	Liberia	SG	Singapur		

Beschreibung

Verfahren und Lastrechner zur Berechnung der Temperaturverteilung einer Anode einer Röntgenröhre

5

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Berechnung der raumzeitlichen Temperaturverteilung in und auf einer mit Elektronen bestrahlten Anode einer Röntgenröhre zur Bestimmung der Belastung der Röntgenröhre, auf einen Lastrechner zur Berechnung der Temperaturverteilung einer Anode einer Röntgenröhre sowie auf eine Röntgeneinrichtung, die einen derartigen Lastrechner zur Ausübung des genannten Verfahrens aufweist.

15 Die Erzeugung von Röntgenstrahlen erfolgt wie bekannt durch Bestrahlung einer Anode mit Elektronen von einer Kathode aus. Indessen besteht bekanntlich das Problem, daß selbst bei einer Anodenoberfläche aus Wolfram (hohe Kernladungszahl Z , $Z = 74$), lediglich ein Prozent der Elektronenstrahlenergie in die erwünschte Röntgenstrahlung umgewandelt werden. Ein großer Teil der Elektronenstrahlenergie heizt lediglich das Anodenmaterial auf. Die restliche Strahlenergie wird im Falle einer Röntgenröhre in das Innere des Gehäuses der Röntgeneinrichtung zurückgestreut. Die Elektronenbestrahlung der Anode muß daher unterbrochen werden, wenn in dem aus verschiedenen Materialien bestehenden Anodenblock Temperaturen erreicht werden, welche die jeweilige maximal zulässige Arbeitstemperatur erreichen bzw. überschreiten. Andererseits wird bei einem verfrühten Abschalten der Röntgeneinrichtung die Anlage nicht optimal ausgenutzt.

35

Dieses Problem wird zwar üblicherweise durch sich mit hoher Geschwindigkeit drehende Anoden gelindert, aber nicht beseitigt.

Zum Schutz der Röntgenröhre muß also die Temperaturverteilung der Anode erfaßt werden. Der thermische Zustand der Anode

kann dabei meßtechnisch oder rechnerisch erfaßt werden. Da der thermische Zustand der Anode, insbesondere der Zustand an einzelnen Anodenorten, meßtechnisch äußerst schwierig bzw. gar nicht (an inneren Anodenorten) zu bestimmen ist, kommen
5 rechnerische Bestimmungsmethoden zum Einsatz. Bei der rechnerischen Erfassung des thermischen Zustands der Anode ermittelt ein Rechner beispielsweise aus den aufgelaufenen Belastungen und der Abkühlkurve der Anode permanent die jeweilige Temperaturverteilung der Anode und zeigt sie beispielsweise
10 in prozentualen HU- (Heat Units) Werten an. Mit Hilfe schneller Mikrocomputer kann die Wartezeit nach einer Röntgenaufnahme aus den gewählten Daten für die folgende Belastung erreicht und angezeigt werden. Ein solcher, Röhrenlastrechner oder Lastrechner genannter Rechner kann daher dem Bediener
15 optisch und/oder akustisch für die Röntgeneinrichtung unzulässige Zustände anzeigen und/oder die Röntgeneinrichtung entsprechend der berechneten Temperaturverteilung steuern.

Bisher verwendete Lastrechner basieren auf einfacheren physikalischen Modellen. Dies kann dazu führen, daß die Röntgeneinrichtung teilweise zu früh abgeschaltet und somit eine optimale Ausnutzung der Röntgeneinrichtung verhindert wird.
20

Weiterhin sind theoretische Berechnungen von Anodentemperaturverteilungen bekannt. Einfache ein- und zweidimensionale Modellrechnungen zur Anodenoberflächentemperatur sind beispielsweise bekannt aus G.E. Vibrans, "Calculation of the Surface Temperature of a Solid under Electron Bombardment", MIT Lincoln Laboratory, Technical Report No. 268, 1962, oder
25 S. Whitaker, "X-Ray Anode Surface Temperatures: The Effect of Volume Heating", SPIE Vol. 914, Medical Imaging II, 565, 1988. Aufwendigere Berechnungen der Anodentemperaturen sind beispielsweise aus H. Dietz, E. Geldner, "Temperature Distribution in X-Ray Rotating Anodes", Part 1. Physical Principles, Siemens F & E - Ber., 7, 18, 1978 bekannt. Indessen
30 können die bekannten Techniken nicht gewährleisten, daß durch

eine genaue Berechnung der Temperaturverteilung der Anode die Röntgenröhre optimal ausgenutzt wird.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine verbesserte Betriebsnutzung von Röntgenanlagen dadurch zu ermöglichen, daß die Temperaturentwicklung und -verteilung der Anode rechnerisch besser als bisher ermittelt wird.

Ausgangspunkt der Erfindung ist es dabei, die raumzeitliche Temperaturverteilung in der Anode aus zwei verschiedenen Beiträgen zu ermitteln, nämlich aus dem kurzzeitigen Temperaturhub in und um den Brennfleck während der und unmittelbar nach der kurzzeitigen Elektronenbestrahlung des Brennflecks, sowie aus der langzeitigen raumzeitlichen Temperaturverteilung im gesamten Anodenvolumen infolge der Wärmeausbreitung, welche von dem Brennfleck ausgeht, und infolge der Wärmeabstrahlung von der Anodenoberfläche. Demzufolge besteht das mathematisch-physikalische Modell der Anode aus zwei unabhängigen Teilmodellen, nämlich einem Kurzzeitbelastungs-Modell und einem Langzeitbelastungs-Modell.

"Kurzzeitig" im Sinne der vorliegenden Beschreibung bezeichnet dabei einen Zeitraum, in dem die Elektronenbestrahlung eines Brennflecks erfolgt. Üblicherweise ist dies ein Zeitraum im Bereich von ca. 10 bis 100 μ s.

"Langzeitig" bezeichnet dagegen einen Zeitraum, in dem üblicherweise die gesamten Bilddaten einer Röntgenaufnahme erfaßt werde, also üblicherweise mehr als ca. 1 s.

Gemäß der Erfindung ist ein Verfahren zur Berechnung der raumzeitlichen Temperaturverteilung in einer mit Elektronen bestrahlten Anode einer Röntgenröhre vorgesehen. Dabei wird der kurzzeitige Temperaturhub in einer Oberflächenschicht in und um einen Brennfleck auf der Anode herum für den Zeitraum während und unmittelbar nach der Elektronenbestrahlung des Brennflecks nach der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung für

homogene Wärmeleiter berechnet. Weiterhin wird die langzeitige Temperaturverteilung im gesamten Volumen der Anode unter Berücksichtigung der Wärmeausbreitung, die von dem Brennfleck ausgeht, und der Wärmeabstrahlung von der Oberfläche der Anode nach der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung für inhomogene Wärmeleiter berechnet. Die Ergebnisse der beiden Berechnungen werden dann zur Ermittlung der Temperaturverteilung auf bzw. in der Anode addiert. Das Ergebnis der Berechnung, die Belastung der Röntgenröhre, kann dem Benutzer angezeigt und/oder bei der Ansteuerung der Röntgenröhre berücksichtigt werden. Diese Berechnungen der Temperaturen der Anode ermöglichen, die Röntgenanode vor Zerstörung durch Überhitzung zu bewahren. Kurz vor Überschreiten zulässiger Höchsttemperaturen an ausgewählten Anodenorten, wie beispielsweise in der Brennring oder in der Grenzschicht zwischen Anodenmaterial, kann der Röntgengenerator abgestellt werden. Ferner kann das Verfahren genutzt werden, um im voraus zu bestimmen, ob im Hinblick auf die Wärmebelastung der Anode eine Röntgenuntersuchung noch durchführbar ist oder ob eine Pause zur Abkühlung der Anode erforderlich ist.

Bei der Berechnung des kurzzeitigen Temperaturhubs kann erfindungsgemäß einer oder mehrere der folgenden Faktoren berücksichtigt werden:

- Die Rückstreuung der eingestrahlten Elektronen in Form eines multiplikativen Faktors < 1 . Dieser Faktor gibt somit die Reduktion der der Anode zugeführten Leistung auf Grund der Rückstreuung wieder.
- Bei der Berechnung des kurzzeitigen Temperaturhubs kann bei Bewegung der Anode während der Bestrahlung die Relativbewegung des Elektronenstrahls bezüglich der Anode durch örtliche Veränderung einer Wärmequellfunktion berücksichtigt werden.

- Bei der Berechnung des kurzzeitigen Temperaturhubs bei inhomogenem Profil des Elektronenstrahls kann die Inhomogenität des Strahlprofils durch Diskretisierung der Fläche des Brennflecks in einzelne Flächenelemente berücksichtigt werden.

Bei der Berechnung der langzeitigen Temperaturverteilung kann erfindungsgemäß wenigstens einer der folgenden Faktoren berücksichtigt werden:

10

- Die Rückstreuung der eingestrahlten Elektronen in Form eines multiplikativen Faktors, der kleiner als 1 ist, wobei dieser Faktor anders (in der Regel größer) sein kann als der Rückstreuungs-Faktor bei der Berechnung des kurzzeitigen Temperaturhubs.

15

- Der dreidimensionale Wärmefluß durch Beschreibung des Volumens der Anode als Zylinder, wobei der Zylinder aus einer Materialschicht besteht oder aus mehreren Schichten verschiedener Materialien zusammengesetzt ist.

20

- Der Strahlungsaustausch zwischen der Oberfläche der Anode und der Umgebung (Gehäuse) der Anode, sowie

- die Temperaturabhängigkeit der Materialparameter.

25

Erfindungsgemäß ist weiterhin ein Lastrechner zur Berechnung der Temperaturverteilung einer Anode einer Röntgenröhre vorgesehen. Dieser Lastrechner weist Mittel zur Ausführung des oben genannten Verfahrens sowie Mittel zur Anzeige des Ergebnisses der Berechnungen und zur Ansteuerung der Röntgenröhre abhängig von dem Ergebnis der Berechnungen auf.

30

Weiterhin ist gemäß der Erfindung eine Röntgeneinrichtung vorgesehen, die einen Lastrechner der genannten Art aufweist, wobei die Anode eine Drehanode sein kann.

35

Weiterhin kann die Oberflächenschicht der Anode der Röntgeneinrichtung Wolfram enthalten, eine in Tiefenrichtung weitere Schicht kann Molybdän enthalten, und eine noch weitere Schicht kann Kohlenstoff enthalten.

5

Das Strahlprofil des Elektronenstrahl kann inhomogen sein.

Die Erfindung wird nun anhand von Ausführungsbeispielen und Bezug nehmend auf die begleitenden Figuren der Zeichnungen
10 näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1 eine erfindungsgemäße Röntgeneinrichtung, bei der die Berechnung der Anodenbelastung infolge Elektronenbestrahlung durch einen Lastrechner erfolgt, und
15 die Kathode der Röntgeneinrichtung dementsprechend angesteuert wird,

Figur 2 eine detaillierte Darstellung der Röntgenstrahlerzeugung auf einem Drehanodenteller einer erfindungsgemäßen Röntgeneinrichtung,
20

Figur 3 eine schematische Darstellung der Modellbildung zur Berechnung des Temperaturhubs im Brennfleck (Kurzzeitbelastung),
25

Figur 4 die Energiedissipation von 120 KeV-Elektronen in Wolfram, berechnet aus den Modellannahmen Energieverlust der Elektronen längs der Bahn nach Bethe, Umrechnung auf Tiefenkoordinate, Gewichtung mit Reichweitenverteilung,
30

Figur 5 das Ergebnis einer Temperaturhub-Berechnung in und unmittelbar um den Brennfleck, gezeigt ist die Temperaturverteilung im Brennfleck, d. h. auf der Anodenoberfläche ($z=0$), am Ende der Strahlbelastung bei ortsfestem, homogenen, rechteckförmigen Strahlprofil,
35

- Figur 6 das Ergebnis der Temperaturhub-Berechnung in und unmittelbar um den Brennfleck als zeitliche Temperaturhub-Entwicklung in der Brennfleck-Mitte (Anodenoberfläche) bei ortsfestem, homogenen Strahlprofil während und nach der Belastung,
- Figur 7 das Ergebnis der Temperaturhub-Berechnung in und unmittelbar um den Brennfleck als räumliche (Tiefenrichtung) Temperaturhub-Entwicklung am Ende der Strahlbelastung bei ortsfestem, homogenen Strahlprofil am Ende der Belastung,
- Figur 8 das Ergebnis der Temperaturhub-Berechnung in und unmittelbar um den Brennfleck als Temperaturverteilung im Brennfleck, d. h. auf der Anodenoberfläche ($z=0$), am Ende der Strahlbelastung bei bewegtem, homogenen, rechteckförmigen Strahlprofil (Drehanode),
- Figur 9 das Ergebnis der Temperaturhub-Berechnung in und unmittelbar um den Brennfleck als zeitliche Temperaturhub-Entwicklung in der Brennfleck-Mitte (Anodenoberfläche) bei bewegtem homogenen Strahlprofil (Drehanode) während und nach der Belastung,
- Figur 10 das Ergebnis der Temperaturhub-Berechnung in und unmittelbar um den Brennfleck als räumliche (Tiefenrichtung) Temperaturhub-Entwicklung am Ende der Strahlbelastung bei bewegtem, homogenen Strahlprofil (Drehanode) am Ende der Belastung,
- Figur 11 das Ergebnis der Temperaturhub-Berechnung in und unmittelbar um den Brennfleck als Temperaturverteilung im Brennfleck, d. h. auf der Anodenoberfläche ($z=0$), am Ende der Strahlbelastung bei ortsfestem, inhomogenen (Doppel-Gauß-Profil) Strahlprofil,

- Figur 12 das Ergebnis der Temperaturhub-Berechnung in und unmittelbar um den Brennfleck als Temperaturverteilung im Brennfleck (auf der Anodenoberfläche ($z=0$)) am Ende der Strahlbelastung bei bewegtem inhomogenen (Doppel-Gauß-Profil) Strahlprofil,
- Figur 13 das Ergebnis der Temperaturhub-Berechnung gemäß der Erfindung in und unmittelbar um den Brennfleck als zeitliche Temperaturhub-Entwicklung in der Brennfleck-Mitte (Anodenoberfläche) bei bewegtem inhomogenen (Doppel-Gauß-Profil) Strahlprofil (a) sowie ein Vergleich des Temperaturverlaufs bei bewegtem homogenen Strahlprofil (b) während und nach der Belastung,
- Figur 14 das Ergebnis der Temperaturhub-Berechnung in und unmittelbar um den Brennfleck gemäß der Erfindung als räumliche (Tiefenrichtung (z)) Temperaturhub-Entwicklung am Ende der Strahlbelastung bei bewegtem inhomogenen (Doppel-Gauß-Profil) Strahlprofil nach der Belastung,
- Figur 15 eine schematische Darstellung der Modellbildung zur Berechnung des Temperaturhubs (Wärmeentwicklung) im Anodenvolumen bei Langzeitbelastung für eine Röhre, wie sie bei der Erfindung Anwendung finden kann,
- Figur 16 die Einstellung variabler Last- und Pausenintervalle bei Scans mit unterschiedlichen Strahlleistungen,
- Figur 17 die äquidistante Diskretisierung des Zylinderbereichs zur Berücksichtigung von beispielsweise Inhomogenitäten des Anodenmaterials,

- Figur 18 die inäquidistante Diskretisierung des Zylinderbereichs zur Berücksichtigung von beispielsweise Inhomogenitäten des Anodenmaterials,
- 5 Figur 19 Linearisierungsmöglichkeiten der Strahlungskurve (nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz) mit 4 Linearisierungs-Intervallen,
- Figur 20 Linearisierungsmöglichkeiten der Strahlungskurve
10 (nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz) mit 20 Linearisierungs-Intervallen,
- Figur 21 das Temperaturverhalten der Wärmeleitfähigkeit λ ,
- 15 Figur 22 des Emissionsvermögens ϵ ,
- Figur 23 der spezifischen Wärmekapazität c_p und
- Figur 24 des Diffusionsparameter D für Wolfram (W), Molybdän
20 (Mo) und Graphit (C),
- Figur 25 das Ergebnis einer Temperaturhub-Berechnung in der Brennring-Mitte (radiale Mittelposition der Brennfleckbahn) bei Dauerbelastung mit/ohne Berücksichtigung des kurzzeitigen Temperaturhubs,
25
- Figur 26 eine Berechnung der Temperaturentwicklung auf der Anodenoberfläche gemäß der Erfindung als Funktion des Radius r ausgehend von der Brennring-Mitte,
30
- Figur 27 eine langfristige Temperaturentwicklung bei Berechnung gemäß der vorliegenden Erfindung an vier verschiedenen Orten und
- 35 Figur 28 die Temperaturentwicklung gemäß der erfindungsgemäßen Berechnung auf Grundlage eines Dreischicht-Zylindermodells, wobei die Temperatur abhängig von

der Tiefe (z) und dem Radius (r) des Modell-Zylinders der Anode dargestellt ist.

Vor der Beschreibung einer erfindungsgemäßen Röntgeneinrichtung sollen zuerst die mathematisch-physikalischen Grundlagen der Berechnung der Temperaturverteilung der Anode kurz erläutert werden.

Gemäß der vorliegenden Erfindung wird ein mathematisch-physikalisches Modell der Anode sowie der Temperaturentwicklung infolge von Elektronenbestrahlung einschließlich des zugehörigen Lastrechnerprogramms vorgestellt. Bei dem erfindungsgemäßen Modell werden dabei die wesentlichen physikalischen Effekte, die der Wärmeentwicklung zugrunde liegen, berücksichtigt. Die vorliegende Erfindung zeichnet sich gegenüber bekannten Lastrechnern durch die Berücksichtigung dieser weiter unten im Detail erläuterten physikalischen Effekte aus.

Das Berechnungsverfahren gemäß der Erfindung erlaubt es weiterhin, Temperaturberechnungen in Echtzeit durchzuführen, was in der praktischen Handhabung von großem Vorteil ist. Durch diesen Vorteil zeichnet sich die vorliegende Erfindung beispielsweise gegenüber sogenannten Finite-Element-Rechnungen aus.

