

EUR 466.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

STUDIE DER OPTIMALEN ZONE
DER UNABHÄNGIGEN PARAMETER
EINES ORGEL-REAKTORS
IN EINEM 250 MWe-KRAFTWERK

Selbsttragendes Brennelement aus UC, SAP-Umhüllung
mit 4 Brennstoffstäben und individuellen Druckrohren

von

F. LAFONTAINE und P. TAUCH

1963



Programm ORGEL

Generaldirektion Forschung und Ausbildung

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen:

- 1° — keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;
- 2° — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Die Namen der Autoren sind in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.

Dieser Bericht wird zum Preise von 60,— bfrs. verkauft.
Bestellungen sind zu richten an: PRESSES ACADEMIQUES
EUROPEENNES — 98, chaussée de Charleroi — Brüssel 6.

Die Zahlung ist zu leisten durch Überweisung:

- an die BANQUE DE LA SOCIETE GENERALE (Agence
Ma Campagne) - Brüssel - Konto Nr. 964.558,
- an die BELGIAN AMERICAN BANK AND TRUST
COMPANY - New York - Konto Nr. 121.86,
- an die LLOYDS BANK (Foreign) Ltd. - 10 Moorgate,
London E.C.2,

als Bezug ist anzugeben: „E U R 4 6 6 . d - Studie der optimalen
Zone der unabhängigen Parameter eines ORGEL-Reaktors in
einem 250 MWe-Kraftwerk - Selbsttragendes Brennelement aus
UC, SAP-Unhüllung mit 4 Brennstoffstäben und individuellen
Druckrohren“.

Gedruckt von Guyot S.A.
Brüssel, Oktober 1963.

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes
vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

EUR 466.d

STUDIE DER OPTIMALEN ZONE DER UNABHÄNGIGEN PARAMETER EINES ORGEL-REAKTORS IN EINEM 250 MWe-KRAFTWERK - SELBSTTRAGENDES Brennelement aus UC, SAP-UMHÜLLUNG MIT 4 Brennstoffstäben und individuellen Druckrohren von F. LAFONTAINE und P. TAUCH.

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM
Program ORGEL
Generaldirektion Forschung und Ausbildung
Brüssel, Oktober 1963 - 39 Seiten - 11 Abb.

Für einen ORGEL-Leistungsreaktor von 250 MWe wird die optimale Auslegung der unabhängigen Parameter der Anlage bestimmt. Diese Parameter fixieren die Brennelementgeometrie (4 UC-Stäbe mit separaten Druckrohren), die Maße des Reaktorcores und die Betriebsbedingungen der Anlage.

EUR 466.d

STUDY OF THE OPTIMUM ZONE OF THE INDEPENDANT VARIABLES OF AN ORGEL REACTOR CONNECTED TO A 250-MWe POWER PLANT - SELF SUPPORTING FUEL ELEMENTS MADE OF UC, WITH SAP CLADDING WITH FOUR FUEL RODS AND INDIVIDUAL PRESSURE TUBES by F. LAFONTAINE and P. TAUCH.

European Atomic Energy Community - EURATOM
ORGEL Program
Directorate-General for Research and Training
Brussels, October 1963 - Pages 39 - Figures 11.

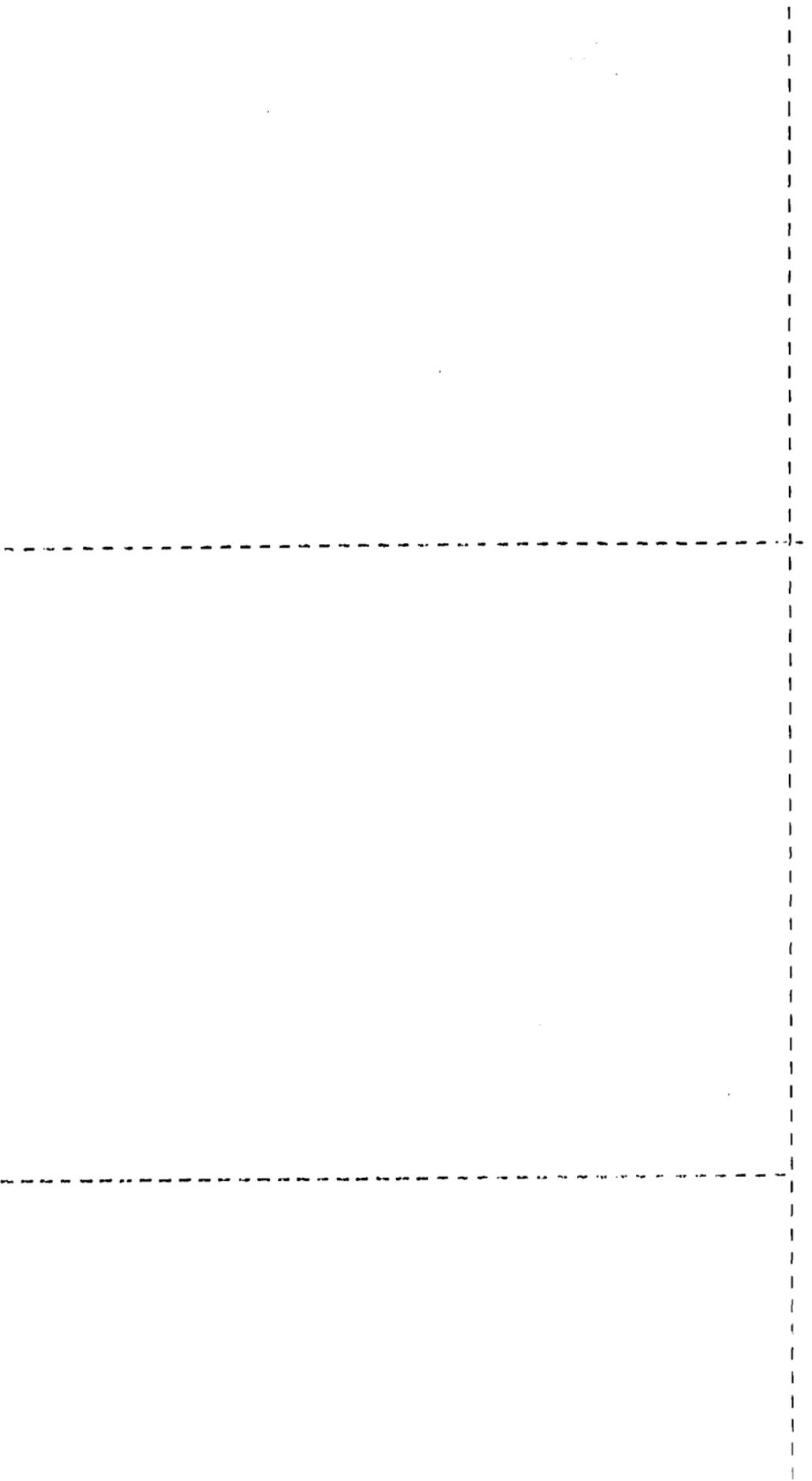
The objective of this study is the description of the optimum zone of the independant variables of an ORGEL reactor connected to a 250-MWe power plant (4 fuel rods of UC with individual pressure tubes) as well as the geometry of the reactor core and the operation of the plant.

EUR 466.d

STUDY OF THE OPTIMUM ZONE OF THE INDEPENDANT VARIABLES OF AN ORGEL REACTOR CONNECTED TO A 250-MWe POWER PLANT - SELF SUPPORTING FUEL ELEMENTS MADE OF UC, WITH SAP CLADDING WITH FOUR FUEL RODS AND INDIVIDUAL PRESSURE TUBES by F. LAFONTAINE and P. TAUCH.

European Atomic Energy Community - EURATOM
ORGEL Program
Directorate-General for Research and Training
Brussels, October 1963 - Pages 39 - Figures 11.

The objective of this study is the description of the optimum zone of the independant variables of an ORGEL reactor connected to a 250-MWe power plant (4 fuel rods of UC with individual pressure tubes) as well as the geometry of the reactor core and the operation of the plant.



EUR 466.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

STUDIE DER OPTIMALEN ZONE
DER UNABHÄNGIGEN PARAMETER
EINES ORGEL-REAKTORS
IN EINEM 250 MWe-KRAFTWERK

Selbsttragendes Brennelement aus UC, SAP-Umhüllung
mit 4 Brennstoffstäben und individuellen Druckrohren

von

F. LAFONTAINE und P. TAUCH

1963



Programm ORGEL

Generaldirektion Forschung und Ausbildung

INHALTVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG

1. EINLEITUNG
 - 1.1. Allgemeines
 - 1.2. Optimalisierung

2. HYPOTHESEN FÜR DIE BERECHNUNG
 - 2.1. Geometrie des Kühlkanals
 - 2.2. Sonstige Hypothesen

3. ANALYSE DER RESULTATE
 - 3.1. Bestimmung der Kenngrößen des optimalen Reaktors
 - 3.2. Einfluß der Änderung einzelner Parameter auf die Stromerzeugungskosten
 - 3.3. Einfluß der Herstellungskosten des Brennstoffes auf die optimale Brennelementgeometrie

SUMMARY

The objective of this study is the description of the optimum zone of the independent variables of an ORGEL reactor connected to a 250-MWe power plant (4 fuel rods of UC with individual pressure tubes) as well as the geometry of the reactor core and the operation of the plant.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieser Untersuchung besteht darin, den optimalen Bereich der unabhängigen Parameter eines ORGEL-Kraftwerks von 250 MWe elektrischer Bruttoleistung zu bestimmen ¹⁾.

