

⑤

Int. Cl. 2:

G 21 C 7-30

⑯ **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

**DEUTSCHES PATENTAMT**



**DT 24 08 761 A1**

⑪

# **Offenlegungsschrift 24 08 761**

⑳

Aktenzeichen: P 24 08 761.4-33

㉔

Anmeldetag: 23. 2. 74

㉕

Offenlegungstag: 4. 9. 75

③①

Unionspriorität:

③② ③③ ③①

—

⑤④

Bezeichnung: Reaktorkern mit stabförmigen Brennstoffzellen

⑦①

Anmelder: Kernforschungsanlage Jülich GmbH, 5170 Jülich

⑦②

Erfinder: Dworak, Alfred, Dr., 5170 Jülich

Prüfungsantrag gem. § 28b PatG ist gestellt

**DT 24 08 761 A1**

Kernforschungsanlage Jülich  
Gesellschaft mit beschränkter Haftung

Reaktorkern mit stabförmigen Brennstoffzellen

Die Erfindung bezieht sich auf einen Reaktorkern mit in Strömungsrichtung eines den Reaktorkern durchströmenden Kühlmittels gesehen mehreren aufeinander folgenden, stabförmigen Brennstoffzellen und mit zur Regelung des Reaktorkerns vorhandenen Absorptionsstäben.

Bei einem bekannten Reaktorkern der oben genannten Art, insbesondere bei einem Reaktorkern eines gasgekühlten Reaktors, bei dem die Kühlmittel den Reaktorkern in axialer Richtung durchströmen, ist die von den äußeren Brennstoffzellen abgegebene Leistung wegen höherer Neutronenverluste im äußeren Bereich des Reaktorkerns gegenüber den Brennstoffzellen im mittleren Bereich stark reduziert. In axialer Richtung des Reaktorkerns stellt sich daher eine etwa cosinusförmige Leistungsverteilung ein. Eine solche Leistungsverteilung ist für den Betrieb des Kernreaktors nicht optimal. Es wird daher angestrebt, eine Leistungsverteilung zu erreichen, bei der im Kühlmittelintrittsbereich des Reaktorkerns die maximalen Leistungsabgaben erzielt werden. Eine solche Leistungsverteilung bringt für den Reaktorbetrieb insbesondere deshalb Vorteile, weil dann das den Reaktorkern durchströmende Kühlgas infolge der sich in Strömungsrichtung langsam verringernden Leistungsabgabe bis dicht unterhalb der zulässigen Oberflächentemperatur der Brennstoffzellen aufheizbar ist. Außerdem lassen sich die Temperaturen der Brennstoffzellen sowohl an ihrer

- 2 -

Oberfläche als auch zentral niedrig halten. Derartige Leistungsverteilungen wurden bisher vor allem in Kugelhaufenreaktoren verwirklicht.

Neben der ungünstigen Leistungsverteilung in axialer Richtung treten bei bekannten Reaktorkernen mit stabförmigen Brennstoffzellen aber auch über der Querschnittsfläche des Reaktorkerns in radialer Richtung unerwünschte Leistungsdifferenzen auf. Diese Leistungsdifferenzen sind einerseits durch die oben bereits erwähnten Neutronenverluste im Randbereich des Reaktorkerns bedingt. Es ist bekannt, die hierdurch verursachten Leistungsdifferenzen durch entsprechende Auswahl verschiedener Brennstoffgemische jeweils für die im Randbereich, beziehungsweise im mittleren Bereich des Reaktorkerns gelegenen Brennstoffzellen auszugleichen. Andererseits sind die radialen Leistungsdifferenzen aber darauf zurückzuführen, daß die Brennstoffzellen wegen der während des Reaktorbetriebes abfallenden Leistungsabgabe nach einer bestimmten Verweilzeit im Reaktorkern regionenweise ausgetauscht werden. Bei bekannten Reaktoren beträgt die mittlere Verweilzeit der einzelnen Brennstoffzellen etwa 4 bis 6 Jahre. Um einen möglichst gleichmäßigen Betrieb des Reaktors zu gewährleisten, werden in jedem Jahr ein Viertel bzw. ein Sechstel der Brennstoffzellen erneuert, so daß jeweils die Region des Reaktorcores mit den jüngsten Brennstoffzellen die maximale Leistung abgibt. Dieser unterschiedlichen Leistung der einzelnen Coreregionen, die ohne eine zusätzliche Beeinflussung des Reaktorbetriebes zu einer unerwünschten unterschiedlichen Aufheizung des Kühlmittels führen würde, wurde bisher dadurch begegnet, daß jeder Region eine gesonderte Regelein-

- 3 -

richtung zur Variation des Kühlgasstromes zugeordnet wurde. Der hierzu benötigte hohe apparative Aufwand schlägt sich nicht nur in den Herstellungskosten des Reaktors nieder, sondern bedingt auch hohe Kosten bei Betrieb des Reaktors. Ein weiterer Nachteil besteht darin, daß der Reaktorkern wegen des regionenweisen Austausches der Brennstoffzellen eine sich von der Inbetriebnahme des Reaktors an über mehrere Jahre hinweg erstreckende Einbrennphase aufweist.