Der allgemeine Aufbau einer erfindungsgemäßen Röntgeneinrichtung 16 soll nun bezugnehmend zuerst auf Figur 1 beschrieben werden. Wie bekannt wird zur Erzeugung von Röntgenstrahlen 4 von einer Kathode 5 aus ein Elektronenstrahl 3 auf die Oberfläche einer Anode 1 geschossen, wodurch ein Brennfleck 2 auf der Oberfläche 19 der Anode 1 erzeugt wird. Die Kathode 5 sowie die Anode 1 sind dabei in einem Gehäuse 17 untergebracht. Die Kathode 5 wird wie dargestellt durch einen Generator 6 angesteuert, der wiederum von einem Rechner 7 angesteuert ist. Dieser Rechner 7 weist einen Lastrechner 8 auf, und hat insbesondere zur Aufgabe, beispielsweise aus den vorherigen Belastungen und der Abkühlkurve (jeweils nach dem Ende einer

Belastung) der Anode 1 permanent den jeweiligen Erwärmungszustand der Anode 1 zu berechnen und ihn beispielsweise an einer Anzeigevorrichtung 22 auszugeben und andererseits das Ergebnis der Berechnung bei der Ansteuerung der Röntgeneinrichtung 16 mittels des Rechners 7 zu berücksichtigen.

In den Rechner 7 können in bekannter Weise Steuerparameter von einer Eingabevorrichtung 9 eingegeben werden, was im folgenden nicht näher beschrieben werden wird.

10

In Figur 2 ist detailliert die Erzeugung von Röntgenstrahlen 4 durch Elektronenbeschuss 3 auf die Oberfläche 19 einer Anode 1 dargestellt. Im dargestellten Beispiel handelt es sich um eine Drehanode 1, d.h. die Anode 1 wird beispielsweise mittels eines Motors 18, der üblicherweise außerhalb des Gehäuses 17 der Röntgeneinrichtung 16 liegt, mit einer Geschwindigkeit ω in Drehbewegung versetzt. Durch die sehr schnelle Drehung des Anodentellers 1 wird somit eine kreisförmige Brennfleckbahn 10 auf der Anodenoberfläche 19 erzeugt. Die in Figur 2 dargestellte Anode 1 weist bei einer Betrachtung in Tiefenrichtung drei Schichten 11, 12, 13 aus unterschiedlichen Materialien auf.

Die vorliegende Erfindung bezieht sich wie bereits erwähnt insbesondere auf die Art und Weise der mathematisch-physikalischen Beschreibung der Temperaturentwicklung beispielsweise einer Drehanode infolge Elektronenbestrahlung und die dadurch ermöglichte Temperatursteuerung der Drehanode von Röntgenröhren, um eine optimale Nutzung der Röntgenröhre zu ermöglichen. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf die Modellierungskomponenten des gesamten Berechnungssystems.

Das Temperaturverhalten in der Anode wird gemäß der Erfindung in ein Kurzzeit- und in ein Langzeitverhalten unterteilt. Dabei sind die folgenden Überlegungen zugrunde gelegt:

Der Elektronenstrahl 3 trifft auf einen kleinen Bereich 2 von etwa 10 mm^2 bis etwa 100 mm^2 auf die Anodenoberfläche 19 auf, wobei dieser kleine Bereich Brennfleck 2 genannt wird. Die Abmessungen des Brennflecks 2 sind wie aus Figuren 1 und 2
5 ersichtlich verhältnismäßig klein gegenüber den Abmessungen des Anodentellers.

Die Kurzzeitbelastung (die Zeit der Belastung des Brennflecks 2) ist sehr kurz (etwa $10 \mu\text{s}$ bis etwa $100 \mu\text{s}$) gegenüber der sekundenlangen Langzeitbelastung (übliche Aufnahmezeit von Bilddaten bei Röntgeneinrichtungen), wie sie beispielsweise in Figur 27 dargestellt ist.

Der Temperaturleitfähigkeit-Wert von etwa $30 \mu\text{m}^2/\mu\text{s}$ des üblicherweise verwendeten Oberflächenmaterials Wolfram bewirkt somit, daß sich ein raumzeitlicher punktförmiger Wärmeimpuls während der Elektronenstrahlbelastung der Anode ungefähr $100 \mu\text{m}$ tief in die Anode hinein ausbreitet. Dies bedeutet, daß bei einer üblichen Schichtdicke der Wolfram-Oberflächenschicht 11 einer Anode 1 wie in Figur 15 beispielsweise dargestellt von einem Millimeter ein Wärmeimpuls in der Wolframschicht 11 selbst verbleibt.

Der Temperaturhub, die am Ende der Belastung erreichter maximale Brennflecktemperatur, ergibt sich aus der räumlichen und zeitlichen Überlagerung von in Raum und Zeit punktförmigen Wärmeimpulsen, welche durch die Energiedissipation der Elektronen im gesamten dreidimensionalen Brennfleckbereich (auf der Anodenoberfläche und im darunterliegenden Tiefenbereich gemäß Figur 3, in der die tiefenabhängige Wärmezeugung über dem unendlichen Halbraum (uHR) aus Wolfram dargestellt ist) während der Belastungszeit erzeugt werden.

Während einer Abtastung mit einer Dauer von 1 Sekunde hat sich somit ein Wärmeimpuls etwa 8 mm tief in die Anode hinein ausgebreitet. Entsprechend hat sich ein Wärmeimpuls bei einer Scan- (Abtast-) Dauer von 20 Sekunden etwa 30 mm tief in An-

ode hinein und somit auch in die übrigen Schichten 12, 13 der Anode ausgebreitet. Somit muß bei der Langzeitbetrachtung die Wärmeausbreitung im gesamten Anodenvolumen berücksichtigt werden.

5

Die Berechnung der raumzeitlichen Temperaturverteilung in der Anode 1 setzt sich aus zwei getrennten Berechnungen zusammen. Einerseits wird der kurzzeitige Temperaturhub in und um den Brennfleck während der und unmittelbar nach der entsprechenden kurzzeitigen Elektronenbestrahlung des Brennflecks berücksichtigt. Weiterhin wird die raumzeitliche Temperaturverteilung im gesamten Anodenvolumen infolge der (verhältnismäßig langsamen) Wärmeausbreitung, welche von dem sich bewegendem Brennfleck (Drehanode) ausgeht, und infolge der Wärmeabstrahlung von der Anodenoberfläche berücksichtigt.

15

Zuerst soll das Rechenmodell für die Kurzzeitbelastung erläutert werden.

20 Die Berechnung der Wärmeausbreitung und somit der Temperaturverteilung erfolgt in einem homogenen, dreidimensionalen, wärmeleitenden, unendlichen Halbraum (uHR), dessen Materialparameter durch das Material der Oberflächenschicht einer Anode, beispielsweise Wolfram, bestimmt sind. Somit wird der dreidimensionale Wärmefluß berücksichtigt. Dabei gilt die
25 folgende allgemeine Wärmeleitungsgleichung für einen homogenen Wärmeleiter

30

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - D\Delta \right] T(t, \vec{r}) = \frac{q(t, \vec{r})}{\rho c_p}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (c_p(T, z)\rho(z)T(t, \vec{r})) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda(T, z)\vec{\nabla}T(t, \vec{r})) + q(t, \vec{r})$$

35 ρ

Dichte

c_p	spezifische Wärmekapazität	(temperaturabhängig)
λ	Wärmeleitfähigkeit	(temperaturabhängig)
$D = \frac{\lambda}{\rho c_p}$	Temperaturleitfähigkeit	

- 5 $T(t, \vec{r})$ raumzeitliches Temperaturfeld
 $q(t, \vec{r})$ Wärmequellfunktion
 $\vec{r} = (x, y, z)$ Ortsvektor

Diese Gleichung wird mittels der Methode der Green'schen
 10 Funktionen gelöst: Die Green'sche Funktion ist die Lösung der
 Wärmeleitungsgleichung für eine in Raum und Zeit punktförmige
 Wärmequelle. Bei Wärmeerzeugung in einem Raumgebiet während
 eines Zeitintervalls werden die Beiträge dieser punktförmigen
 Wärmequellen (Wärmeimpulse) gewichtet durch ihre Stärke sum-
 15 miert.

Mittels der Green'schen Funktion $G(t, \vec{r}, t', \vec{r}')$, die in Kapitel 7
 des Buches "Methods of Theoretical Physics" von Morse et al,
 McGraw Book Company, New York, 1953, beschrieben ist, lautet
 20 der Temperatúrausdruck:

$$T(t, \vec{r}) = \frac{1}{\rho c_p} \int_{t_0}^t dt' \int_{u_{HR}} d\vec{r}' G(t, \vec{r}, t', \vec{r}') q(t', \vec{r}')$$

Die Green'sche Funktion beschreibt eine Wirkung am Ort \vec{r} zur
 25 Zeit t infolge einer Ursache am Ort \vec{r}' zur Zeit t' . Auf Grund
 der Kausalität muß gelten $t > t'$. Die gestrichenen Größen ge-
 ben Zeitpunkt und Ort der oben beschriebenen Wärmeerzeugung
 an. Die Integration erstreckt sich über die gesamte Zeit der
 Wärmeerzeugung (Wärmebelastung) und über sämtliche Orte der
 30 Wärmeerzeugung.

Für den Kurzzeitbereich werden die folgenden physikalischen
 Effekte gemäß der Erfindung einbezogen:

- 35 - Die Rückstreuung der Elektronen,

- der dreidimensionale Wärmefluß durch die Beschreibung der Wolframschicht als wärmeleitenden, dreidimensionalen unendlichen Halbraum,
- der Energieverlust der Elektronen in der Tiefe (z) des Anodenmaterials (Energiedissipation $\frac{dE}{dz}$, siehe Figur 4),
- die Bewegung des Strahlprofils bei einer Drehanode und/oder
- ggf. die Inhomogenität des Strahlprofils.

Die Rückstreuung eines Teils der auf den Brennfleck treffenden Elektronen, die in Figur 3 mit 15 bezeichnet ist, reduziert die der Anode 1 durch den Elektronenstrahl zugeführte Leistung. Diese Reduktion der der Anode 1 zugeführten Leistung wird bei der erfindungsgemäßen Berechnung durch einen multiplikativen Faktor $1 - \eta$ mit η als Rückstreckoeffizient berücksichtigt, welcher die zugeführte Strahlleistung herabsetzt.

Die Energiedissipation setzt sich aus drei Beiträgen zusammen:

1. dem Energieverlust $\frac{dE}{dz}$ der Elektronen im Wärmeleiter längs ihrer Bahn infolge Anregung der Atome und Ionisation gemäß der sogenannten Bethe-Formel,
2. dem Zusammenhang zwischen Bahnlänge und Reichweite der Elektronen und
3. der Verteilung der Eindringtiefen (R) der Elektronen.

Die daraus resultierende Energiedissipationsgleichung ist eine gewichtete Summe über alle Eindringtiefen:

$$\frac{d\epsilon}{dz} = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dR' g(R') \frac{d\tilde{E}_{R'}}{dz}$$

Mit R_{\min} und R_{\max} als minimale und maximale Eindringtiefen.

Das Strahlprofil ist die Intensität des Elektronenstrahls auf der Brennfleckfläche. Aus elektronenoptischen Gründen ist diese Intensitätsverteilung i.a. nicht homogen. Das Profil des Elektronenstrahles 14 in Fig. 3 weist eine "Doppelh"öcker"-Struktur auf. Durch Diskretisierung der Brennfleckfläche in rechteckige Flächenelemente können inhomogene Strahlprofile (Intensitätsverteilungen) modelliert werden.

10

Die Belegung des Strahlprofils, die Ortsabhängigkeit der Funktion $p(t, x, y)$, ist durch die elektronenoptischen Verhältnisse in der Röntgenröhre bestimmt. Die Belegung kann photometrisch gemessen werden, wie beispielsweise in dem Buch 15 "Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik", herausgegeben von H. Morneburg, 3. Auflage, 1995, Seiten 236ff zu entnehmen ist.

20

Die Zeitabhängigkeit der Funktion $p(t, x, y)$ gestattet es, die Bewegung des Strahlprofils bei einer Drehanode und damit die Bewegung des Strahls über die Anodenoberfläche und die Dauer der Bestrahlung zu beschreiben. Die Wärmequellfunktion lautet:

25

$$q(t', \vec{r}) = p(t', x', y') \frac{1}{\epsilon_0} \frac{d\epsilon}{dz'}$$

mit $\vec{r} = (x', y', z')$ als Vektor zum Ort der Wärmeerzeugung und ϵ_0 als Strahlenenergie.

30

Die Wärmeerzeugung im Anodenmaterial wird im wesentlichen durch den Energieverlust der Elektronen in der Anode bestimmt, wie es in Figur 3 und 4 dargestellt ist. Gemäß der Erfindung wird dieser tiefenabhängige Energieverlust durch ein phänomenologisches Modell beschrieben. Dieses Modell

35

weist folgende Merkmale auf:

1. Die Umrechnung des Energieverlustes pro Wegelement infolge Anregung und Ionisation von Atomen längs der Bahn des Elektrons auf den Energieverlust pro Wegelement längs der Reichweitenstrecke des Elektrons unter Beachtung des Energieerhaltungssatzes und

2. die Gewichtung des genannten Energieverlustes pro Wegelement mit der Reichweitenverteilung für die betrachtete Elektronenenergie, wodurch sich der wärmeerzeugende Energieverlust längs der Tiefenrichtung und somit die Wärmequellfunktion gemäß Figur 4 ergibt.

Die Strahlprofilbewegung wird dadurch berücksichtigt, daß sich die Wärmequellfunktion entsprechend der Profilbewegung, d.h. der Relativbewegung zwischen dem Strahl und der Anode, örtlich verändert.

Die Inhomogenität des Strahlprofils ist dadurch berücksichtigt, daß die Brennfleckfläche diskretisiert wird und dann den einzelnen Flächenelementen Leistungsflächendichte-Werte entsprechend der zu beschreibenden Profilintensitätsverteilung zugeordnet werden. Die Temperaturprofile der Figur 5 und Figur 11 zeigen in indirekter Weise Möglichkeiten von Strahlprofilinhomogenitäten. Dabei wurde von Maximaltemperaturen von $T_{\max}=522,7\text{K}$ bei Figur 5 und von $T_{\max}=692,74\text{K}$ bei Figur 11 ausgegangen.

Nun soll das Berechnungsmodell hinsichtlich der Langzeitbelastung anhand der einbezogenen, in diesem Zeitbereich relevanten physikalischen Effekte erläutert werden. Die gemäß der Erfindung berücksichtigten Effekte sind:

- Die Rückstreuung der Elektronen,
- der dreidimensionale Wärmefluß durch die Beschreibung des Anodenvolumens als Zylinder 20 (siehe Figur 15) mit einem

Radius R von beispielsweise 50 mm und der Höhe H, der aus mehreren Schichten 11, 12, 13 verschiedener Materialien, beispielsweise aus Wolfram (W) mit einer Stärke von 1mm, Molybdän (Mo) mit einer Stärke von 8mm und Graphit (C) mit einer Stärke von 21mm, zusammengesetzt ist,

- der Strahlungsaustausch (Abstrahlung 21 in Figur 15) zwischen der Anodenoberfläche 19 und dem Gehäuse 17 gemäß dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz (vgl. Figuren 19 und 20), und/oder
- die Temperaturabhängigkeit der Materialparameter wie beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit (Figur 21), das Emissionsvermögen (Figur 22), die spezifische Wärmekapazität (Figur 23) sowie Diffusionsparameter (Figur 24) der verschiedenen Materialien.

Die Rückstreuung 15 eines Teils der auf den umlaufenden Brennfleck 2 treffenden Elektronen 3 reduziert wiederum die der Anode 1 zugeführte Leistung. Diese Reduktion wird in der Rechnung durch einen multiplikativen Faktor ≤ 1 berücksichtigt, wodurch der Faktor also die zugeführte Strahlleistung herabsetzt. Dieser Faktor unterscheidet sich im allgemeinen vom multiplikativen Faktor der Rückstreuung der Kurzzeitbelastung, da bei der Langzeitbelastung zu berücksichtigen ist, daß ein Teil der an einer Stelle rückgestreuten Elektronen 15 an einer anderen Stelle wieder auf die Anode 1 auftrifft. Der multiplikative Faktor der Langzeitbelastung ist also in der Regel größer als derjenige der Kurzzeitbelastung.

Infolge des auf einer Kreisbahn umlaufenden Brennflecks (vgl. Figur 2) stellt sich schon nach wenigen (max. 10) Umläufen eine - bis auf den Brennfleckbereich 2 - homogene Temperaturverteilung längs der Brennfleckbahn und somit eine axialsymmetrische dreidimensionale Temperaturverteilung im Anodenvolumen ein. Diese dreidimensionale Temperaturverteilung kann in einem zweidimensionalen Zylinder 20 (vgl. Figur 15, unab-

hängige Koordinaten: Radial- und Tiefenkoordinate) berechnet werden. Dieser Zylinder 20 ist in der Tiefe geschichtet (vgl. die Schichten 11, 12, 13 in Figur 15). Die Berechnung besteht in der Lösung der allgemeinen inhomogenen Wärmeleitungsgleichung in dem oben genannten zweidimensionalen Zylinder 20 mittels der sogenannten Finiten-Differenzen-Methode.

$$\frac{\partial}{\partial t} (c_p(T, z)\rho(z)T(t, \vec{r})) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda(T, z)\vec{\nabla}T(t, \vec{r})) + q(t, \vec{r})$$

10

$\rho(z)$	Dichtefunktion
$c_p(T, z)$	spezifische Wärmekapazität (temperaturabhängig)
$\lambda(T, z)$	Wärmeleitfähigkeit (temperaturabhängig)
$T(t, \vec{r})$	raumzeitliches Temperaturfeld
15 $q(t, \vec{r})$	Wärmequellfunktion
$\vec{r} = (x, y, z)$	Ortsvektor

In Figur 17 ist eine äquidistante Diskretisierung des zweidimensionalen Zylinders 20 dargestellt. Eine inäquidistante Diskretisierung zeigt Figur 18. In diesem Fall sind die z-Bereiche der Materialsichten und die Radialbereiche inner- und außerhalb des inneren Brennradius unterschiedlich diskretisiert. Der wesentliche Vorteil der inäquidistanten gegenüber der äquidistanten Diskretisierung ist die Möglichkeit, mit einer geringeren Zahl von Gitterpunkten Rechnungen durchzuführen zu können. Dabei erfolgt von Zeitpunkt zu Zeitpunkt eine Anpassung von λ , c_p und ε gemäß der mittleren Schichttemperatur oder mittleren z-Ebenen-Temperatur.