Das benutzte Brennelement (Kurzbezeichnung N4T) hat folgende Anordnung im Querschnitt:

4 Brennstoffstäbe, jeder von einem eigenen Druckrohr umgeben, sind in einem gemeinsamen Hüllrohr (tube de calandre) untergebracht. Jeder Brennstoffstab stellt mit seinem Druckrohr ein separates Brennelement dar. Um bei der gleichen Terminologie ²⁾ wie für die Brennelemente N7R und N4R ³⁾ zu bleiben, soll jedoch auch hier unter dem Begriff "Brennelement" die Gesamtheit der 4 individuellen Elemente verstanden werden.

Es handelt sich um die folgenden Parameter:

- Parameter der Brennelementgeometrie

Brennstoffquerschnitt

Rippenkoeffizient

Kühlkanalweite

- Parameter der Coregeometrie

Corehöhe

Gitterabstand

Radiale Reflektordicke

Grad der Flußabflachung

- Betriebsparameter der Anlage

Mittlere Kühlmittelgeschwindigkeit im Core

¹⁾ Dampfkreislauf mit 1 Druck und Überhitzung, aber ohne Zwischenüberhitzung

²⁾ Im allgemeinen bezeichnet man die Gesamtheit der innerhalb eines Hüllrohres angeordneten Brennstoffstäbe als "Brennelement".

³⁾ Die beiden Brennelemente wurden bereits früher untersucht. Ref. 1 und 2.

Maximale nominelle Temperatur der Brennstoffhülle
Nominelle Kühlmittelaustrittstemperatur.

Bei der Festlegung dieser Parameter sind folgende technische Begrenzungen zu beachten:

- Die Kühlkanalweite (Abstand zwischen Rippenpitzen und Druckrohr) darf nicht kleiner als 1 mm sein.
- Die maximale nominelle Brennstoffhüllentemperatur darf 440°C nicht überschreiten.
- Die Aufwärmspanne des Kühlmittels ist auf max. 180°C begrenzt.
- Die maximal zulässige Brennstofftemperatur beträgt 1.600°C .
- Der maximale Wärmefluß zwischen Brennstoffhülle und Kühlmittel ist auf 130 W/cm^2 begrenzt.
- Die Wandstärke der Druckrohre darf 1 mm weder über- noch unterschreiten (damit auch Beschränkung der Kühlmittelgeschwindigkeit).

Im optimalen Betriebsbereich nehmen die oben genannten Parameter die folgenden Werte an:

a) Geometrie des Brennelementes

Der optimale Brennstoffquerschnitt liegt bei 35 cm^2 . Die Kühlkanalweite soll etwa 1,5 mm betragen, der Rippenkoeffizient ungefähr 1,7.

b) Geometrie des Cores

Die optimale Corehöhe beträgt etwa $4,5\text{ m}$ ¹⁾, der Gitterabstand 27 cm (bei einem Moderatorverhältnis von 18) und die radiale Reflektorstärke 40 cm. Der Grad der Flußabflachung liegt bei 0,40.

1) Der Coreradius liegt bei 3,2 m

c) Betriebsbedingungen der Anlage

Die optimale mittlere Kühlmittelgeschwindigkeit ist mit 9 m/s festgelegt worden. Die vorgegebene Wandstärke der Druckrohre von 1 mm reicht aus, um die durch den Druckabfall im Kühlkanal hervorgerufenen Beanspruchungen aufzunehmen. Auch die bei steigender Kühlmittelgeschwindigkeit zunehmende Leistungsdichte hat mit 22 MW/t U einen annehmbaren Wert.

Die optimale Temperatur der Brennstoffhülle $t_{gm\ opt}$ und die optimale Kühlmittelaustrittstemperatur $t_{l\ opt}$ sind durch die folgende Relation verbunden:

$$t_{gm\ opt} = t_{l\ opt} + 45 \text{ bis } 60^{\circ} \text{ C}$$

Diese Beziehung ist für den nachstehenden Bereich der Reaktorbetriebsparameter gültig:

Temperatur der Brennstoffhülle	420 bis 480° C
Kühlmittelaustrittstemperatur	370 bis 430° C
Kühlmittelgeschwindigkeit	8 bis 10 m/s

1. EINLEITUNG

1.1. Allgemeines

Die vorliegende Parameterstudie eines ORGEL-Leistungsreaktors, dessen Brennstoffelemente aus je 4 mit SAP umhüllten Urankarbidbrennstoffstäben mit 4 separaten SAP-Druckrohren ¹⁾ bestehen, ist in ihren der Rechnung zugrunde liegenden Hypothesen weitgehend identisch mit den in Referenz 1. und 2. beschriebenen Anlagen. Der Brennstoff ist nicht angereichert.

Die Betriebsbedingungen des Kraftwerks sind ähnlich den in den obigen Berichten; die untersuchten Variablen der Brennelementgeometrie, der Reaktorgeometrie und der Gesamtanlage sowie die technisch bedingten Limitationen der verschiedenen Parameter sind in etwa dieselben.

¹⁾ siehe Abschnitt 2.1.1.

1.2. Optimalisierung der Anlage

Das Optimalisierungsverfahren ist in allen Stufen dasselbe wie in den obigen Berichten angegeben.

2. HYPOTHESEN FÜR DIE BERECHNUNG

2.1. Geometrie des Kühlkanals

2.1.1. Geometrie des Brennelementes (Fig. 1)

Im Gegensatz zu dem im Aufbau ähnlichen Brennelement N4R der Referenz 2. (4 UC-Brennstoffstäbe, aber gemeinsames Druckrohr, Graphitfüllstücke, alle auftretenden Belastungen vom zentralen Füllstück aufgenommen) ist das hier untersuchte Brennelement selbsttragend, d.h. die Brennstoffstabhülle aus SAP nimmt alle Beanspruchungen auf.

Es ist zu beachten, daß jeder einzelne Brennstoffstab mit seinem separaten Druckrohr ein komplettes Brennelement darstellt, das auch separat ausgewechselt wird ¹⁾. Um jedoch bei der gleichen Terminologie wie für die Brennelemente N7R und N4R zu bleiben, soll auch hier unter dem Begriff "Brennelement" die Gesamtheit der in einem Calendra-Rohr zusammen untergebrachten 4 Einzelelemente verstanden werden. (Alle angegebenen Querschnitte für Brennstoff, SAP, Kühlmittel etc. beziehen sich daher auf 4 Brennstoffstäbe.)

Gegenüber den Brennelementen mit Füllstücken (Typen N7R und N4R) hat das Element N4T den Vorteil einer völlig gleichmäßigen Strömung des Kühlmittels im Kühlkanal (siehe Fig. 1). Der hydraulische Durchmesser des Kanals ist überall konstant, folglich ist auch die Temperaturverteilung im Kühlkanalquerschnitt symmetrisch; es gibt

¹⁾ natürlich nur der Brennstoffstab ohne Druckrohr.

keine hot spots an der Brennstoffstabhülle und keine zusätzlichen lokalen Wärmespannungen in der Hülle.

Des Weiteren sind im Element N4T gegenüber N4R weniger absorbierende Materialien enthalten

- 20 - 30 % weniger organisches Kühlmittel
- 15 % weniger SAP (dünnere Druckrohre)
- keine Graphitfüllstücke.

Der daraus resultierende Gewinn für die Neutronenbilanz beträgt 1100 - 1300 pcm. Das Core kann kleiner werden und der erzielbare Abbrand steigt an. Das Niveau der Gesamtstromerzeugungskosten wird um etwa 0,35 mill/Kwh gegenüber den Elementen N7R und N4R gesenkt.

Die untersuchte Geometrie umfaßt den folgenden Bereich (Tabelle 1):

Tabelle 1

Uranquerschnitt im Brennelement	V_u	25 bis 35 cm ²
Rippenkoeffizient	μ	1,4 bis 2,3
Abstand zwischen Rippen spitzen und Wand der Druckrohre	j_4	1 bis 2,5 mm

Die Wandstärken der Brennstoffstabhüllen sind identisch mit denen in Referenz 2. genannten, desgleichen die Rippenhöhen. Der Einfluß des Abstandes j_5 zwischen den Druckrohren im Element ist im Rahmen dieser Untersuchung nicht berücksichtigt worden. Ein zunehmender Abstand j_5 beeinflusst sowohl die thermische als auch die neutronenökonomische Bilanz des Brennelementes:

- Thermisch findet durch den größeren Gasraum im Element ein stärkerer konvektiver Wärmetransport zum Moderator statt, d.h. zunehmende thermische Verluste und niedrigerer Gesamtwirkungsgrad.

