

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

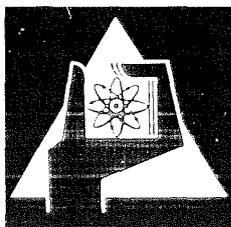
Januar 1970

KFK 1140

Institut für Reaktorentwicklung  
Projekt Schneller Brüter

Ergebnisse der Fehleranalyse für in pile-Wärmeleitfähigkeitsbestimmung  
nach dem Balanced Oscillator Verfahren

W. Dänner



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Januar 1970

KFK 1140

Institut für Reaktorentwicklung  
Projekt Schneller Brüter

Ergebnisse der Fehleranalyse für  
in pile-Wärmeleitfähigkeitsbestimmung nach dem  
Balanced Oscillator Verfahren

W.Dänner

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe



## Zusammenfassung

Für die in pile-Anwendung des Balanced Oscillator Verfahrens zur Bestimmung der Brennstoff-Wärmeleitfähigkeit und der Wärmedurchgangszahl des Spaltes zwischen Brennstoff und Hüllrohr wurde eine eingehende Fehleranalyse durchgeführt. Unter Einhaltung optimaler Versuchsbedingungen kann für die Wärmeleitfähigkeit mit einer Genauigkeit zwischen 15 und 20 %, für die Wärmedurchgangszahl des Spaltes zwischen 20 und 40 % über den gesamten Abbrand eines Prüflings gerechnet werden.

Notwendige Verbesserungen in den Meßeinrichtungen der für die Experimente vorgesehenen Helium-Kreislaufanlage sowie erforderliche Vorversuche werden empfohlen.

Abschließend werden einige experimentelle Probleme des Reaktors FR2 diskutiert.

## Abstract

In respect of in pile applicating of the Balanced Oscillator Method for measuring the fuel thermal conductivity and the gap conductance a detailed error analysis has been performed. Observing the postulated optimal test conditions the thermal conductivity could be obtained with a precision of about 15 to 20 %, the gap conductance with about 20 to 40 % during the entire burnup of the specimen.

Necessary improvements of the test loop instrumentation and essential foregoing experiments are advised.

Finally some experimental problems of running the measurements in the FR2 are discussed.

## Inhalt:

1. Einführung
2. Fehleranalyse
  - 2.1 Allgemeines
  - 2.2 Allgemeine Fehlertendenzen
    - 2.2.1 Einfluß der Periodendauer  $T$
    - 2.2.2 Einfluß der Stableistung  $S$
  - 2.3 Tendenzen im Laufe des Abbrandes
    - 2.3.1 Frisch eingesetzter Brennstoff
    - 2.3.2 Vorbestrahlte Prüflinge
  - 2.4 Vergleich der beiden Versuchsanordnungen
  - 2.5 Der Gesamtfehler im Optimum
  - 2.6 Einfluß der maximalen Fehlerquellen
  - 2.7 Schlußfolgerungen aus der Fehleranalyse
3. Experimentelle Probleme am FR2
  - 3.1 Oszillatorischer Reaktorbetrieb
  - 3.2 Erzeugung der Neutronenfluß-Oszillationen
  - 3.3 Neutronenflußmessung
4. Weitere Probleme
5. Zusammenfassung

## 1. Einführung

Das Balanced Oscillator Verfahren [1] bietet die Möglichkeit, die Wärmeleitfähigkeit von oxydischen Kernbrennstoffen und die Wärmedurchgangszahl des Gasspaltes zwischen Brennstoff und Hüllrohr an Brennstabprüflingen während des Betriebs im Reaktor zu bestimmen. Dieses instationäre Verfahren beruht auf der Messung der Übertragungsfunktion zwischen sinusförmigen Kühlmitteldurchsatz- und Neutronenfluß-Oscillationen, welche unter der Bedingung einer konstant gehaltenen Kühlmittelaufheizspanne gewonnen wird. Seine wesentlichsten Vorzüge liegen in dem prinzipiell möglichen Verzicht sowohl auf eine Zentraltemperaturmessung als auch - bei anderweitig ermittelbarer Wärmeübergangszahl zwischen Hüllrohroberfläche und Kühlmittel - auf eine Messung der Hüllrohr-Oberflächentemperatur. Dadurch wird es möglich, in-pile-Experimente bis zu höchsten Temperaturen und Abbränden auszudehnen, ein Vorteil, der prinzipiell allen instationären Verfahren eigen ist, da die Lebensdauer von Temperaturmeßfühlern (Thermoelemente und Gasthermometer), die für stationäre Verfahren unerlässlich sind, unter solchen extremen Betriebsbedingungen stark begrenzt ist. Gegenüber anderen bisher bekannten instationären in-pile-Meßverfahren, die sämtlich auf der Auswertung des Oberflächentemperatursignals beruhen, hat es den Vorzug, von der speziellen Ausbildung der Brennstoffstruktur in der axialen Ebene, in welcher die Temperaturmessung erfolgt, unabhängig zu sein. Anstatt dessen wird für die Wärmeleitfähigkeit ein integraler Mittelwert über das gesamte Brennstoffvolumen, für die Wärmedurchgangszahl ein Mittelwert über die gesamte Mantelfläche des Brennstoffes gewonnen. Beide Werte sind für die wärmetechnische Auslegung eines Brennstabes im Hinblick auf sein Langzeitverhalten von Interesse.

Für die Realisierung dieser Experimente wird die im FR2 installierte Helium-Kreislaufanlage [2] in Verbindung mit dem Hochdruck-Loop-einsatz ins Auge gefaßt, die gute Voraussetzungen für die kühlungsseitigen Auslegungs- und Regelprobleme mitbringt. Sinnvolle Experimente sind jedoch nur zu erwarten, wenn eine sorgfältige Optimierung sowohl des Prüflings als auch der spezifischen Versuchsbedingungen durchgeführt wird und die Probleme eines oszillatorischen Reaktorbetriebs zur Zufriedenheit gelöst werden können.

Die folgenden Ausführungen beschäftigen sich mit diesen beiden Problemkreisen. Insbesondere werden zwei verschiedene Prüflinge einander gegenübergestellt, die sich aufgrund vorläufiger Fehlerbetrachtungen als unter bestimmten Versuchsbedingungen aussichtsreiche Versuchsobjekte herausgestellt hatten [3]. In Tabelle 1 sind deren wesentlichste Auslegungsdaten zusammengefaßt.

## 2. Fehleranalyse

### 2.1 Allgemeines

Die Fehleranalyse des Balanced Oscillator Verfahrens wird dadurch erschwert, daß sich die Fehler in den gewünschten Ergebnissen, der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  des Brennstoffes und Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  des Spaltes zwischen Brennstoff und Hüllrohr, nicht explizit als Funktion aller in das Auswertungsverfahren eingehenden Parameter darstellen lassen. Die einzige Möglichkeit zu ihrer Erfassung bietet der in [1] dargestellte Weg. Er beruht auf der Vorstellung, daß jeder ursächliche Fehler (Toleranzen, Meßfehler, Bestimmungsgenauigkeiten) in einer der im Auswertungsverfahren benötigten Größen eine bestimmte Abweichung in den Resultaten von  $\lambda_f$  und  $\alpha_g$  hervorrufen kann. Als Gesamtfehler kann sodann sinnvoll die Wurzel aus der Summe der Quadrate aller Einzelabweichungen definiert werden. Die Gesamtfehler in Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  und Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  ergeben sich damit zu

$$\epsilon_\lambda = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\Delta \lambda_f}{\lambda_f} \right)_i^2} \quad \epsilon_\alpha = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\Delta \alpha_g}{\alpha_g} \right)_i^2}$$

Sie sind einerseits abhängig von den Auslegungsdaten und den Versuchsbedingungen, andererseits jedoch auch von den absoluten Beträgen der Meßgrößen selbst. Insofern bedeutet eine eingehende Analyse unter Berücksichtigung sämtlicher Abhängigkeiten und Tendenzen einen überaus großen Rechenaufwand, der nur auf ein vernünftiges Maß reduziert werden kann, wenn man die Anzahl der frei wählbaren Variablen beschränkt. Von dieser Möglichkeit wurde hier Gebrauch gemacht, wobei sich die Untersuchungen auf zwei, durch Tabelle 1 definierte Versuchsanordnungen stützen.

Als frei wählbare Variable, deren Einfluß auf die Genauigkeiten  $\epsilon_\lambda$  und  $\epsilon_\alpha$  untersucht werden sollte, wurden die folgenden Größen gewählt:

1. Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$
2. Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$
3. Stableistung S
4. Periodendauer T

Die Abhängigkeiten der Gesamtfehler von den Absolutwerten von  $\lambda_f$  und  $\alpha_g$  sind insofern von Bedeutung, als man mit Änderungen dieser Größen ohnehin im Laufe des Abbrandes rechnen muß. Die Stableistung S als Variable bietet sich an, weil ihre Variation während der Versuche zur Erzielung verschiedener Temperaturniveaus als zweckmäßig erachtet wird. Die Periodendauer T schließlich ist bei gegebenen Versuchsbedingungen die das Auflösungsvermögen bestimmende Variable, welche eine sinnvolle Optimierung überhaupt erst ermöglicht.

Sämtliche Fehlerrechnungen wurden mit dem in [4] beschriebenen Fehleranalysenprogramm BALØS durchgeführt, welches in der IRE-Load-Bibliothek an der IBM 360/65 zur Verfügung steht. Es gestattet sowohl die Berechnung von Gesamtfehlern für verschiedene Versuchsanordnungen als auch die Verfolgung von Einzelfehlern in ihrer Abhängigkeit von der Höhe der ursächlichen Fehlerquoten.

## 2.2 Allgemeine Fehlertendenzen

Für die Ermittlung des optimalen Experimentierbereichs hinsichtlich der Oszillationsperiodendauer T wurden im Hinblick auf vertretbare Rechenzeiten nur die beiden größten, das gesamte Fehlerniveau bestimmenden Fehlerursachen herangezogen. Es handelt sich dabei um die Meßfehler bei der Bestimmung von Amplitude und Phasenwinkel der Übertragungsfunktion. Aus den Meßgenauigkeiten von  $\pm 1\%$  für den thermischen Neutronenfluß und  $\pm 1,3\%$  für den Kühlmitteldurchsatz ergibt sich dabei ein ursächlicher Meßfehler von  $\pm 4,6\%$  für die Amplitude, dem von Programm selbsttätig der Fehler aufgrund ungenügender Kompensation hinzugefügt wird.

Letzterer beruht dabei auf einer Meßgenauigkeit von  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  für die Kühlmitteltemperatur. Der Phasenmeßfehler wurde aufgrund der Erfahrungen aus den out-pile-Experimenten zu  $\pm 0.75^{\circ}$  angesetzt.

### 2.2.1 Einfluß der Periodendauer T.

Um den Einfluß der Periodendauer T auf die Fehler in  $\lambda_f$  und  $\alpha_g$  festzustellen, wurde zunächst die Stabileistung S auf ihrem als minimal angenommenen Wert von  $S = 350 \text{ W/cm}$  konstant gehalten. Die Ermittlung der Fehler erstreckte sich auf die folgenden Bereiche von Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangszahl:

$$\begin{aligned}\lambda_f &= 0,014 \text{ bis } 0,030 \text{ W/cm grad} \\ \alpha_g &= 0,4 \quad \text{bis } 2,0 \quad \text{W/cm}^2 \text{ grad}\end{aligned}$$

Die vom Programm BALØS gelieferten Fehlertabellen wurden zunächst vom Programm DIA [4] in Diagramme umgearbeitet, welche anschließend einer weiteren Auswertung von Hand unterzogen wurden. Als endgültige Darstellungsform der Verhältnisse wurde die Form von Fehler-Höhenlinien in einem durch  $\lambda_f$  und  $\alpha_g$  aufgespannten Koordinatennetz gewählt.

Für die einzelnen Periodendauern zeigen die Abbn. 1 und 2 die Höhenliniennetze für die Versuchsanordnungen I und II (s. Tabelle 1). Grundsätzlich sind die folgenden Tendenzen festzustellen:

#### 2.2.1.1 Fehler $\epsilon_\lambda$ in der Wärmeleitfähigkeit

Für die Versuchsanordnung I liegt die Genauigkeit der Wärmeleitfähigkeit im gesamten betrachteten Periodenbereich  $10 \leq T \leq 40$  Sekunden zwischen 15 und 20%. Für Versuchsanordnung II ergeben sich für einen Periodenbereich  $5 \leq T \leq 20$  Sekunden Genauigkeiten zwischen 13 und 22%.

Für eine festgehaltene Periodendauer differiert der Fehler in beiden Fällen um etwa 2,5 bis 3 %. Hieraus ist zu schließen, daß Veränderungen der Absolutwerte von  $\lambda_f$  und  $\alpha_g$  im Laufe des Abbrandes, solange sie sich in dem betrachteten Bereich bewegen, keinen entscheidenden Einfluß auf ihre Genauigkeit ausüben.

Mit steigender Periodendauer  $T$  steigt für Versuchsanordnung I die mittlere Genauigkeit  $\xi_\lambda$  leicht an, während sie für Versuchsanordnung II zunächst ebenfalls ansteigt, nach Durchlaufen eines Fehler-Minimums bei etwa  $T = 12.5 \div 15$  Sekunden, welches niedriger liegt als bei Versuchsanordnung I, aber wieder zurückgeht. Für Anordnung I ist zwar auch mit einem Minimum des Fehlers  $\xi_\lambda$  zu rechnen, welches jedoch oberhalb des betrachteten Periodenbereichs liegt.

Grundsätzlich resultiert der Hauptanteil des Fehlers in der Wärmeleitfähigkeit aus dem Meßfehler für die Amplitude der Übertragungsfunktion.

#### 2.2.1.2. Fehler $\xi_\alpha$ in der Wärmedurchgangszahl

---

Für Versuchsanordnung I variiert der Fehler  $\xi_\alpha$  innerhalb des gesamten  $(\lambda_f, \alpha_g, T)$ -Bereiches zwischen 10 und 70%, für Versuchsanordnung II dagegen nur zwischen 10 und 40%. Während die untere Grenze mit 10% in allen Fällen etwa konstant bleibt, verschiebt sich die obere Grenze innerhalb des  $(\lambda_f, \alpha_g)$ -Bereichs mit steigender Periodendauer  $T$  zu immer höheren Werten, und zwar für Anordnung I von ca. 45% auf 70%, für Anordnung II von ca. 20% auf 40%. Mit steigender Periodendauer reagiert daher die Genauigkeit  $\xi_\alpha$  zunehmend empfindlicher. Diese Tendenz ist bei Anordnung I bedeutend ausgeprägter als bei Anordnung II.

Die minimalen Fehler in der Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  sind in jedem Fall bei kleinen Periodendauern zu erwarten. Der Hauptanteil des Fehlers  $\xi_\alpha$  in der Wärmedurchgangszahl resultiert im Gegensatz zu dem in der Wärmeleitfähigkeit wesentlich aus dem Phasenmeßfehler.

### 2.2.2 Einfluß der Stableistung S

Während die zu erwartenden Fehler  $\mathcal{E}_\alpha$  in der Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  von der Stableistung kaum beeinflusst werden, steigt die Genauigkeit  $\mathcal{E}_\lambda$  in der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  mit steigender Stableistung S an. Die Ursache dafür liegt in dem geringer werdenden Fehler durch ungenügende Kompensation, welcher der gesamten Kühlmittelaufheizspanne und damit - bei konstantem Kühlmitteldurchsatz - der Stableistung S umgekehrt proportional ist.

Die Abbn. 3 und 4 zeigen den Einfluß der Stableistung (S = 350, 500, 600, 750 W/cm) bei Periodendauern von T = 20 bzw. T = 40 Sekunden für Anordnung I. Man erkennt daran, daß die Reduzierung des Fehlers bei niedriger Periodendauer, d.h. bei weiterer Entfernung von dem oberhalb T = 40 S befindlichen Fehlerminimum, stärker ausgeprägt ist als in der Nähe des Minimums selbst.