30

Als Rechenmethode für die Finite-Differenzen-Rechnung wird die Methode der alternierenden Richtungen, das Crank-Nicholson-Verfahren in jeder Richtung gewählt. Alle nicht-linearen Effekte (Abstrahlung, Temperaturabhängigkeit der Materialparameter, etc.) werden linearisiert. Es ergeben sich somit lineare Gleichungssysteme mit tridiagonalen Matrizen. Durch

35

diese tridiagonalen Matrizen ergibt sich eine drastische Rechenzeit-Ersparnis, wodurch eine Berechnung in Echtzeit erfolgen kann.

- 5 Zur Berechnung des Strahlungsaustausches wird das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz

$$p = \sigma \varepsilon (T^4 - T_{\text{Gehäuse}}^4)$$

- 10 σ Stefan-Boltzmannsche Konstante
 ε Emissionsvermögen zwischen Anode und Umgebung

stückweise in Form von Temperaturintervallen linearisiert (vgl. Figuren 19 und 20). Für die Rechnung wird das Linearisierungsintervall gewählt, in welches die mittlere Oberflächentemperatur einer Materialschicht fällt. Bei Über-/Unterschreiten der Intervallgrenzen wird mit einer anderen Tangente d , die sich durch die Linearisierung ergibt, gerechnet. Dabei wurde eine Gehäusetemperatur $T_{\text{Gehäuse}}=300\text{K}$ zugrunde gelegt.

20

Die in Figuren 21 bis 24 dargestellte Temperaturabhängigkeit der Materialparameter Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Emissionsvermögen sowie Diffusion werden entsprechend der oben definierten Temperaturintervalle (vgl. Figuren 19 und 20) und den mittleren Temperaturen der Materialschichten (11, 12, 13) berücksichtigt.

25

Die Figuren 5 bis 14 zeigen Berechnungsergebnisse, die sich aus dem erfindungsgemäßen Verfahren hinsichtlich des kurzzeitigen Verhaltens der Temperaturentwicklung der Anode ergeben. Dabei wurden die gemäß der Erfindung zu berücksichtigenden Parameter der Temperaturentwicklung auf und in der Anode 1 verändert. Alle Berechnungen wurden mit einer Leistung P von 20kW, einem Rückstreuoeffizienten $\eta=0,372$, einer kinetischen Energie E_{kin} von 120keV, einer Belastungszeit von 106,1µs und einer Fokusgröße von 1,4x9,62mm² durchgeführt. Dabei wurde von

30

35

Maximaltemperaturen von $T_{\max}=511\text{K}$ bei Figur 8 und von $T_{\max}=538,7\text{K}$ bei Figur 12 ausgegangen.

Figur 16 zeigt Last- und Pausenintervalle mit unterschiedlichen Strahlleistungen, wie sie bei der erfindungsgemäßen Berechnung Eingang finden.

Figuren 25 bis 28 zeigen weitere Berechnungsergebnisse gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren hinsichtlich des langzeitigen Verhaltens der Temperaturverteilung in und auf der Anode. Diesen Berechnungen lagen bei einem 3-Schicht-Zylinder mit den obengenannten Abmessungen eine Leistung P von 20kW , ein Rückstreuoeffizient $\eta_{\text{BR}}=0,2$, eine kinetische Energie E_{kin} von 120keV , ein Ort $R_{\text{BR-Mitte}}=42\text{mm}$, eine Fokusgröße von $1,4 \times 9,62\text{mm}^2$ und für die Figuren 25 und 26 eine Gittergröße von $\Delta r=\Delta z=0,5\text{mm}$ und $\Delta t=0,01\text{s}$, für die Figuren 27 eine Gittergröße von $\Delta r(1,0, 0,8, 1,0)\text{mm}$, $\Delta z=(0,5, 1, 1,5)\text{mm}$ und $\Delta t=0,05\text{s}$ und für die Figur 28 eine Gittergröße von $\Delta r(1,0, 0,8, 1,0)\text{mm}$, $\Delta z=(0,5, 1, 3)\text{mm}$ und $\Delta t=0,05\text{s}$ zugrunde.

In der Figur 27 ist die zeitliche Temperaturentwicklung an vier verschiedenen Orten in der Brennring-Mitte bei einer schnellen Scanfolge 15 1-s-Scans, 15 1-s-Pausen bei einer Aufnahmezeit von $t=29\text{s}$ dargestellt. Die Kurven zeigen von oben nach unten den Verlauf an der Anodenoberfläche, an der Grenze Wolfram-Molybdän, an der Grenze Molybdän-Graphit und an der Anodenbodenfläche als Tiefenkoordinate $(0, 1, 9, 30\text{mm})$.

Die räumliche 2D-Temperaturverteilung, die Temperaturverteilung in Radial- und Tiefenrichtung, am Ende des 15. Scan bei der schnellen Scanfolge (15 1-s-Scans, 15 1-s-Pausen) ist in Figur 28 ebenfalls wie bei den Kurven gemäß Figuren 26 und 27 ohne Hub dargestellt. Die obere Kurve in Figur 25 gibt die zeitliche Temperaturentwicklung in der Brennring-Mitte bei Dauerbelastung mit und die untere ohne Hub der Brennring-Temperatur wieder. Die obere Kurve in Figur 26 zeigt den radia-

len Temperaturverlauf bei einer Aufnahmezeit von 1s und die untere von 0,1s.

Zusammengefaßt werden also bei der Erfindung zwei verschiedene Beiträge der Belastung einer Anode einer Röntgenröhre berücksichtigt, nämlich die Kurzzeitbelastung durch Einbeziehung der wesentlichen physikalischen Effekte in das Rechenmodell und die Langzeitbelastung durch Berücksichtigung der Elektronenrücksteuerung, die temperaturabhängige stückweise Linearisierung der nichtlinearen physikalischen Effekte (Abstrahlung von der Oberfläche gemäß T^4 -Gesetz und Temperaturabhängigkeit der Materialparameter), um so - auf Grund der Kombination von numerischen Verfahren (Crank-Nicholson-Verfahren und ADI-Verfahren (implizite Methode der alternierenden Richtungen für die rz-Richtungen) und der expliziten Lösung von linearen, verallgemeinerten tridiagonalen Gleichungssystemen - Echtzeitrechnungen zu ermöglichen. Die exakte Mitnahme der nichtlinearen Effekte erfolgt in anderen, jedoch an Rechenzeit aufwendigeren Modellen (z.B. Finiten-Element-Modellen).

Patentansprüche

1. Verfahren zur Berechnung der raumzeitlichen Temperaturverteilung in einer mit Elektronen (3) bestrahlten Anode (1) einer Röntgenröhre (16) zur Bestimmung der Belastung der Röntgenröhre (16),
aufweisend die folgenden Schritte:
- Berechnung (8) des kurzzeitigen Temperaturhubs in einer Oberflächenschicht (11) in und um einen Brennfleck (2) auf der Anode (1) herum für den Zeitraum während und unmittelbar nach der Elektronenbestrahlung (3) des Brennflecks (2) nach der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung für homogene Wärmeleiter,
 - Berechnung (8) der langzeitigen Temperaturverteilung im gesamten Volumen der Anode (1) unter Berücksichtigung der Wärmeausbreitung, die von dem Brennfleck ausgeht, und der Wärmeabstrahlung von der Oberfläche (19) der Anode (1) nach der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung für inhomogene Wärmeleiter, wobei nichtlineare Effekte temperaturabhängig stückweise linearisiert werden,
 - Addition (8) der Ergebnisse der Berechnungen zur Ermittlung der Temperaturverteilung auf und in der Anode (1) und
 - Anzeige der Belastung und/oder Steuerung der Röntgenröhre (16) in Abhängigkeit von der Belastung.
2. Verfahren nach Anspruch 1, d a d u r c h g e - k e n n z e i c h n e t , daß bei der Berechnung (8) des kurzzeitigen Temperaturhubs wenigstens einer der folgenden Beiträge berücksichtigt wird:
- Rückstreuung (15) der eingestrahlten Elektronen in Form eines multiplikativen Faktors $(1 - \eta)$,
 - dreidimensionaler Wärmefluß durch Beschreibung der Oberflächenschicht (11) als wärmeleitenden, dreidimensionalen, unendlichen Halbraum (uHR), und/oder
 - Energieverlust der eingestrahlten Elektronen in der Tiefe des Materials der Anode (1).

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, daß bei der
Berechnung (8) des kurzzeitigen Temperaturhubs bei Bewegung
der Anode (1) während der Bestrahlung die Relativbewegung des
5 Elektronenstrahls (3) bezüglich der Anode (1) durch örtliche
Veränderung einer Wärmequellfunktion ($q(t, \vec{r})$) berücksichtigt
wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
10 dadurch gekennzeichnet, daß bei in-
homogenem Profil (14) des Elektronenstrahls (3) zur Berech-
nung (8) des kurzzeitigen Temperaturhubs eine Diskretisierung
(Fig. 17) der Fläche des Brennflecks (2) in einzelne Flä-
chenelemente erfolgt.
- 15 5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, daß bei der
Berechnung (8) der langzeitigen Temperaturverteilung wenig-
stens einer der folgenden Beiträge berücksichtigt wird:
- 20 - Rückstreuung (15) der eingestrahlten Elektronen in Form
eines multiplikativen Faktors $(1 - \eta)$,
- dreidimensionaler Wärmefluß durch Beschreibung des Volu-
mens der Anode (1) in Form eines Zylinders (20), der aus
einer Materialschicht besteht oder aus einer Oberflächen-
25 schicht, beispielsweise aus Wolfram, und weiteren darun-
terliegenden Schichten (z. B 12 und 13) aus anderen Mate-
rialien besteht,
- Strahlungsaustausch (21) zwischen der Oberfläche (19) der
Anode (1) und der Umgebung der Anode (1), und
30 - Temperaturabhängigkeit der Materialparameter.
6. Lastrechner zur Berechnung der Temperaturverteilung einer
Anode (1) einer Röntgenröhre (16), gekennzeichnet
durch Mittel (8) zur Ausführung eines Ver-
35 fahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche und Mittel
(22) zur Anzeige des Ergebnis der Berechnungen sowie zur An-

steuerung (6) der Röntgenröhre (16) abhängig von dem Ergebnis der Berechnungen.

7. Röntgeneinrichtung, aufweisend einen Lastrechner nach Anspruch 6, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
5 daß die Anode eine Drehanode (19) ist.

8. Röntgeneinrichtung nach Anspruch 7, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß die Anode (1) aus einer
10 Materialschicht besteht oder aus einer Oberflächenschicht (11), beispielsweise aus Wolfram, und weiteren darunterliegenden Schichten aus anderen Materialien besteht.

9. Röntgeneinrichtung nach Anspruch 7 oder 8, d a -
15 d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß das Strahlprofil (14) Inhomogenitäten aufweisen kann.