Aufgabe der Erfindung ist es, bei einem Reaktorkern mit in Strömungsrichtung des Kühlmittels gesehen mehreren aufeinander folgenden, stabförmigen Brennstoffzellen die Leistungsverteilung im Reaktorkern sowohl in axialer als auch in radialer Richtung zu optimieren, wobei in radialer Richtung eine weitgehend gleichmäßige Leistungsabgabe des Reaktorkerns angestrebt wird. Außerdem soll die Herstellung des Reaktors vereinfacht und ein Betrieb des Reaktors ohne das Auftreten einer Einbrennphase ermöglicht werden.

Zur Lösung dieser Aufgabe geht die Erfindung davon aus, daß sich unter der Bedingung weitgehend konstanter Leistungsverteilung im Reaktorkern während des Reaktorbetriebes die Leistungsabgabe einer Brennstoffzelle um so höher einstellen läßt, je kürzer die Verweilzeit des Brennelements im Reaktorkern bemessen ist. So lassen sich zwar zum Beispiel mit an U 235 hoch angereicherten Brennstoffzellen hohe Leistungsabgaben erzielen, die Leistungen klingen aber

- 4 -

- 4 -

innerhalb verhältnismäßig kurzer Betriebszeit rasch ab.

Hiervon ausgehend wird die Aufgabe der Erfindung bei einem Reaktor der eingangs bezeichneten Art dadurch gelöst, daß für die aufeinander folgenden Brennstoffzellen jeweils eine für die einzelne Brennstoffzelle nach einer vorgegebenen Leistungsverteilung im Reaktorkern vorbestimmte Verweilzeit vorgesehen ist, wobei die Brennstoffzellen gleicher Verweilzeit in Strömungsrichtung des Kühlmittels gesehen im Reaktorkern nebeneinander angeordnet sind. Wegen der Zuordnung zwischen Verweilzeit und Leistungsabgabe sind bei einem Reaktorkern gemäß der Erfindung die Brennstoffzellen mit der kürzesten Standzeit in den Bereichen des Reaktorkerns eingesetzt, in denen die höchsten Leistungen erforderlich sind. Ein großer Vorzug der Erfindung besteht darin, daß die Verweilzeiten der Brennstoffzellen einer vorgegebenen Leistungsverteilung angepaßt sind, wobei die Leistungsverteilung dem optimalen Reaktorbetrieb entspricht. Ein weiterer Vorzug besteht darin, daß jeweils benachbarte Brennstoffzellen die gleiche Verweilzeit aufweisen. Das Auswechseln der Brennstoffzellen erfolgt daher beim erfindungsgemäßen Reaktor nicht mehr regional, sondern durch Austausch einer vollständigen Querschnittsschicht, so daß Leistungsunterschiede in radialer Richtung im Reaktorkern wegen unterschiedlichen Alters der Brennstoffzellen nicht mehr auftreten. Hierdurch ergibt sich eine erhebliche Vereinfachung für den apparativen Aufbau des Reaktorkerns. Regelungseinrichtungen für eine regionale Steuerung des Kühlmittelstromes zum Ausgleich der sogenannten "Agefaktoren" entfallen.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, die Brennstoffzellen mit der kürzesten Standzeit an der Kühl-

- 5 -

mitteleintrittsseite anzuordnen. Diese Maßnahme entspricht nicht nur der Anpassung des Reaktorkerns an eine optimale Leistungsverteilung, wie sie bei Kugelhaufenreaktoren gegeben ist. Hierdurch ergibt sich auch eine große Vereinfachung beim schichtweisen Auswechseln der Brennstoffzellen. Die am häufigsten auszuwechselnden Brennstoffzellen sind am gut zugänglichen Randbereich des Reaktorkerns angeordnet.