- Neutronenökonomisch vergrößern sich zwar nicht die absorbierenden Massen im Element, aber das effektive Resonanzintegral des U^{238} wird größer (d.h. k_{∞} kleiner).

Zur Abschätzung der beiden Einflüsse wurde eine Vergrößerung des Abstandes j_5 von 3 auf 6 mm untersucht. Der Gesamtwirkungsgrad η_{en} fällt von 0,3177 auf 0,3175, d.h. um weniger als 1 ‰. Das effektive Resonanzintegral I_{eff} vergrößert sich um 6 ‰ von 0,2744 auf 0,2760.

Aus dem Vorstehenden ergibt sich, daß im gegebenen Bereich von j_5 eine Optimierung dieser Distanz j_5 nicht notwendig ist.

2.1.2. Thermische Isolierung des Brennelementes

Die thermische Isolierung des Brennelementes wird durch eine Gasfüllung zwischen den Druckrohren und dem Hüllrohr bewirkt. Dieser relativ große gasgefüllte Raum des Elementes N4T bedingt höhere thermische Verluste aus dem Brennelement in den Moderator (etwa um den Faktor 2,5 gegenüber N4R), was sich in einem etwas verringerten Wirkungsgrad des Kraftwerkes äußert. In der endgültigen Ausführung wird man natürlich diese thermischen Verluste durch eine geeignete Isolierung zwischen den Druckrohren und dem Hüllrohr zu verringern suchen (z.B. durch eine dünne, wenig Neutronen absorbierende Schicht aus SiO_2), um den konvektiven Wärmetransport möglichst zu unterbinden.

Gegenüber dem mit Füllstücken aus Graphit versehenen Brennelement N4R bewirkt der Fortfall des Graphits im Element N4T eine Verbesserung der Neutronenbilanz, die in einem um ca. 220 MWd/t U höheren Abbrand resultiert ¹⁾. Die Wandstärke der Druckrohre aus SAP beträgt 1 mm, die des Hüllrohres aus Al 1,5 mm ²⁾.

- 1) Dem Kostenvorteil von 0,045 mill/KWh durch höheren Abbrand stehen Nachteile von 0,017 mill/KWh durch das kleinere η_{en} gegenüber, so daß bei der jetzigen Ausführung ohne zusätzliche Isolierung im Endeffekt eine Kostenersparnis von 0,028 mill/KWh bleibt.
- 2) Druckrohre aus SAP mit den hier vorkommenden Durchmessern von ca. 40 mm sind nach Ansicht der Metallurgen in Ispra in dieser Wandstärke heute realisierbar.

2.2. Sonstige Hypothesen

Bezüglich der sonstigen thermischen, thermodynamischen, physikalischen und ökonomischen Daten und Annahmen sei auf Referenz 2. verwiesen, deren Werte mit den hier benutzten identisch sind.

3. ANALYSE DER RESULTATE

Die Analyse der Resultate erfolgt in zwei Etappen:

1. Bestimmung der Kenngrößen des optimalen Kraftwerkes.
2. Untersuchung des Einflusses verschiedener unabhängiger Variablen auf die Stromkosten.

3.1. Bestimmung der Kenngrößen des optimalen Reaktors

Entsprechend dem in Referenz 2. angegebenen Optimisierungsverfahren wurde zunächst die optimale Geometrie des Brennelementes unter Beachtung aller einschränkenden Parameter bestimmt.

3.1.1. Festlegung der optimalen Brennelementgeometrie

Figur 2 zeigt, daß das optimale ORGEL-Kraftwerk die folgende Brennelementgeometrie aufweisen sollte:

Uranquerschnitt im Brennelement	V_u	35 cm ²	
Rippenkoeffizient	μ	1,7 bis 2,3	1)
Abstand zwischen Rippen- spitzen und Wand der Druckrohre	j_4	0,15 cm	

Auf der Fig. 3 sind für den gefundenen optimalen Uranquerschnitt V_u die Kurven gleicher Stromerzeugungs-

1) Vergleiche Fig. 3

kosten als Funktion von μ und j_4 dargestellt ¹⁾. Zugleich werden die Zentraltemperatur eines Brennstoffstabes t_{uom} , die Aufwärmspanne längs eines Kühlkanals Δt und die maximale Leistungsdichte H_m des Reaktors angegeben. Die zulässigen Obergrenzen von $t_{uom} = 1.600^\circ \text{C}$, $\Delta t = 180^\circ \text{C}$ und $j_4 \geq 0,10 \text{ cm}$ beschränken die optimale Brennelementgeometrie auf die Werte

$$j_4 \geq 0,10 \text{ cm}$$

$$\mu \leq 1,7$$

d.h. das Gebiet minimaler Kosten wird nicht ganz erreicht. Ferner ist noch die Grenzlinie für die Wandstärke $e_{tf} = 1 \text{ mm}$ der Druckrohre eingezeichnet. Im Feld links dieser Linie ist die erforderliche Wandstärke e_{tf} wegen der zunehmenden Druckabfälle bei enger werdenden Kühlkanälen größer als 1 mm , so daß sich die Neutronenbilanz schnell verschlechtert ²⁾.

Der maximale Wärmefluß durch die Brennelementhülle in das organische Kühlmittel liegt im Bereich der optimalen Brennelementgeometrie zwischen 120 und 130 W/cm^2 und damit etwa an der oberen zulässigen Grenze ³⁾ (Fig. 4).

Die vorstehend beschriebene als optimal befundene Geometrie des Brennelements ergibt sich aus dem Zusammenwirken der folgenden Einflußgrößen (Fig. 4):

- 1) bezogen auf die minimal erreichbaren Kosten unter Berücksichtigung der technischen Begrenzungen (Punkt A in den Figuren).
- 2) Die Grenzkurve $e_{tf} = 1 \text{ mm}$ kann durch Erhöhung des Gasdrucks zwischen Druckrohr und Führungsrohr nach links verschoben werden, aber der erzielbare Gewinn ist gering, da sehr bald die Begrenzung $\Delta t = 180^\circ \text{C}$ erreicht wird.
- 3) Bei einem Rippenkoeffizienten $\mu = 1,7$ ergibt sich ein Wärmefluß von ca. 220 W/cm^2 zwischen Uranoberfläche und Brennelementhülle. Mit dem angenommenen Wärmeleitwiderstand von $2^\circ \text{C cm}^2/\text{W}$ beträgt der Temperaturabfall zwischen Brennstoff und Hülle dann 440°C , d.h. eine hohe Zentraltemperatur t_{uom} . Eine Flüssigmetallschicht zwischen Brennstoff und Hülle ergäbe einen wesentlich besseren Wärmeübergang und folglich erheblich niedrigere Temperaturen t_{uom} . Damit wäre die einem größeren Rippenkoeffizienten μ entgegenstehende Begrenzung des t_{uom} für Werte $\mu \approx 2,0$ beseitigt, und man könnte alsdann in das Gebiet niedrigerer Kosten gelangen (der Wärmefluß j_m liegt mit 131 W/cm^2 dabei an der obersten zulässigen Grenze).

- steigende spezifische Leistung pro Brennelement w_{foc} bei Erhöhung des Rippenkoeffizienten μ oder Verringerung der Kühlkanalweite j_4 ,
- Erhöhung des Nettowirkungsgrades η_{en} des Kraftwerkes bei Vergrößerung der Kühlkanalweite j_4 oder Verminderung des Rippenkoeffizienten μ (Einfluß der aufwärmspanne Δt),
- Verschlechterung der Neutronenbilanz bei Vergrößerung der Kühlkanalweite oder des Rippenkoeffizienten (mehr absorbierendes Kühlmittel oder SAP im Core).

3.1.2. Wahl der unabhängigen Variablen des Kraftwerkes

Nach der Festlegung der optimalen Brennelementgeometrie muß geprüft werden, ob die für die Berechnung verwendeten Betriebsdaten des Kraftwerkes

- maximal zulässige Brennstoffhüllentemperatur t_{gm}
- Kühlmittelaustrittstemperatur t_1
- maximale Kühlmittelgeschwindigkeit im Core V

in der Nähe der optimalen Werte liegen.

3.1.2.1. Kühlmittelaustrittstemperatur und Brennstoffhüllentemperatur

In den Fig. 5, 6 und 7 sind die Linien gleicher Stromerzeugungskosten als Funktion der Kühlmittelaustrittstemperatur t_1 , der maximal zulässigen Brennstoffhüllentemperatur t_{gm} und der maximalen Kühlmittelgeschwindigkeit V für die in Fig. 3 als optimal gefundene Brennelementgeometrie aufgetragen. Die günstigste Corehöhe H ist bereits dort mit $H = 450$ cm festgelegt worden.

Für das optimal ausgelegte Kraftwerk gilt in etwa die Beziehung

$$t_{gm \text{ opt}} = t_{1 \text{ opt}} + 45 \text{ bis } 60^{\circ} \text{ C}$$

unabhängig von der Kühlmittelgeschwindigkeit im Bereich $V = 8$ bis 10 m/s .