Ähnliches gilt für Versuchsanordnung II, für die der Einfluß der Stableistung in den Abbn. 5, 6 und 7 bei Periodendauern von T = 10, 15 und 20 Sekunden dargestellt ist. Hier wird deutlich, daß die Tendenz des Fehlers sich in der Nähe des Fehleroptimums umkehrt, wobei oberhalb des Optimums ( $T > T_{opt}$ ) ein relativ starker Anstieg zu bemerken ist.

### 2.3 Tendenzen im Laufe des Abbrandes

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Tendenzen der Fehler in Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangszahl aufgezeigt, die sich durch die Wahl der Oszillations-Periodendauer T und der Stableistung S für das gesamte betrachtete Feld der Größen  $\lambda_f$  und  $\alpha_g$  ergeben. Im allgemeinen ändern sich diese Parameter jedoch in charakteristischer Weise, welche von den Betriebsbedingungen und von der Bestrahlungsgeschichte des eingesetzten Prüflings abhängen.

#### 2.3.1 Frisch eingesetzter Brennstoff

Das Nahziel der geplanten in-pile-Experimente ist es, einen unbestrahlten Prüfling in den Hochdruck-Loopeinsatz einzubringen und ihn über längere Zeit (1 - 2 Zyklen) zu bestrahlen.

Die Stableistung sollte dabei so eingerichtet werden, daß im Zentrum der Schmelzpunkt noch nicht überschritten wird.

In dem von  $\lambda_f$  und  $\alpha_g$  aufgespannten Koordinatennetz wird der Prüfling qualitativ den in Abb. 8a eingezeichneten Weg beschreiben [5\_7]. Vom Ausgangspunkt (1) aus, gekennzeichnet durch eine integrale Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,030 W/cm grd und eine Wärmedurchgangszahl von ca. 0,6 W/cm<sup>2</sup>grd bei einer Spaltweite von 50 $\mu$ , werden sich die Verhältnisse zunächst während des Anfahrvorganges in Richtung auf Punkt (2) hin verschoben. Die Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  erhöht sich dabei durch Verringerung der Spaltweite um etwa die Hälfte der Anfangsspaltweite [5\_7] infolge der thermischen Ausdehnung des Brennstoffes, gleichzeitig nimmt die Wärmeleitfähigkeit infolge von auftretenden Ringrissen in der äußeren Brennstoffzone ab. Diese Anfahrphase ist relativ kurz, verglichen mit der notwendigen Zeit für eventuelle Messungen nach dem Balanced Oscillator Verfahren. Während des sich anschließenden Einfahrvorganges, der je nach Stableistung einige Minuten (10 min bei 750 W/cm) bis Wochen (S = 400 W/cm) dauern kann, fällt die Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  zunächst infolge der sich im Spalt ansammelnden Spaltgase stark ab, um dann durch die Volumenzunahme des Brennstoffes infolge Schwellens (Spaltprodukte) wieder anzusteigen. Der Spalt verringert sich bis auf eine Weite von etwa 20 $\mu$ . Dabei kann der Brennstoff an verschiedenen Stellen zum direkten Kontakt mit der Hülle kommen, wodurch der Anstieg der Wärmedurchgangszahl noch unterstützt wird. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  wird sich während dieser Zeit durch die Strukturveränderungen des Brennstoffes und durch Zusammensintern wieder erhöhen ( $\rightarrow$  Punkt (3)).

Während des weiteren Betriebs sind die Verhältnisse z.T. noch ungeklärt. Es ist jedoch wahrscheinlich, daß sich die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  infolge der mit dem Abbrand steigenden Spaltproduktbildung wieder verschlechtert. Die Verhältnisse im Spalt werden annähernd die gleichen bleiben wie am Ende der Einfahrphase. Es besteht jedoch durchaus die Möglichkeit, daß  $\alpha_g$  sich durch weitere Ansammlung von Spaltgasen im Spalt verschlechtert, andererseits ist aber auch das Entstehen neuer Kontaktstellen zwischen Brennstoff und Hülle nicht auszuschließen. Für die weitere Betrachtung soll deshalb eine qualitative Bewegung in Richtung auf Punkt (4) hin angenommen werden.

Da die Anfahrphase und der erste Teil der Einfahrphase ohnehin im Experiment mit großer Wahrscheinlichkeit nicht erfaßt werden können, der zweite Teil der Einfahrphase nahezu einem direkten Weg von Punkt (1) nach Punkt (3) entspricht, sollen im folgenden die Verhältnisse nur an den Punkten (1), (3) und (4) betrachtet werden. Für  $\lambda_f$  und  $\alpha_g$  werden dabei angenommen:

Punkt (1)	$\lambda_f = 0,030$	$\alpha_g = 0,6$
Punkt (3)	$\lambda_f = 0,030$	$\alpha_g = 1,6$
Punkt (4)	$\lambda_f = 0,020$	$\alpha_g = 1,6$

In den Abbildungen 9 und 10 sind der Verlauf der Fehler in Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangszahl für die Versuchsanordnungen I und II in Abhängigkeit von der Periodendauer T dargestellt. Die Stableistung S wurde dabei mit  $S = 350 \text{ W/cm}$  angenommen.

Es zeigt sich, daß bei beiden Anordnungen während des Einfahrvorganges die Fehler in der Wärmeleitfähigkeit abnehmen. Diese Reduzierung ist im Bereich geringerer Periodendauern am ausgeprägtesten. Der Fehler in der Wärmedurchgangszahl hingegen steigt an, und zwar bei Anordnung I im unteren Periodenbereich relativ stärker als bei Anordnung II. Der Anstieg des Fehlers  $\epsilon_\alpha$  bei Anordnung I ist dabei etwa konstant, bei Anordnung II ist er zunächst wesentlich flacher, um von einer Periodendauer von ca. 15 Sekunden an sehr steil zu werden.

Beim weiteren Betrieb des Prüflings (Punkt (3)  $\rightarrow$  Punkt (4)) zeigte sich hinsichtlich des Fehlers  $\epsilon_\lambda$  in der Wärmeleitfähigkeit ein unterschiedliches Verhalten der beiden Anordnungen. Während bei Anordnung I der Fehler im unteren Periodenbereich abnimmt, im oberen Bereich gegenüber den Fehlern des eingefahrenen Zustandes und des Ausgangszustandes jedoch zunimmt, verhält sich Anordnung II gerade umgekehrt. Unterhalb einer Periodendauer von  $T = 14$  Sekunden steigt der Fehler leicht an, ohne jedoch - im Gegensatz zu Anordnung I - den Verlauf im Ausgangszustand (1) wesentlich zu überschreiten.

Oberhalb von  $T = 14$  Sekunden strebt der Fehler einem Minimum zu, welches, verschoben zu höherer Periodendauer, niedriger liegt als die Minima der übrigen betrachteten Zustände. Bei der Wärmedurchgangszahl zeigt sich gegenüber dem Einfahrvorgang ein weiterer Fehleranstieg, der bei Anordnung I ausgeprägter ist als bei Anordnung II. Bei letzterer wird sogar der in Punkt (2) festgestellte steile Anstieg oberhalb 15 Sekunden Periodendauer rückgängig gemacht.

### 2.3.2 Vorbestrahlte Brennstäbe

Das Fernziel des Balanced Oscillator Experimentes ist gerichtet auf Versuche an vorbestrahlten Prüflingen, da hier der eigentliche Vorzug dieses Verfahrens erst zum Tragen kommt. Ein bis heute noch nicht gelöstes Problem, nämlich das Einschleusen der hochaktiven Prüflinge in den Loopeinsatz, bleibt dabei allerdings noch offen. Die diesbezüglichen Schwierigkeiten sind jedoch nicht prinzipieller Natur sondern liegen auf der Seite der dazu erforderlichen apparativen Einrichtungen.

Hinsichtlich des Verhaltens vorbestrahlter Brennstäbe im  $(\lambda_f, \alpha_g)$ -Koordinatennetz sind dabei grundsätzlich mehrere Fälle zu unterscheiden, die jedoch letztlich für die eigentliche Messung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Unterschiede liegen in der Art der vorangegangenen Bestrahlung. Nach [6] ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  des Brennstoffes im Moment des Einschleusens in den Loopeinsatz abhängig von der Temperatur und der Neutronendosis der vorangegangenen Bestrahlung. Merkliche Reduzierungen in dieser Stoffgröße treten jedoch nur bei Bestrahlung unter relativ niedrigen Temperaturen auf. Bei einer solchen Vorbehandlung ist deshalb auch kaum mit einer Abnahme der Spaltweite zu rechnen, wohl aber mit einer gewissen Verunreinigung des Füllgases (He) mit die Wärmedurchgangszahl reduzierenden Spalteredelgasen.

Eine hinreichend genaue Messung von Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangszahl ist jedoch nur möglich, wenn der Prüfling mit einer ausreichend hohen Stableistung betrieben wird. Abgesehen von der Frage, ob Stableistungen der Größenordnung, wie sie hier betrachtet werden, überhaupt erzielbar sind [7], wird die Temperatur des Brennstoffes auf jeden Fall oberhalb der Temperatur bei der vorangegangenen Bestrahlung liegen, welche die beschriebenen Effekte ermöglicht hat.

In diesem Falle werden sich rasch Zustände des Brennstabes einstellen, die zwischen den im Abschn. 2.3.1. beschriebenen Punkten (3) und (4) liegen.

Im derzeitigen Bestrahlungsprogramm des PSB sind derartige "Tief-temperaturbestrahlungen" nicht vorgesehen [7]. Es kann deshalb, zumindest vorläufig, nur mit dem Einsatz von Prüflingen gerechnet werden, bei denen der in Abschn. 2.3.1. zitierte Einfahrvorgang bereits abgeschlossen ist.

Aus dieser Sicht wird deutlich, daß für die Tendenzen der Fehler  $\xi_\lambda$  und  $\xi_\alpha$  bei vorbestrahlten Brennstäben identisch die gleichen Überlegungen gelten - abgesehen vom Einfahrvorgang selbst - wie sie für frisch eingesetzte Brennstäbe bereits angestellt wurden.

#### 2.4 Vergleich der beiden Versuchsanordnungen

-----

Anhand der bisher beschriebenen Fehlertendenzen kann ein Vergleich der beiden in Tabelle 1 angegebenen Versuchsanordnungen durchgeführt und eine Entscheidung für eine der beiden herbeigeführt werden. Als Kriterium hat dabei das Verhalten der Genauigkeit während der gesamten voraussichtlichen Bestrahlung zu dienen.

Im folgenden soll das Ergebnis dieser Entscheidung vorweggenommen und anschließend begründet werden:

Nach Ansicht des Verfassers hat die Entscheidung zwischen den beiden untersuchten Versuchsanordnungen zugunsten der Anordnung II zu fallen.

##### Begründung:

A) Aus der Fehleranalyse folgende Gründe:

1. Bei Anordnung II liegt das gesamte Fehlerniveau niedriger als bei Anordnung I.
2. Die absolute Höhe der optimalen Genauigkeiten liegt unter sonst gleichen Voraussetzungen in Anordnung II günstiger als in Anordnung I.

$$\begin{array}{ll} \text{I} : \min \xi_\lambda = 15 - 16 \% & \min \xi_\alpha = 9 - 21 \% \\ \text{II} : \min \xi_\lambda = 13 - 14 \% & \min \xi_\alpha = 9 - 17 \% \end{array}$$

3. Bei Anordnung I sind minimale Fehler in  $\lambda_f$  nur zu erreichen bei gleichzeitig hohen Fehlern in  $\alpha_g$ , bei Anordnung II liegt der Fehler in  $\alpha_g$  beim Minimum in  $\epsilon_\lambda$  noch in vernünftigen Grenzen:

$$\text{I : } \min \epsilon_\lambda = 15 - 16 \% \quad \epsilon_\alpha = 12 - 43 \%$$

$$\text{II: } \min \epsilon_\lambda = 13 - 14 \% \quad \epsilon_\alpha = 9 - 29 \%$$

B) Sonstige Gründe

4. Der Brennstoffeinsatz ist bei Anordnung II geringer

$$\text{I : Brennstoffvolumen } V_f = 76 \text{ cm}^3$$

$$\text{II: Brennstoffvolumen } V_f = 23 \text{ cm}^3$$

5. Für Brennstoffdurchmesser von 9.9 mm liegen bereits Erfahrungen aus Bestrahlungsexperimenten vor.
6. Der Hochdruckverdichter des Hochdruckloops braucht nicht an der Grenze seiner Leistung betrieben zu werden [3\_7].
7. Mit der Anordnung II lassen sich die spezifischen Forderungen der Kriechbeul-Experimente realisieren, was eine Kombination beider Experimente erlaubt [3\_7].

### 2.5 Der Gesamtfehler im Optimum

In den bisher beschriebenen Überlegungen wurden lediglich die beiden hauptsächlichsten, das gesamte Genauigkeitsniveau bestimmenden Fehler betrachtet. Bezieht man sämtliche übrigen Fehler mit in die Betrachtungen ein, so ist zu erwarten, daß diejenigen Bereiche am stärksten beeinflußt werden, in denen die bisher errechneten Fehler am geringsten waren. Im folgenden werden deshalb die Gesamtfehler im Fehleroptimum von Versuchsanordnung II bei einer Periodendauer von  $T = 15$  Sekunden dargestellt.

Insgesamt gehen 15 Fehler in Form von Toleranzen (Geometrie), Meßfehlern (Übertragungsfunktion, Periodendauer) und Bestimmungsungenauigkeiten (äußere Wärmeübergangszahl, Stoffwerte) in die Betrachtung ein.

### 2.5.1. Ursächliche Fehlerquoten

Die Toleranzen des Prüflings wurden in Anlehnung an eine typische Spezifikation eines im Kapselversuchseinsatz bestrahlten Prüflings gewählt:

1. Dichte (Prozentsatz der theoretischen)	$90 \pm 1\%$
2. Brennstoffdurchmesser	$9.9 \pm 0,01 \text{ mm}$
3. Hüllrohr-Innendurchmesser	$10.0 \pm 0,04 \text{ mm}$
4. Hüllrohr-Außendurchmesser	$11.5 \pm 0,05 \text{ mm}$

Die Genauigkeit der Wärmeübergangszahl, die aufgrund von vorherigen Messungen bestimmt werden muß, wird vorausgesetzt zu:

5. Wärmeübergangszahl	$0,365 \pm 10\% \text{ W/cm}^2\text{grd}$
-----------------------	---

Die Meßgenauigkeit der Periodendauer betrage

6. Periodendauer	$\pm 0,5 \%$
------------------	--------------

Als Genauigkeit der Kühlmitteltemperatur wird die halbe Kühlmittelaufheizspanne bei maximaler Stabileistung angenommen:

7. Kühlmitteltemperatur	$\pm 45 \text{ }^\circ\text{C}$
-------------------------	---------------------------------

Die mittlere Stabileistung und damit die Wärmestromdichte an der Brennstoffoberfläche sei bekannt mit einer Genauigkeit von

8. Wärmestromdichte am Brennstoff	$\pm 5 \%$
-----------------------------------	------------

Für die Stoffwerte werden die folgenden Fehlerquoten vorausgesetzt:

9. Dichte	} des Hüllrohr- materials	$\pm 1 \%$
10. spez. Wärme		$\pm 1 \%$
11. Wärmeleitfähigkeit		$\pm 5 \%$
12. Dichte	} des Brenn- stoffes	$\pm 1\%$
13. spez. Wärme		$\pm 2 \%$

Für die Meßwerte der Übertragungsfunktion gelten die in Abschnitt 2.2. genannten Fehlerquoten.

14. Amplitude der Übertragungsfunktion  $\pm 4,6 \%$   
+ Fehler aufgrund ungenügender Kompensation

15. Phase  $\pm 0,75^\circ$

### 2.5.2. Resultierende Genauigkeiten der Werte für $\lambda_f$ und $\alpha_g$

Aufgrund dieser Annahmen ergeben sich die in Tabelle 2 angegebenen Bereiche und Tendenzen für die aus den einzelnen Fehlerquoten folgenden Abweichungen  $(\Delta\lambda_f/\lambda_f)_i$  bzw.  $(\Delta\alpha_g/\alpha_g)_i$ . Es zeigt sich dabei, daß die neu in Betracht gezogenen Fehlerquellen sich stärker auf die Genauigkeit der Wärmedurchgangszahl als auf die der Wärmeleitfähigkeit auswirken. Dies gilt insbesondere im Bereich hoher Wärmedurchgangszahlen. Hier sind es vorwiegend die Fehler aus den Ungenauigkeiten der äußeren Wärmeübergangszahl und, in schwächerem Maße, die der Hüllrohrabmessungen, die das Fehlerniveau von  $\alpha_g$  anheben.