1/26

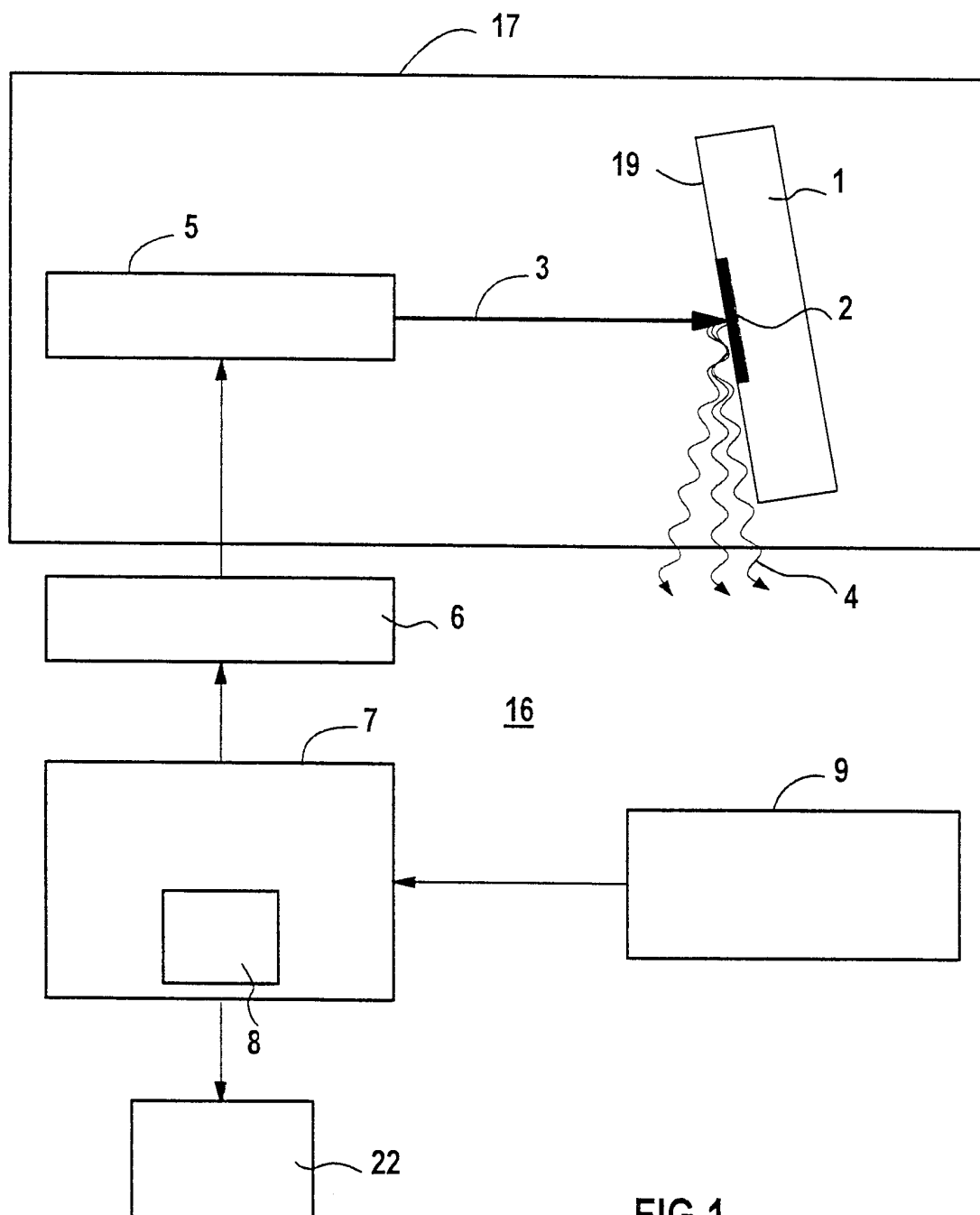


FIG 1

2/26

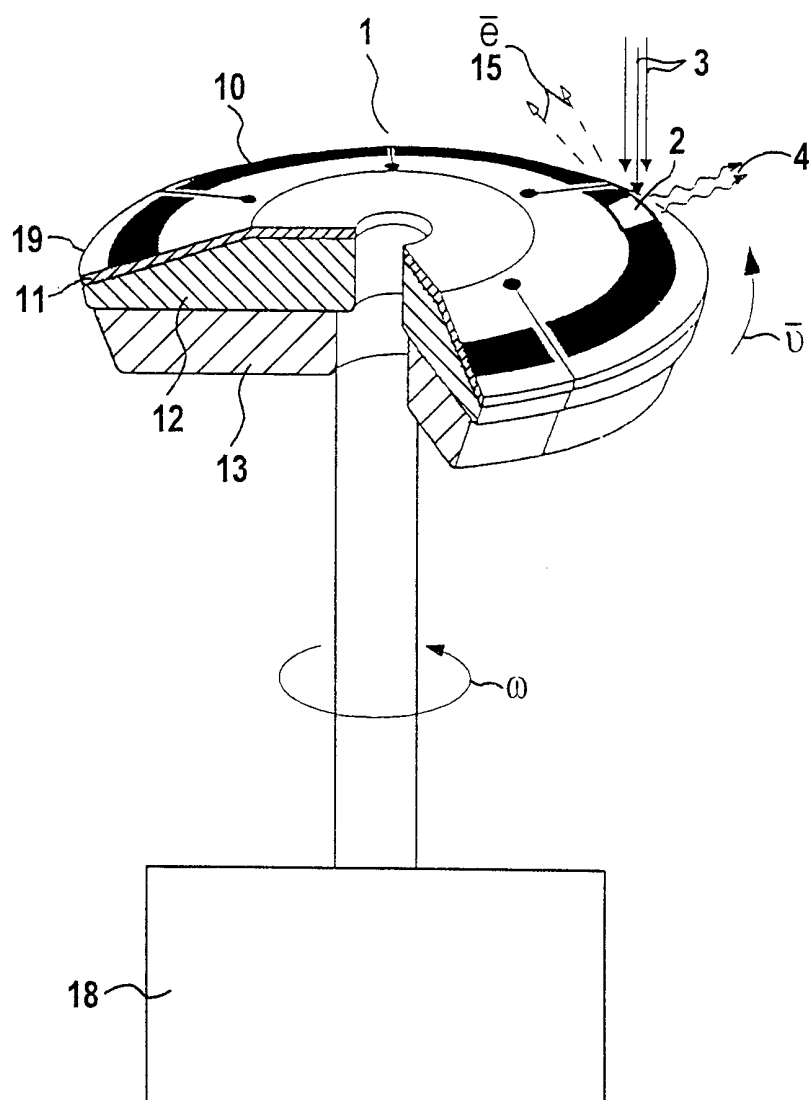


FIG 2

3/26

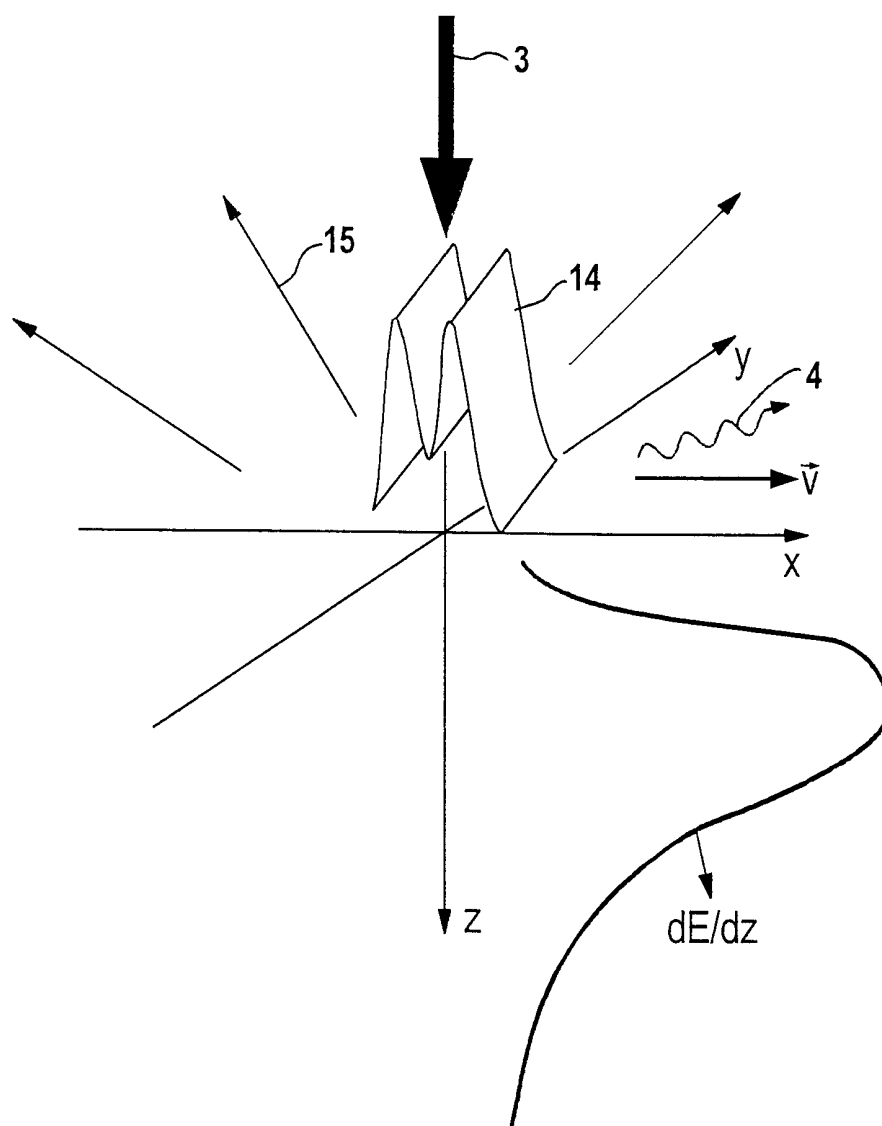


FIG 3

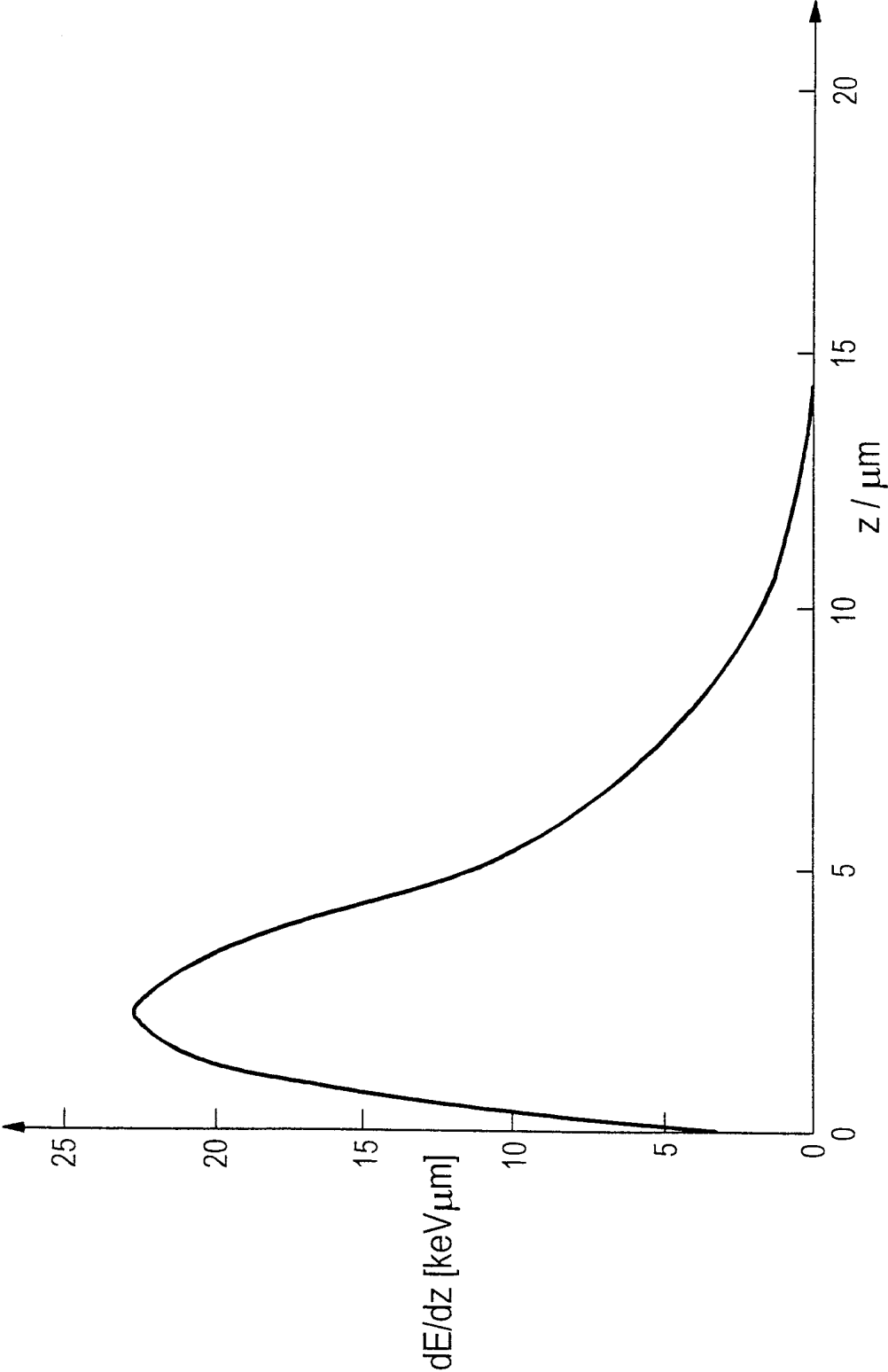


FIG 4

5/26

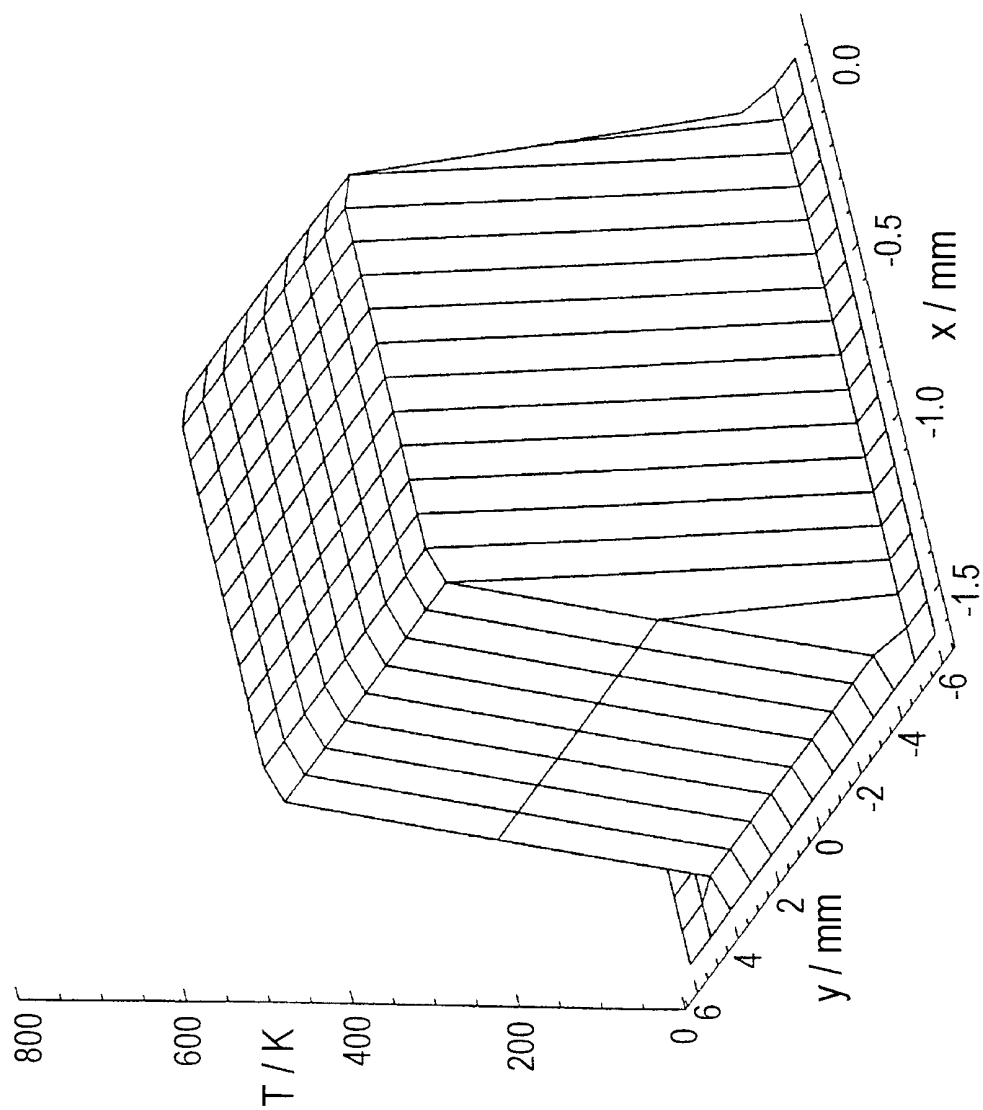