Unter Beachtung der bis jetzt auf maximal 440° C fixierten Temperatur t_{gm} wäre es möglich, durch Absenken der Kühlmittelaustrittstemperatur t_1 von 400° auf 390° C die Stromerzeugungskosten ω noch um etwa $0,025 \text{ mill/KWh}$ zu verringern (Einfluß der verringerten Pyrolyse). Dabei steigt jedoch das Δt fast bis an die zulässige Obergrenze von 180° C an, während der Wärmefluß \dot{Q}_m bereits weit über der Grenze von 130 W/cm^2 liegt. Die maximale Brennstofftemperatur t_{uom} beträgt 1.720° C (zulässig war 1.600° C). Es ist daher nicht möglich, die kostenoptimale Linie zu erreichen.

Aus den Figuren wird ersichtlich, daß bereits kleine Abweichungen von dieser kostenoptimalen Linie $t_{gm} - t_1$ zu erheblich höheren Stromerzeugungskosten führen.

Eine Steigerung der Brennstoffhülltemperatur t_{gm} von 440 auf 460° C entlang der Optimallinie würde eine Kostenersparnis von etwa $0,08 \text{ mill/KWh}$ bringen. Dabei steigt die Aufwärmspanne Δt des Kühlmittels jedoch auf nahezu 200° C an ¹⁾.

3.1.2.2. Kühlmittelgeschwindigkeit im Core

Ziel des Konstrukteurs soll es sein, das Reaktorcore bei vorgegebener Leistung so klein wie möglich zu bauen, um mit geringen Mengen von Brennstoff und D_2O auszukommen, d.h. die Leistungsdichte pro Tonne Brennstoff muß hoch sein. Eine große Lei-

¹⁾ Bis etwa 180° C Aufwärmspanne ist die benutzte Berechnungsmethode des thermodynamischen Wirkungsgrades für einen Dampfkreislauf mit Überhitzung, aber ohne Zwischenüberhitzung, brauchbar. Für höhere Werte von Δt sollte man auf einen Dampfkreislauf mit zwei verschiedenen Dampfdrücken übergehen, der dann erheblich bessere Wirkungsgrade liefert. Der oben angegebene Wert von $0,08 \text{ mill/KWh}$ ist deshalb pessimistisch.

stungsdichte bedeutet aber hohen Wärmefluß vom Brennelement zum Kühlmittel. Die Kühlmittelgeschwindigkeit V muß daher so groß wie möglich gewählt werden (unter Beachtung der zugleich ansteigenden Druckverluste und der Pumpleistung).

Auf der Fig. 8 sind die Stromerzeugungskosten als Funktion der Kühlmittelgeschwindigkeit V für mehrere Corehöhen H dargestellt. Die Knicke in den Kurven rühren von der mit steigender Geschwindigkeit notwendigen größeren Wandstärke der Brennelementdruckrohre her (schnell zunehmender Druckabfall im Brennelement). Größere Wandstärke bedeutet mehr neutronenabsorbierendes Material im Core und damit Verminderung des Abbrandes.

Mittels eines höheren Gasdrucks zwischen den Druckrohren und dem Führungsrohr im Brennelement könnte man die Wandstärke auch bei $V > 9$ m/s noch konstant bei 1 mm halten. Mit steigender Kühlmittelgeschwindigkeit erhöht sich aber zugleich die spezifische Leistung der Kanäle (größere Wärmeübergangszahl α). Der Wärmefluß \dot{Q}_m wird mit 140 W/cm^2 bei $V = 10$ m/s Kühlmittelgeschwindigkeit (vergl. Fig. 7) zu groß.

Wie bereits weiter oben angedeutet, hat die Kühlmittelgeschwindigkeit V im Bereich von 8 bis 10 m/s keinen merklichen Einfluß auf die Lage der optimalen Temperaturkombination $t_{gm} - t_1$.

3.1.3. Schlußfolgerung

Wie vorstehend gezeigt wurde, entsprachen die bei der Berechnung der optimalen Brennelementgeometrie benutzten Betriebsparameter des Kraftwerks ziemlich genau den als optimal befundenen Werten derselben (unter Berücksichtigung der oben erwähnten vorgegebenen technischen Grenzwerte).

Es ist deshalb nicht notwendig, durch eine Iteration eine neue optimale Brennelementgeometrie zu suchen.

Der Bereich der optimalen Parameter ergibt sich demnach wie folgt:

Geometrie des Brennelementes

Brennstoffquerschnitt	cm ²	35
Rippenkoeffizient		1,7
Kühlkanalweite	cm	0,15

Geometrie des Reaktors

Corehöhe	cm	450
Gitterabstand	cm	27
Radiale Reflektordicke	cm	40
Grad der Flußabflachung ¹⁾		0,40

Betriebsparameter der Anlage

Kühlmittelaustrittstemperatur	°C	400
Temperatur der Brennstoffhülle	°C	440
Kühlmittelgeschwindigkeit	m/s	8 - 9

Anschließend werden die wichtigsten technischen Daten des als optimal gefundenen Reaktors wiedergegeben.

Allgemeine Kennwerte des Kraftwerks

Elektrische Bruttoleistung	MW	250
Elektrische Nettoleistung	MW	237
Spaltleistung	MW	742
Primärpumpleistung	MW	4,3
Sekundärpumpleistung	MW	4,55
Elektrischer Bruttowirkungsgrad		0,35
Elektrischer Nettowirkungsgrad		0,32
Maximaler Neutronenfluß n_{v_0}	n/cm ² s	$6,2 \cdot 10^{13}$
Maximale spezifische Leistung	MW/t U	22
Mittlerer Abbrand der Brennelemente		
Zentrale Zone	MWd/t	8700
Äußere Zone	MWd/t	6600

¹⁾ definiert als Verhältnis des Radius der inneren Reaktorzone (mit abgeflachtem Fluß) zum extrapolierten Reaktorradius.

Benötigter Moderator D ₂ O	t	173
Verbrauch an Kühlmittel		
Pyrolyse	Kg/h	26
Radiolyse	Kg/h	27

Geometrie des Kühlkanals

Brennelement

Zahl der Brennstoffstäbe/Brennelement	¹⁾	4
Zahl der Sektionen/Brennstoffstab		4
Radius des Brennstoffstabes	cm	1,67
Wandstärke der Hülle	cm	0,10
Rippenkoeffizient		1,7
Rippenhöhe	cm	0,07
Abstand zwischen Rippen spitzen und Druckrohr (Kühlkanalweite)	cm	0,15
Brennstoffquerschnitt	cm ²	35
Kühlmittelquerschnitt	cm ²	9,15
Querschnitt des Hüllmaterials (SAP)	cm ²	5,57

Thermische Isolierung des Kühlkanals

Innendurchmesser der Druckrohre	cm	3,98
Wandstärke der Druckrohre	cm	0,10
Dicke der Gasschicht (gemittelt über das ganze Brennelement)	cm	1,4
Gasdruck	Kg/cm ²	1-5
Wandstärke des Führungsrohres (Al)	cm	0,15

Geometrie des Reaktors

Corehöhe	m	4,50
Coreradius	m	3,17
Radiale Reflektordicke	m	0,40
Axiale Reflektordicke	m	0,05
Gitterabstand	m	0,27
Zahl der Kanäle		430
Radialer Formfaktor		0,74
Grad der Flußabflachung		0,40

¹⁾ Man beachte die Definition des Brennelementes in Abschnitt 2.1.1.

Thermische Kenngrößen

Brennelement ¹⁾ in der zentralen Reaktorzone

Mittlere Kühlgeschwindigkeit	m/s	9
Spaltleistung des Brennelementes	MW	2,60
Gehalt des Kühlmittels an hochsiedenden Polymeren	%	30
Aufwärmspanne längs des Kühlkanals	°C	150
Nominelle Kühlmittelaustrittstemperatur	°C	400
Maximale nominelle Temperatur der Brennstoffstabhülle	°C	440
Maximaler Wärmefluß zwischen Brennstoffhülle und Kühlmittel	W/cm ²	128
Maximale Brennstofftemperatur	°C	1535

Reaktor

Nominelle Reaktoraustrittstemperatur	°C	400
Aufwärmspanne im Reaktor	°C	150
Kühlmittleintrittsdruck im Sammelrohr	kg/cm ²	18

Sekundärkreislauf

Temperaturverlust im Wärmetauscher	°C	10
Dampfatemperatur am Wärmetauscheraustritt	°C	390
Dampfdruck am Turbineneinlaß	kg/cm ²	61,2
Kondensatordruck	kg/cm ²	0,044
Nettowirkungsgrad des Sekundärkreises		0,345

3.2. Einfluß der Änderung einzelner Parameter auf die Stromerzeugungskosten

Um eine Vorstellung über den quantitativen Einfluß der einzelnen hier untersuchten Parameter zu geben, ist in Fig. 9 die relative Änderung Δw der Stromerzeugungskosten als Funktion der betreffenden Variablen dargestellt. Der Nullpunkt entspricht dem als optimal ausgewählten Kraftwerk. Es ist zu beachten, daß bei der Un-

1) Man beachte, daß sich das "Brennelement" in 4 kleine Einzelbrennelemente aufteilt. Alle angegebenen Werte beziehen sich auf die Gesamtheit der 4 Einzelelemente.

tersuchung der Einzelvariablen nicht darauf gesehen wurde, ob die betreffende Reaktorauslegung eventuel gegen die eine oder andere vorgegebene technische Begrenzung verstößt. (Der Nullpunkt verletzt mit Sicherheit keine der Einschränkungen.)