Tabelle 3 zeigt einen Auszug aus der Gesamtfehlerberechnung für die charakteristischen Betriebszustände (Abb. 8: Punkte (1), (3) und (4))

Die Verschiebung der Fehlerhöhenlinien im  $(\lambda_f, \alpha_g)$ -Koordinatennetz aufgrund der Einbeziehung aller möglichen Fehlerursachen ist in Abb. 11 dargestellt. Die Diagramme gelten für eine Stabileistung von  $S = 750 \text{ W/cm}$  und eine Periodendauer von  $T = 15 \text{ Sekunden}$ . Dies entspricht den Versuchsbedingungen, für welche das Fehlerniveau sich als am niedrigsten erwiesen hatte.

### 2.6 Einfluß der maximalen Fehlerquellen

Wie aus der Gesamtfehlerbetrachtung hervorgeht, wird die Höhe des gesamten Genauigkeitsniveaus für die Bestimmung von Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  und Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  im wesentlichen geprägt durch 3 Fehlerursachen:

- 1.) Meßfehler in der Amplitude der Übertragungsfunktion
- 2.) Meßfehler in der Phase der Übertragungsfunktion
- 3.) Bestimmungsungenauigkeit der äußeren Wärmeübergangszahl.

Dabei wirken sich der erste Fehler vorwiegend auf die Genauigkeit der Wärmeleitfähigkeit, die beiden letzteren auf die der Wärmedurchgangszahl aus. Abbildung 12 zeigt diese speziell wichtigen Abhängigkeiten als Funktion der Höhe der ursächlichen Fehlerquote.

Die angegebenen Fehlerbereiche beziehen sich dabei auf das in Abb. 8 dargestellte voraussichtliche qualitative Verhalten des Prüflings während seines Betriebs im Loopeinsatz. Sie gelten weiterhin für den gesamten ins Auge gefaßten Bereich der Stableistung  $S$  von 350 bis 750 W/cm, bei einer Periodendauer von  $T = 15$  Sekunden.

Bemerkenswert ist dabei der außerordentliche starke Anstieg des Fehlers in der Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  aufgrund von Meßfehlern in der Phase der Übertragungsfunktion. Dieser Anstieg findet im wesentlichen bereits während des Einfahrvorganges statt.

## 2.7 Schlußfolgerungen aus der Fehleranalyse

Aus der gesamten Fehleranalyse sind die folgenden Schlußfolgerungen zu ziehen:

- 1.) Unter Einbeziehung des voraussichtlichen Bestrahlungsverhaltens eines Brennstabes in die Fehlerbetrachtungen erscheint die in Tabelle 1 angegebene Versuchsanordnung II mit einem Prüfling von 9,9 mm Brennstoffdurchmesser als die günstigere Anordnung. Eine ausführliche Begründung ist in Abschnitt 2.4. gegeben.
- 2.) Bei der Auslegung der Meßeinrichtungen ist besonders zu achten auf sorgfältigste Messung von Amplitude und Phasenwinkel der Übertragungsfunktion. Ebenso ist eine vorherige Bestimmung der Wärmeübergangszahl zwischen Hüllrohroberfläche und Kühlmittel mit möglichst großer Präzision durchzuführen.

- 3.) Voraussetzungen für eine genaue Messung der Amplitude der Übertragungsfunktion sind:
- 3.1 Genaue Messung des thermischen Neutronenflusses
  - 3.2 Genaue Messung des Kühlmitteldurchsatzes
  - 3.3 Genaue Messung der Kühlmitteltemperaturschwankungen
  - 3.4 Möglichst wenig Oberwellen in den Signalen von Neutronenfluß und Kühlmitteldurchsatz.
- ad 3.1. Nach Informationen von zuständigen Stellen der Abteilung RB/E ist eine Neutronenflußmessung bei Anwendung geeigneter Meßsonden mit einer Genauigkeit von  $\pm 1\%$  durchführbar.
- ad 3.2. In der Fehlerrechnung wurde eine Genauigkeit der Kühlmitteldurchsatzmessung von  $\pm 1,3\%$  vorausgesetzt. Diese Genauigkeit ist bei der Meßeinrichtung des Kurzzeit-Loopeinsatzes realisierbar. Die bisher diesbezüglich angestellten Überlegungen für die Instrumentierung des Hochdruck-Loopeinsatzes basieren hingegen auf einer Genauigkeit von nur  $\pm 3\%$ . Nach Abb. 12 wäre dabei zu erwarten, daß die Genauigkeit der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nur mit optimal 20 bis 30 % anstatt 15 bis 20 % möglich ist. Es wird deshalb dringend empfohlen, das Konzept der Durchsatzmessung neu zu überdenken.
- ad 3.3. Eine genaue Kühlmitteltemperaturmessung (Kühlmittelaustritts-temperatur) ist nur möglich, wenn die Messung schnell erfolgt. Es wird deshalb empfohlen, die für diese Messung vorgesehene Wirbelkammeranordnung experimentell auf das genaueste zu untersuchen. Es sollte in einem speziellen out-pile-Versuch unter Parallelmessung mit möglichst mehreren schnellen Thermo-elementen, die sich direkt im Gasstrom befinden, der Frequenzgang dieser Meßanordnung oder zumindest die Zeitkonstante ermittelt werden.
- ad 3.4. Das Problem der Oberwellen läßt sich reduzieren auf das Problem der Kühlmitteltemperaturmessung. Wenn eine der beiden Messungen (Neutronenfluß und Kühlmitteldurchsatz) oder beide einen Oberwellenanteil beinhalten, so äußert sich dies, da beide

Oszillationen gesteuert werden, in einer ungenügenden Kompensation der Kühlmitteltemperaturschwankungen. Maßgebend für die Höhe des zulässigen Oberwellenanteils ist die Übertragungsfunktion zwischen Kühlmitteltemperatur und Neutronenfluß bzw. Kühlmitteldurchsatz. Eine diesbezügliche Untersuchung wurde bisher noch nicht durchgeführt.

- 4.) Aufgrund der bei den out-pile-Experimenten gewonnenen Erfahrungen erscheint es unerlässlich, vor den in-pile-Versuchen im FR2 das dynamische Verhalten sowohl der Neutronenflußmessung und -steuerung als auch der Kühlmitteldurchsatzmessung und -steuerung experimentell genau zu untersuchen. Bezüglich des Kühlmitteldurchsatzes kann dies innerhalb des out-pile-Versuchsprogrammes für das Hochdruckloop geschehen. Gedacht ist in diesem Zusammenhang wiederum an die Aufnahme der entsprechenden Übertragungsfunktionen bzw. Frequenzgänge.
- 5.) Im Zusammenhang mit einer Verbesserung der Durchsatzmessung ist auch eine Verbesserung der Bestimmung der äußeren Wärmeübergangszahl anzustreben. Es wird empfohlen, auch diesbezüglich out-pile-Experimente bei originalen geometrischen Verhältnissen durchzuführen.

### 3. Experimentelle Probleme am FR2

Während im vorstehenden Abschnitt 2 die aus dem Verfahren selbst folgenden Erfolgsaussichten für das Balanced Oscillator Experiment im FR2 bzw. die zum Erfolg führenden Bedingungen behandelt wurden, sollen in diesem Abschnitt einige Probleme erörtert werden, welche bei der Realisierung des Experimentes am FR2 zu beachten sind.

#### 3.1 Oszillatorischer Reaktorbetrieb

Im Hinblick auf ein ausreichend hohes Signal der Kühlmitteltemperatur und mit Rücksicht auf die Reduzierung möglicher Nichtlinearitäten des analytischen Verfahrens zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangszahl des Spaltes zwischen Brennstoff und Hüllrohr aus den gemessenen Frequenzgängen wird ein sinnvoller Kompromiß für die Amplitude der Neutronenflußoszillation in einem Wert von  $\pm 10\%$  gesehen.

Um dabei die Möglichkeit zu Messungen auch bei hohen Stabileistungen zu gewährleisten, muß eine Realisierung dieser Amplitude bei voller Reaktorleistung gegeben sein ( $P=P_0 + \Delta P = 40 + 4 \cdot \sin \omega t$  [MW]). Setzt man eine minimale Periodendauer für die vorgeschlagene Versuchsanordnung II von  $T_{\min} = 10$  s ( $\omega = 0.628 \text{ s}^{-1}$ ) voraus, so ergibt sich ein maximaler zeitlicher Gradient für die Reaktorleistung von  $dP/dt = 2.5$  MW/s.

In [8] wurde ein maximaler Leistungsgradient von 0,5 MW/s festgelegt. Dieser Wert gilt nach Rücksprache mit der Abteilung RB jedoch nur für das Anfahren des Reaktors und ist für einen Oszillationsbetrieb bei erhöhter Leistung nicht verbindlich. Von dieser Seite sind deshalb keine Schwierigkeiten zu erwarten.

Trotzdem wirft ein oszillatorischer Reaktorbetrieb Probleme auf, die im folgenden kurz betrachtet werden sollen.

### 3.1.1 Auswirkungen auf die Brennelemente

Wenn die am Prüfling erforderlichen Neutronenflußoszillationen durch entsprechende Steuerung der gesamten Reaktorleistung hervorgerufen werden, werden sämtliche Brennelemente periodischen Laständerungen unterworfen sein. Das gleiche gilt voraussichtlich auch für den Fall, daß Flußstörungen mit Hilfe örtlich begrenzter Absorber erzeugt werden. Dies ist aus entsprechenden Experimenten am Swimmingpool-Reaktor Seibersdorf (Österreich) zu folgern. Weitere Informationen zu diesem Punkt werden von dem kanadischen Forschungsreaktor NRU erwartet, der im geometrischen Aufbau dem des FR2 näherkommt.

Infolge der periodischen Lastwechsel unterliegen sämtliche Brennelemente einer gewissen Gefährdung, wobei die Belastung der Hülle durch Wärmedehnung des Brennstoffes und durch erhöhte Spaltgasfreisetzung als gravierendste Faktoren angesehen werden. Bei normalem Reaktorbetrieb werden für die augenblicklich im Einsatz befindlichen Brennelementebündel ca. 2000 Lastwechsel zugelassen, die von der Herstellerfirma (Nukem) garantiert werden. Die Frage, ob diese Garantie bei einem oszillatorischen Betrieb fallengelassen wird, wird gegenwärtig in Gesprächen zwischen der Fa.Nukem und der Abteilung RB erörtert.

Das Ergebnis dieser Verhandlungen ist in Kürze zu erwarten. Sollte die Garantie nicht erhalten bleiben, so bleibt auf höherer Ebene zu entscheiden, ob dieses Risiko zugunsten eines Forschungsvorhabens eingegangen werden sollte oder nicht.

Eine Alternativlösung wird darin gesehen, daß die geplanten Experimente aufgeschoben werden bis zu einem Zeitpunkt, an dem der FR2 mit neuen, durchgehenden Brennstäben ausgerüstet ist, für welche Lastwechselzahlen von 10 000 garantiert werden könnten.

### 3.1.2 Auswirkungen auf Strukturmaterialien und Kühlkreislauf

Aufgrund eines oszillatorischen Reaktorbetriebs werden Auswirkungen auf Strukturmaterialien und Kühlkreislauf erwartet, die jedoch im Gegensatz zum Brennelement mit größeren Verzögerungen und damit auch weitgehend abgeschwächt wirksam werden. Als gefährdetste Teile werden dabei der Stahltank sowie die Wärmetauscher angesehen. Als Ergebnis eines Vorversuches, bei dem die Reaktorleistung kurzfristig mit einer Amplitude von  $\pm 10\%$  bei Vollast und einer Periodendauer von  $T=200$  Sekunden oszilliert wurde, wurde festgestellt, daß die Schwankungen der Stahltanktemperaturen, die als das gefährdende Moment angesehen werden, innerhalb der zulässigen Grenzen geblieben sind. Da während des Experimentes mit wesentlich kleineren Oszillationsperioden zu rechnen ist, werden diese Schwankungen noch wesentlich geringer werden. Damit kann die Gefährdung des Stahltanks ausgeschlossen werden.

Bezüglich der Wärmetauscher wird ebenfalls mit keinen Schwierigkeiten gerechnet, da auf dem Wege des Kühlwassers vom Austritt aus den Brennelementen bis zum Eintritt in die Wärmetauscher für eine gute Durchmischung gesorgt ist.

### 3.1.3 Reaktorsicherheitsprobleme

Erste qualitative Überlegungen führten zu der Auffassung, daß zwischen den notwendigen Neutronenflußänderungen und den dazu erforderlichen Steuerstabbewegungen starke Nichtlinearitäten auftreten. Insbesondere wird erwartet, daß die negative Reaktivität zur Absenkung des Flusses kleiner sein wird als die positive Reaktivität, welche den Wiederanstieg bewirken soll.

Unter Umständen sind dazu relativ große Reaktivitäten erforderlich, die jedoch wegen behördlicher Auflagen 7‰ nicht übersteigen dürfen. Eine exakte Klärung dieses Punktes ist unbedingt notwendig.

Eine strenge Forderung seitens des Reaktorbetriebs hinsichtlich der Oszillationsfrequenz besteht darin, daß keinesfalls die Reaktorperiode von  $T_R = 10$  Sekunden unterschritten werden darf, um den Schnellschluß zu vermeiden. Bei Oszillationsperioden von minimal  $T = 10$  Sekunden ist mit einer Reaktorperiode von  $T_R = 14 - 15$  Sekunden zu rechnen, was knapp oberhalb der Schnellschlußperiode liegt. Von dieser Seite stünde damit einem Oszillationsbetrieb in dem gewünschten Frequenzbereich nichts im Wege.

### 3.2 Erzeugung der Neutronenflußoszillationen

Über die Methode zur Erzeugung der Neutronenfluß-Oszillationen liegt in der Abteilung RB bisher noch kein endgültiges Konzept vor. Konkrete Vorstellungen sollen erst nach Klärung der Garantiefraage entwickelt werden.

Gegenwärtig sind drei Mechanismen im Gespräch.

- a) Steuerung über Dichteänderungen eines absorbierenden Gases.  
Dabei wird an ein mit Borfluorid vergiftetes Trägergas gedacht. Diese Methode, die bereits anderwärts erprobt wurde, wird jedoch wahrscheinlich aus Platzgründen scheitern.
- b) Verwendung eines getrennten Absorbers, der in seiner Funktion etwa dem Feinregelstab des FR2 entsprechen soll, im Gegensatz zu diesem jedoch mit einem kontinuierlich arbeitenden Antrieb versehen werden soll.
- c) Aufgrund neuester Initiativen seitens RB soll geprüft werden, ob eine Steuerung der Neutronenflußoszillationen mit Hilfe des vorhandenen Feinregelstabes unter Ausnutzung des Temperatureffektes möglich ist. Dies wäre die eleganteste und zugleich billigste Methode.

### 3.3 Neutronenflußmessung

In der in Abschnitt 2 beschriebenen Fehleranalyse war ein Meßfehler von  $\pm 1\%$  für den Neutronenfluß vorausgesetzt worden. Diese Genauigkeit ist zu erreichen, gilt jedoch nur für den Ort des Detektors und bei vorhergehender Eichung. Dabei bleibt die Frage offen, ob das am Ort des Detektors gemessene Signal repräsentativ für den tatsächlichen Fluß am Prüfling ist. In diesem Punkt wird eine große Schwierigkeit gesehen. Das Abbildungsgesetz wird umso ungenauer, je größer der Detektor ist. Dies ist gleichbedeutend mit einer weiteren Entfernung zum Prüfling. Kleine Detektoren, die in unmittelbarer Prüflingsnähe angebracht werden könnten, verzerren andererseits den Fluß durch ihre eigene Absorptionswirkung.

