

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

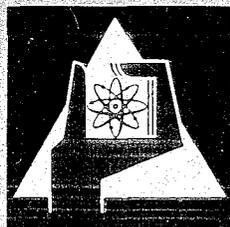
Juli 1970

KFK 1179
EUR 3708 d

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Einfluß der echten Totzeitsimulation auf das dynamische Verhalten
des Rechenmodells des geregelten Na 2-Reaktors

C. Koepp



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Juli 1970

KFK 1179

EUR 3708 d

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Einfluß der echten Totzeitsimulation auf das dynamische Verhalten
des Rechenmodells des geregelten Na 2-Reaktors

C. Koepp ^{*})

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

^{*}) delegiert von EURATOM, Brüssel

I n h a l t

1. Übersicht
2. Rechenmodell
 - 2.1 Voraussetzungen und Beschreibung
 - 2.2 Gleichungssystem
 - 2.3 Hilfsgleichungen
 - 2.4 Konstanten
 - 2.5 Temperaturwerte bei Nennleistung
3. Ergebnisse
 - 3.1 Untersuchte Varianten des Rechenmodells
 - 3.2 Regelschaltung
 - 3.3 Reglereinstellung
 - 3.4 Störverhalten bei rampenförmigen Kühlmitteldurchfluß-änderungen
 - 3.5 Störverhalten bei Reaktivitätsänderungen
 - 3.6 Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen
4. Literaturverzeichnis
5. Anhang: Nomenklatur
 - Abb.1 bis 00030

Zusammenfassung

Der Einfluß der echten Totzeitsimulation auf das Regelverhalten des Rechenmodells des Na 2 - Reaktors wurde untersucht. Die Totzeitsimulation wurde der allgemein üblichen Darstellung der Totzeitbeziehungen durch Verzögerungen 1.Ordnung gegenübergestellt. Dabei hat sich herausgestellt, daß die Darstellung der echten Totzeitsimulation nur bei den Gleichungen, die einen großen Einfluß auf das Regelverhalten des Rechenmodells haben (wie z.B. die Transportzeiten der Rohrleitungen im Primärnatriumkreislauf), ein wesentlich ungünstigeres Regelverhalten ergeben als die Darstellungen durch Verzögerungen 1.Ordnung. Die Untersuchungen wurden mit Hilfe des dynamischen Simulators DAS2 auf dem Digitalrechner IBM 360/65 durchgeführt.

Abstract

The influence of the correct deadtime simulation upon the automatic control behaviour of the Na₂-reactor model has been analysed. A comparison between deadtime-simulation and the generally applied simulation of deadtime relations by 1st order time delays has been made. The result was that only those deadtime relations, which have a great influence upon the dynamic behaviour of the model (such as the transporttime of the coolant in the primary sodium circuit tubes), produce a significantly worse automatic control behaviour, when they are simulated by deadtime blocks as compared to 1st order delay blocks. The analysis was carried out with the digital dynamic simulator DAS2 on an IBM 360/65 computer.

1. Übersicht

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der regeltechnischen Untersuchungen des Na 2 - Reaktors, die mit Hilfe des DAS2-Simulators [4] am Digitalrechner IBM 360/65 der GfK durchgeführt wurden, wiedergegeben. Einige Untersuchungen wurden auf der IBM-Rechenmaschine 360/91 in Garching ausgeführt. Für diese Rechenmaschine mußten die in [4] angegebenen Steuerkarten teilweise abgeändert werden. Dabei sollte untersucht werden, ob die allgemein übliche Darstellung der Totzeitbeziehungen im Rechenmodell durch Verzögerungen 1.Ordnung ein günstigeres Regelverhalten ergibt als die Darstellung der Totzeitbeziehungen durch echte Totzeitglieder.

Es wurden nur Untersuchungen mit der in Abb.1 angegebenen Regelschaltung gemacht. Diese Regelschaltung ergab schon ein so gutes Regelverhalten des Na 2 - Reaktors, daß keine weiteren Regelschaltungen untersucht wurden.