3.3. Einfluß der Herstellungskosten des Brennstoffs auf die optimale Brennelementgeometrie

Die optimale Geometrie des Brennelements N4T mit vier Brennstoffstäben und vier separaten Druckrohren wurde unter Annahme eines Herstellungspreises von $p = 90$ \$/kg U berechnet. Zur Untersuchung der Auswirkungen dieser Hypothese auf die optimale Geometrie wurde dieselbe Optimierung der Geometrie nochmals mit $p = 50$ \$/kg U durchgeführt (alle anderen Parameter und technischen Beschränkungen bleiben gleich).

Es ergab sich, daß der optimale Uranquerschnitt V_u im Brennelement nach wie vor bei 35 cm^2 liegt (Fig. 10). Ebenso hat sich die kostenoptimale Kühlkanalweite j_4 kaum verändert (Fig. 11), lediglich der günstigste Rippenkoeffizient μ liegt jetzt bei etwas höheren Werten ($\mu \gtrsim 2,3$).¹⁾

Die optimale Corehöhe H bleibt unverändert bei $H = 450 \text{ cm}$, ebenso die optimale Kühlmittelgeschwindigkeit $V = 900 \text{ cm/s}$.

Gegenüber dem technisch realisierbaren Optimum der Stromerzeugungskosten bei hohem Brennstoffpreis ($p = 90$ \$/kg U, Fig. 3) liefert das für den niedrigen Brennstoffpreis ($p = 50$ \$/kg U, Fig. 11) gefundene realisierbare Optimum um etwa $0,9 \text{ mill/KWh}$ geringere Stromerzeugungskosten. Etwa $0,7 \text{ mill/KWh}$ entfallen auf die niedrigeren Kosten des Brennstoffverbrauchs und der Rest auf die Anlagekosten. Die Verminderung der Anlagekosten ist auf einen dünneren radialen D_2O -Reflektor zurückzuführen.

1) Diese Verschiebung kommt durch die "billigeren" Neutronen zustande, so daß man mehr absorbierendes Material (hier höhere Rippen) im Core zulassen kann.

Das thermische Verhalten des Brennelementes ändert sich dabei nicht, auch die technischen Begrenzungen bleiben gleich:

- maximale Aufwärmspanne $\Delta t = 180^\circ \text{ C}$
- maximale Brennstofftemperatur $t_{uom} = 1.600^\circ \text{ C}$
- Wandstärke der Druckrohre $e_{tf} = 1 \text{ mm}$
- minimale Kühlkanalweite $j_4 = 1 \text{ mm}$

Ohne Beachtung der vorstehend gegebenen Begrenzungen könnte man bei hohem Brennstoffpreis die Stromkosten noch um 0,07 mill/KWh gegenüber dem technisch realisierbaren Optimum verringern, bei niedrigerem Brennstoffpreis sogar um 0,14 mill/KWh, wenn man das ideale Optimum der Fig. 3 bzw. 11 als Betriebspunkt ansetzt.

Tafel 2

BE-Herstellungskosten (\$/kg U)	Kostendifferenz Δw (mill/KWh)
90	0,07
50	0,14

Man erkennt an Hand der Tabelle, daß sich die Kostendifferenz Δw zwischen dem technisch realisierbaren Optimum und dem ideellen Optimum der Brennelementgeometrie mit fallenden Brennstoffherstellungskosten erhöht. Gerade bei niedrigen Brennstoffkosten besteht demnach ein großer Anreiz, durch geeignete konstruktive Maßnahmen die technischen Begrenzungen zu verringern, um dem ideellen Kostenminimum näher zu kommen.

Literatur

1. B. Chambaud, F. Lafontaine, P. Tauch

Etude de la zone optimale des paramètres indépendants d'un réacteur ORGEL associé à une centrale de 250 MWeb.

Eléments combustibles en UC gainés SAP, type autoportant en grappes de 7 crayons.

EUR 464.f, 1963

2. F. Lafontaine, P. Tauch

Etude de la zone optimale des paramètres indépendants d'un réacteur ORGEL associé à une centrale de 250 MWeb.

Eléments combustibles en UC gainés SAP, type structuré en grappes de 4 crayons.

EUR 465.f, 1963

Fig. 1
G0 - 785A

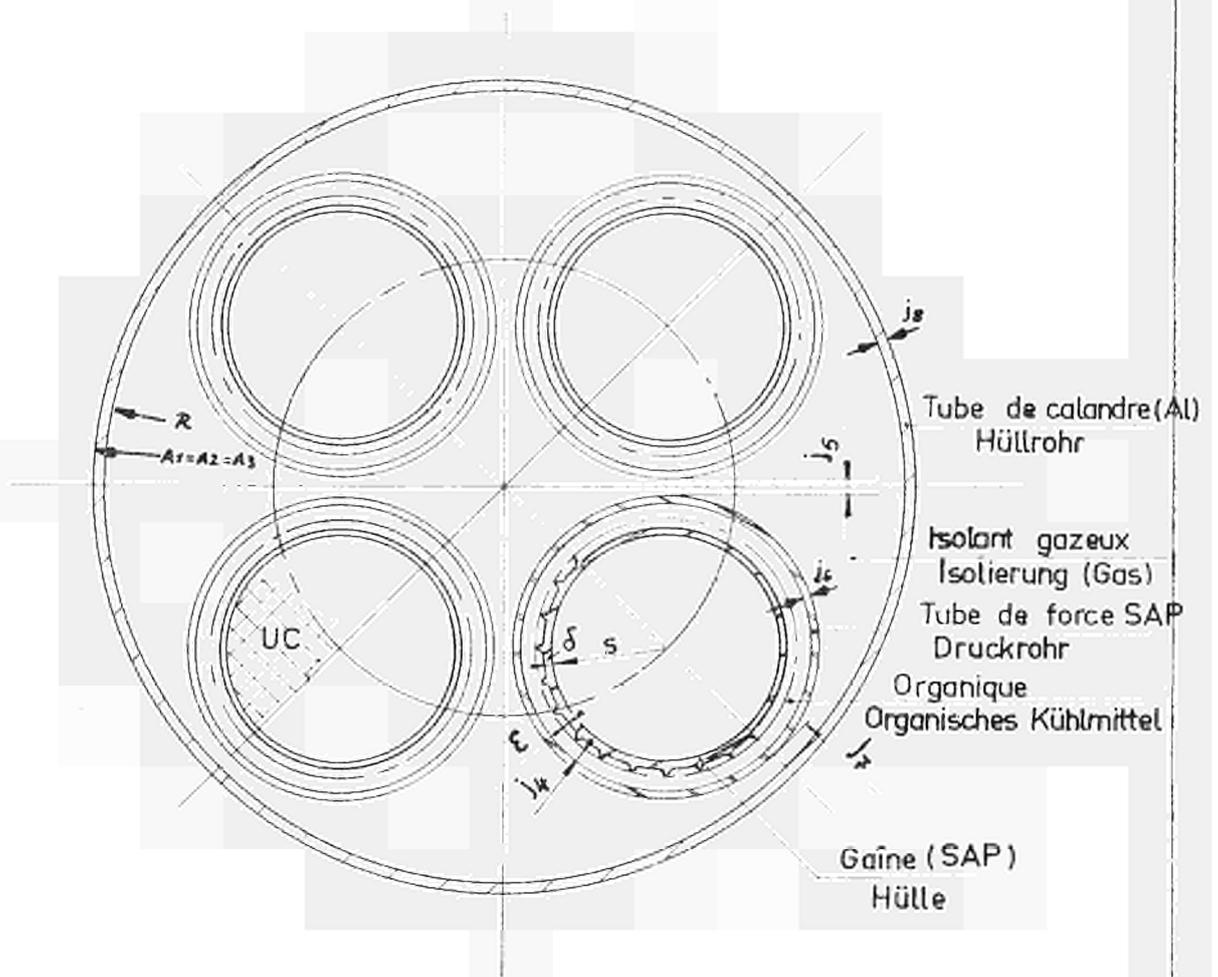


Fig. 2
GD-1410

$t_1 = 400^\circ\text{C}$
 $t_{gm} = 440^\circ\text{C}$
 $H = 450\text{ cm}$
 $v = 900\text{ cm/s}$
 $x = 30\%$
 $\delta_1 = 10^\circ\text{C}$
 Web. 250 MWe
 NAT