Um die optimale Leistungsverteilung im Reaktorkern über der Betriebszeit konstant zu halten, ist es nach einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung vorteilhaft, mit abbrennbaren Neutronengiften auf gleicher Leistung gehaltene Brennstoffzellen einzusetzen. Eine andere erfindungsgemäße Variante zur Aufrechterhaltung der Leistungsverteilung ist durch die Verwendung von Absorptionsstäben mit in Strömungsrichtung des Kühlmittels gesehen abnehmenden Absorptionsraten gegeben.

In der Zeichnung sind Ausführungsbeispiele eines Reaktorkerns gemäß der Erfindung wiedergegeben. Es zeigen:

Fig. 1 Anordnung stabförmiger Brennstoffzellen unterschiedlicher Verweilzeit im Reaktorkern

Fig. 2 Querschnitt einer Brennstoffzelle nach Fig. 1

Fig. 3 axiale Leistungs- und Temperaturverteilung im Reaktorkern nach Fig. 1

Fig. 4 Verweilzeitschema und mit Kenngrößen für das Brennstoffgemisch der Brennstoffzellen nach Fig. 1

- 6 -

Fig. 5 Verweilzeitschema eines  
weiteren Ausführungsbeispiels

Wie aus der Zeichnung ersichtlich ist, besteht der von einem Reflektor 1 umgebene Reaktorkern 2 aus mehreren Brennstoffzellenschichten, die jeweils aus in Strömungsrichtung 3 des Kühlmittels gesehen, aufeinander folgenden Brennstoffzellen 4 bis 11 bestehen. Den Aufbau einer einzelnen Brennstoffzelle zeigt Fig. 2. Es handelt sich dabei um einen "10-row-Graphit-Block" mit 210 Brennstoffkanälen 12, die voneinander einen minimalen Abstand von 18,8 mm aufweisen. In den Brennstoffkanälen ist der Brennstoff in Form von beschichteten, sphärischen Brennstoffkernen, die von karburiertem Graphitpulver und Binder umgeben sind, eingelagert. Jeweils im Zentrum von 6, in Form eines Sechsecks angeordneten Brennstoffzellen 12 wird die Brennstoffzelle von Kühlkanälen 13 durchsetzt.. Außerdem weist die Brennstoffzelle jeweils an den Eckpunkten des sechseckigen Blockes Kanäle 14 zum Einbringen abbrennbarer Neutronengifte auf. In der Mitte der Brennstoffzelle befindet sich ein Greiferloch 15 zum Einsetzen, bzw. Herausheben der Brennstoffzelle.

Die vorbestimmte Verweilzeit der einzelnen Brennstoffzellen 4 bis 11 im Reaktorkern 2 beruht auf der in Fig. 3 dargestellten, vorgegebenen axialen Leistungsverteilung 16 und ist aus dem Verweilzeitschema nach Fig. 4 ersichtlich. Die Verweilzeit der Brennstoffzellen ist auf der Abszissenachse des Schemas in Einheiten von 300 Tagen eingetragen. Danach beträgt die Verweilzeit der im Hochleistungsbereich des Reaktorkerns 1 angeordneten Brennstoffzellen 4 und 5 jeweils 300 Tage, die Verweilzeit der Brennstoffzellen 6

- 7 -

600 bzw. 300 Tage. Im Niederleistungsbereich sind für die Brennstoffzellen längere Verweilzeiten vorgesehen. Die Brennstoffzellen 6 werden nach Ablauf von 1200 Tagen, die Brennstoffzellen 8 bis 11 erst nach Ablauf von 2400 Tagen ausgewechselt. Die zuletzt angegebene Zeitspanne von 2400 Tagen entspricht gleichzeitig einer Betriebsperiode des Reaktorkerns. Nach dieser Zeitspanne wird der Reaktorkern durch Austausch aller Brennstoffzellen in den Zustand versetzt, der bei Inbetriebnahme des Reaktors vorlag.

Die Zusammensetzung des Brennstoffgemisches der im Reaktorkern verwendeten Brennstoffzellen 4 bis 11 ist in Fig. 4 angegeben. Als Kenngrößen für das Brennstoffgemisch jeder Brennstoffzelle sind dimensionslose Bezugsgrößen jeweils zur Charakterisierung des Brutstoffgehaltes und des Spaltstoffgehaltes eingetragen. Es bedeuten

$N_C / N_{SM}$  = mittlere Teilchendichte Graphit zu mittlerer Teilchendichte Brutstoff- und Spaltstoff.

$E$  = Atomdichte des Spaltstoffes bezogen auf Atomdichte von Brutstoff - und Spaltstoff in %.