Die hauptsächlichlichen Ergebnisse sind:

- das Regelverhalten des Na 2 - Reaktors ist sehr gut. Der Na 2 - Reaktor erlaubt schnellere Leistungsänderungen als die Turbinen und Generatoren bei einem Kernkraftwerk in dieser Größenordnung zulassen.
 - Die echte Totzeitsimulation in den entsprechenden Temperaturbeziehungen des Reaktorkernes allein führt zu einem nur geringfügigen schlechteren Regelverhalten als die Simulation der Totzeitbeziehungen durch Verzögerungen erster Ordnung. Das hängt mit dem Einfluß der Totzeitbeziehungen auf das Verhalten des Gesamtreaktors zusammen, der im vorliegenden Fall, bedingt durch die relativ kleinen Totzeiten, gering ist.
- Betrachtet man dagegen den Einfluß der echten Totzeitsimulation beim geregelten Reaktor unter Einbeziehung des Primär-

natriumkreislaufes, so ergibt die echte Totzeitsimulation ein wesentlich schlechteres Regelverhalten. Diese Verschlechterung ist auf die großen Transportzeiten der Rohrleitungen zurückzuführen.

- Der Wert der Totzeit, die zwischen dem Auftreten einer Reaktivitätsänderung und dem darauf erfolgenden Ein- bzw. Ausfahren des Regelstabes liegt, hat einen großen Einfluß auf die Stabilität des Reaktors. Diese Totzeitbeziehung sollte auf jeden Fall durch ein Totzeitglied simuliert werden. Bei einem Reaktivitätssprung von $5 \cdot 10^{-4}$ und einer Totzeit von 97 Millisekunden ist der geregelte Reaktor unstabil. Erst bei einem Wert von 10 Millisekunden ist der Einfluß dieser Totzeit gering. Bei der Simulierung dieser Totzeitbeziehung durch eine Verzögerung erster Ordnung, wird der Reaktor selbst bei einer Verzögerungszeit von 8 Sekunden nicht unstabil.

2. Rechenmodell

2.1 Voraussetzungen und Beschreibung

Es wird angenommen, daß die Leistungserzeugung der Brenn- und Brutelemente in radialer Richtung unabhängig von der Lage im Reaktorkern ist und daß die Wärmeleitung in den Brenn- und Brutstäben nur in radialer Richtung erfolgt. Die Leistungserzeugung in axialer Richtung in den Brennstoffzonen der Brennelemente soll dagegen eine Cosinus-Verteilung haben.

In der neutronenkinetischen Gleichung zur Bestimmung des Neutronenflusses wird das Produkt aus der effektiven Neutronenlebensdauer und der ersten Ableitung des Neutronenflusses vernachlässigt. Das ist zulässig für die in diesem Bericht benutzten Reaktivitätsänderungen von maximal $1/3$ Dollar pro Sekunde, für die das Produkt aus Neutronenlebensdauer und erster Ableitung des Neutronenflusses sehr

klein ist. Damit erhält man anstelle einer Differentialgleichung erster Ordnung mit sehr kleinen Zeitkonstanten eine algebraische Gleichung für die Bestimmung des Neutronenflusses. Ersetzt man dann noch in dieser Gleichung den auf den Neutronenfluß bei Nennleistung bezogenen Neutronenfluß durch die auf Nennleistung bezogene Reaktorleistung, so erhält man die Bestimmungsgleichung für die Reaktorleistung.

Das Rechenmodell besteht aus der Hintereinanderschaltung des unteren Reaktorkühlmittelpenums, der Parallelschaltung eines Brenn- und eines radialen Brutstabes und des oberen Reaktorkühlmittelpenums (siehe Abb.2).

Die in den beiden Plena hervorgerufenen Verzögerungen der Änderung der Kühlmitteltemperatur wird durch eine Verzögerung erster Ordnung berücksichtigt. Der Brennstab wird in 5 axiale Zonen, 2 axiale Brutstabszonen und 3 axiale Brennstoffzonen aufgeteilt. Der radiale Brutstab wird in axialer Richtung nicht unterteilt. Jede Brutstoffzone (axiale und radiale) wird in radialer Richtung in einen Brutstoffbereich und eine Kühlmittelzone aufgeteilt. Der Wärmetransport vom Brutstoff durch Spalt und Brutstoffhülle wird nur durch einen Anteil am Wärmewiderstand zwischen dem Brutstoff und dem Kühlmittel berücksichtigt. Die axialen Brennstoffzonen werden in radialer Richtung in einen Brennstoffbereich, eine Hüllenzonenzone und eine Kühlmittelzone aufgeteilt. Dem Wärmetransport durch den Spalt des Brennstabes wird durch einen Anteil am Wärmewiderstand zwischen dem Brennstoff und der Hülle Rechnung getragen. Die Kühlmitteldurchflüsse im Na2-Reaktor sind durch die nachfolgende Gleichung festgelegt:

$$\frac{M_{KB}}{M_{KBN}} = \frac{M_{KBÜ}}{M_{KBÜN}} = \frac{M_{K1}}{M_{K1N}}$$

Die nachfolgenden Gleichungen für die Simulierung des Brenn- und des radialen Brutstabes sind [2] entnommen. Um allerdings den Einfluß der Kühlmitteltemperaturänderungen am Eingang der Kühlkanalzone auf die mittlere Kühlmitteltemperatur in der Kühlkanalzone richtig zu

erfassen, wurden die Gleichungen für den Kühlkanal nach [3, Kapitel 1.2.3] abgeändert.

Im Rechenmodell wird die Messung der Kühlmitteltemperaturen am Ausgang des Brennstabkühlkanals und am Reaktorausgang durch konstante Verzögerungen 1. Ordnung berücksichtigt. Als Regler werden ideale PI- und P-Regler simuliert. Das Produkt ($K_{R3} \cdot K_M$) aus dem Verstärkungsfaktor des P-Reglers und der auf die Zeit 1 sec bezogenen maximalen Änderung der Regelstabenstellung wurde durch eine Konstante ersetzt. Damit wird der P-Regler und der darauf folgende Regelstabantrieb durch eine Integrationsgleichung dargestellt. Die Verzögerungen, die durch den Regelstabantrieb, den Neutronenflußmesser und die Meßdatenverarbeitungselektronik hervorgerufen werden, sind durch die Hintereinanderschaltung eines Totzeitgliedes und einer Verzögerung 1. Ordnung, die vor den Regelstabantrieb gesetzt wurden, berücksichtigt worden.

Der Aufbau des Na2-Reaktors ist in [1] angegeben. Alle im vorliegenden Bericht benutzten Stoff- und Konstruktionsdaten sind aus [1] entnommen.

2.2 Gleichungssystem

$$T_{KB1}(t) = T_{KE} \cdot \left(t - K_5 \frac{M_{K1N}}{M_{K1}} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dT_{BÜZ1}}{dt} = K_{11} \cdot \frac{N}{N_N} - K_{12} \cdot (T_{BÜZ1} - T_{KB2})$$

$$T_{KB2} = T_{KB1} + \frac{1}{1 + K_7 \cdot \frac{M_{K4}}{M_{K1N}}} (T_{BÜZ1} - T_{KB1})$$

$$T_{KB3} = 2 T_{KB2} - T_{KB1}$$

$$T_{KB3}^* = T_{KB3} \cdot \left(t - \frac{M_{K1N}}{M_{K1}} K_{81} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dT_{B1}}{dt} = K_{16} \cdot \frac{N}{N_N} - K_{17} \cdot (T_{B1} - T_{CB1})$$

$$\frac{dT_{CB1}}{dt} = K_{24} \cdot (T_{B1} - T_{CB1}) - K_{25} \cdot (T_{CB1} - T_{KB4})$$

$$\frac{dT_{KB4}^*}{dt} = K_{35} \cdot (T_{CB1} - T_{KB4}^*) - K_{34} \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}} \cdot T_{KB4}^*$$

$$T_{KB4} = T_{KB4}^* + \frac{K_8 \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}}}{1 + K_8 \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}}} T_{KB3}^*$$

$$T_{KB5} = 2T_{KB4} - T_{KB3}^*$$

$$T_{KB5}^* = T_{KB5} \left(t - K_{83} \cdot \frac{M_{K1N}}{M_{K1}} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dT_{B2}}{dt} = K_{84} \cdot \frac{N}{N_N} - K_{17} \cdot (T_{B2} - T_{CB2})$$

$$\frac{dT_{CB2}}{dt} = K_{24} \cdot (T_{B2} - T_{CB2}) - K_{25} \cdot (T_{CB2} - T_{KB6})$$

$$\frac{dT_{KB6}^*}{dt} = K_{35} \cdot (T_{CB2} - T_{KB6}^*) - K_{34} \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}} \cdot T_{KB6}^*$$