FIG 5

6/26

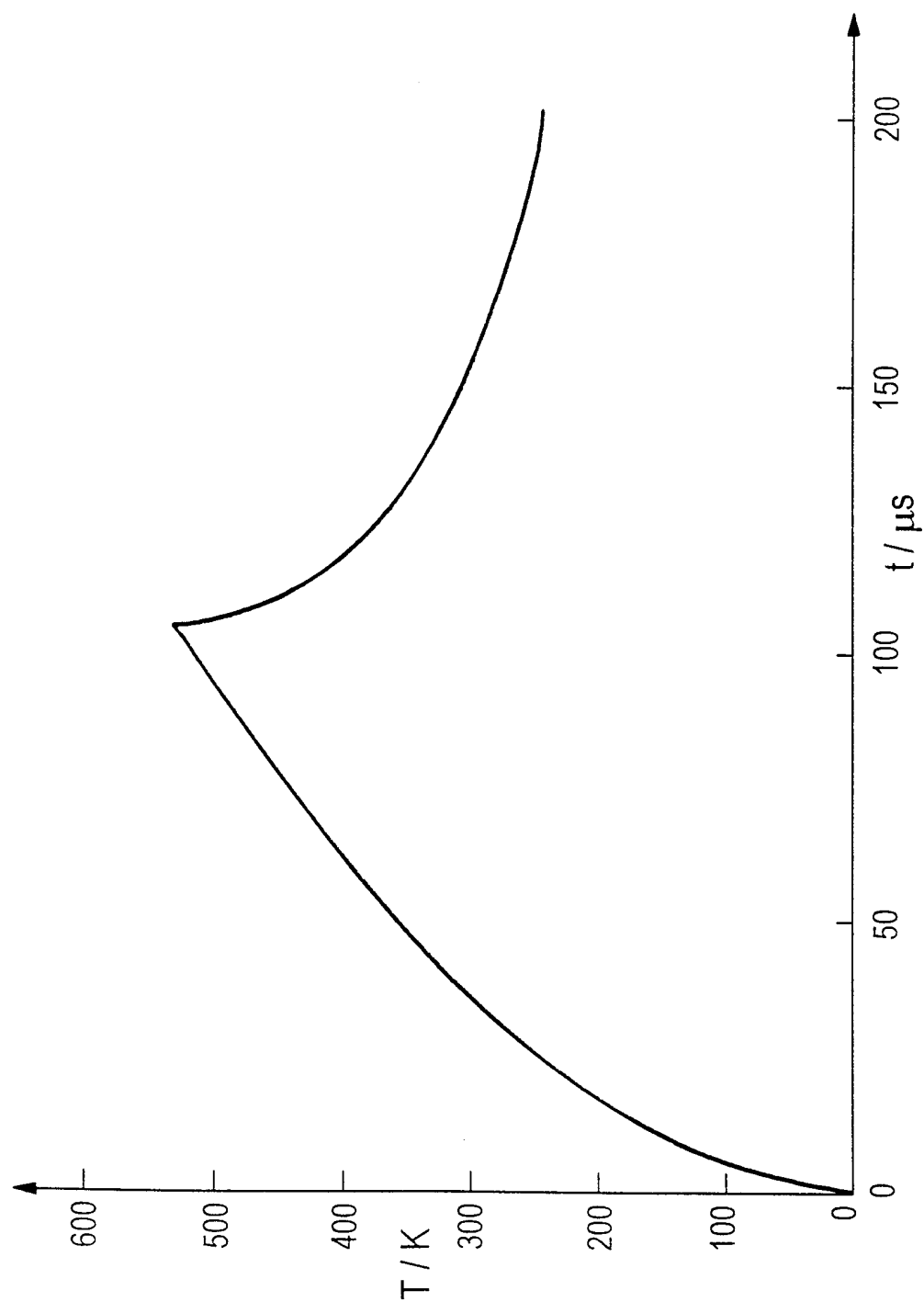


FIG 6

7/26

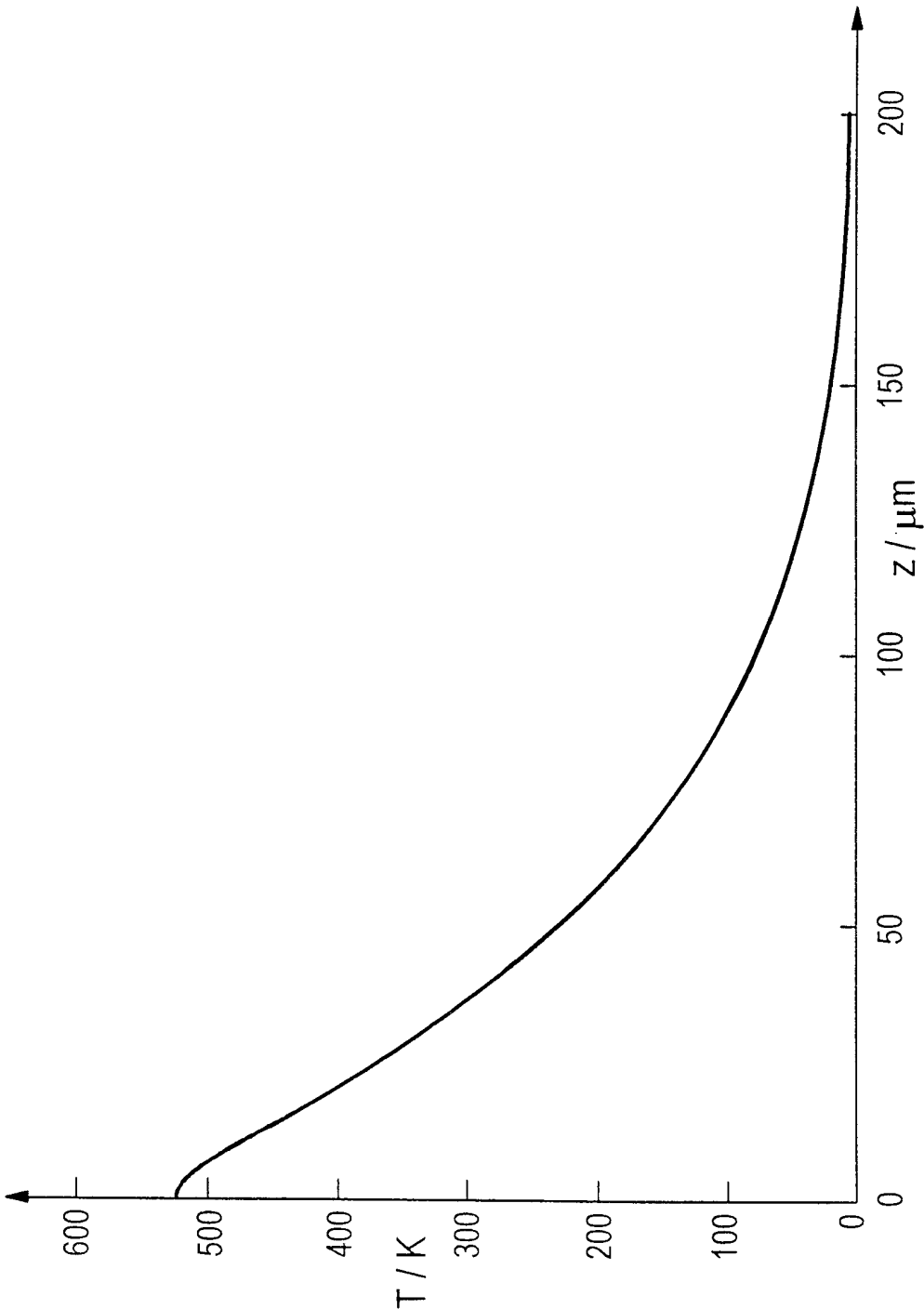


FIG 7

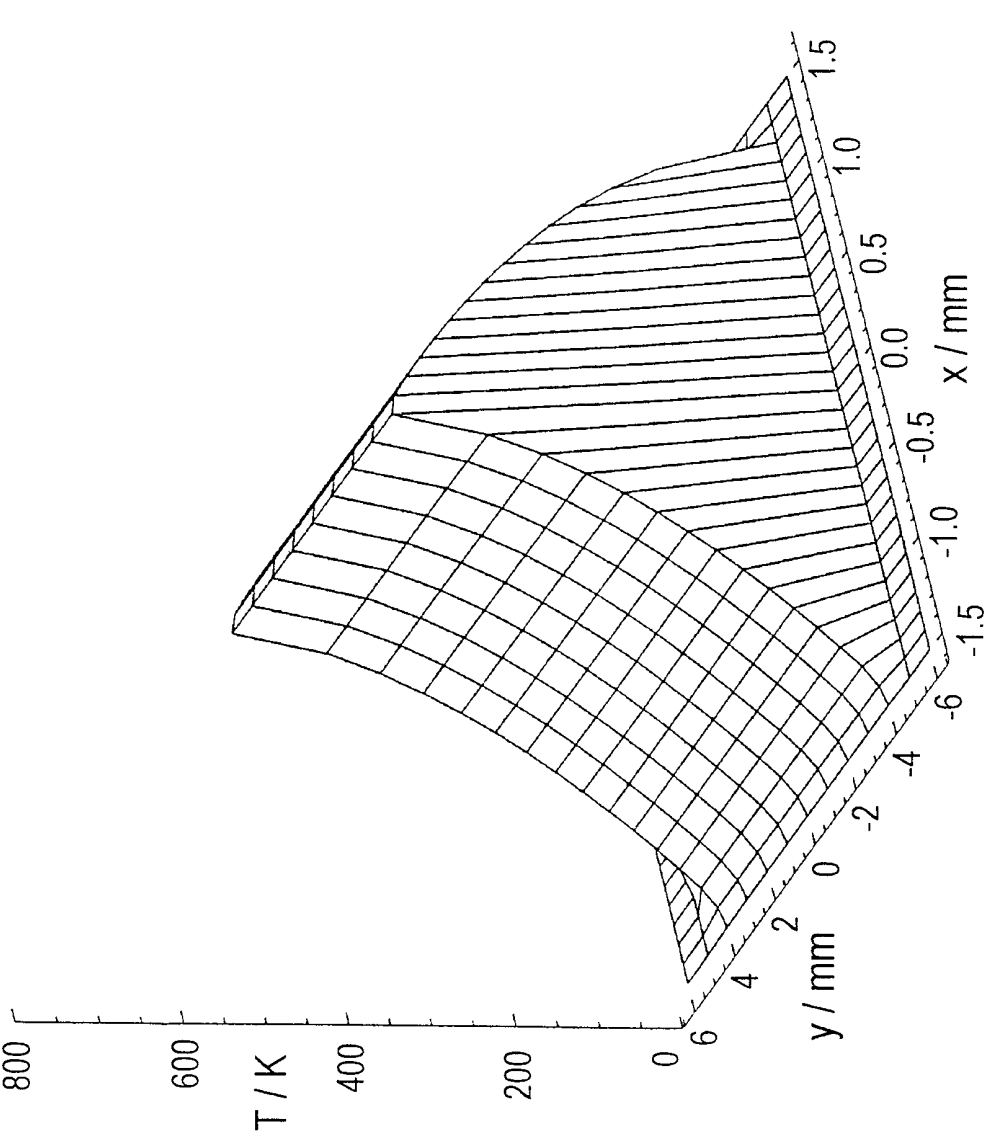


FIG 8

9/26

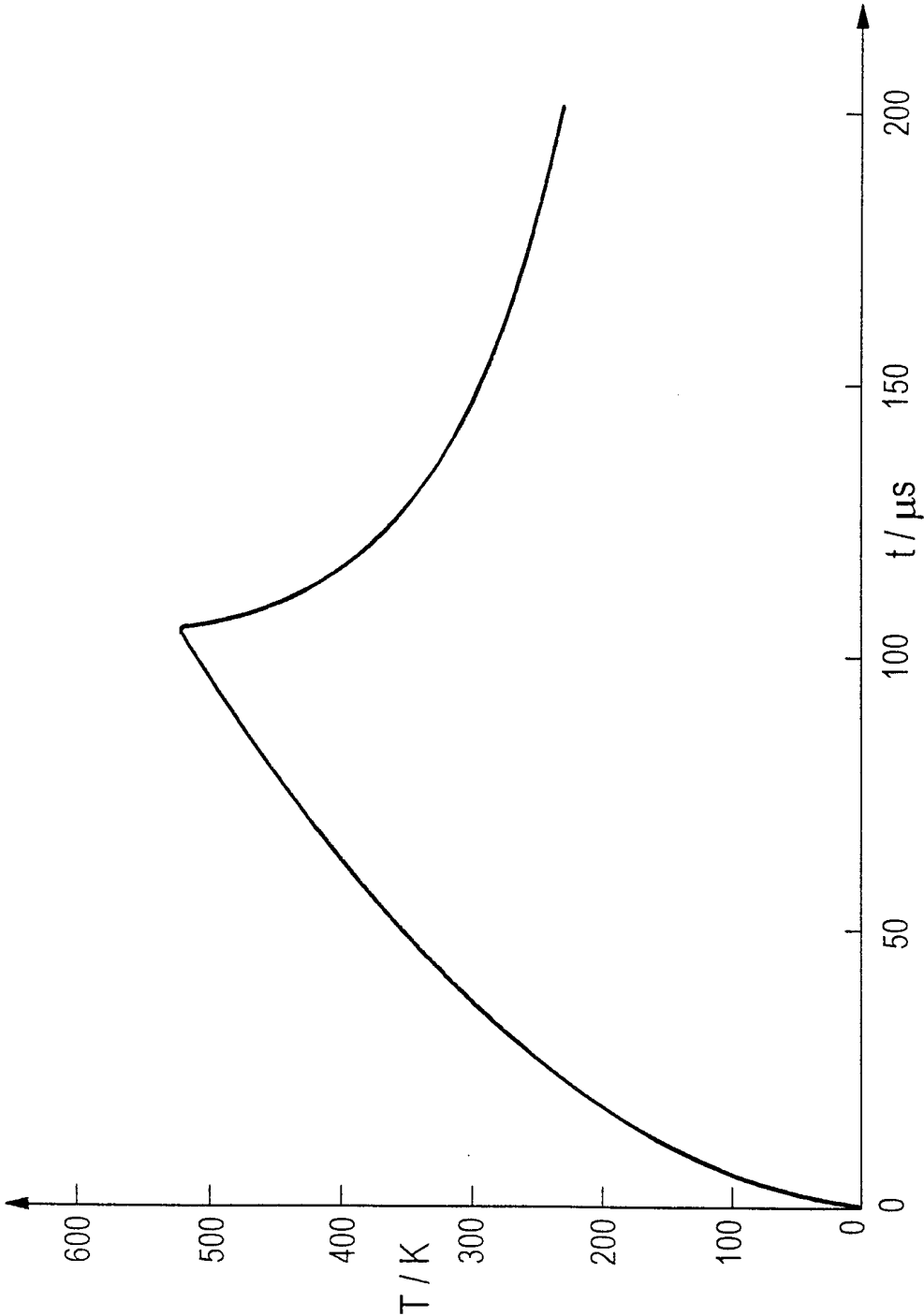


FIG 9

10/26