Als Detektor ist augenblicklich eine Spaltkammer im Gespräch, welche Abmessungen von 6 mm  $\varnothing$  und 60 mm Länge besitzt. Rhodium - oder auf ähnlicher Basis arbeitende Detektoren werden infolge ihrer Trägheit als ungünstig angesehen. Sie wären jedoch verwendbar, wenn man ihr Übertragungsverhalten experimentell bestimmen würde. Allerdings würde dadurch die Genauigkeit wesentlich verschlechtert. Ein neuer, sehr schneller Detektor wird in RB gerade erprobt.

### 4. Weitere Probleme

In der analytischen Behandlung des Balanced Oscillator Verfahrens wird davon ausgegangen, daß die Neutronenflußverteilung in Umfangsrichtung konstant ist und daß die örtlichen Krümmungen des Flußverlaufs sowohl in radialer als auch in axialer Richtung während des Oszillationsvorganges erhalten bleiben. Über diese Voraussetzungen wurde in den letzten Besprechungen mit RB diskutiert, wobei sich ergab, daß diese idealen Verhältnisse nur schwerlich zu erreichen sein werden. Der Verlauf in Umfangsrichtung wird dabei beeinflusst vom gesamten Coreaufbau und von in der Nähe des Zentralkanals befindlichen Versuchseinrichtungen. Die axiale Krümmung kann durch die Bewegung des Regelstabes bzw. des als Oszillator für den Fluß fungierenden neu zu entwickelnden Steuerstabes, die radiale Flußkrümmung durch die Eigenreaktivität des Prüflings u.U. stark beeinflusst werden.

Eine Klärung dieser Probleme hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die analytische Behandlung oder im Hinblick auf weitgehende Reduzierung der sich daraus ergebenden Effekte wird deshalb dringend empfohlen.

#### 5. Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit den Erfolgsaussichten für das Balanced Oscillator Verfahren im Hinblick auf seine in-pile-Anwendung. Aufgrund einer eingehenden Fehleranalyse wurde festgestellt, daß es möglich ist, unter optimalen Bedingungen die Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes mit einer Genauigkeit von 15 - 20%, die Wärmedurchgangszahl des Spaltes zwischen Brennstoff und Hüllrohr mit einer Genauigkeit von 20 - 40% zu bestimmen. Voraussetzung dazu sind sorgfältige Vorversuche, die insbesondere das dynamische Verhalten der Meß- und Regeleinrichtungen aufzeigen sollen. Verbesserungen in der Genauigkeit der Durchsatzmessung sind darüber hinaus notwendig.

Die experimentellen Schwierigkeiten am FR2 sind zu überwinden, offen bleibt zunächst nur die Garantiefraage für die Brennelemente. Die diesbezüglichen Fragen werden von der Abteilung RB in naher Zukunft geklärt werden.

Des weiteren erscheint es als zweckmäßig, genauere Überlegungen über das Verhalten des Neutronenflußverlaufes während des Oszillationsvorganges anzustellen.

*Janner*

Referenzen:

- [1\_] W.Dänner: Bestimmung der betriebsmäßigen Wärmeleitfähigkeit von keramischem Kernbrennstoff und der Wärmedurchgangszahl des Gasspaltes zwischen Brennstoff und Hüllrohr nach dem Balanced Oscillator Verfahren.  
KFK-1125, Jan.1970
- [2\_] E.Bojarsky: Helium-Kreislaufanlage für Bestrahlungsversuche mit Brennstoffstäben im Reaktor FR2.  
Kerntechnik 10, 6 (1968)
- [3\_] W.Dänner : Bestimmung der in pile Wärmeleitfähigkeit an (U,Pu)O<sub>2</sub>-Prüflingen nach dem Balanced Oscillator Verfahren. Problematik der Prüflingsauslegung.  
nicht veröffentlicht
- [4\_] W.Dänner : Bestimmung der in pile Wärmeleitfähigkeit an keramischen Kernbrennstoffen nach dem Balanced Oscillator Verfahren. Fehleranalyse-Programm BALØS.  
nicht veröffentlicht
- [5\_] H.Beißwenger u.a.: Die Entwicklung von Brennelementen schneller Brutreaktoren  
KFK-700 (EUR 3713d)
- [6\_] E.Gebhardt,  
F.Thümmeler ; Reaktorwerkstoffe, Teil 2.  
B.G.Teubner, Stuttgart (1969)
- [7\_] D.Geithoff ; persönliche Mitteilung.
- [8\_] Nachtrag II zum Sicherheitsbericht des FR2  
nicht veröffentlicht

Tabelle 1

Auslegungsdaten für	Versuchsanordnung I	Versuchsanordnung II
Brennstoff	(U,Pu)O <sub>2</sub> )	(U,Pu)O <sub>2</sub>
Brennstoffdurchmesser [mm]	17,9	9,9
Länge der Brennstoff- säule [mm]	3 x 100	3 x 100
Hüllrohrwerkstoff	beliebig	beliebig
Hüllrohr-Abmessungen [mm]	20 x 1,0	11,5 x 0,75
Kühlkanal-Durchmesser [mm]	22,5	22,5
Kühlmittel-Durchsatz [kg/h]	170 ± 17	170 ± 17
Kühlmittel-Druck [ata]	75	75 - 150
Wärmeübergangszahl [W/cm <sup>2</sup> grd]	1,0	0,365
Stableistung [W/cm]	350 - 750	350 - 750
max. Hüllrohr-Tempera- tur [°C]	260	700
Periodenbereich [s]	10 - 40	5 - 20

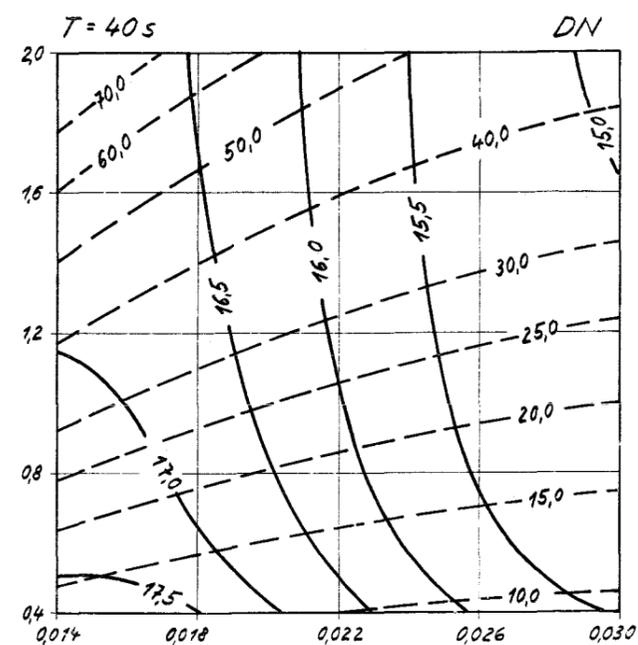
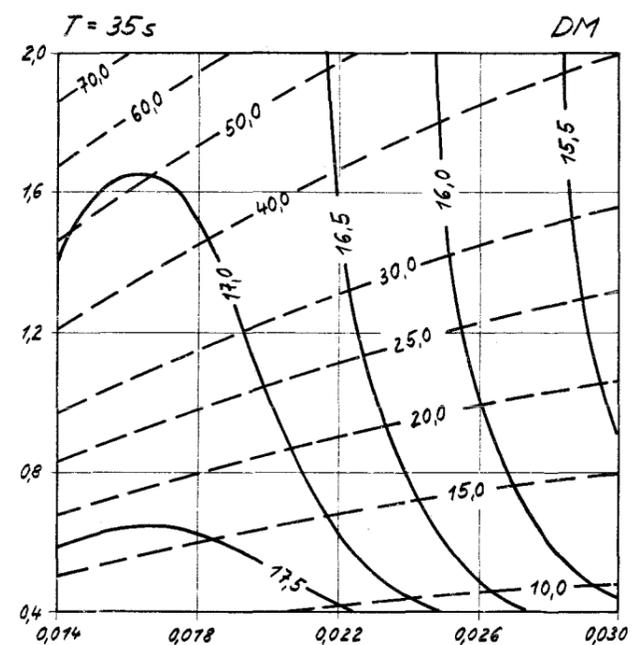
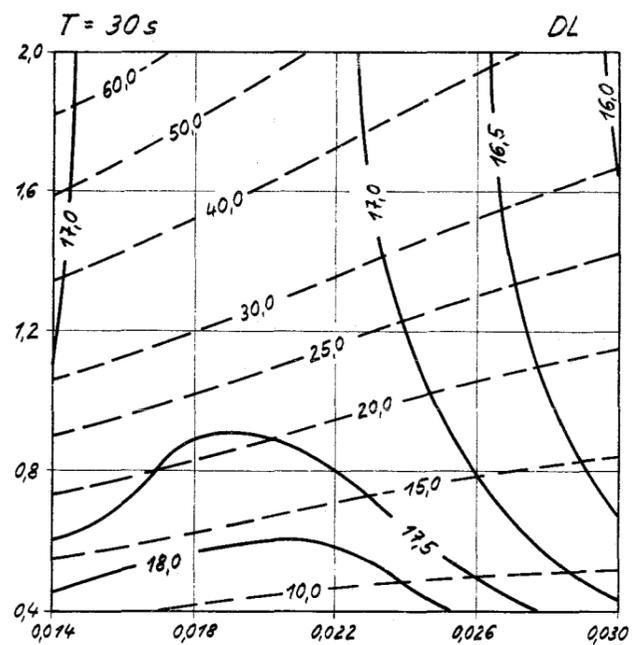
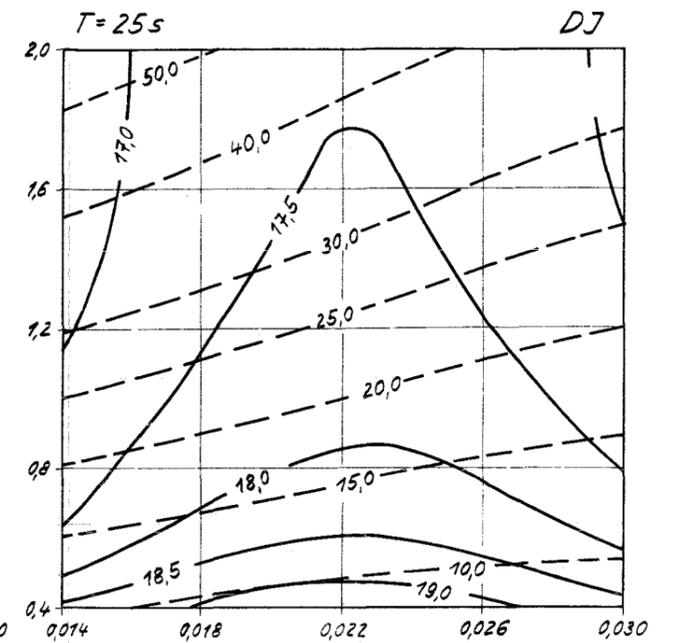
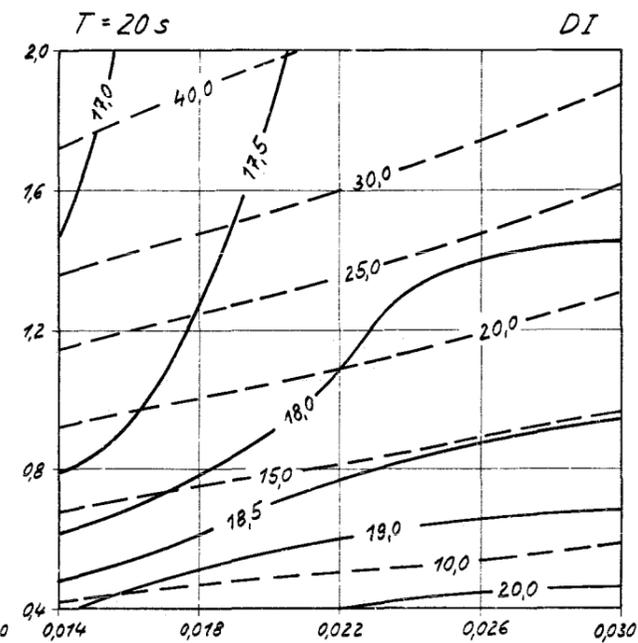
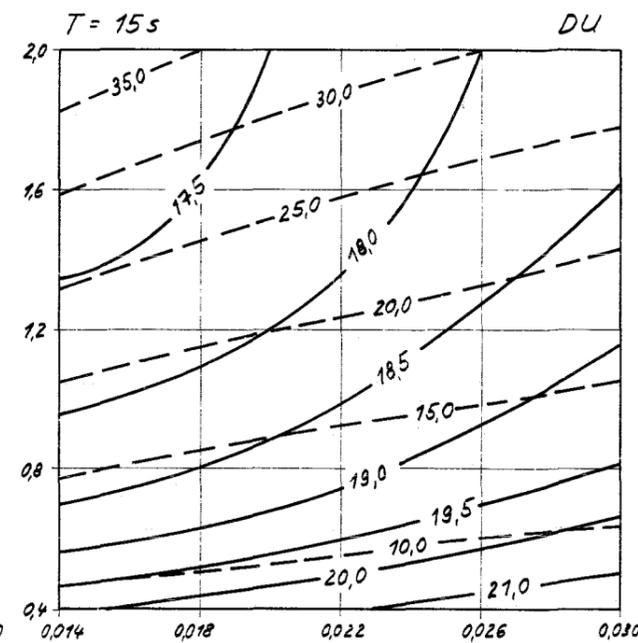
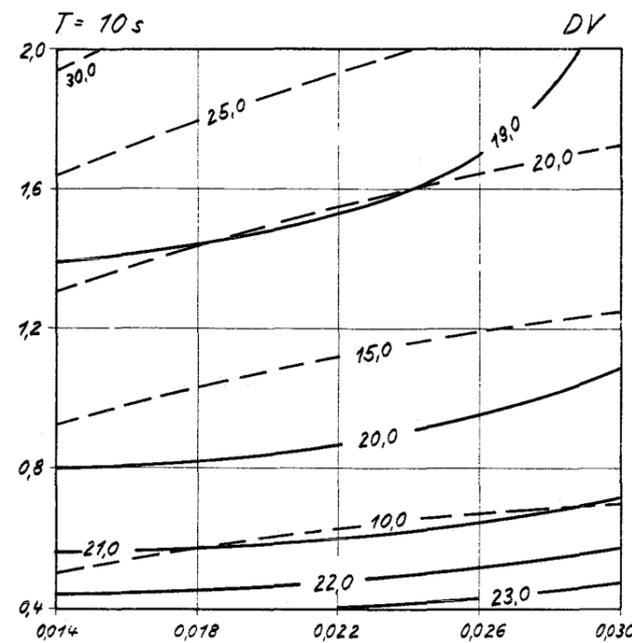
Tabelle 2:

Fehlerbereiche und -tendenzen für Versuchsanordnung II,  $T = 15 \text{ s}$ ,  $S = 750 \text{ W/cm}$ 

Nr.	Fehlerursache	Fehlerquote	Abweichung in $\epsilon_\lambda$	Tendenz	Abweichung in $\epsilon_\alpha$	Tendenz
1	theoretische Dichte	1% abs.	1,04-1,25 %		1,20-2,40 %	
2	Brennstoff- $\phi$	0,01 mm	$\approx 0,5 \%$		$\leq 0,1 \%$	
3	Hüllrohr-Innen- $\phi$	0,04 mm	0,1-0,5 %		1,5-6,6 %	steigt mit $\alpha_g$ , fällt mit $\lambda_f$
4	Hüllrohr-Außen- $\phi$	0,05 mm	0,65-1,05%		1,5-8,4 %	steigt mit $\alpha_g$ fällt mit $\lambda_f$
5	Wärmeübergangszahl	10 %	1,2-1,9 %		4,0-23,0%	steigt stark mit $\alpha_g$ fällt leicht mit $\lambda_f$
6	Periodendauer	0,5 %	$\approx 0,4 \%$		0,7-1,7 %	
7	Kühlmitteltemperatur	45 °C	$\leq 0,3 \%$		$\leq 0,55 \%$	
8	Wärmestromdichte	5 %	$\leq 0,3 \%$		$\leq 0,55 \%$	
9	Dichte Hüllrohr	1 %	0,13-0,24 %		0,25-1,5%	
10	spez. Wärme Hüllrohr	1 %	0,13-0,25 %		0,25-1,5%	
11	Wärmeleitf. Hüllrohr	5 %	0,17-0,25 %		0,9- 4,5%	steigt mit $\alpha_g$ , fällt mit $\lambda_f$
12	Dichte Brennstoff	1 %	$\approx 1 \%$		1,1-1,9%	
13	spez. Wärme Brennstoff	2 %	$\approx 2 \%$		2,2-4,25%	
14	Amplitudenmeßfehler +Kompensationsfehler	4,6% 1,1-1,5%	11,0-13,0%		0,4-4,9%	fällt mit $\alpha_g$
15	Phasenmessung	0,75°	3,4-5,0 %	fällt mit $\alpha_g$	5,8-34,6%	steigt mit $\alpha_g$ , fällt mit $\lambda_f$
	Gesamtfehler		11,9-14,4%		8,7-43,6%	steigt mit $\alpha_g$ , fällt leicht mit $\lambda_f$