$$T_{KB6} = T_{KB6}^* + \frac{K_8 \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}}}{1 + K_8 \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}}} T_{KB5}^*$$

$$T_{KB7} = 2T_{KB6} - T_{KB5}^*$$

$$T_{KB7}^*(t) = T_{KB7} \cdot \left(t - K_{83} \cdot \frac{M_{K1N}}{M_{K1}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dT_{B3}}{dt} = K_{16} \cdot \frac{N}{N_N} - K_{17} \cdot (T_{B3} - T_{CB3})$$

$$\frac{dT_{CB3}}{dt} = K_{24} \cdot (T_{B3} - T_{CB3}) - K_{25} \cdot (T_{CB3} - T_{KB8})$$

$$\frac{dT_{KB8}^*}{dt} = K_{35} \cdot (T_{CB3} - T_{KB8}^*) - K_{34} \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}} \cdot T_{KB8}^*$$

$$T_{KB8} = T_{KB8}^* + \frac{K_8 \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}}}{1 + K_8 \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}}} T_{KB7}^*$$

$$T_{KB9} = 2 T_{KB8} - T_{KB7}^*$$

$$T_{KB9}^* = T_{KB9} \left(t - K_{83} \cdot \frac{M_{K1N}}{M_{K1}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dT_{BÜZ2}}{dt} = K_{11} \cdot \frac{N}{N_N} - K_{12} \cdot (T_{BÜZ2} - T_{KB10})$$

$$T_{KB10} = T_{KB9}^* + \frac{1}{1 + K_7 \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}}} (T_{BÜZ2} - T_{KB9}^*)$$

$$T_{KB11} = 2 T_{KB10} - T_{KB9}^*$$

$$T_{KB11}(t) = T_{KB11} \left(t - K_{10} \frac{M_{K1N}}{M_{K1}} \right) \quad (6)$$

$$T_{KBÜ1}(t) = T_{KE} \left(t - K_6 \frac{M_{K1N}}{M_{K1}} \right) \quad (7)$$

$$\frac{dT_{BÜR}}{dt} = K_{31} \cdot \frac{N}{N_N} - K_{32} \cdot (T_{BÜR} - T_{KBÜ2})$$

$$T_{KBÜ2} = T_{KBÜ1} + \frac{1}{1 + K_9 \cdot \frac{M_{K1}}{M_{K1N}}} (T_{BÜR} - T_{KBÜ1})$$

$$T_{KBÜ3} = 2 T_{KBÜ2} - T_{KBÜ1}$$

$$T_{KB\ddot{U}A}(t) = T_{KB\ddot{U}3} \cdot \left(t - K_{41} \frac{M_{K1N}}{M_{K1}} \right) \quad (8)$$

$$T_{KA} = K_{39} \cdot T_{KBA} + K_{40} \cdot T_{KB\ddot{U}A}$$

$$\frac{dT_{KBTH}}{dt} = \frac{1}{K_{q1}} \cdot (T_{KBA} - T_{KBTH})$$

$$\frac{dT_{KRTH}}{dt} = \frac{1}{K_{q2}} \cdot (T_{KRA} - T_{KRTH})$$

$$\frac{dT_{KRA}}{dt} = \frac{M_{K1}}{K_{42} \cdot M_{K1N}} \cdot (T_{KA} - T_{KRA})$$

$$\frac{dT_{KE}}{dt} = \frac{M_{K1}}{K_4 \cdot M_{K1N}} \cdot (T_{KRE} - T_{KE})$$

$$T_B = \frac{1}{3} (T_{B1} + T_{B2} + T_{B3})$$

$$T_{CB} = \frac{1}{3} (T_{CB1} + T_{CB2} + T_{CB3})$$

$$T_{KB} = \frac{1}{3} (T_{KB4} + T_{KB6} + T_{KB8})$$

$$\frac{dT_{STR1}}{dt} = \frac{1}{K_{14}} (T_{KB} - T_{STR1})$$

$$\frac{dT_{STR2}}{dt} = \frac{1}{K_{14}} [0,5 \cdot (T_{KB2} + T_{KB10}) - T_{STR2}]$$