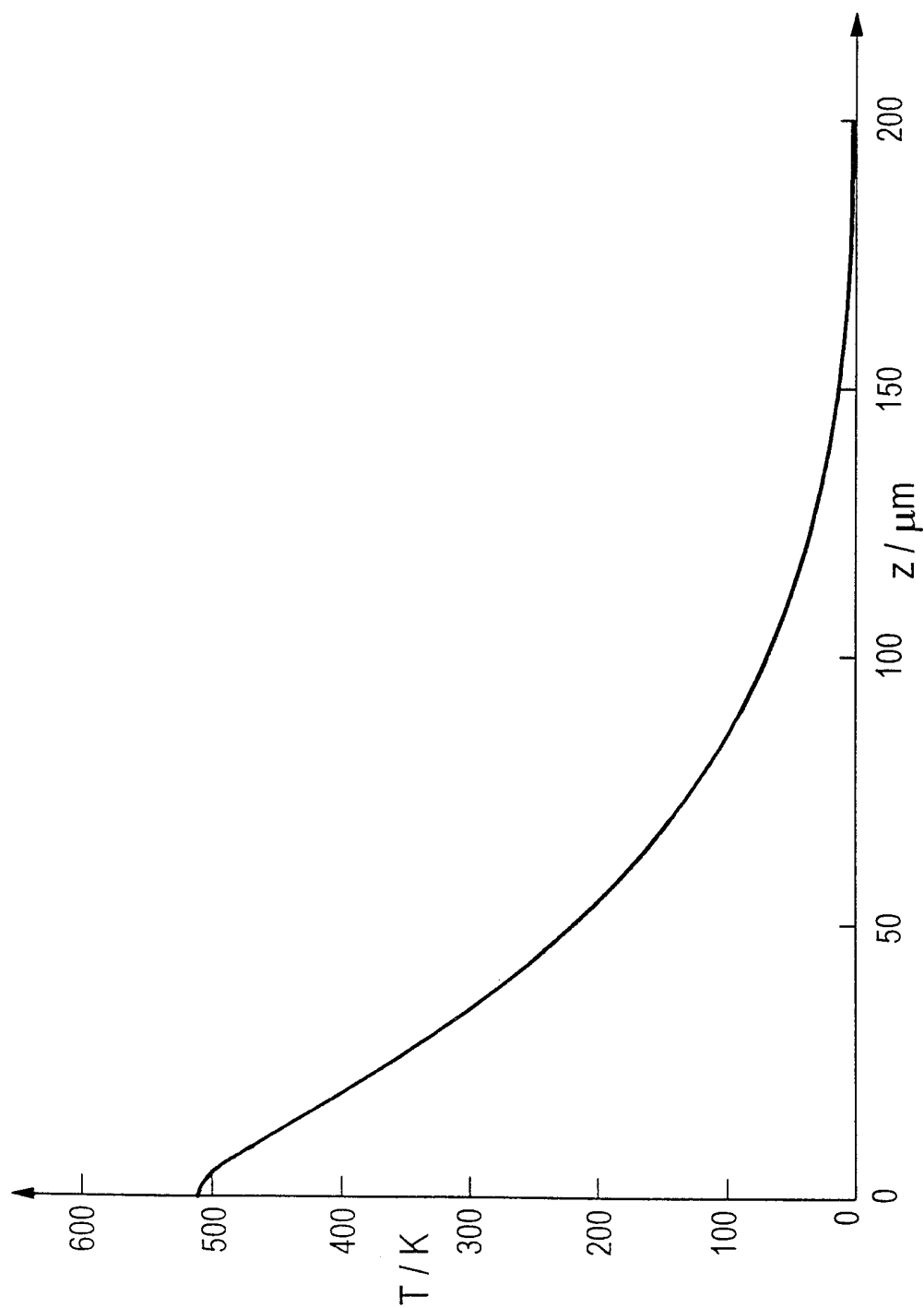


FIG 10

11/26

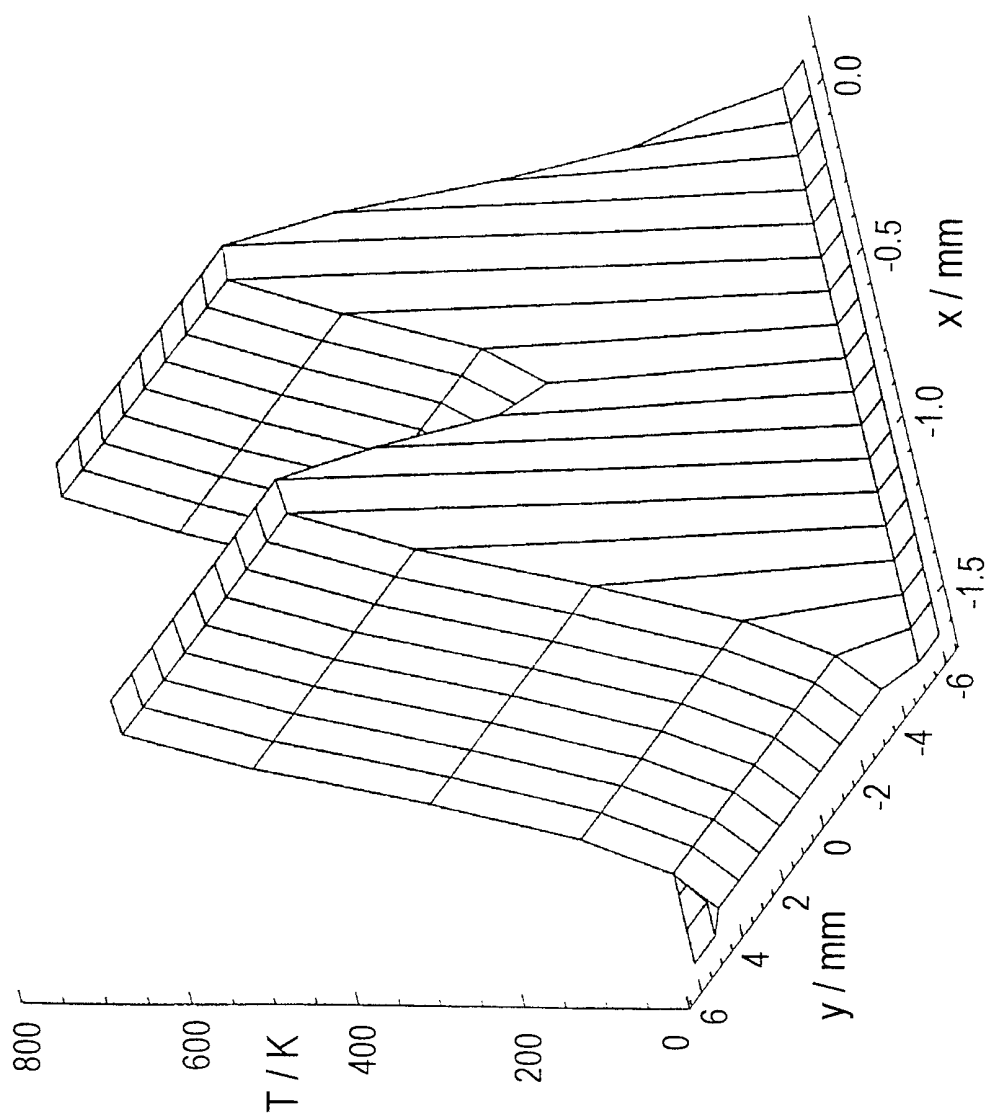


FIG 11

12/26

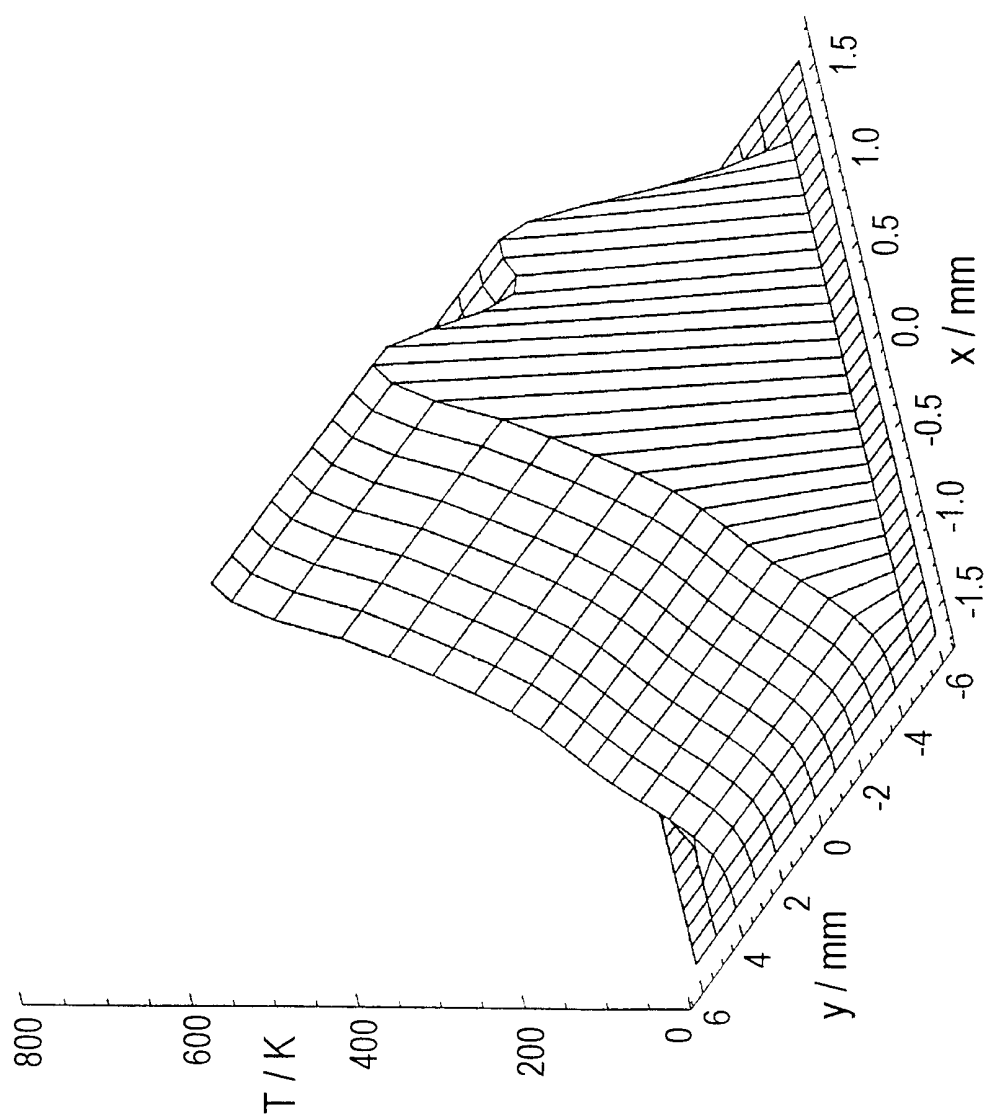


FIG 12

13/26

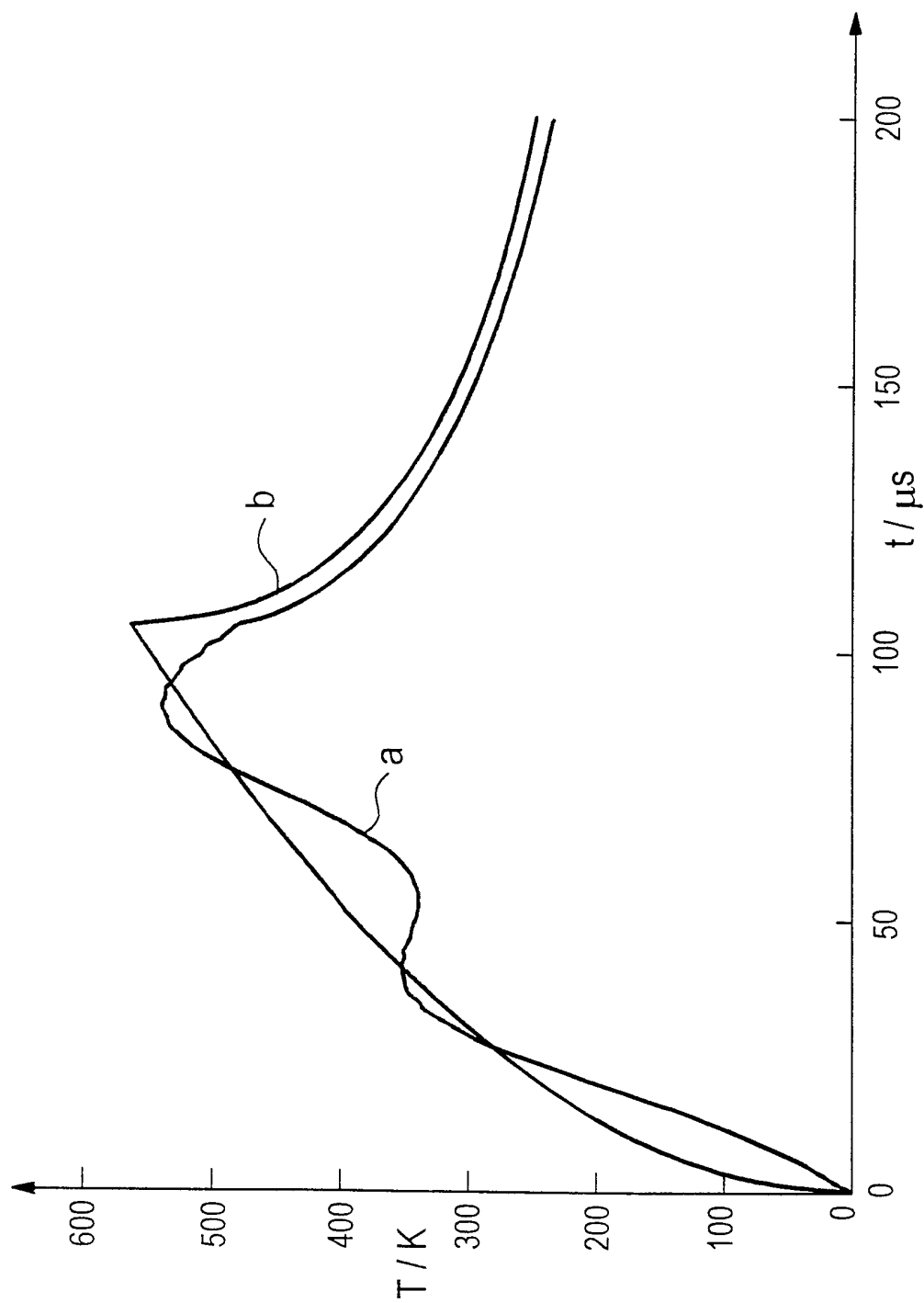
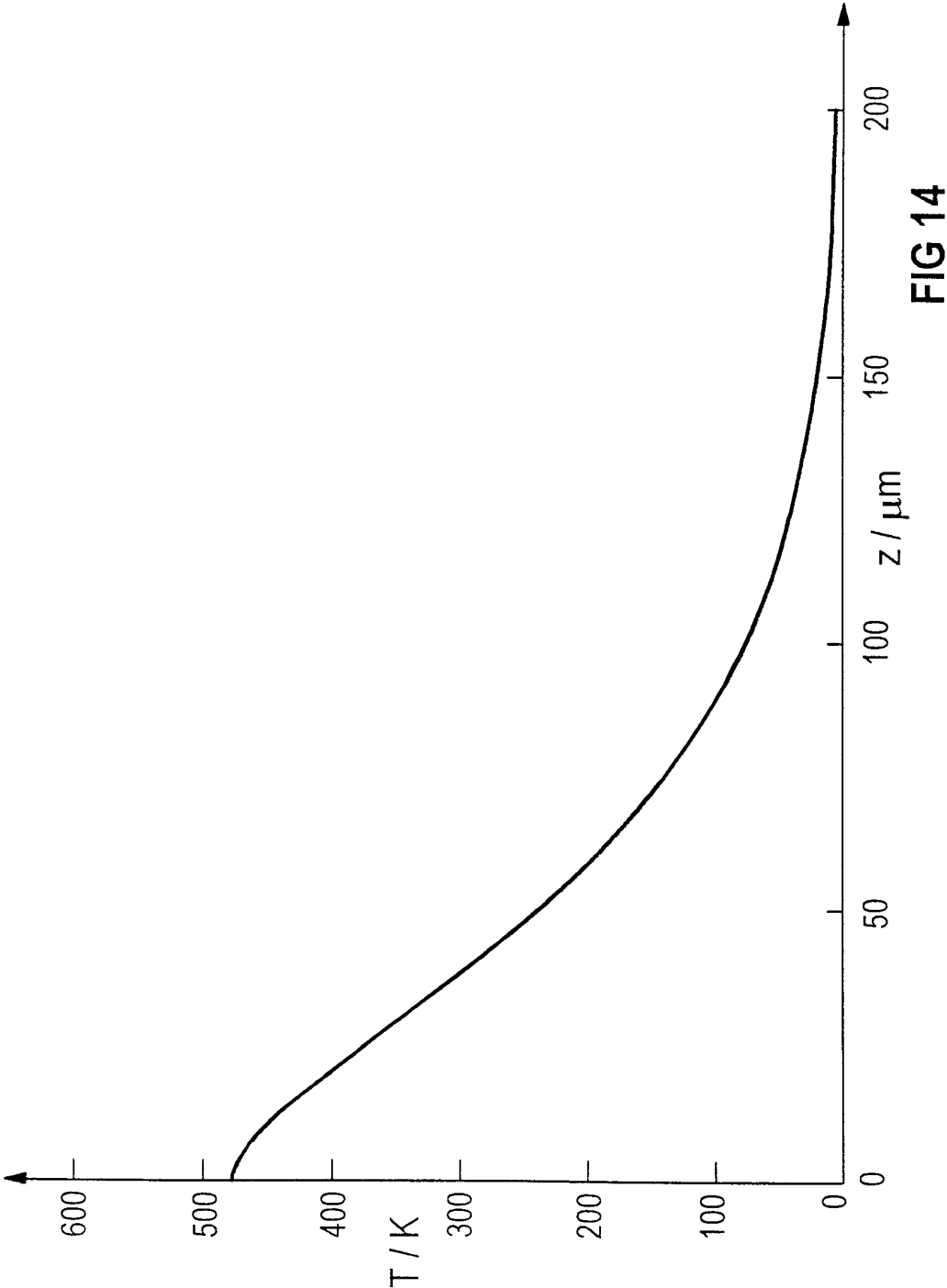