Aus Fig. 4 ist ersichtlich, daß die Brennstoffzellen im Hochleistungsbereich mehr Spaltstoffe als die Brennstoffzellen im Niederleistungsbereich aufweisen. Die Zusammensetzung des Brennstoffgemisches der nach Ablauf der vorbestimmten Verweilzeit neu einzusetzenden Brennstoffzellen ist so gewählt, daß die Leistungsverteilung 16 im Reaktorkern konstant bleibt. Die mittlere Leistungsdichte des Reaktorcores beträgt  $8,3 \text{ MW/m}^3$ .

Die bei Betrieb des Reaktors auftretenden Temperaturen



- 8 -

innerhalb der Brennstoffzellen 4 bis 11 sind neben der axialen Leistungsverteilung 16 in Fig. 3 dargestellt.

Es bedeuten

$Q$  = Leistung in axialer Richtung bezogen auf die mittlere Leistung des Reaktorkerns

$T_z$  = Brennstoff-Zentraltemperatur

$T_g$  = Kühlmitteltemperatur

$T_o$  = Kühlkanal-Oberflächentemperatur

Bei weitgehend konstanter Brennstoff-Zentraltemperatur in allen Brennstoffzellen 4 bis 11, wird das den Reaktorkern 1 von der Kühlmittelintrittsseite 17 zum Kühlmittelaustritt 18 durchströmende Kühlmittel auf zirka  $850^{\circ}\text{C}$  aufgeheizt. Dabei nimmt die Kühlkanal-Oberflächentemperatur  $T_o$  von der Kühlmittelintrittsseite bis zum Kühlmittelaustritt um etwa  $200^{\circ}\text{C}$  zu.

In Fig. 5 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel des Aufbaues eines Reaktorkerns anhand des für diesen Fall geltenden Verweilzeitschemas dargestellt. Die vorgegebene Verweilzeit der Brennstoffzellen im Niederleistungsbereich ist bei diesem Ausführungsbeispiel nur 4 mal so lang, wie die kürzeste Verweilzeit der im Hochleistungsbereich angeordneten Brennstoffzellen. Je nach technischer Anforderung und je nach erforderlicher und zweckmäßiger Wahl der Materialzusammensetzung der Brennstoffzellen des Reaktorkerns sind außer den in den Ausführungsbeispielen beschriebenen Verweilzeitschemen weitere Verweilzeitschemen zur Durchführung des optimalen Betriebes des Reaktorkerns möglich.

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Reaktorkern mit in Strömungsrichtung eines den Reaktorkern durchströmenden Kühlmittels gesehen mehreren aufeinander folgenden, stabförmigen Brennstoffzellen und mit zur Regelung des Reaktorkerns vorhandenen Absorptionsstäben, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß für die aufeinander folgenden Brennstoffzellen (4 bis 11) jeweils eine für die einzelne Brennstoffzelle nach einer vorgegebenen Leistungsverteilung (16) im Reaktorkern (2) vorbestimmte Verweilzeit vorgesehen ist, wobei die Brennstoffzellen gleicher Verweilzeit in Strömungsrichtung des Kühlmittels gesehen im Reaktorkern (2) nebeneinander angeordnet sind.
2. Reaktorkern 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 die Brennstoffzellen (4) mit der kürzesten Verweilzeit der Kühlmittelleintrittsseite (17) des Reaktorkerns (2) angeordnet sind.
3. Reaktor nach Anspruch 1 oder 2, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß mit abbrennbaren Neutronengiften auf gleicher Leistung gehaltene Brennstoffzellen verwendet sind.
4. Reaktorkern nach einem der Ansprüche 1,2 oder 3, g e k e n n z e i c h n e t d u r c h die Verwendung von Absorptionsstäben mit in Strömungsrichtung des Kühlmittels gesehen abnehmenden Absorptionsraten.