$$\frac{dT_{STR3}}{dt} = \frac{1}{K_{14}} (T_{KB\ddot{U}2} - T_{STR3})$$

$$\frac{N}{N_N} = \frac{1}{S_K - K_{62}} \left(K_{48} \frac{C_1}{C_{1N}} + K_{49} \frac{C_2}{C_{2N}} + K_{54} \frac{C_3}{C_{3N}} + K_{55} \frac{C_4}{C_{4N}} \right. \\ \left. + K_{61} \frac{C_5}{C_{5N}} + K_{60} \frac{C_6}{C_{6N}} \right)$$

$$\frac{d \frac{C_1}{C_{1N}}}{dt} = K_{45} \cdot \left(\frac{N}{N_N} - \frac{C_1}{C_{1N}} \right)$$

$$\frac{d \frac{C_2}{C_{2N}}}{dt} = K_{47} \cdot \left(\frac{N}{N_N} - \frac{C_2}{C_{2N}} \right)$$

$$\frac{d \frac{C_3}{C_{3N}}}{dt} = K_{51} \cdot \left(\frac{N}{N_N} - \frac{C_3}{C_{3N}} \right)$$

$$\frac{d \frac{C_4}{C_{4N}}}{dt} = K_{53} \cdot \left(\frac{N}{N_N} - \frac{C_4}{C_{4N}} \right)$$

$$\frac{d \frac{C_5}{C_{5N}}}{dt} = K_{56} \cdot \left(\frac{N}{N_N} - \frac{C_5}{C_{5N}} \right)$$

$$\frac{d \frac{C_6}{C_{6N}}}{dt} = K_{58} \cdot \left(\frac{N}{N_N} - \frac{C_6}{C_{6N}} \right)$$

$$\begin{aligned} \int_K = & \int_Y + \int_{ST} + K_{20} \cdot T_B + K_{18} \cdot \frac{1}{T_B} + K_{21} \cdot T_{STR1} + K_{22} \cdot T_{KB} \\ & + K_{23} \cdot T_{CB} + K_{27} \cdot (T_{BÜZ1} + T_{BÜZ2}) + K_{66} \cdot T_{STR2} + K_{67} \cdot (T_{KB2} + T_{KB10}) \\ & + K_{65} \cdot T_{KBÜ2} + 2K_{67} \cdot T_{STR3} + K_{68} \cdot T_{BÜR} + K_{63} \end{aligned}$$

$$Y_1 = K_{71} \cdot (T_{KRTH} - T_{KRTHN}) + \int_0^t K_{70} \cdot (T_{KRTH} - T_{KRTHN}) dt$$

$$Y_2 = K_{74} \cdot (Y_1 + T_{KBTH} - T_{KBTHN}) + \int_0^t K_{73} \cdot (T_{KBTH} - T_{KBTHN} + Y_1) dt$$

$$\frac{N_0}{N_N} = K_{75} \cdot (1 - Y_2) + K_{76} \cdot \frac{M_K}{M_{KN}}$$

$$\text{DEL TN} = \frac{N_0}{N_N} - \frac{N}{N_N}$$

$$\text{DEL TN}_T(t) = \text{DEL TN}(t - K_{97}) \quad (9)$$

$$\frac{d \text{DEL TN}_{TV}}{dt} = \frac{1}{K_{96}} \cdot (\text{DEL TN}_T - \text{DEL TN}_{TV}) \quad (10)$$

$$S_y = \int_0^t K_{77} \cdot \text{DEL TN}_{TV} \cdot dt$$

2.3 Hilfgleichungen

$$R_{BÜZ} = \frac{1}{8\pi \cdot \lambda_{BÜ} \cdot l_{BÜZ}} + \frac{1}{2\pi \cdot \alpha_{BÜC} \cdot r_{B1} \cdot l_{BÜZ}} + \frac{\ln \frac{r_{B3}}{r_{B2}}}{2\pi \cdot \lambda_C \cdot l_{BÜZ}} + \frac{1}{2\pi \cdot \alpha_{CBK} \cdot r_{B3} \cdot l_{BÜZ}}$$

$\alpha_{BÜC} = \alpha_{BC} = \text{konstant, aus [1] entnommen}$

$$\alpha_{CBK} = \frac{\lambda_K}{d_{Bhydr}} \left[0,93 + 10,81 \left(\frac{l_{st}}{d_{B3}} \right) - 2,01 \left(\frac{l_{st}}{d_{B3}} \right)^2 + 0,0252 \left(\frac{l_{st}}{d_{B3}} \right)^{0,273} \cdot (\psi \cdot Pe)^{0,8} \right]$$