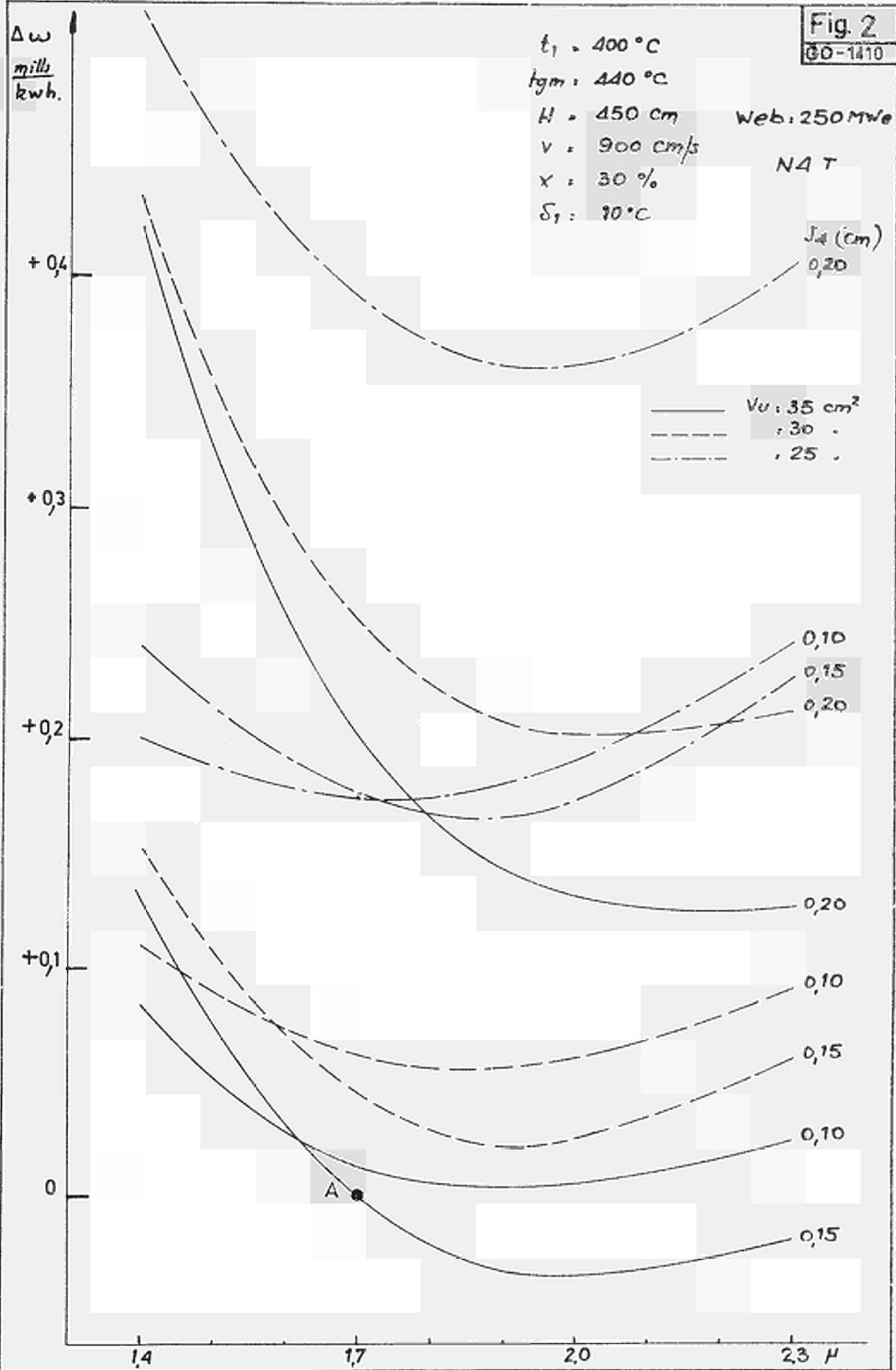
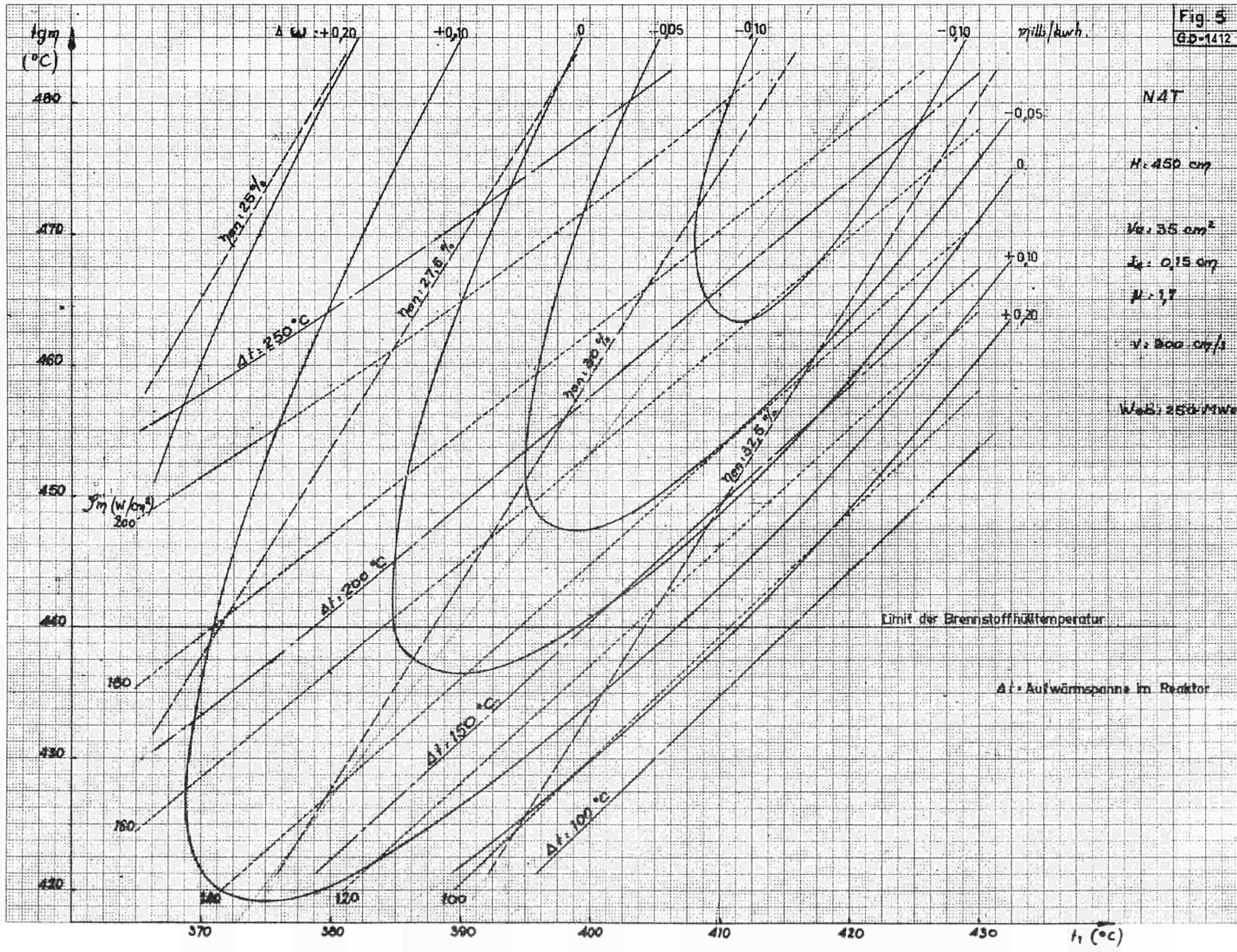


Fig. 5
Gp-1412



NAT
 $H = 450 \text{ cm}$
 $V_e = 35 \text{ cm}^3$
 $I_e = 0.15 \text{ cm}$
 $\mu = 1.7$
 $v = 300 \text{ cm/s}$
 $W_{\text{ab}} = 250 \text{ MWt}$