FIG 13



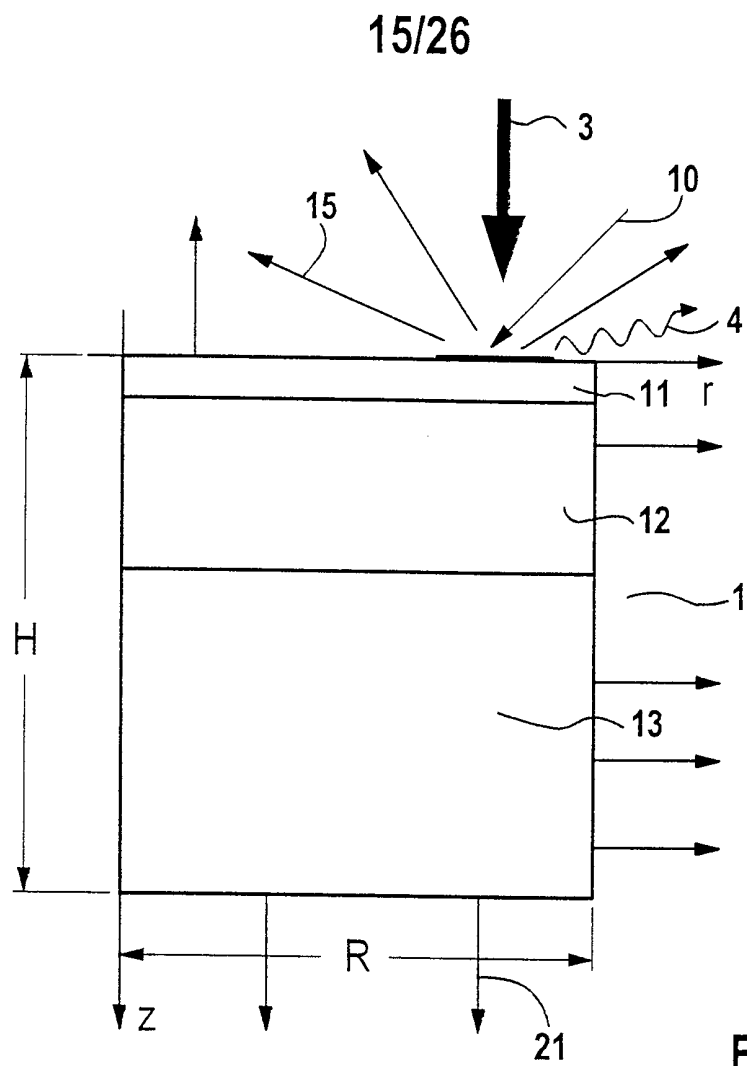


FIG 15

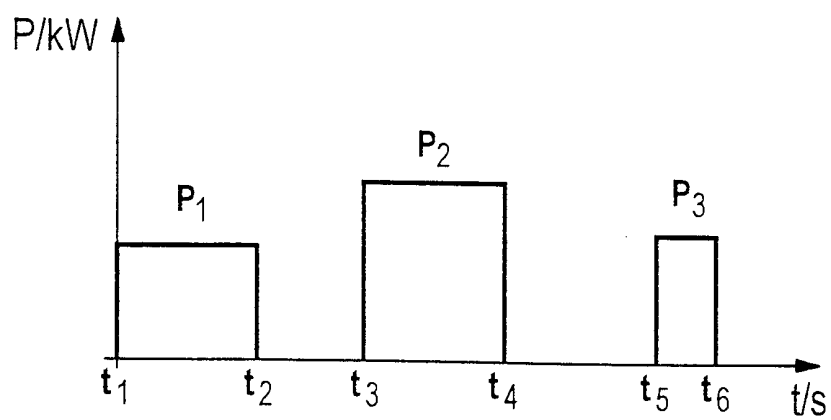


FIG 16

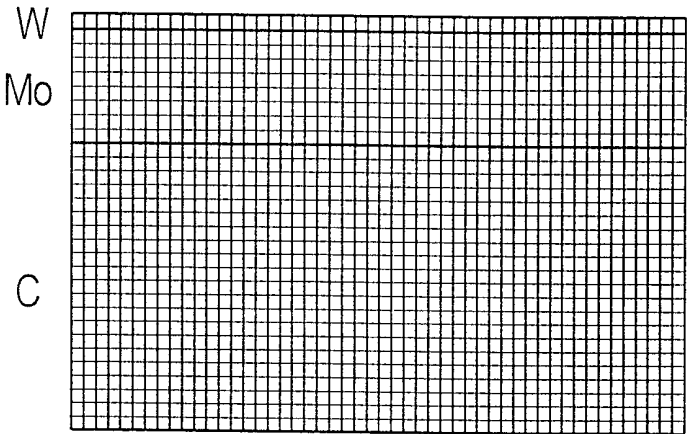


FIG 17

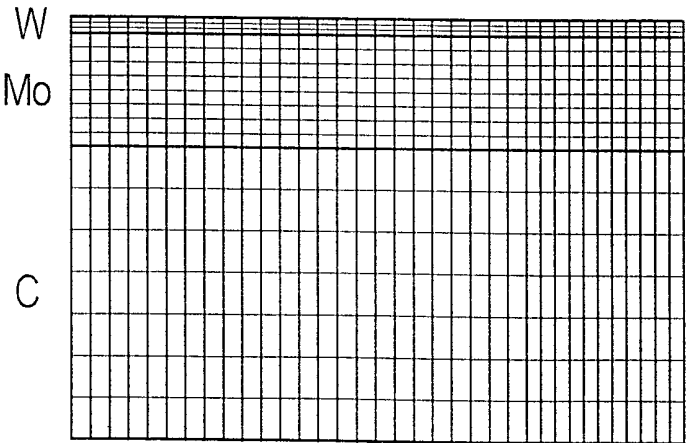


FIG 18

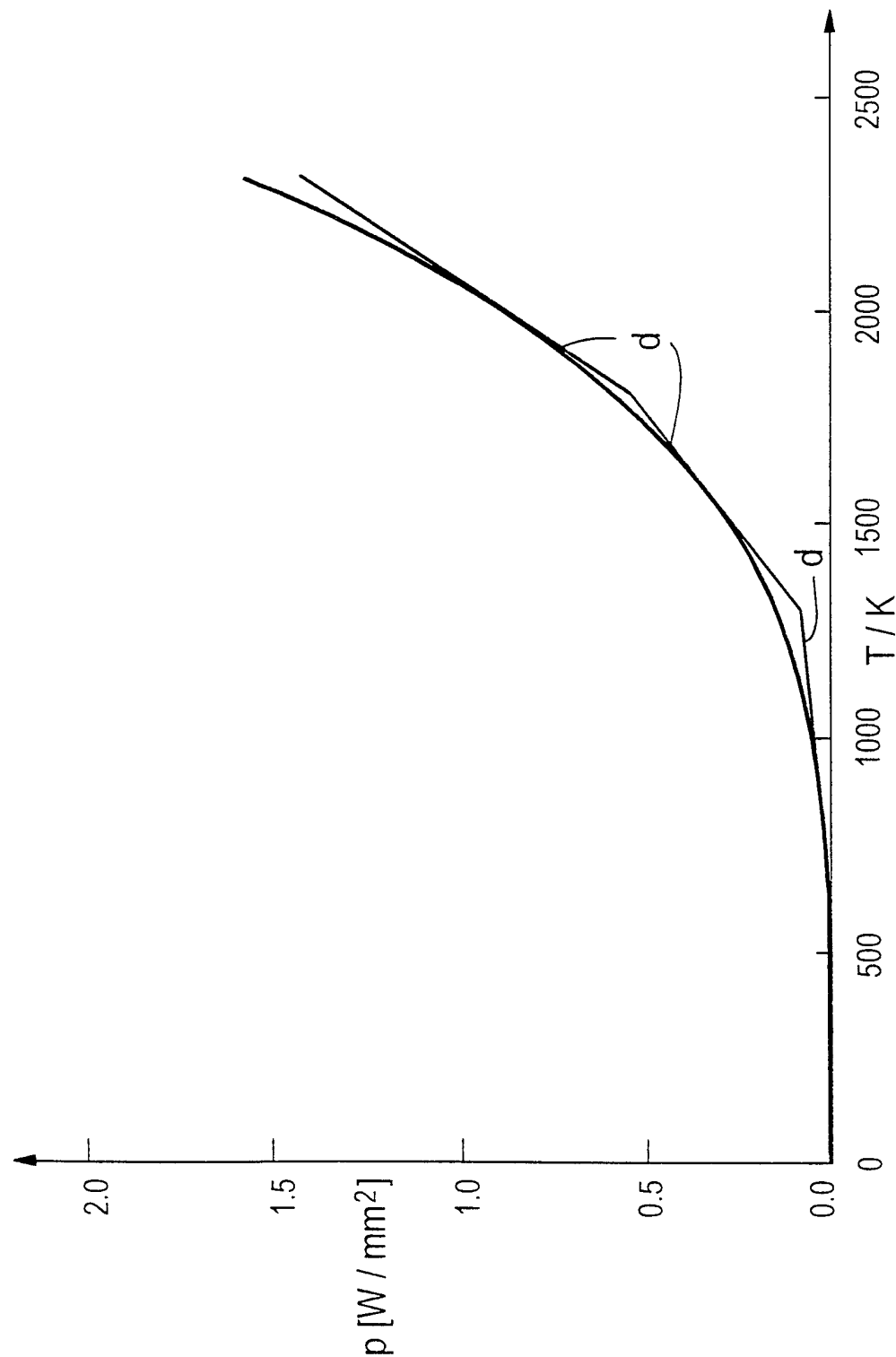


FIG 19

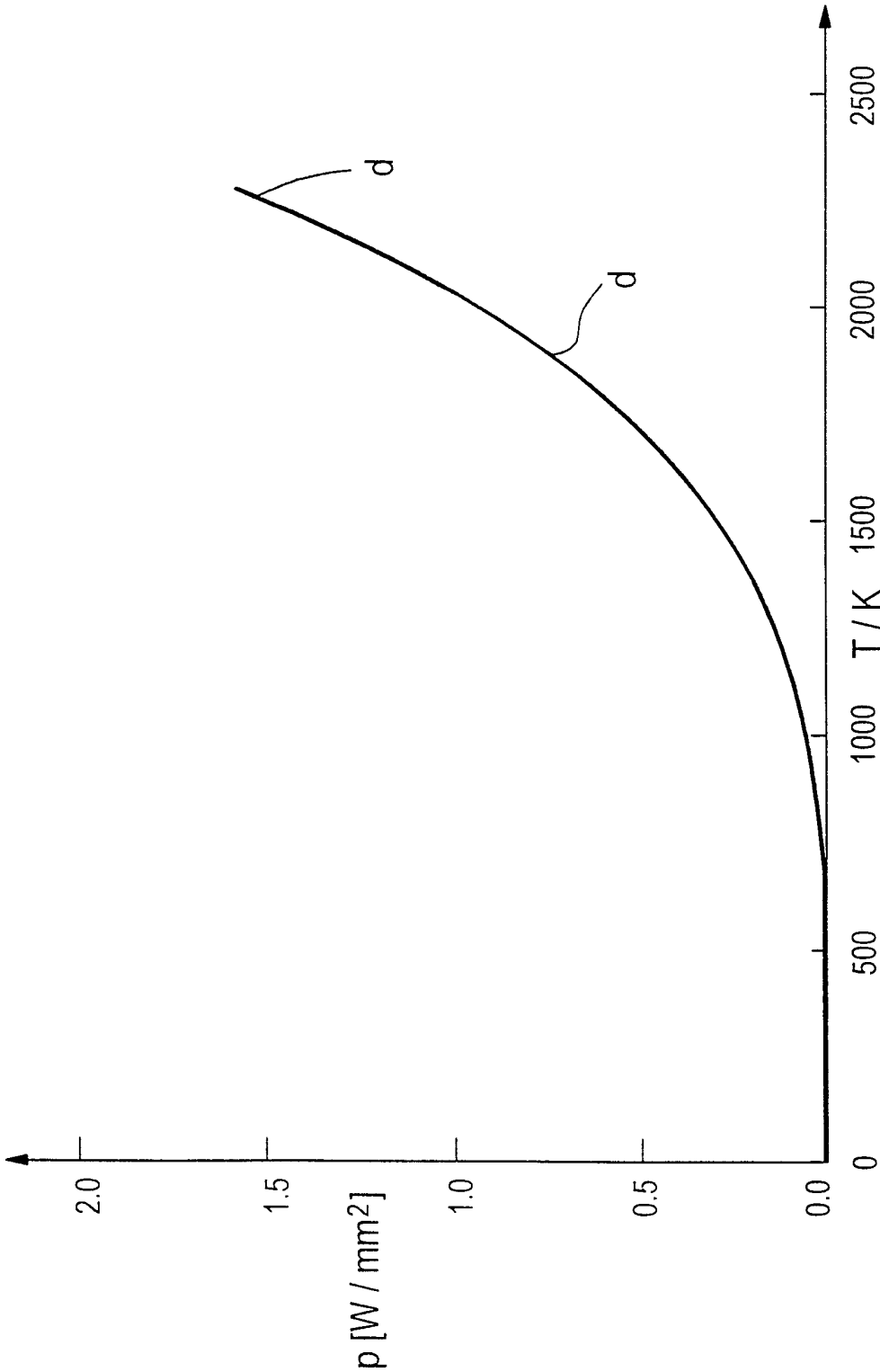


FIG 20

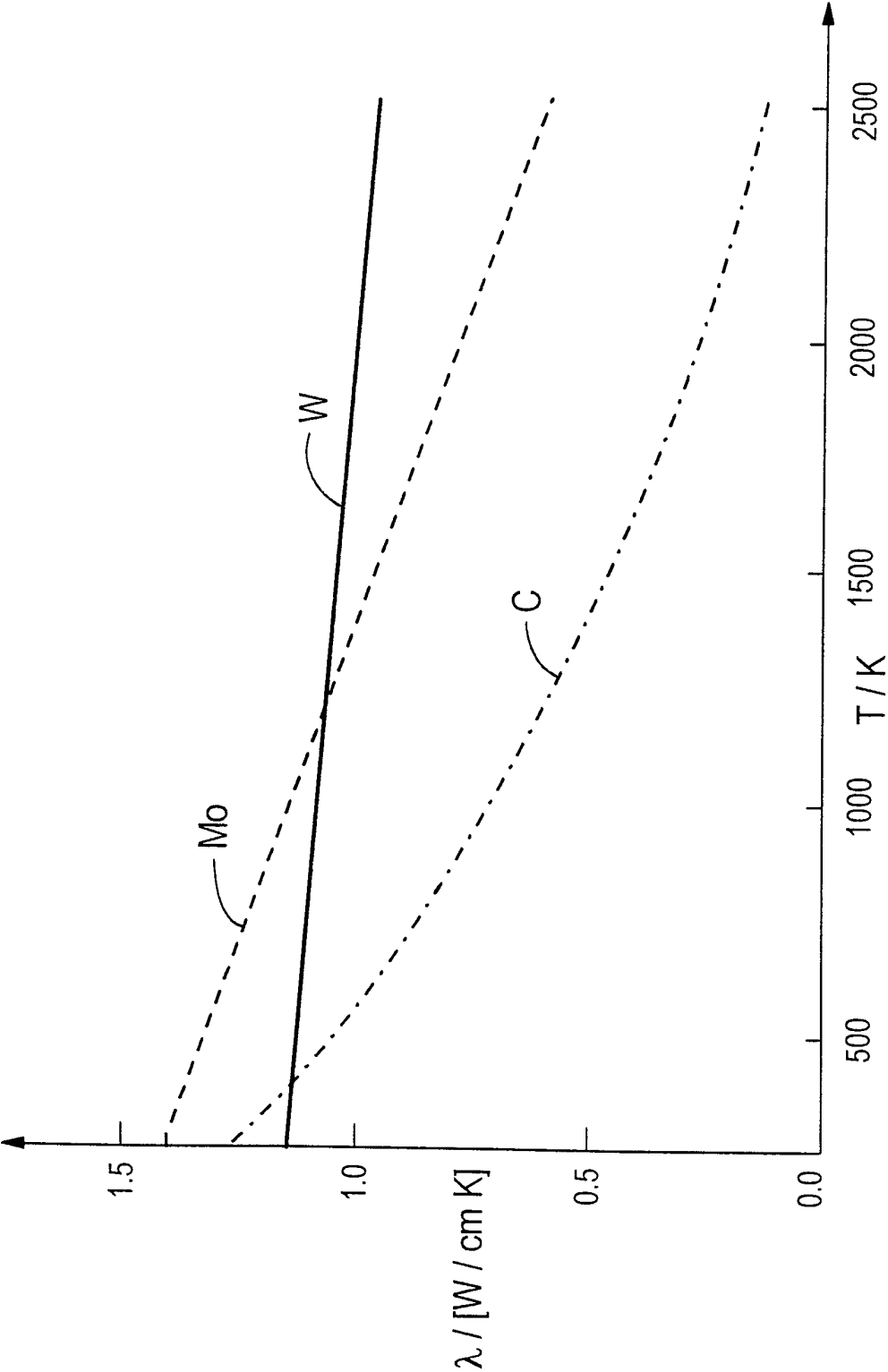


FIG 21

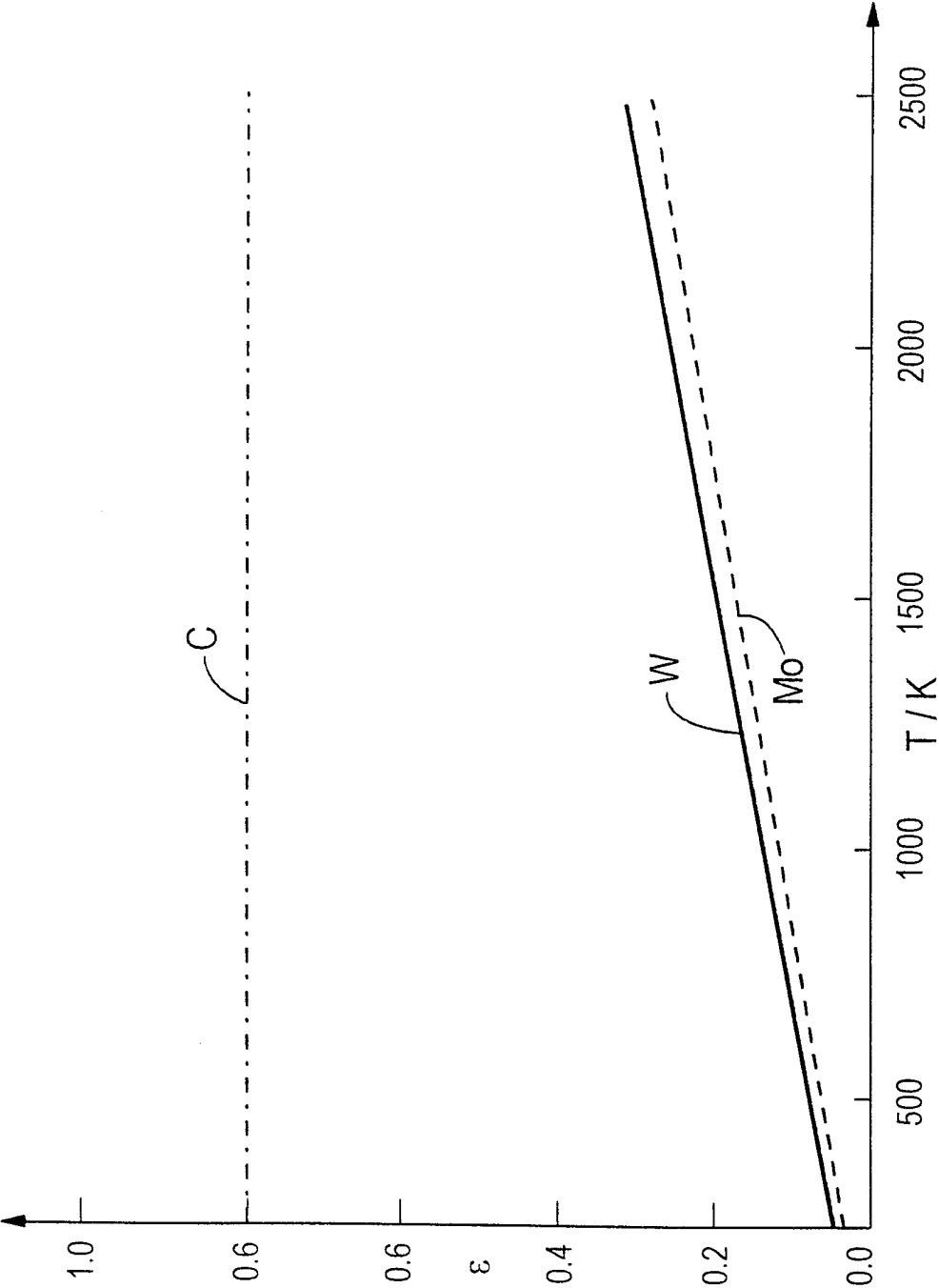


FIG 22

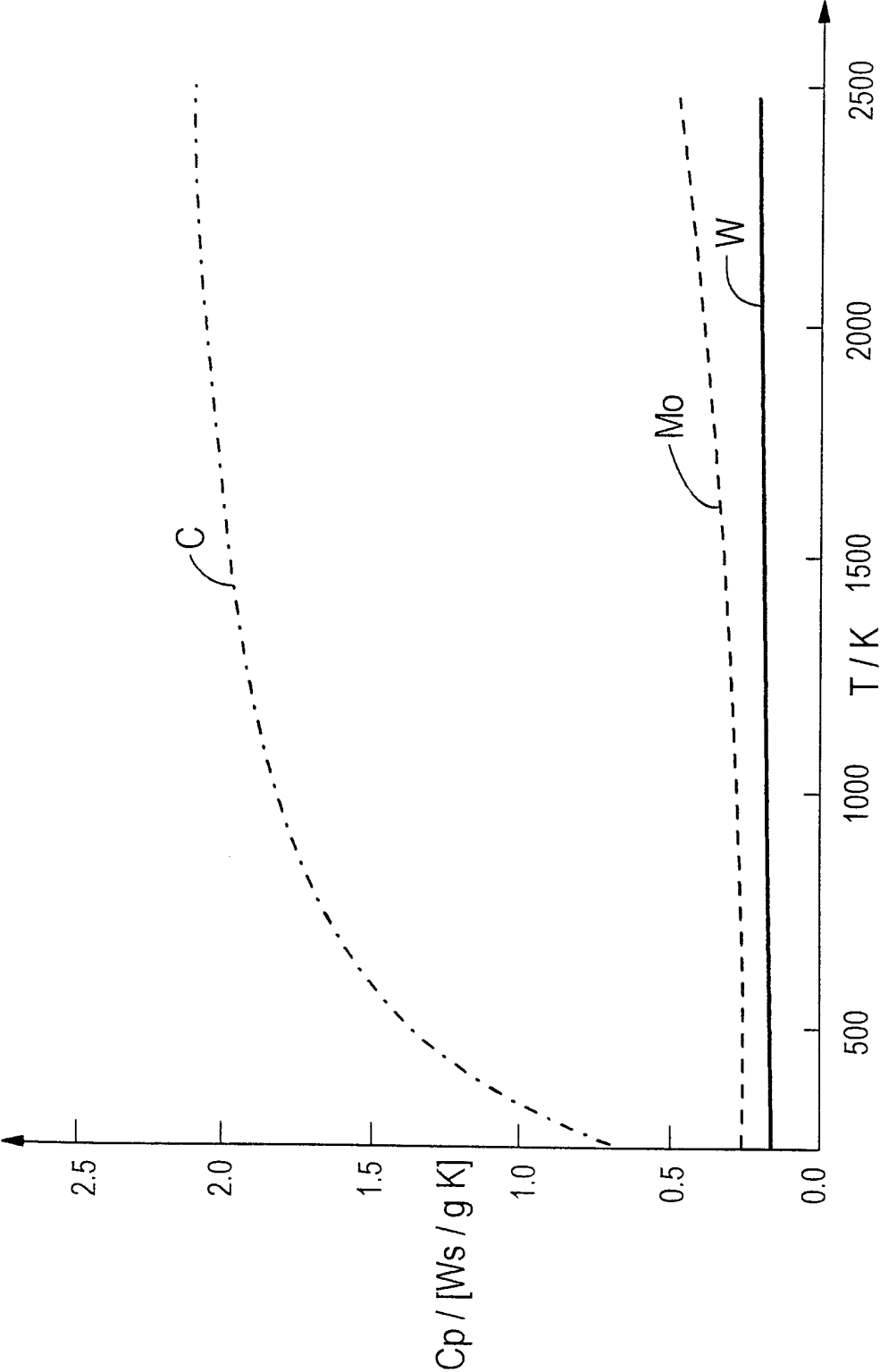


FIG 23

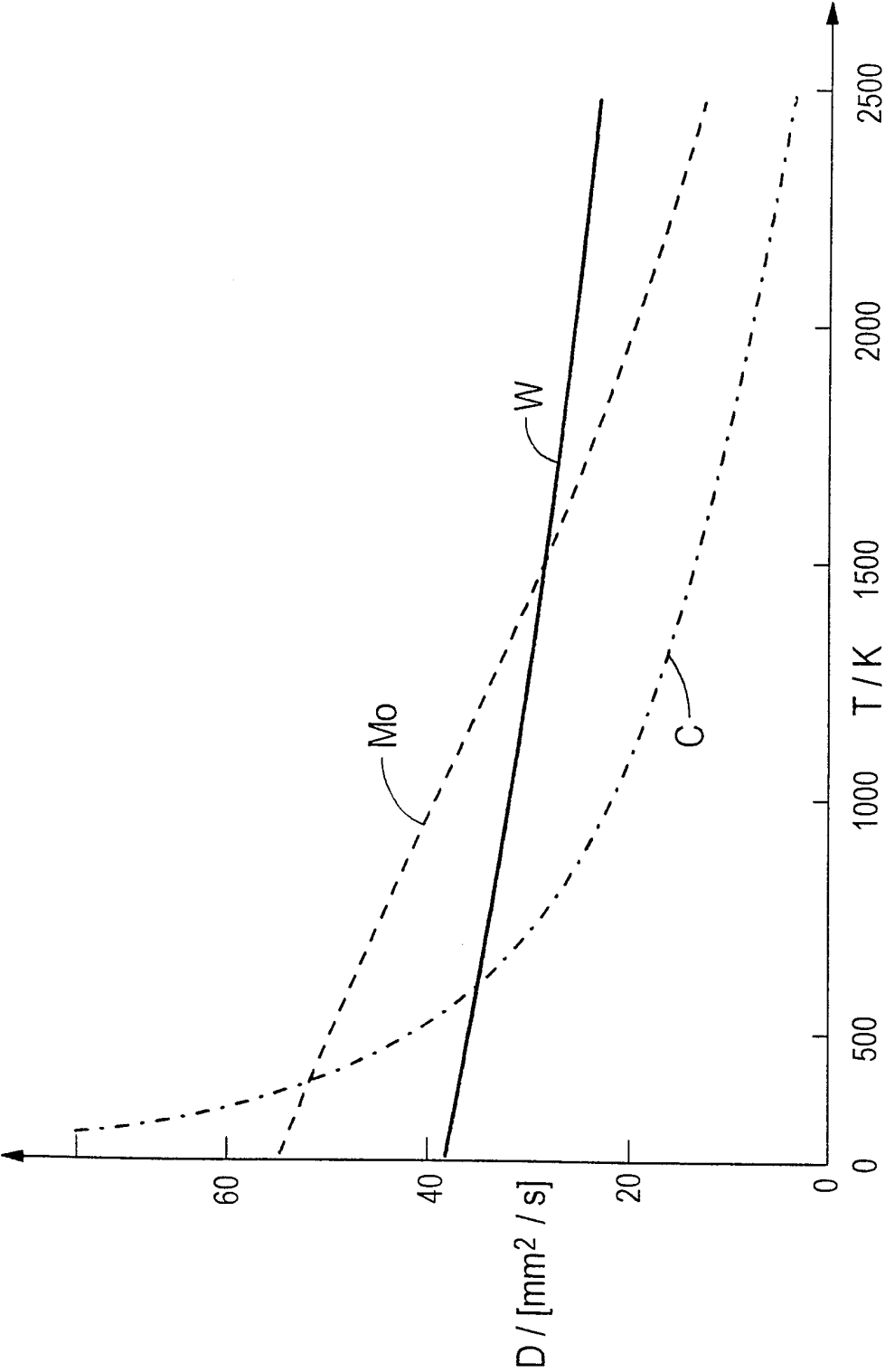


FIG 24

23/26

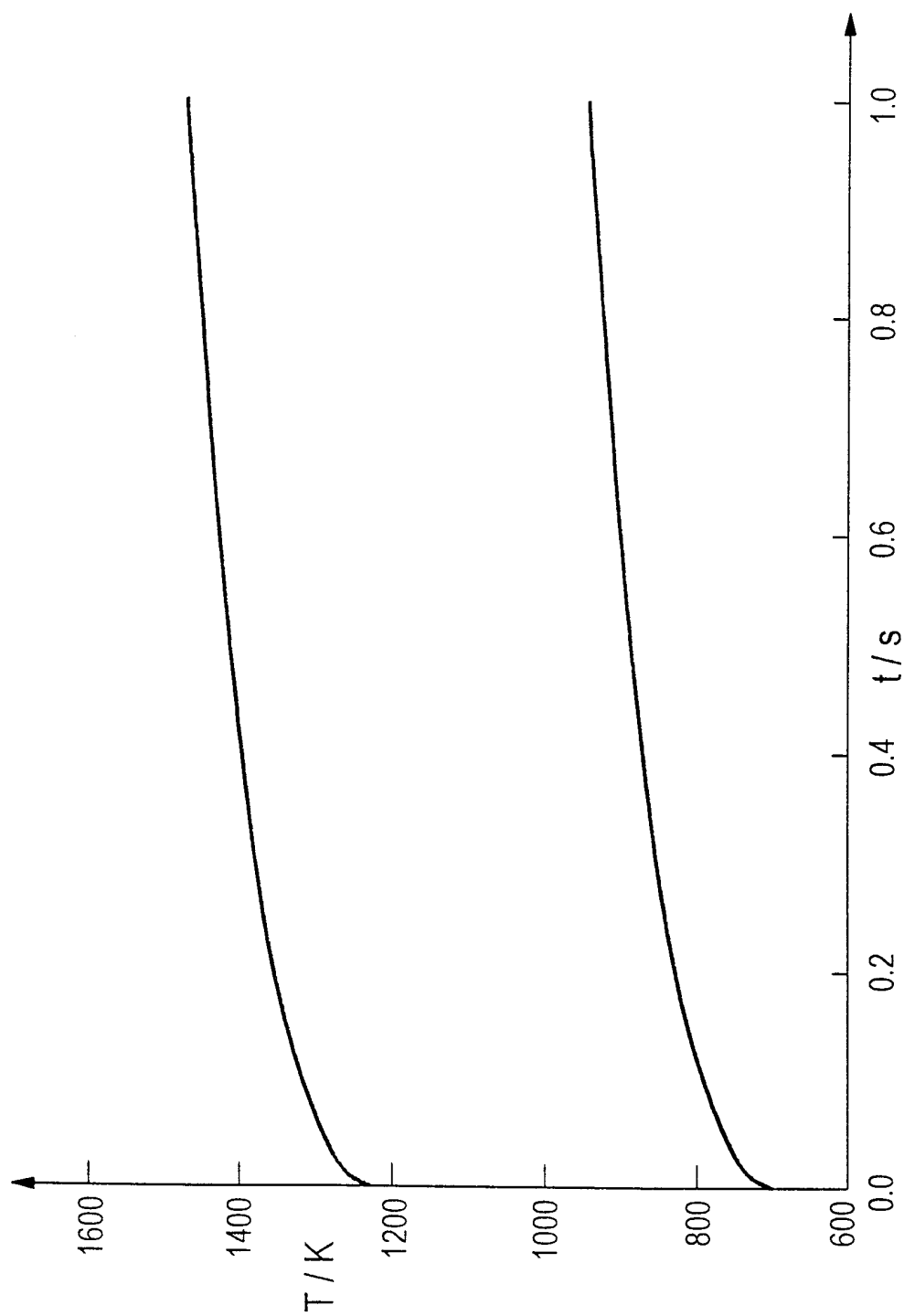


FIG 25

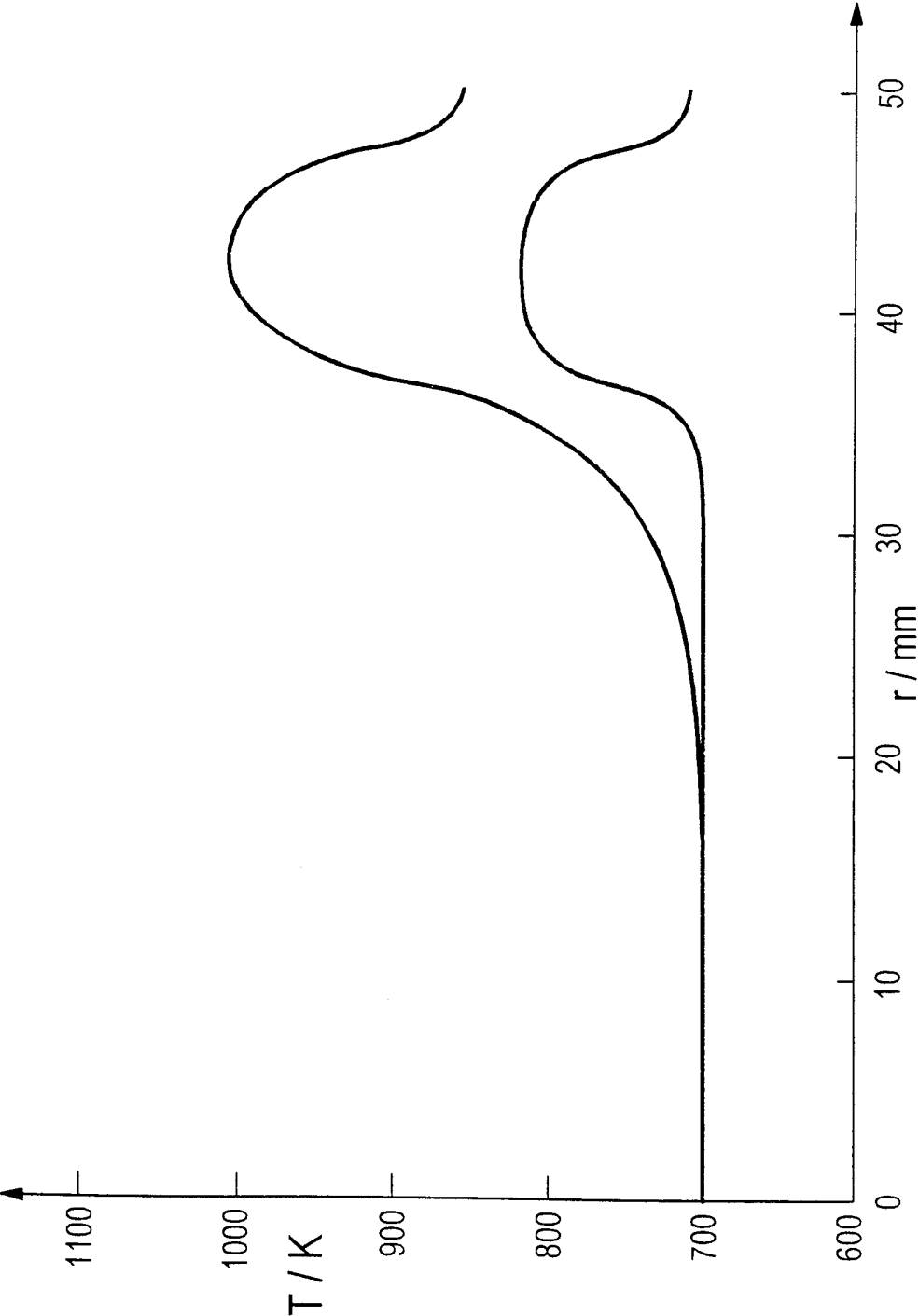


FIG 26

25/26

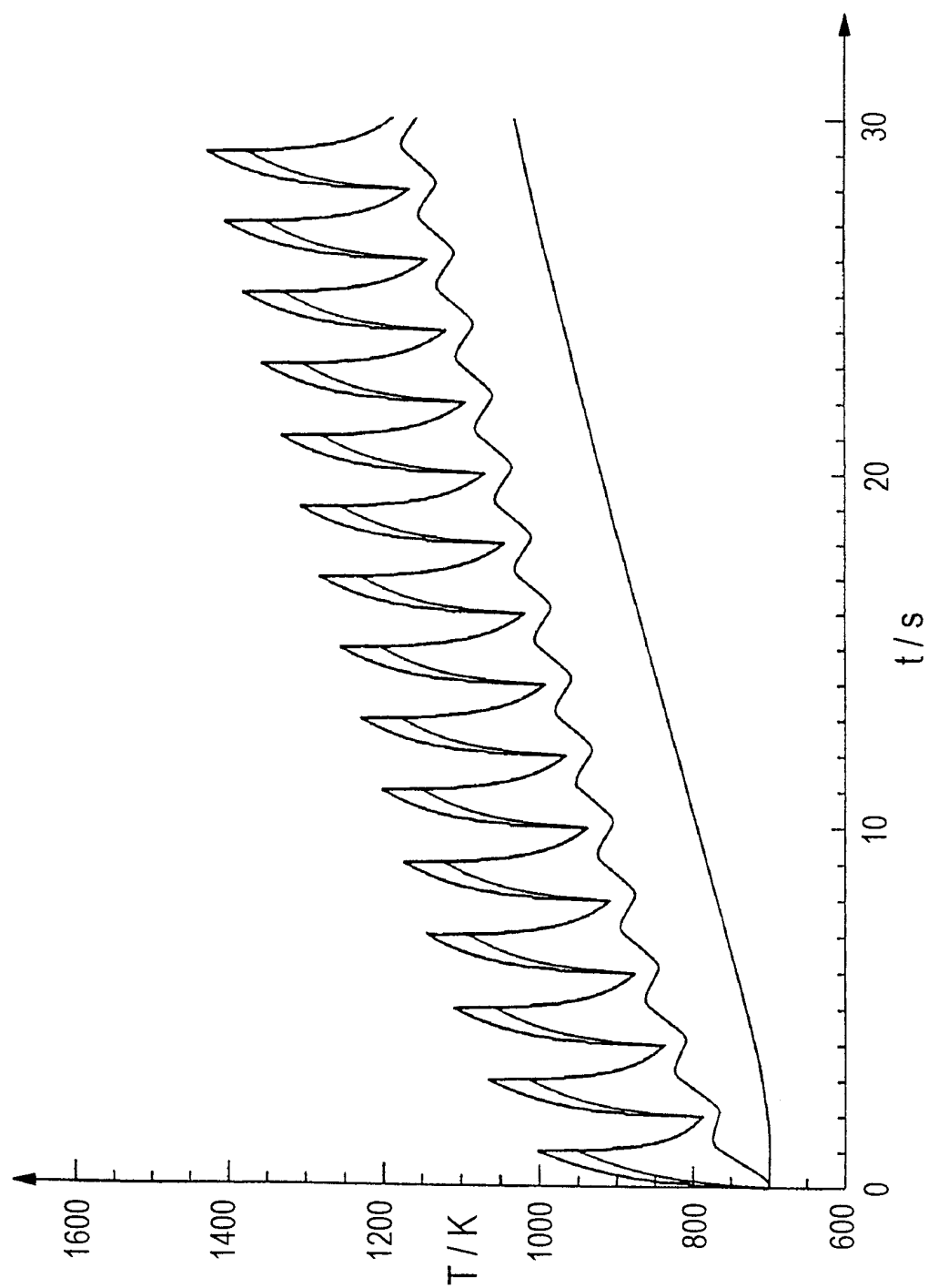


FIG 27

26/26

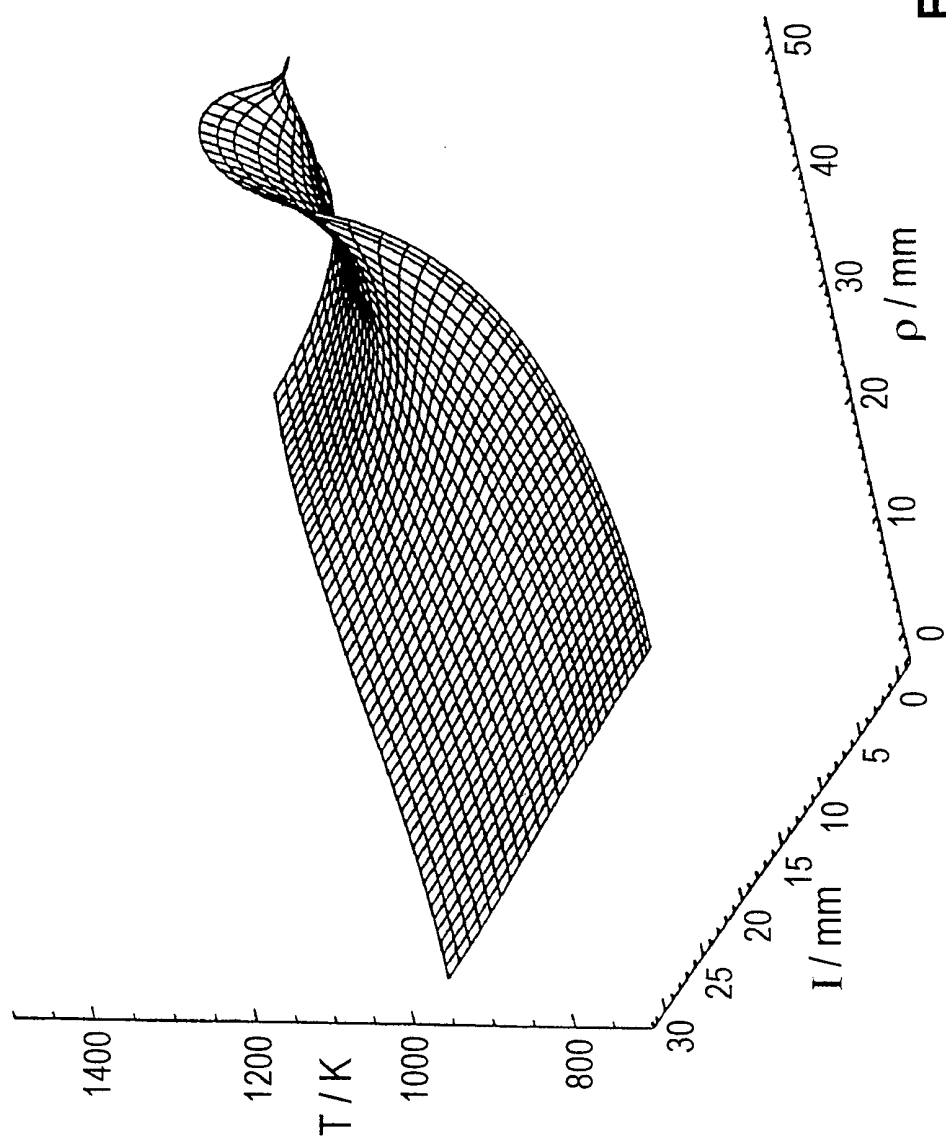


FIG 28

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Intern: al Application No

PCT/DE 99/00695

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 6 H05G1/36 G01K11/30

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 6 H05G G01K H01J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 292 399 A (VARIAN ASSOCIATES) 18 June 1976 (1976-06-18) claim 1 ---	1
A	DE 41 34 126 A (SIEMENS AG) 22 April 1993 (1993-04-22) claim 1 ---	1
A	GB 1 498 824 A (PHILIPS ELECTRONIC ASSOCIATED) 25 January 1978 (1978-01-25) claim 1 -----	1

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

22 July 1999

Date of mailing of the international search report

02/08/1999

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Van den Bulcke, E

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

Intern: al Application No

PCT/DE 99/00695