Tabelle 3:

Nr.	Fehlerursache	Fehlerquote	Fehler $\epsilon_\lambda$ [%]			Fehler $\epsilon_\alpha$ [%]		
			Punkt (1)	Punkt (3)	Punkt (4)	Punkt (1)	Punkt (3)	Punkt (4)
1	theoretische Dichte	1% abs.	1,13	1,07	1,08	1,38	2,19	1,87
2	Brennstoff- $\phi$	0,01 mm	0,48	0,45	0,43	0	0	0
3	Hüllrohr-Innen- $\phi$	0,04 mm	0,23	0,42	0,38	1,91	4,06	4,84
4	Hüllrohr-Außen- $\phi$	0,05 mm	0,89	0,69	0,69	2,19	5,47	5,94
5	Wärmeübergangszahl	10%	1,60	1,27	1,27	6,18	15,62	16,56
6	Periodendauer	0,5%	0,40	0,46	0,44	0,85	1,25	1,25
7	Kühlmitteltemperatur	45°C	0,32	0,30	0,27	0,28	0,31	0,31
8	Wärmestromdichte	5%	0,44	0,38	0,50	0,44	0,62	0,62
9	Dichte Hüllrohr	1%	0,21	0,13	0,13	0,38	0,94	0,94
10	spez. Wärme Hüllrohr	1%	0,21	0,13	0,13	0,38	0,94	0,94
11	Wärmeleitf. Hüllrohr	5%	0,18	0,17	0,17	1,30	3,44	3,44
12	Dichte Brennstoff	1%	1,01	0,97	1,00	1,24	1,87	1,56
13	spez. Wärme Brennstoff	2%	1,91	1,93	1,87	2,48	3,91	3,59
14	Amplitudenmeßfehler + Kompensations- fehler	4,6% 1,1-1,5%	11,47	11,51	11,17	2,00	2,34	1,25
15	Phasenmessung	0,75°	4,37	3,62	3,50	8,18	20,62	22,97
	Gesamtfehler		12,68	12,43	12,07	11,40	27,58	29,94



Versuchsanordnung I

Einfluß der Periodendauer  $T$   
auf die Fehler  $\epsilon_\lambda$  und  $\epsilon_\alpha$   
Stableistung  $S = 350\text{ W/cm}$

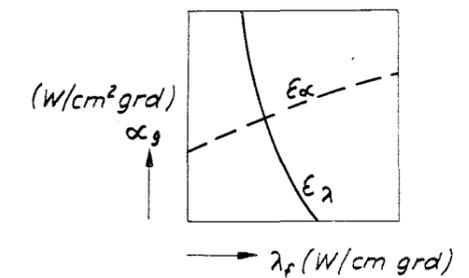
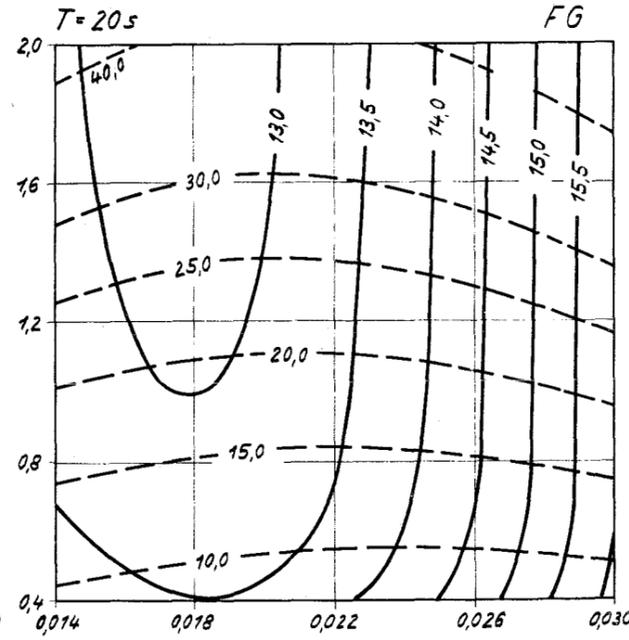
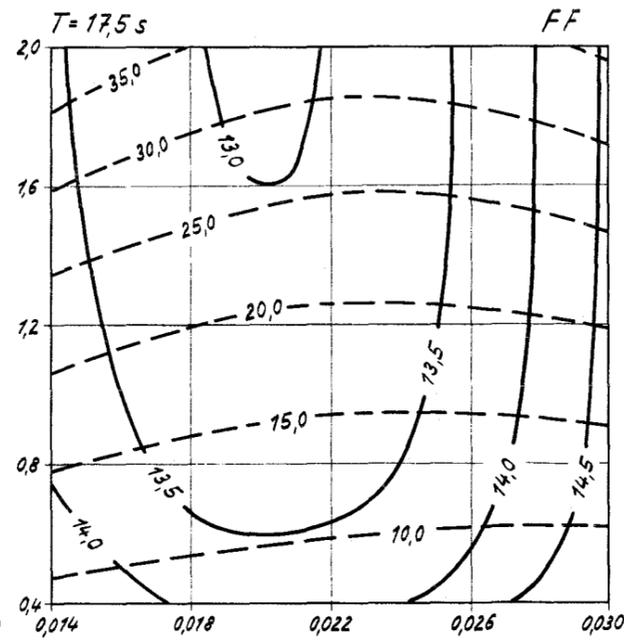
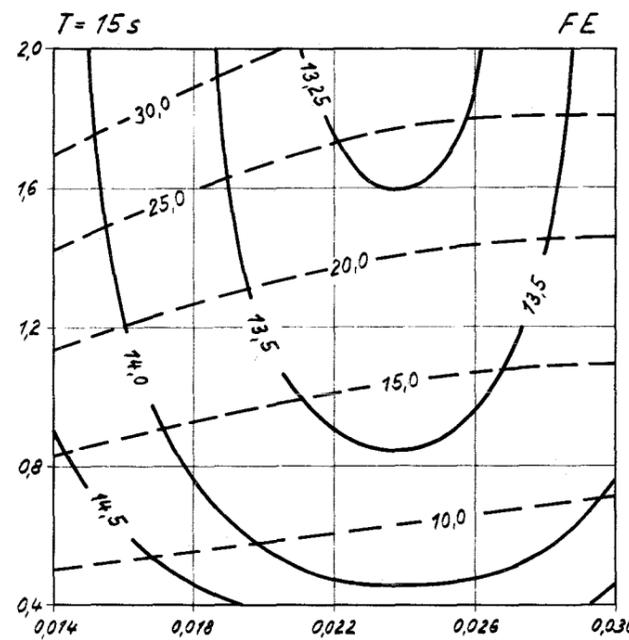
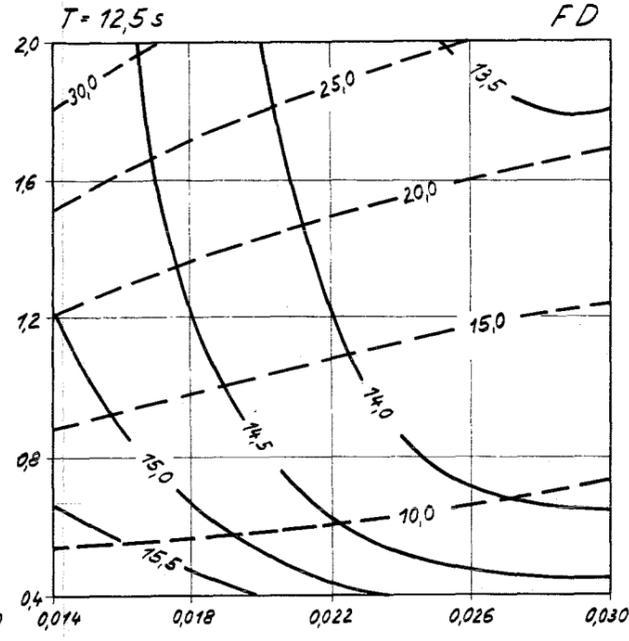
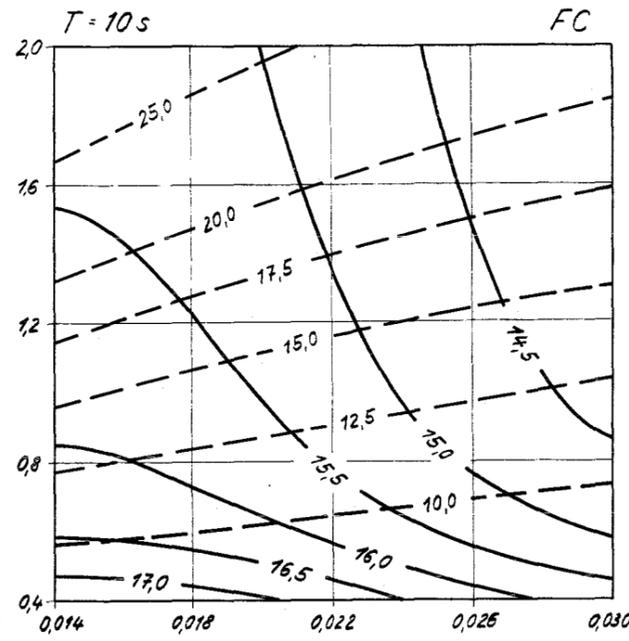
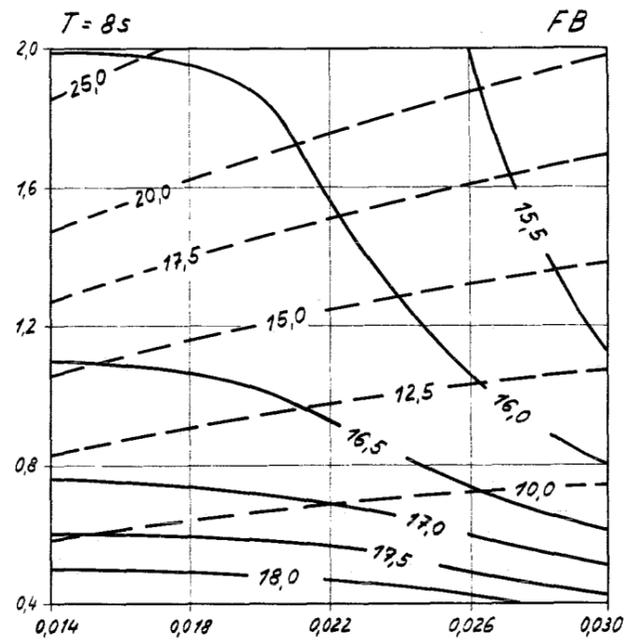
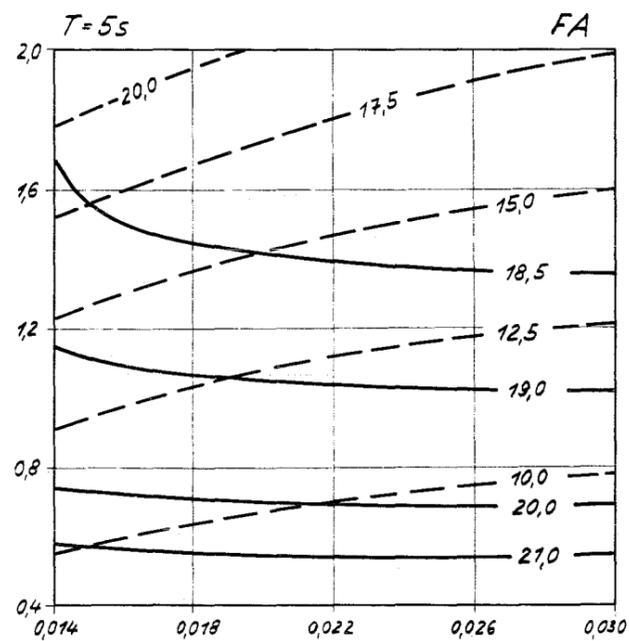


Abb. 1



Versuchsanordnung II

Einfluß der Periodendauer  $T$   
auf die Fehler  $\epsilon_\lambda$  und  $\epsilon_\alpha$   
Stableistung  $S = 350 \text{ W/cm}$