10  
Leerseite

-15-

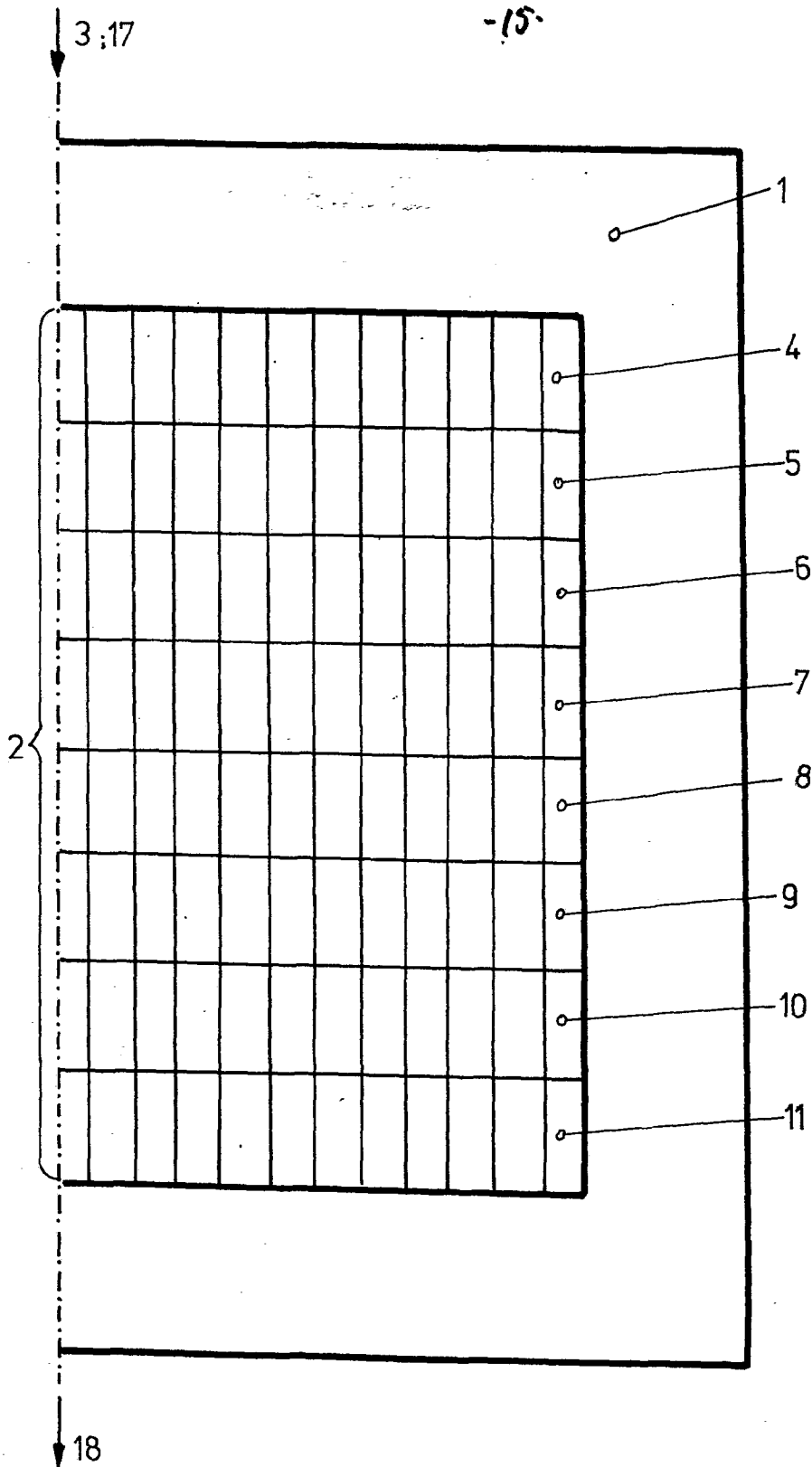


Fig. 1

509836/0099

G21C

7-30