Δt = Aufwärmspanne im Reaktor

Fig 6
60-1413

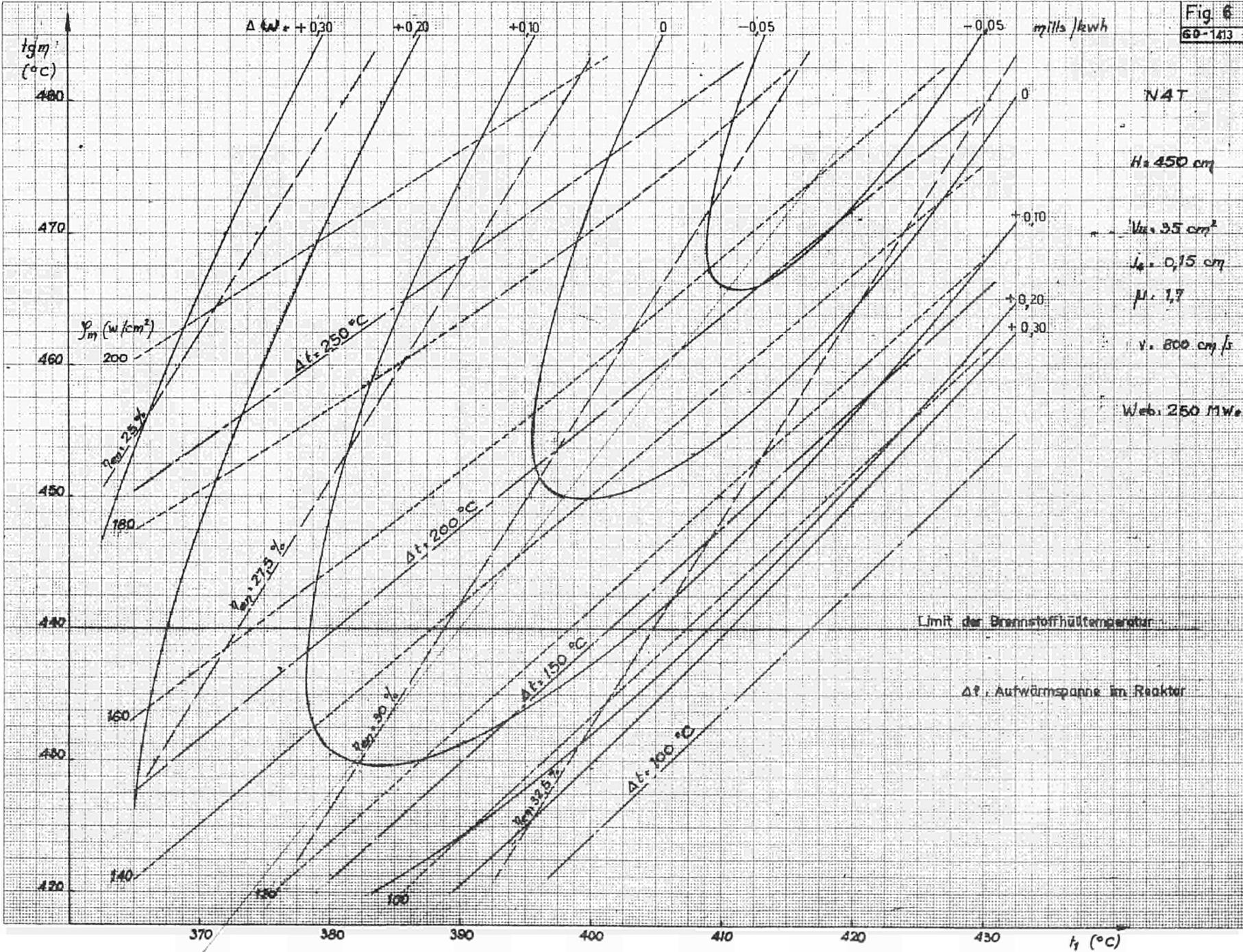


Fig. 7
GB-1414

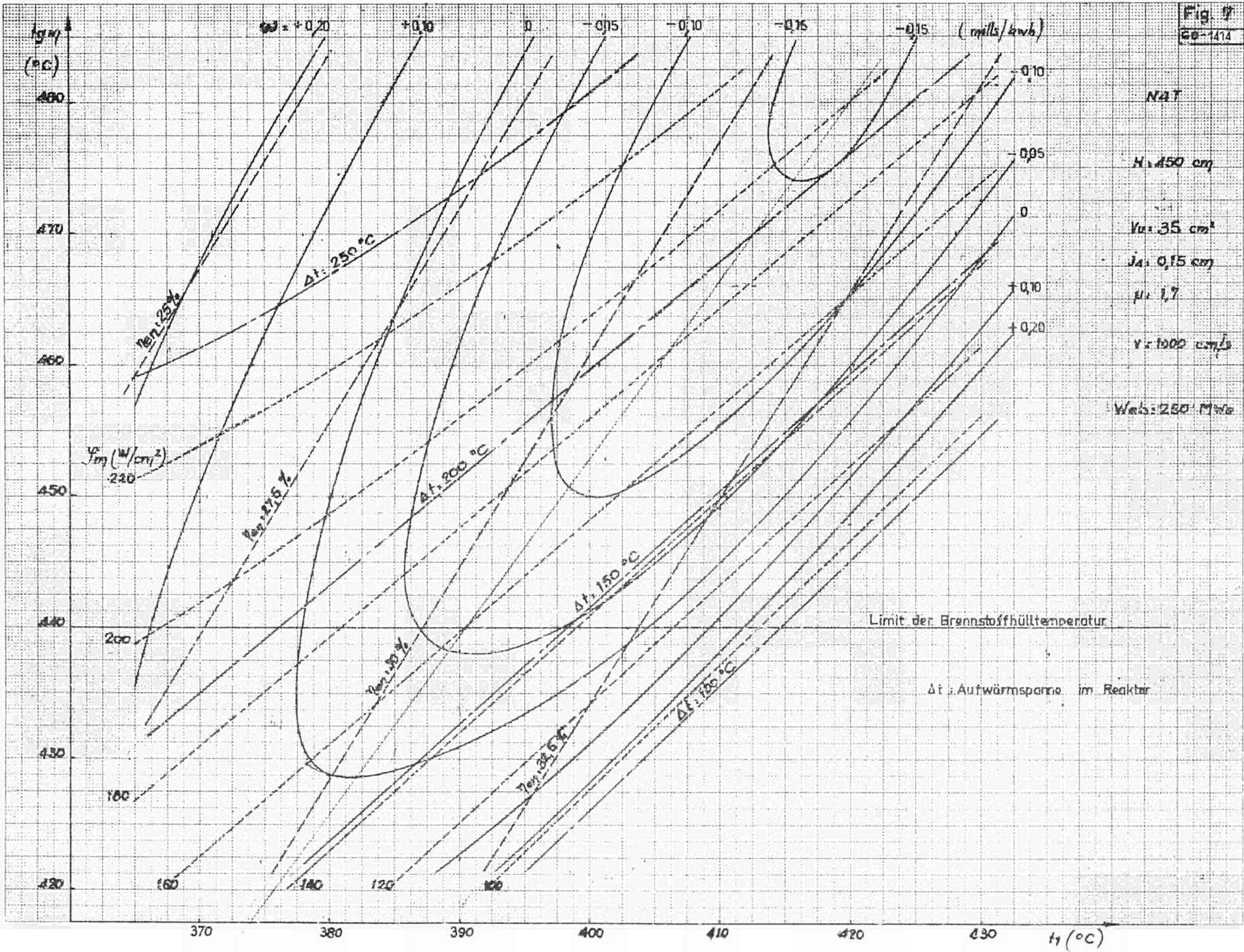


Fig. 8
GO-1415

NAT

$$t_1 = 400^\circ\text{C}$$

$$t_{gm} = 440^\circ\text{C}$$

$$V_u = 35 \text{ cm}^2$$

$$\mu = 1,7$$

$$J_A = 0,15 \text{ cm}$$

Web: 250 MWe.