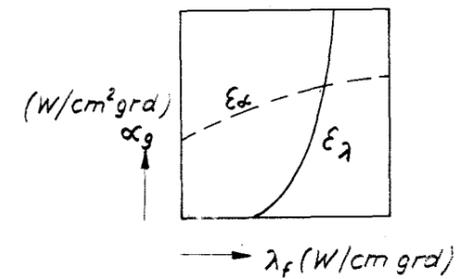
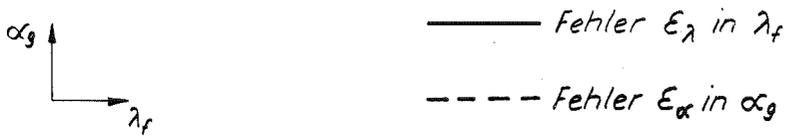
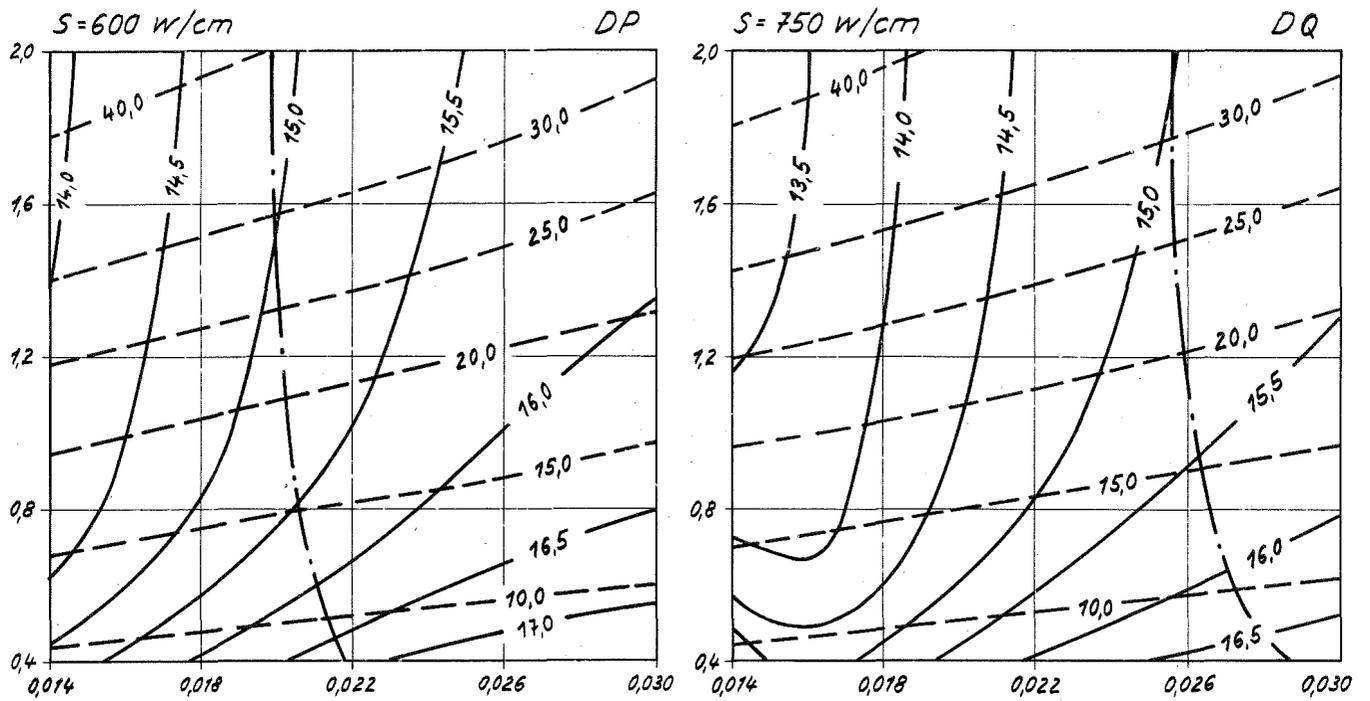
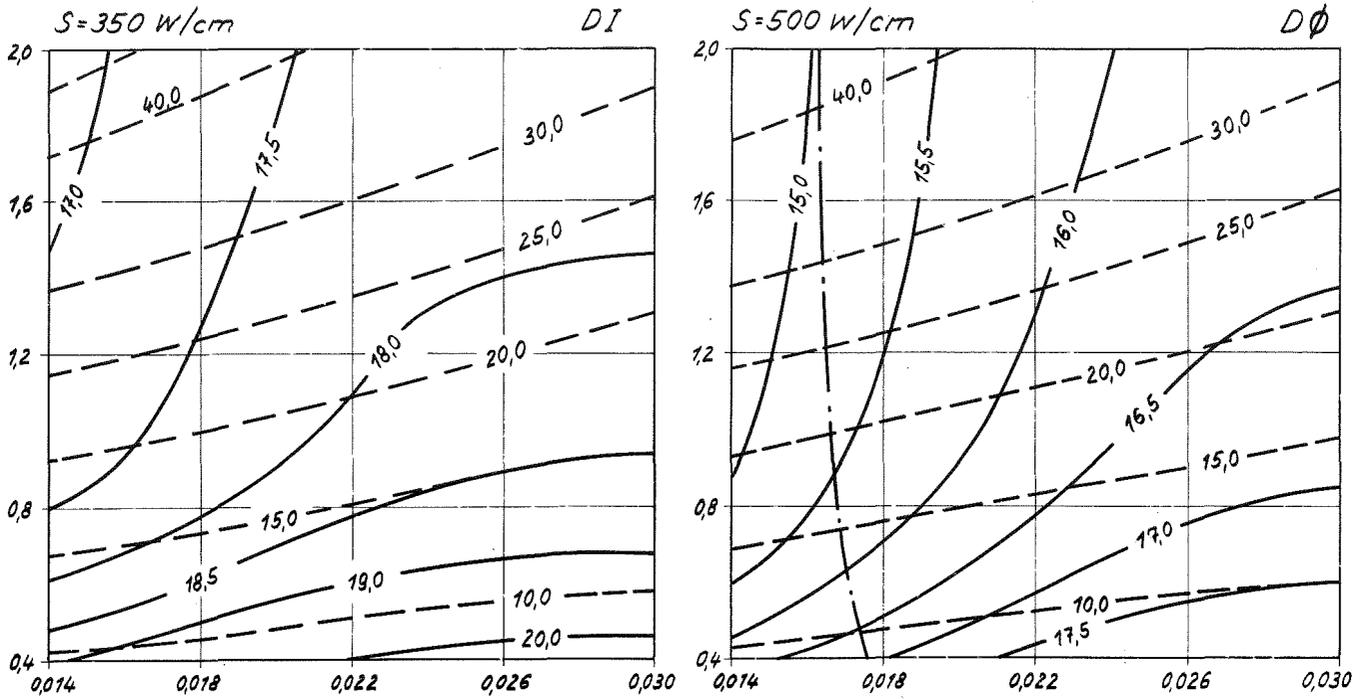


Abb. 2

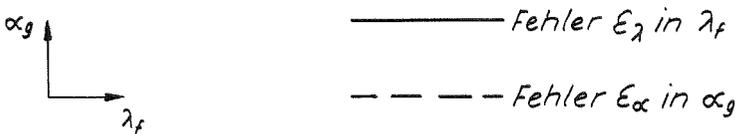
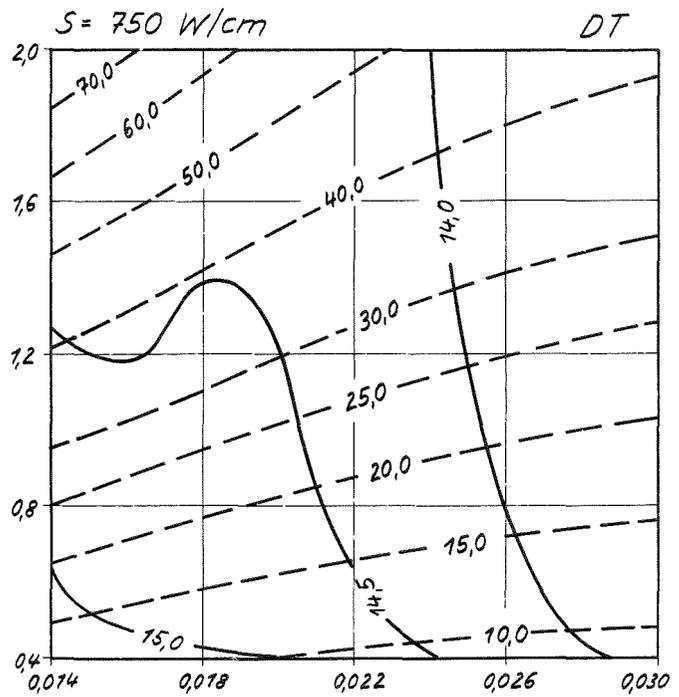
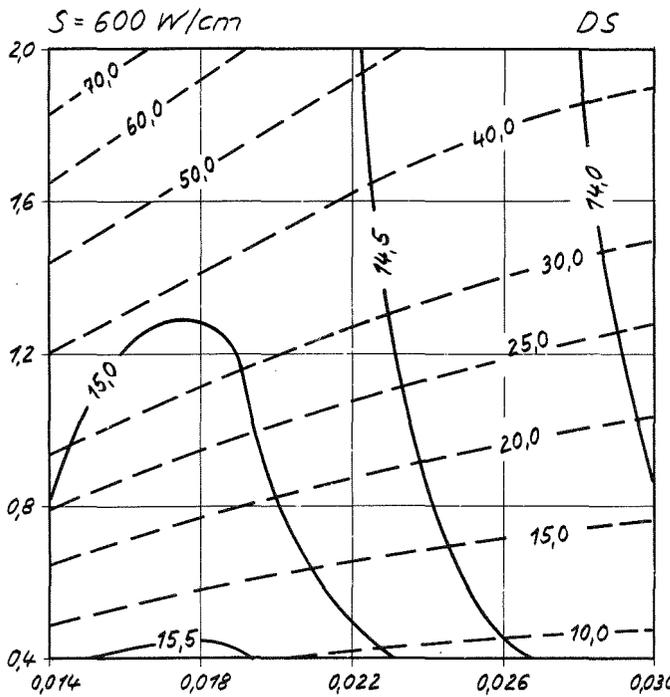
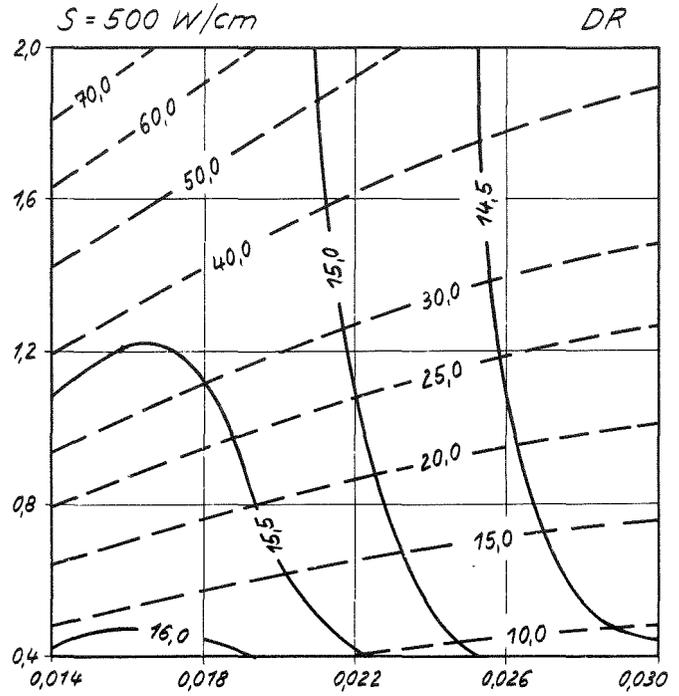
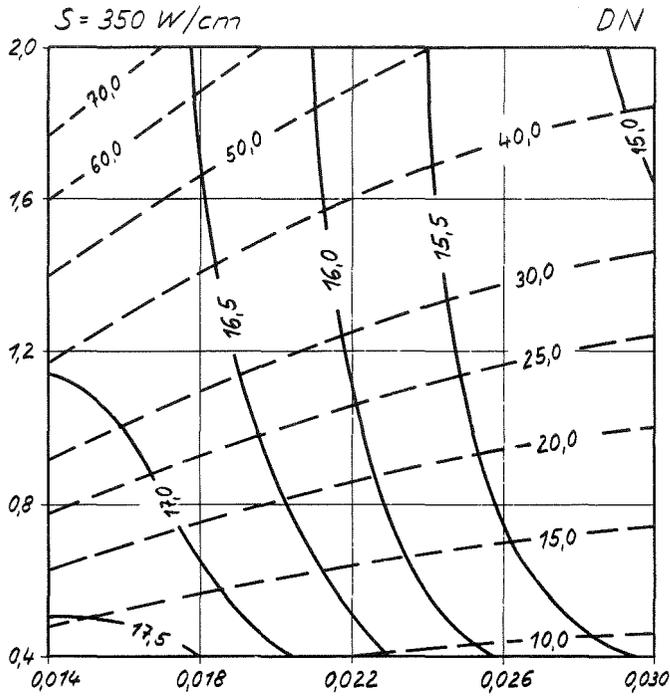
Versuchsanordnung I



Einfluß der Stabileistung  $S$ , Periodendauer  $T=20s$

Abb. 3

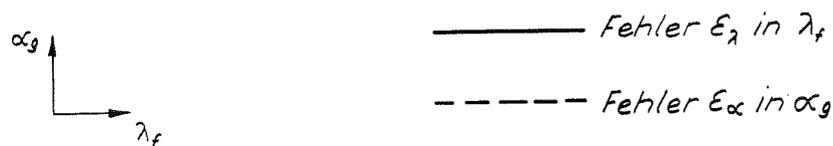
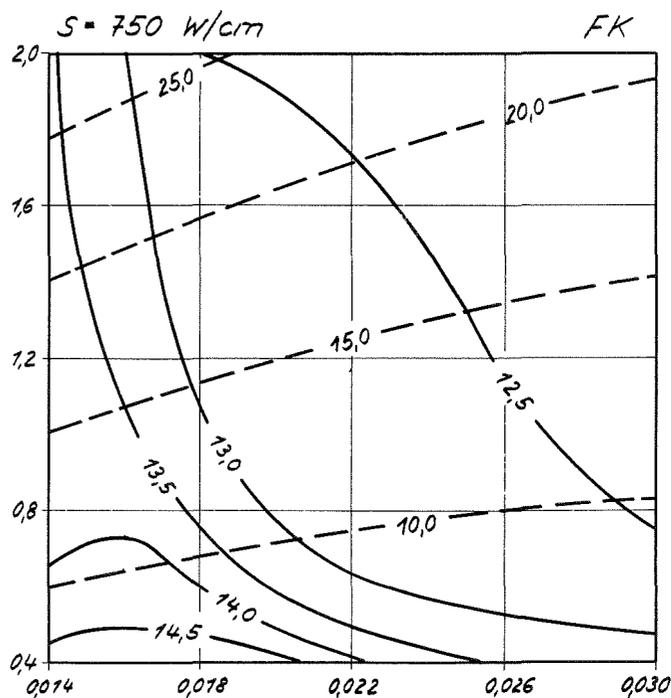
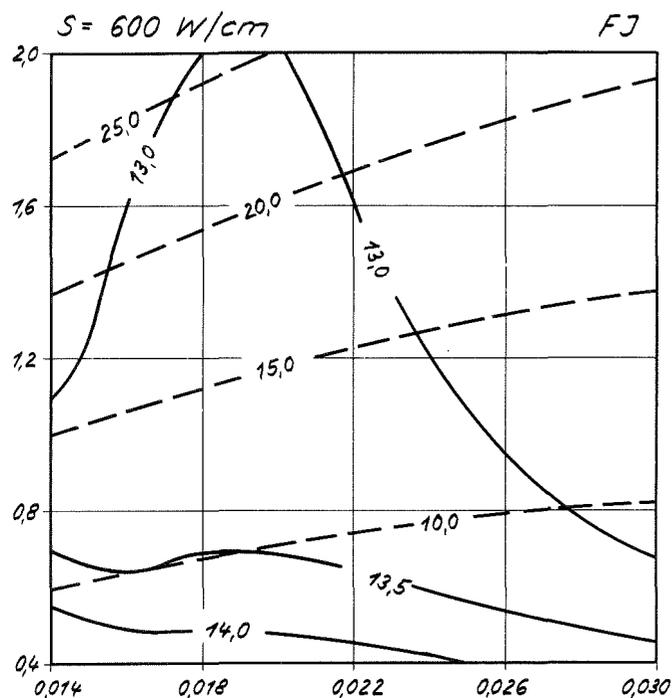
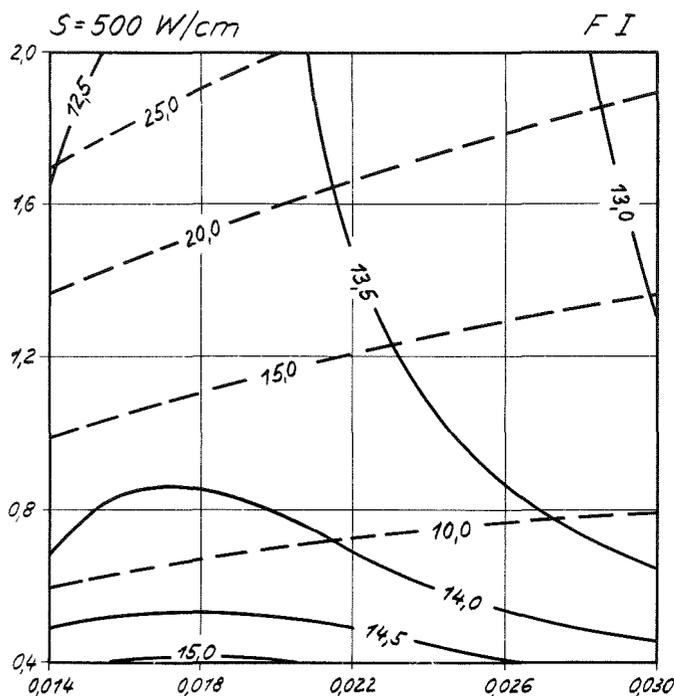
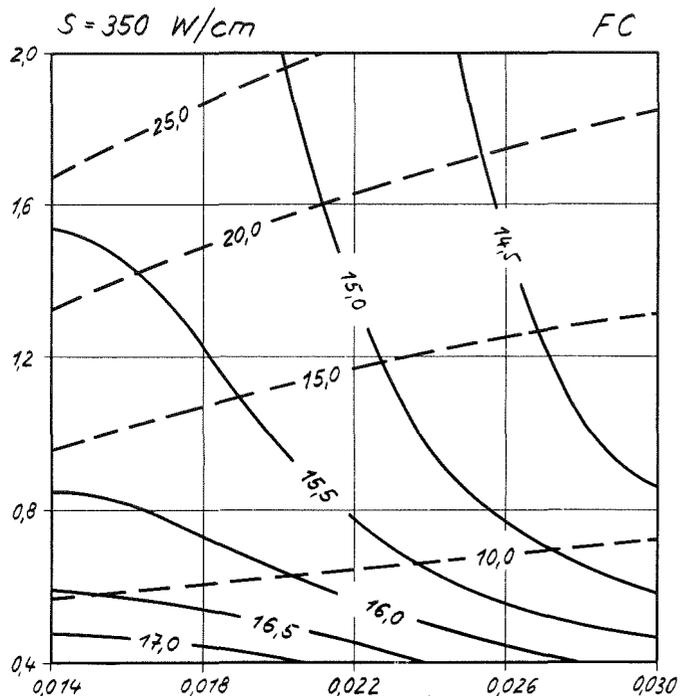
Versuchsanordnung I