AT:23.02.1974

OT:04.09.1975

ORIGINAL INSPECTED

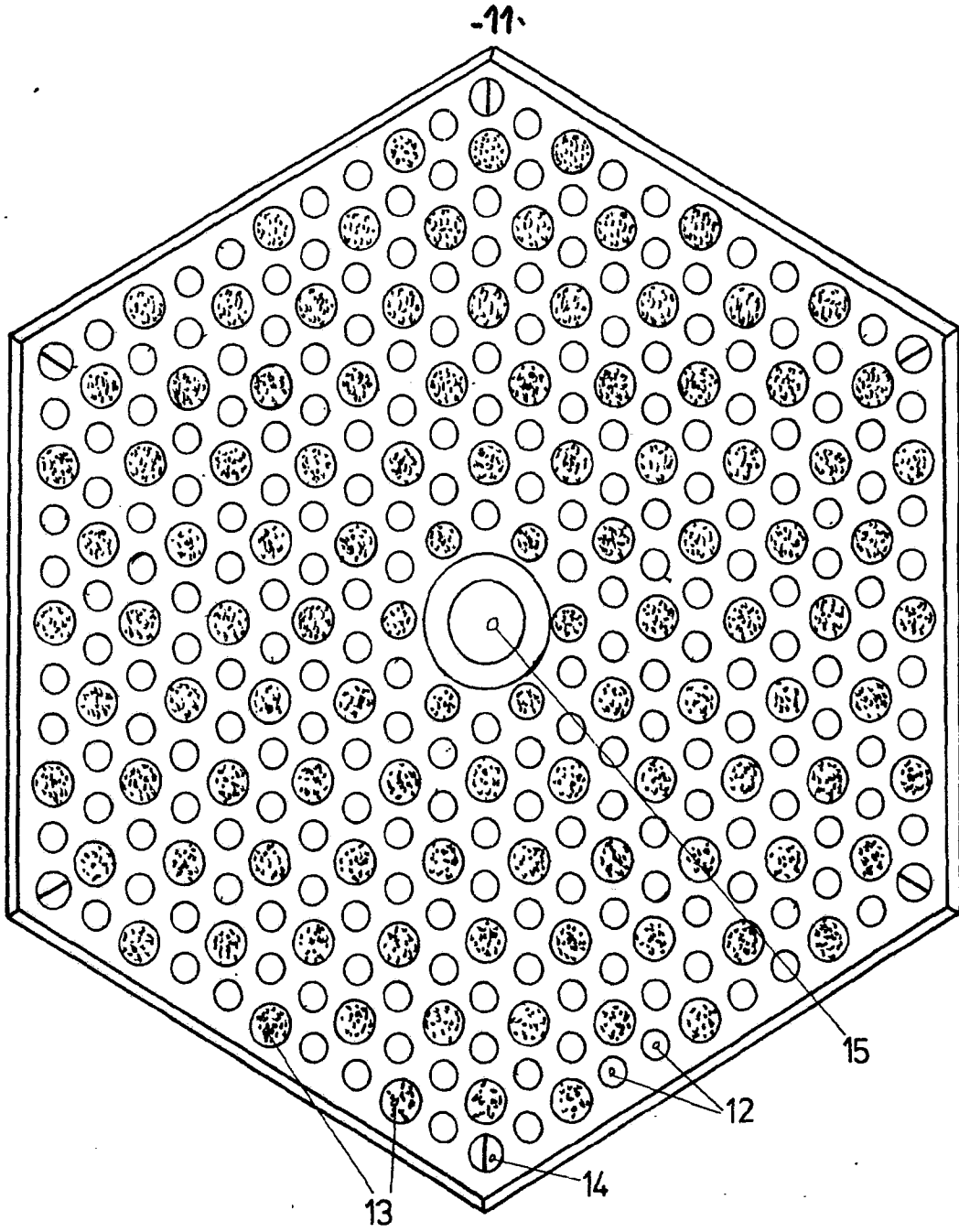


Fig. 2