= konstant = Mittelwert zwischen dem Wert bei Nenndurchfluß und dem Wert bei 30% Nenndurchfluß

$$R_{B1} = \frac{1}{8\pi \cdot \lambda_B \cdot l_{BZ}} + \frac{1}{2\pi \cdot \alpha_{BC} \cdot r_{B2} \cdot l_{BZ}} + \frac{\ln \frac{r_{CBM}}{r_{B2}}}{2\pi \cdot \lambda_C \cdot l_{BZ}}$$

$$\ln \frac{r_{CBM}}{r_{B2}} = \frac{r_{B3}^2}{r_{B3}^2 - r_{B2}^2} \ln \frac{r_{B3}}{r_{B2}} - 0.5$$

$$\ln \frac{r_{B3}}{r_{CBM}} = \ln \frac{r_{B3}}{r_{B2}} - \ln \frac{r_{CBM}}{r_{B2}}$$

$$R_{B2} = \frac{\ln \frac{r_{B3}}{r_{CBM}}}{2\pi \cdot \lambda_C \cdot l_{BZ}} + \frac{1}{2\pi \cdot \alpha_{CBK} \cdot r_{B3} \cdot l_{BZ}}$$

$$R_{BÜR} = \frac{1}{8\pi \cdot \lambda_{BÜ} \cdot l_{BÜ}} + \frac{1}{2\pi \cdot \alpha_{BÜC} \cdot r_{BÜ1} \cdot l_{BÜ}} + \frac{\ln \frac{r_{BÜ3}}{r_{BÜ2}}}{2\pi \cdot \lambda_C \cdot l_{BÜ}} + \frac{1}{2\pi \cdot \alpha_{CBÜK} \cdot r_{BÜ3} \cdot l_{BÜ}}$$

$\alpha_{CBÜK}$ wird nach derselben Formel wie α_{CBK} berechnet und gleich konstant gesetzt (Wert bei Nenndurchfluß)

$$\tau_{BÜ} = \frac{l_{BÜZ} \cdot \gamma_K \cdot F_{KB}}{M_{KBN}}$$

$$\tau_B = \frac{l_{BZ} \cdot \gamma_K \cdot F_{KB}}{M_{KBN}}$$

$$\tau_{BA} = \frac{(l_{BA} + l_{BÜZ}) \cdot \gamma_K \cdot F_{KB}}{M_{KBN}}$$

$$\tau_{BÜA1} = \frac{l_{BÜE} \cdot \gamma_K \cdot F_{KBÜ}}{M_{KBÜN}}$$

$$\tau_{BÜA2} = \frac{(l_{BÜ} + l_{BÜA}) \cdot \gamma_K \cdot F_{KBÜ}}{M_{KBÜN}}$$

$$\tau_E = \frac{l_{BE} \cdot \gamma_K \cdot F_{KB}}{M_{KBN}}$$

2.4 Konstanten

$$K_4 = \tau_{PLU} = 7 \text{ sec}$$

$$K_5 = \tau_E = 0,328 \text{ sec}$$

$$K_6 = \tau_{BÜA1} = 0,959 \text{ sec}$$

$$K_7 = 2M_{KBN} \cdot C_K \cdot R_{BÜZ} = 14,643 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$K_8 = 2M_{KBN} \cdot C_K \cdot R_{BZ} = 0,2658 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$K_9 = 2M_{KBÜN} \cdot C_K \cdot R_{BÜR} = 0,37 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$K_{10} = \tau_{BA} = 0,178 \text{ sec}$$