Einfluß der Stableistung  $S$ , Periodendauer  $T = 40 \text{ s}$

Abb. 4

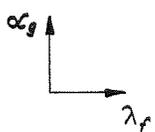
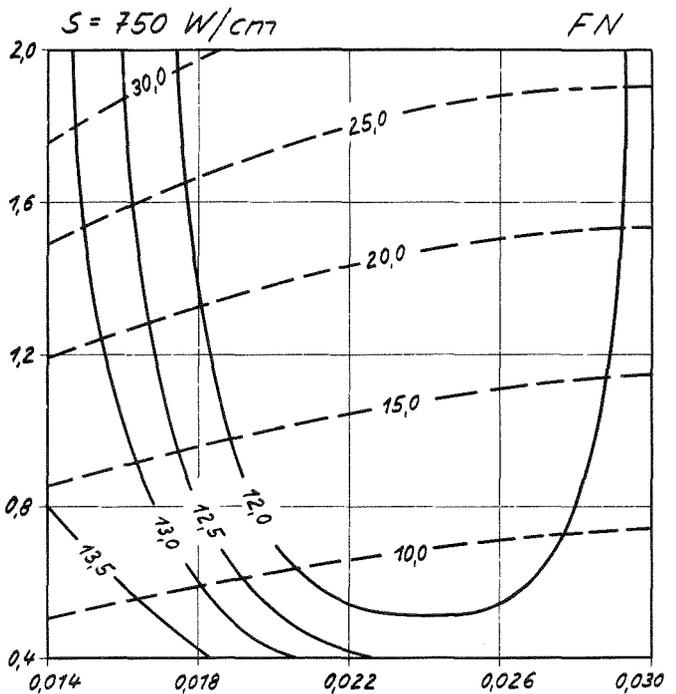
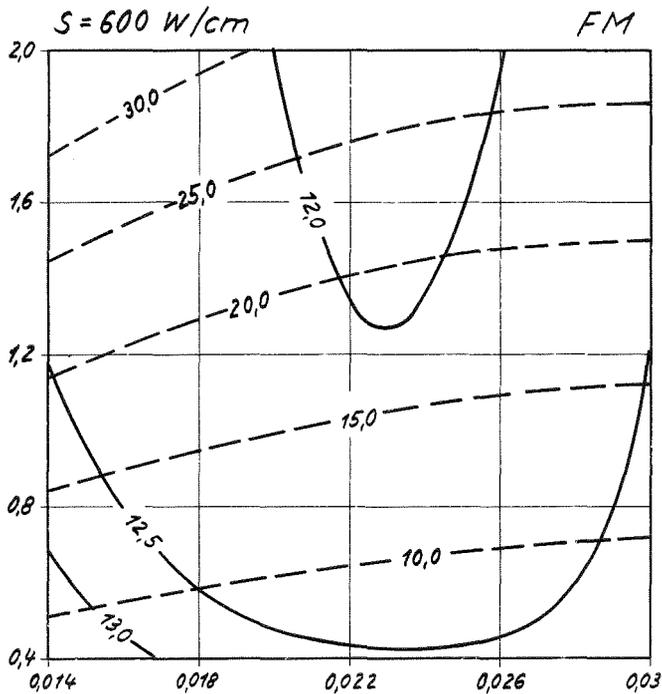
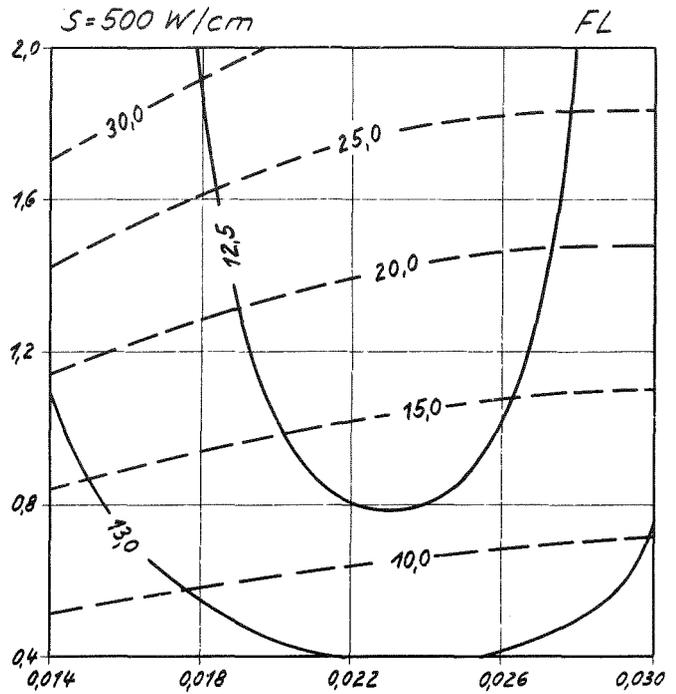
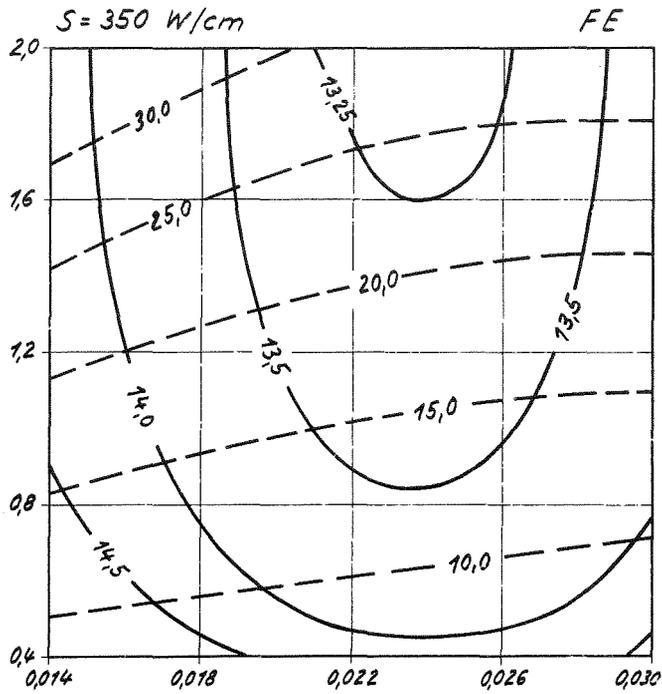
# Versuchsanordnung II



Einfluß der Stabileistung  $S$ , Periodendauer  $T=10\text{s}$

Abb. 5

Versuchsanordnung II

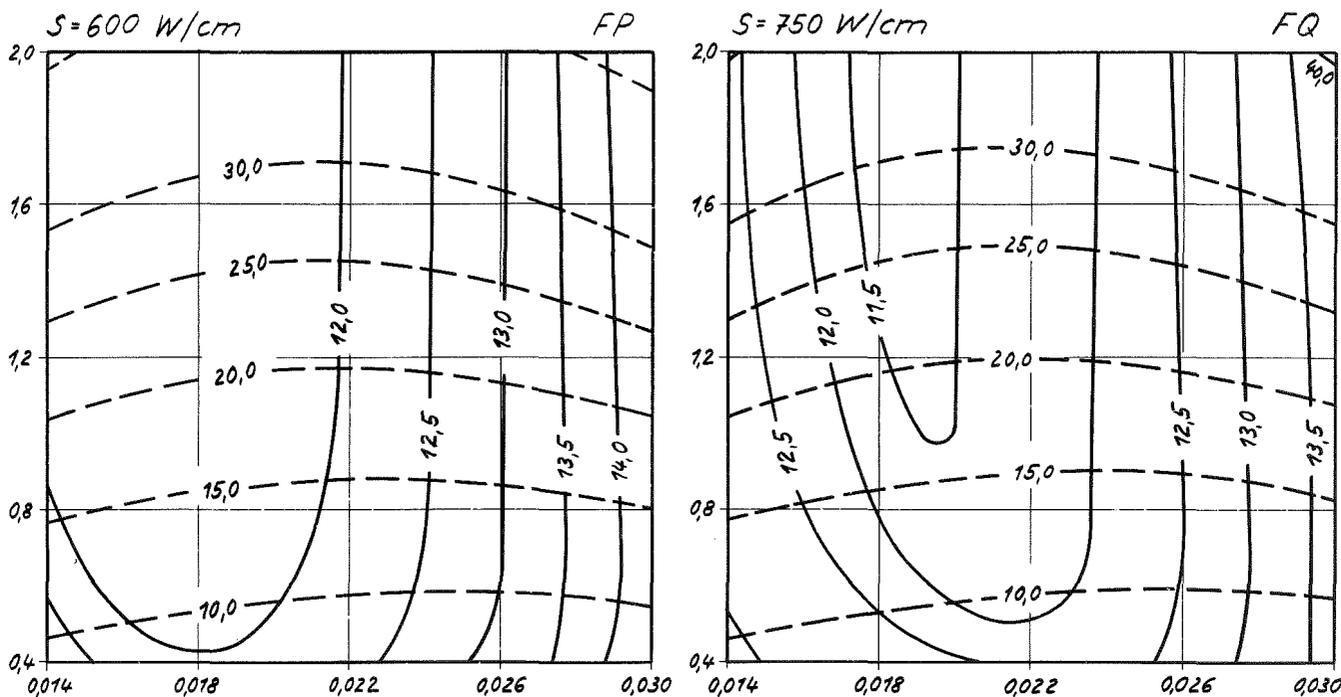
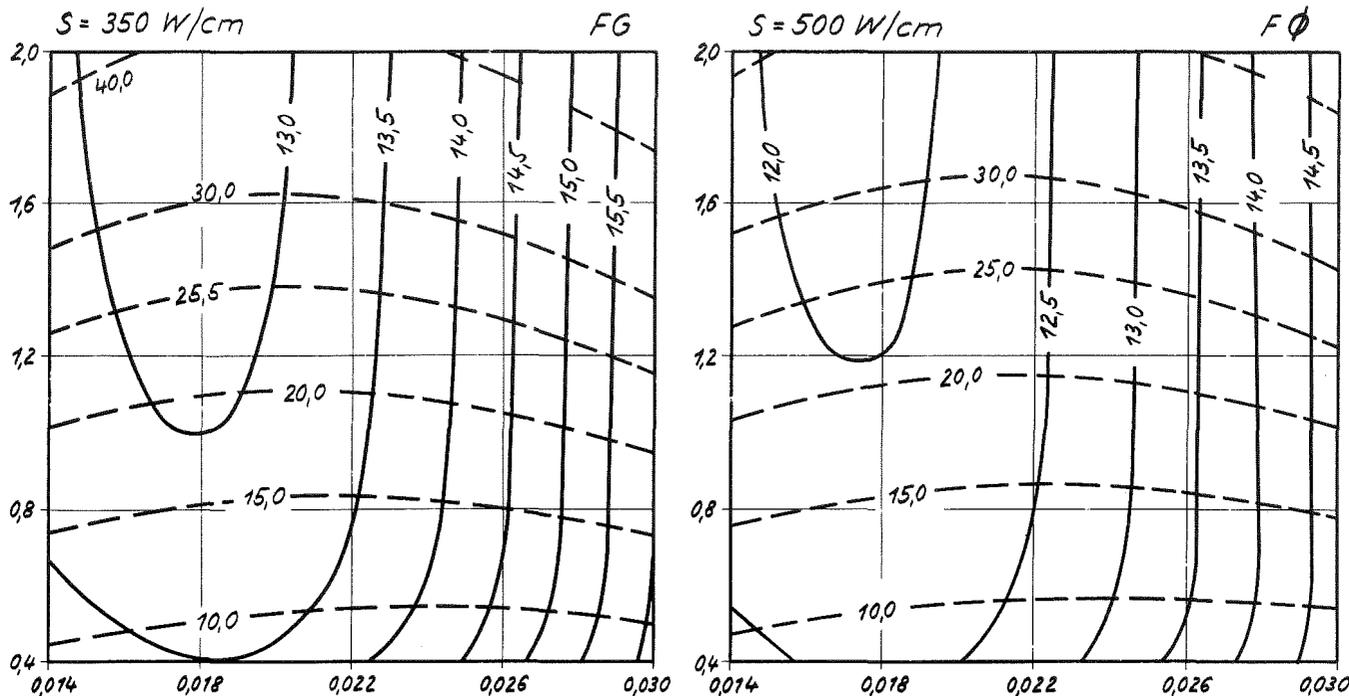


———— Fehler  $E_\lambda$  in  $\lambda_f$   
 - - - - Fehler  $E_\alpha$  in  $\alpha_g$

Einfluß der Stableistung  $S$ , Periodendauer  $T=15\text{s}$

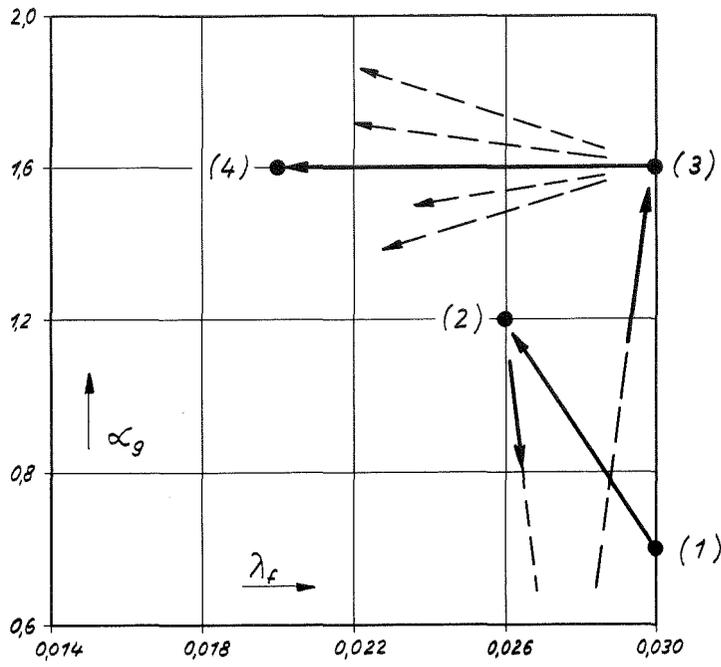
Abb. 6

Versuchsanordnung I



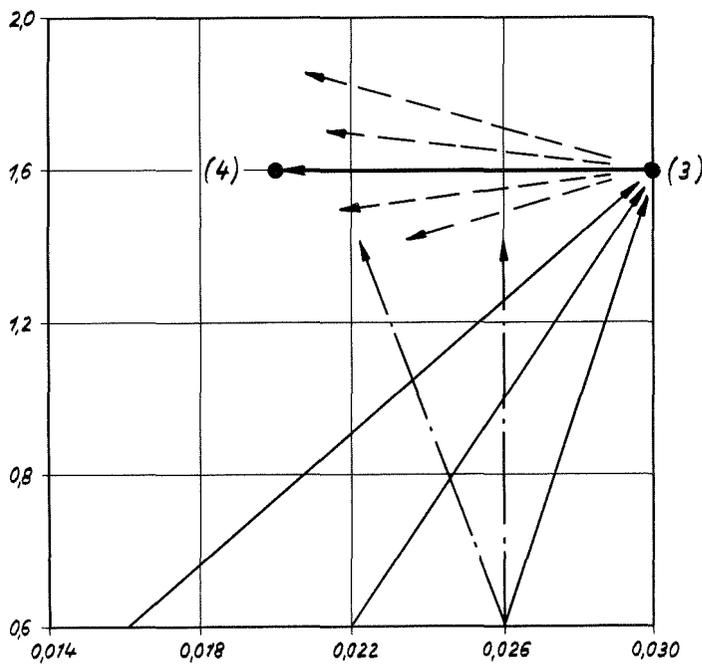
$\alpha_g$  ↑  
 — Fehler  $E_\lambda$  in  $\lambda_f$   
 - - - Fehler  $E_\alpha$  in  $\alpha_g$   
 →  $\lambda_f$