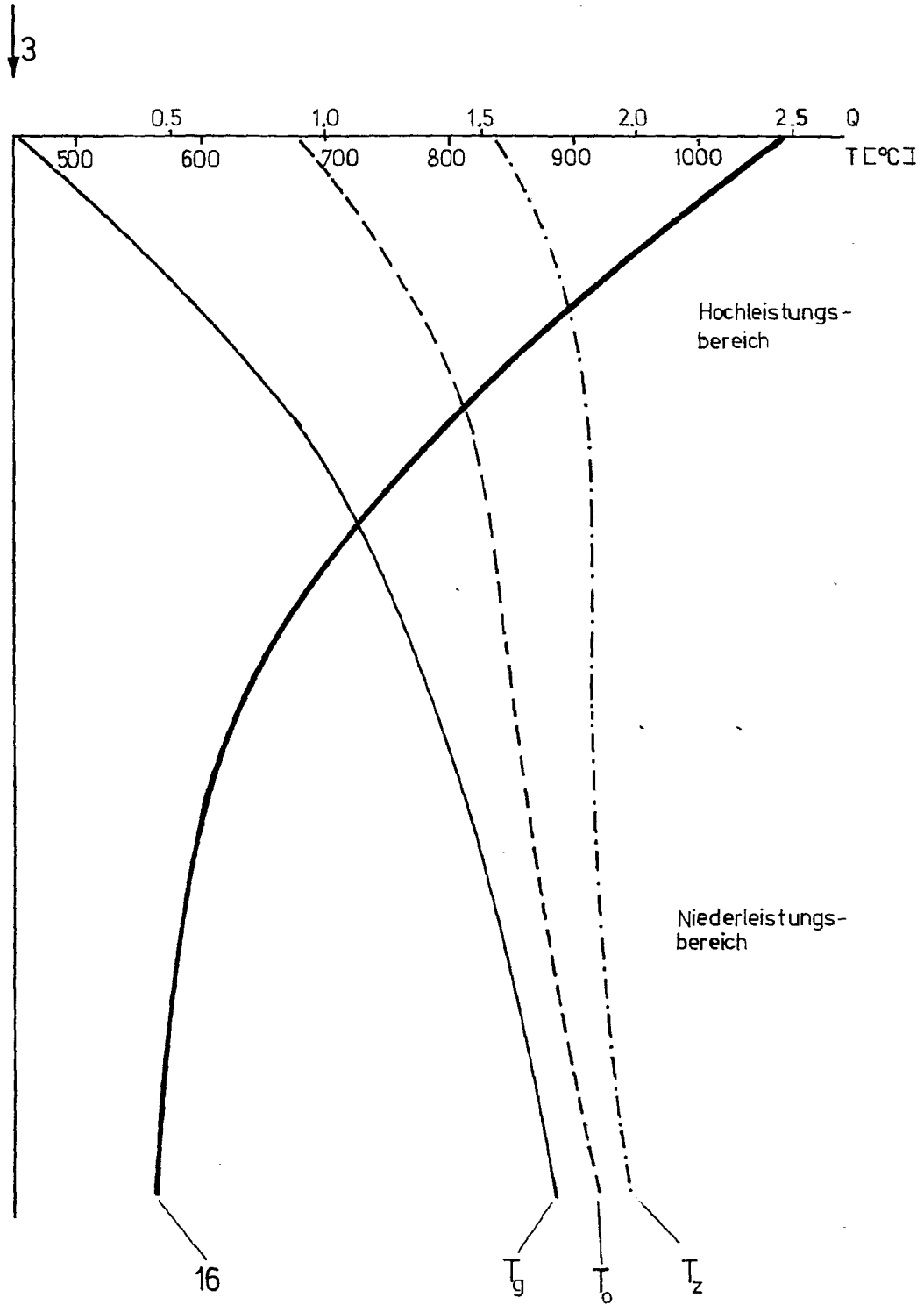


Fig. 3

509836/0099

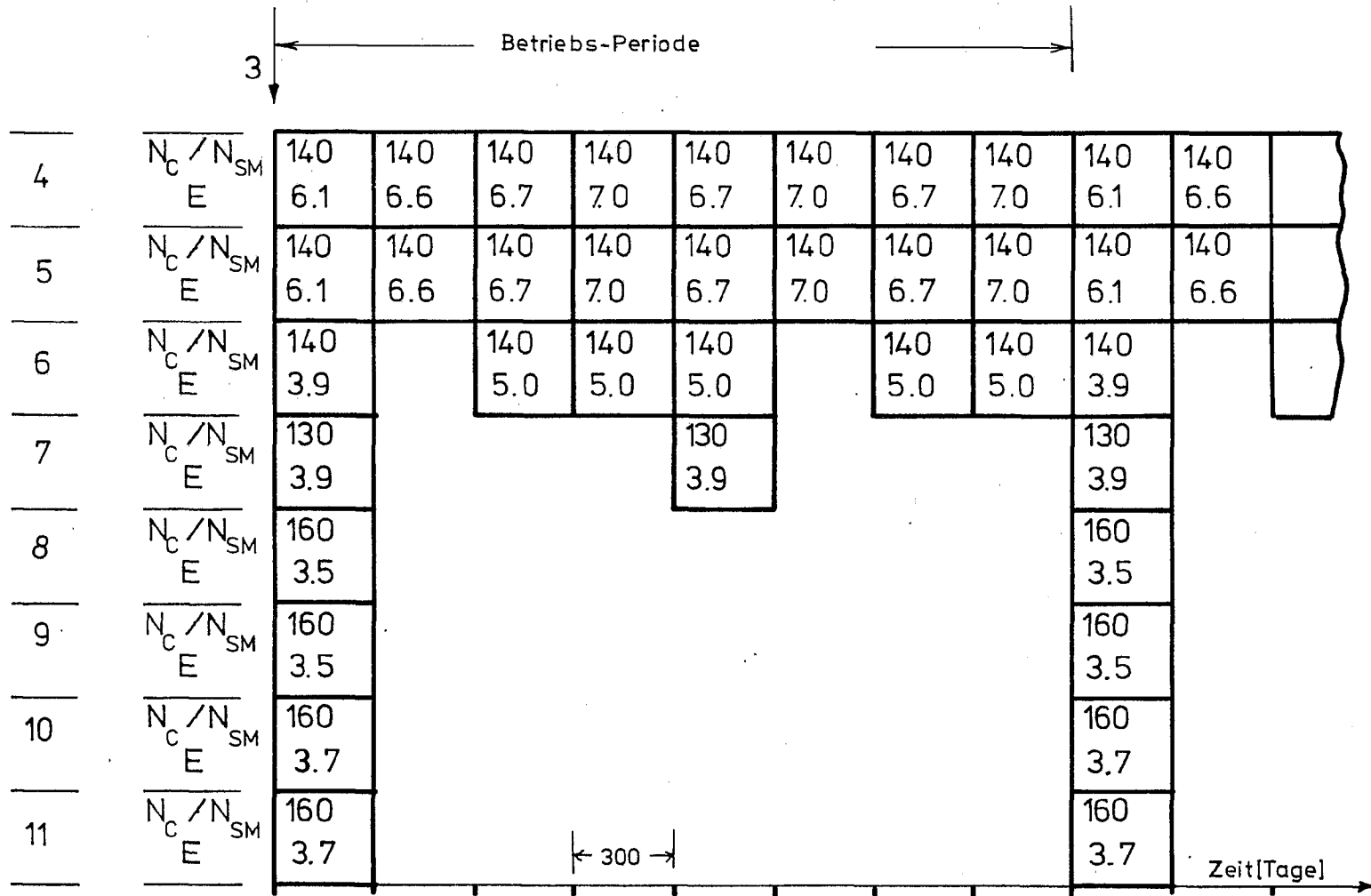