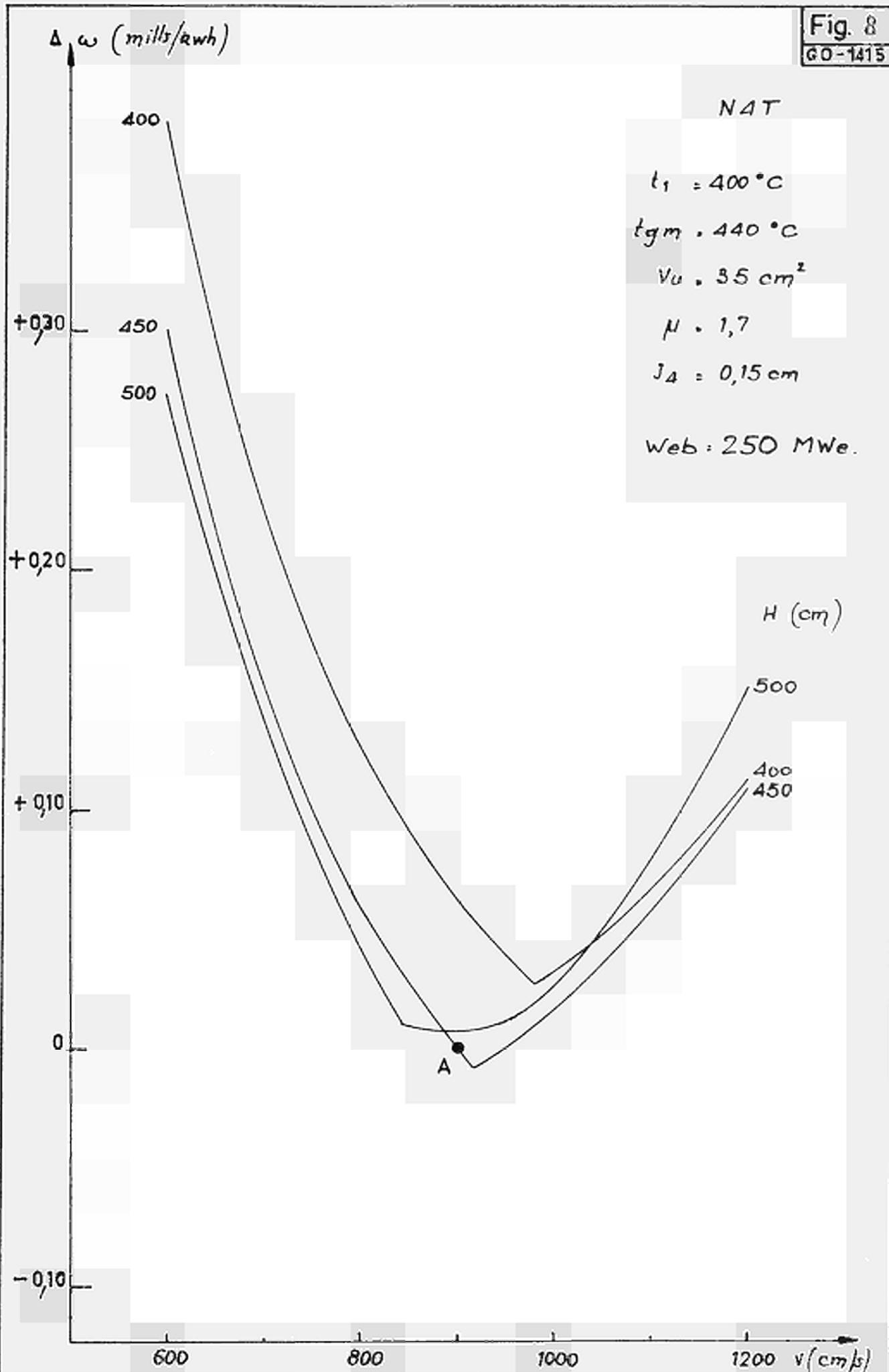


Fig. 9
60-1275

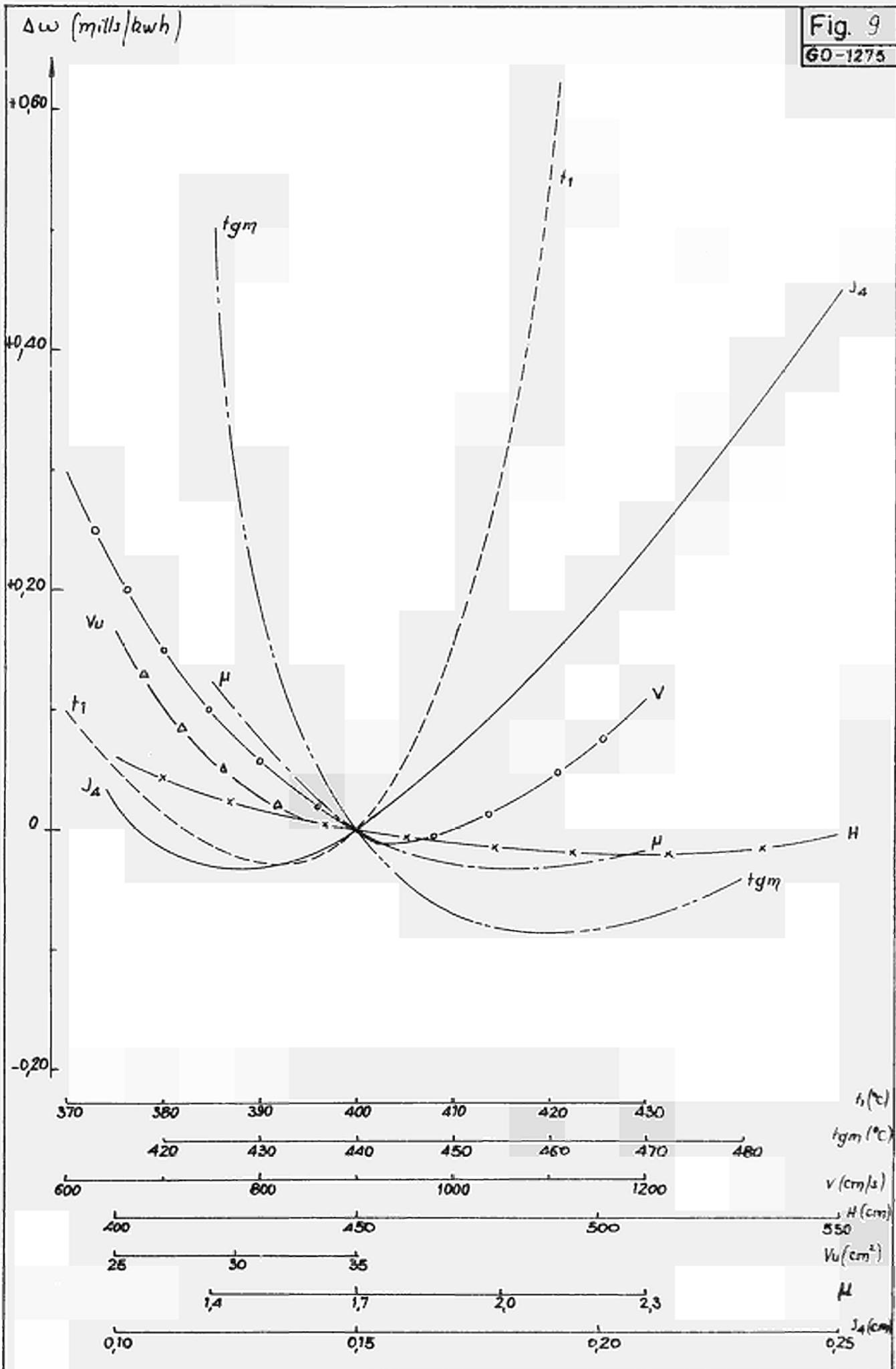
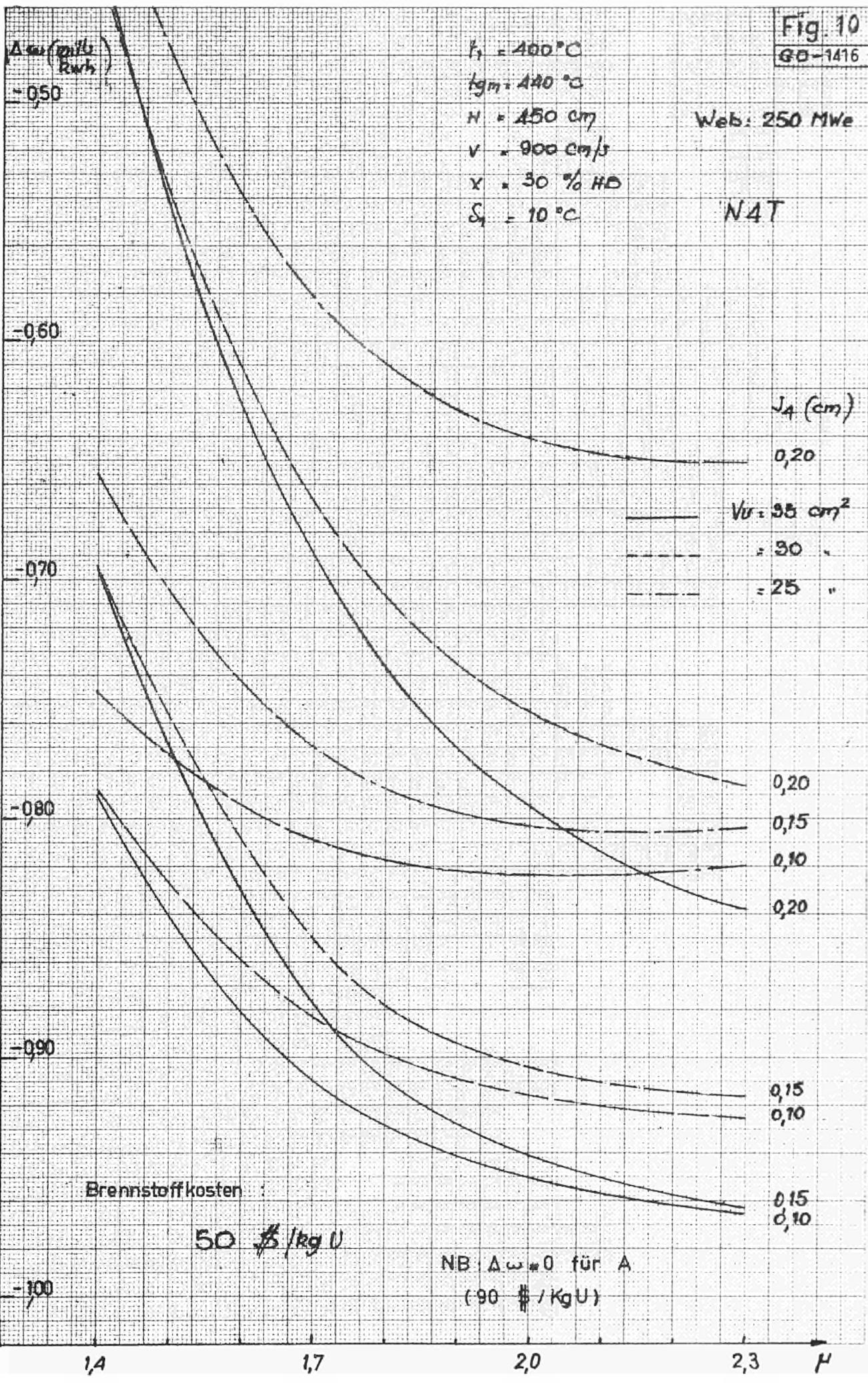


Fig. 10
GO-1416



CDNA00466DEC