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
FR 2292399 A	18-06-1976	US 3961173 A CA 1055563 A CH 594981 A DE 2551356 A GB 1524069 A IT 1064297 B NL 7513540 A SE 7513078 A	01-06-1976 29-05-1979 31-01-1978 26-05-1976 06-09-1978 18-02-1985 24-05-1976 21-05-1976
DE 4134126 A	22-04-1993	NONE	
GB 1498824 A	25-01-1978	NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Intern ales Aktenzeichen

PCT/DE 99/00695

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 6 H05G1/36 G01K11/30

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 6 H05G G01K H01J

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie ^o	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	FR 2 292 399 A (VARIAN ASSOCIATES) 18. Juni 1976 (1976-06-18) Anspruch 1 ---	1
A	DE 41 34 126 A (SIEMENS AG) 22. April 1993 (1993-04-22) Anspruch 1 ---	1
A	GB 1 498 824 A (PHILIPS ELECTRONIC ASSOCIATED) 25. Januar 1978 (1978-01-25) Anspruch 1 -----	1

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

^o Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

22. Juli 1999

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

02/08/1999

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Van den Bulcke, E

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE 99/00695

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
FR 2292399 A	18-06-1976	US 3961173 A	01-06-1976
		CA 1055563 A	29-05-1979
		CH 594981 A	31-01-1978
		DE 2551356 A	26-05-1976
		GB 1524069 A	06-09-1978
		IT 1064297 B	18-02-1985
		NL 7513540 A	24-05-1976
		SE 7513078 A	21-05-1976
DE 4134126 A	22-04-1993	KEINE	
GB 1498824 A	25-01-1978	KEINE	