Fig. 4

13.

2408761

509836/0099

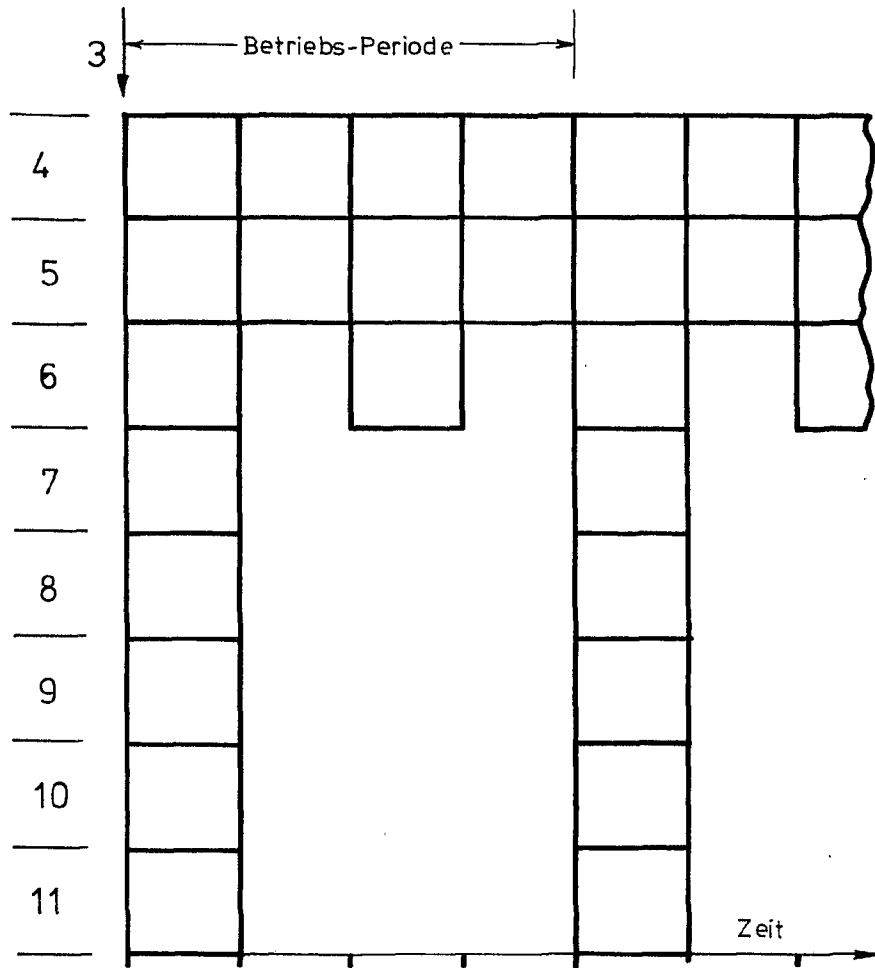


Fig. 5

-14-

2408761