Einfluß der Stableistung  $S$ , Periodendauer  $T = 20 \text{ s}$



Verhalten von frisch eingesetzten Brennstäben

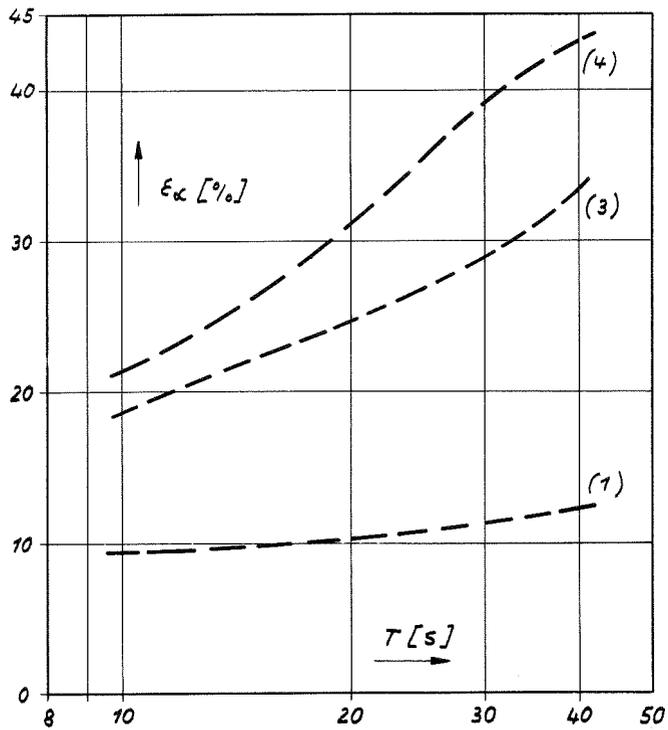
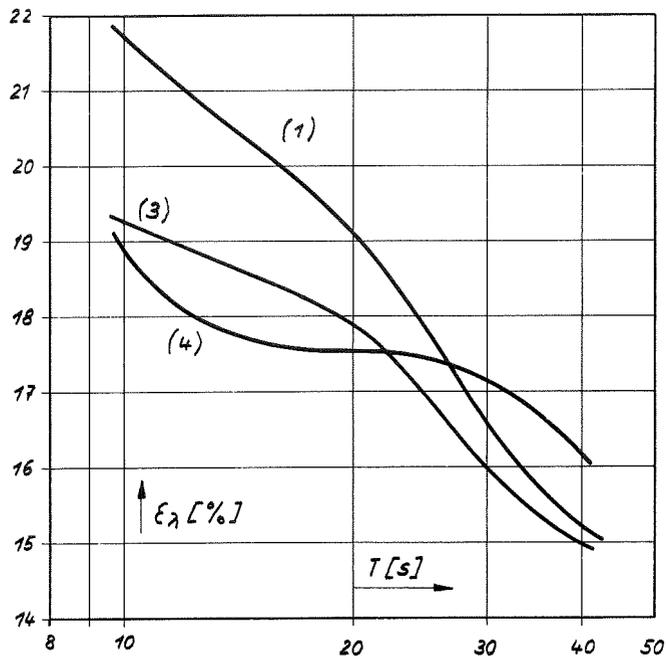
Abb. 8a



Verhalten vorbe-strahlter Brenn-stäbe

Abb. 8b

↑	↑	↑
Bestrahlungstemperatur < 100°C	100 ÷ 500°C	> 500°C
Neutronendosis $1.4 \cdot 10^{19}$ nvt	$5 \cdot 10^{17}$ nvt	$6 \div 36 \cdot 10^{20}$ nvt

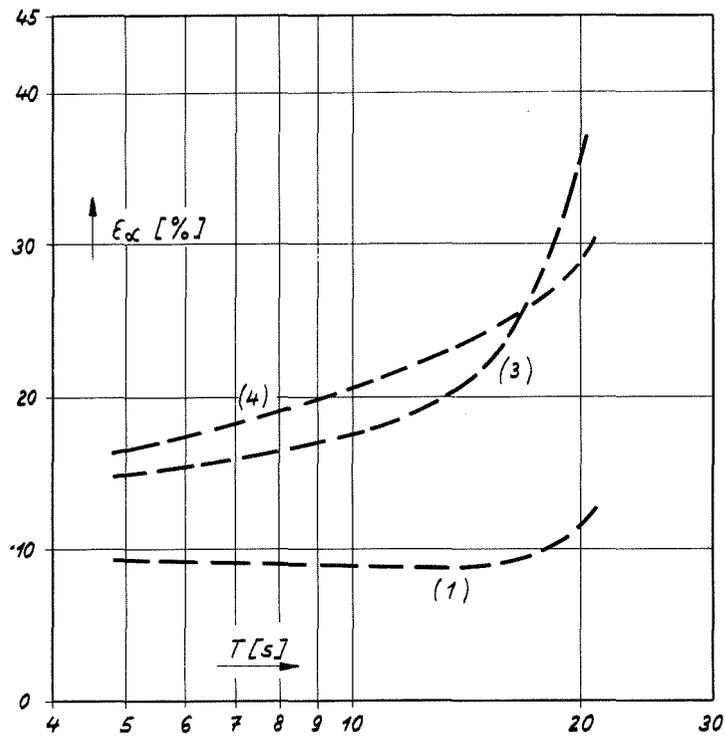
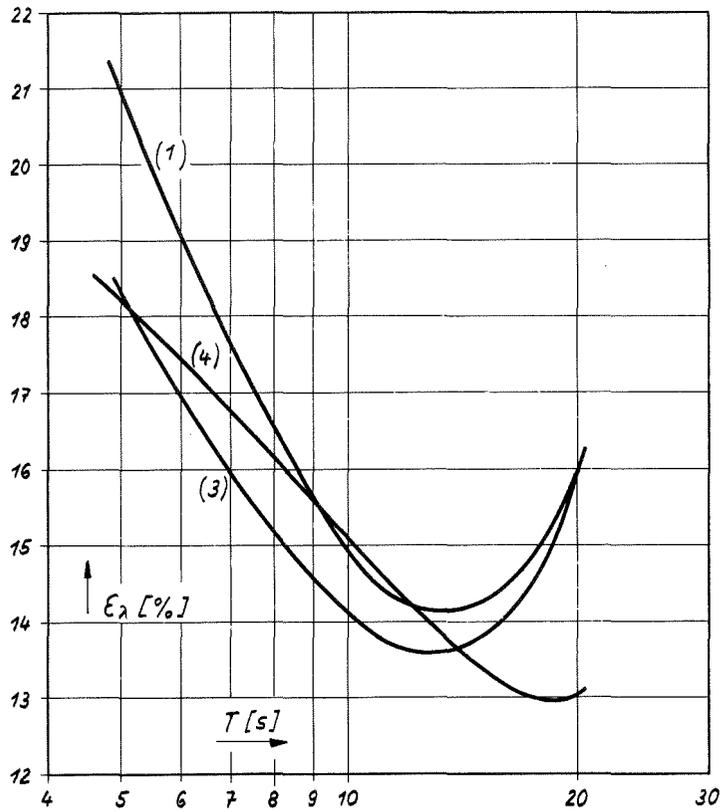


Versuchsordnung I

Abbrandverhalten der Fehler  $\epsilon_\lambda$  und  $\epsilon_\alpha$   
als Funktion der Periodendauer  $T$

Stableistung  $S = 350 \text{ W/cm}$

Abb. 9

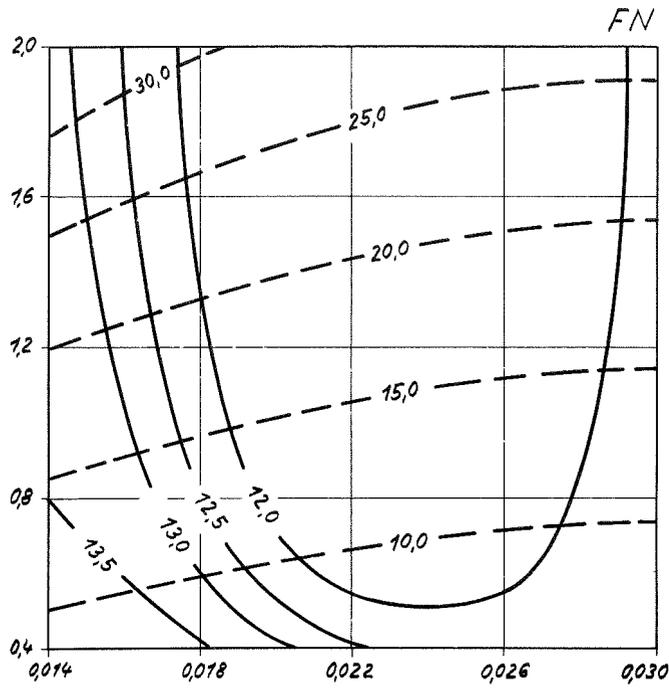


Versuchsanordnung II

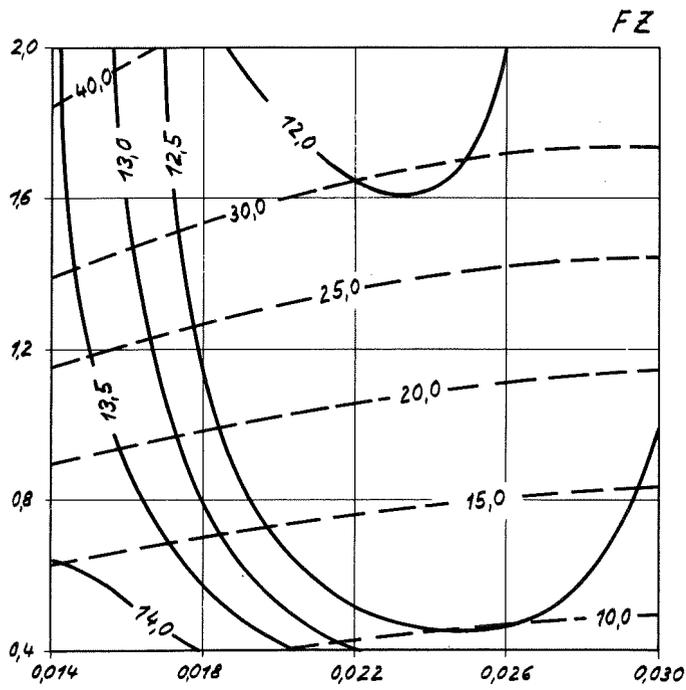
Abbrandverhalten der Fehler  $\epsilon_\lambda$  und  $\epsilon_\alpha$   
als Funktion der Periodendauer  $T$

Stableistung  $S = 350 \text{ W/cm}$

Abb. 10



Berücksichtigung der beiden Hauptfehlerkomponenten

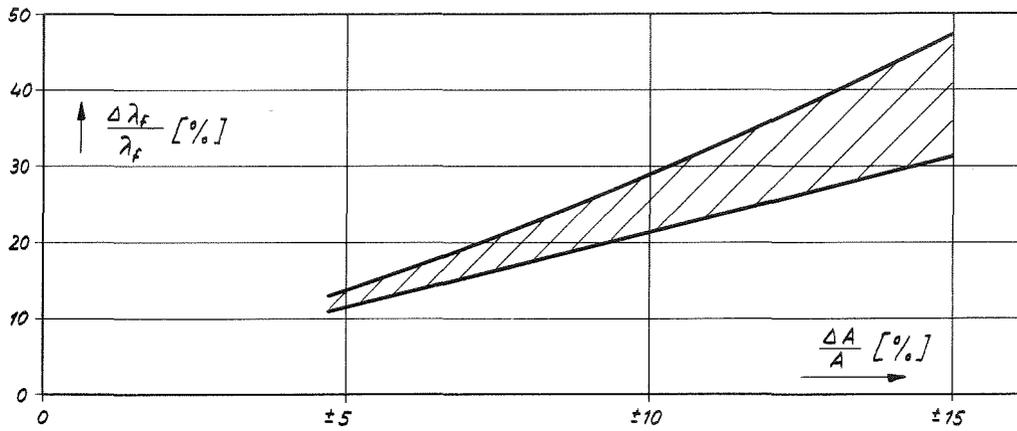


Gesamtfehler

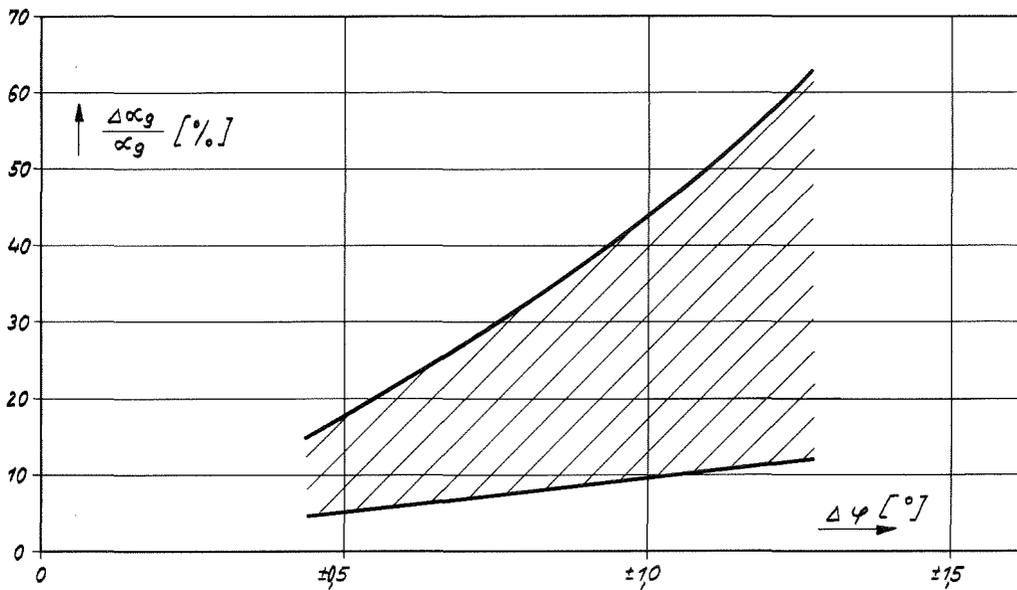
Genauigkeiten im Optimum von Versuchsanordnung II

Stableistung  $S = 750 \text{ W/cm}$ , Periodendauer  $T = 15 \text{ s}$

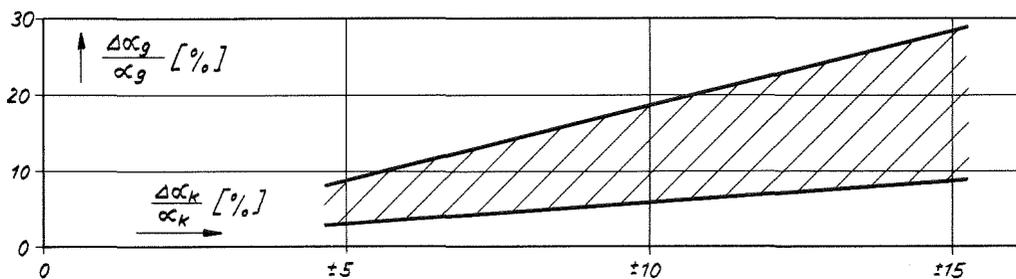
Abb. 11



Abweichung in der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  infolge eines Meßfehlers  $\Delta A/A$  in der Amplitude der Übertragungsfunktion



Abweichung in der Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  infolge eines Meßfehlers ( $\Delta \varphi$ ) in der Phase der Übertragungsfunktion



Abweichung in der Wärmedurchgangszahl  $\alpha_g$  infolge der Bestimmungsungenauigkeit  $\Delta \alpha_k / \alpha_k$  der äußeren Wärmeübergangszahl.

Abb. 12