$$\begin{aligned}
K_{11} &= \frac{S_{BÜZ}}{C_{BÜ} \cdot \gamma_{BÜ}} = 13,53 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{sec}} \\
K_{12} &= \frac{1}{C_{BÜ} \cdot \gamma_{BÜ} \cdot V_{BÜZ} \cdot R_{BÜZ}} = 0,6602 \frac{1}{\text{sec}} \\
K_{14} &= \tau_{STR} = 0,1 \text{ sec} \\
K_{16} &= \frac{S_{B1}}{C_B \cdot \gamma_B} = 369,3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{sec}} \\
K_{17} &= \frac{1}{C_B \cdot \gamma_B \cdot V_{BZ} \cdot R_{B1}} = 0,6211 \frac{1}{\text{sec}} \\
K_{18} &= \alpha_{BA} \cdot T_{Bn}^2 = -4,495 \text{ } ^{\circ}\text{C} \\
K_{20} &= \alpha_B = -0,942 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \\
K_{21} &= \alpha_{STR1} = -3,472 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \\
K_{22} &= \alpha_{KB} = 0,0564 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \\
K_{23} &= \alpha_{CB} = 0,0768 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \\
K_{24} &= \frac{1}{C_C \cdot \gamma_C \cdot V_{CBZ} \cdot R_{B1}} = 1,2778 \frac{1}{\text{sec}} \\
K_{25} &= \frac{1}{C_C \cdot \gamma_C \cdot V_{CBZ} \cdot R_{B2}} = 34,93 \frac{1}{\text{sec}} \\
K_{27} &= \frac{\alpha_{BÜZ}}{2} = -0,093 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \\
K_{31} &= \frac{S_{BÜR}}{C_{BÜ} \cdot \gamma_{BÜ}} = 5,778 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{sec}} \\
K_{32} &= \frac{1}{C_{BÜ} \cdot \gamma_{BÜ} \cdot V_{BÜR} \cdot R_{BÜR}} = 0,286 \frac{1}{\text{sec}}
\end{aligned}$$

| | | | | | |
|----------|-----|--|-----|-----------------------|------------------------|
| K_{34} | $=$ | $\frac{2M_{KBN}}{f_K \cdot V_{KBZ}}$ | $=$ | 40,927 | $\frac{1}{\text{sec}}$ |
| K_{39} | $=$ | $\frac{M_{K11N}}{M_{K1N}}$ | $=$ | 0,8716 | |
| K_{40} | $=$ | $\frac{M_{K12N}}{M_{K1N}}$ | $=$ | 0,1284 | |
| K_{41} | $=$ | $\tau_{BÜA2}$ | $=$ | 1,47 | Sec |
| K_{42} | $=$ | τ_{PLO} | $=$ | 18 | Sec |
| K_{45} | $=$ | λ_1 | $=$ | 0,01305 | $\frac{1}{\text{sec}}$ |
| K_{47} | $=$ | λ_2 | $=$ | 0,0316 | $\frac{1}{\text{sec}}$ |
| K_{48} | $=$ | β_1 | $=$ | $0,732 \cdot 10^{-4}$ | |
| K_{49} | $=$ | β_2 | $=$ | $6,66 \cdot 10^{-4}$ | |
| K_{51} | $=$ | λ_3 | $=$ | 0,1365 | $\frac{1}{\text{sec}}$ |
| K_{53} | $=$ | λ_4 | $=$ | 0,3445 | $\frac{1}{\text{sec}}$ |
| K_{54} | $=$ | β_3 | $=$ | $5,66 \cdot 10^{-4}$ | |
| K_{55} | $=$ | β_4 | $=$ | $10,7 \cdot 10^{-4}$ | |
| K_{56} | $=$ | λ_5 | $=$ | 1,335 | $\frac{1}{\text{sec}}$ |
| K_{58} | $=$ | λ_6 | $=$ | 3,615 | $\frac{1}{\text{sec}}$ |
| K_{60} | $=$ | β_5 | $=$ | $1,56 \cdot 10^{-4}$ | |
| K_{35} | $=$ | $\frac{1}{C_K f_K V_{KBZ} \cdot R_{B2}}$ | $=$ | 51,33 | $\frac{1}{\text{sec}}$ |

$$\begin{aligned}
K_{61} &= \beta_6 &= 5,15 \cdot 10^{-4} \\
K_{62} &= \beta &= 30,462 \cdot 10^{-4} \\
K_{63} &= -K_{20} \cdot T_{BN} - \frac{K_{18}}{T_{BN}} - K_{21} \cdot T_{STR1N} + K_{22} \cdot T_{KBN} \cdot K_{23} \cdot T_{CBN} \\
&\quad - K_{27} \cdot (T_{BÜZ1N} + T_{BÜZ2N}) - K_{66} \cdot T_{STR2N} - K_{67} \cdot (T_{KB2N} + T_{KB10N}) \\
&\quad - K_{65} \cdot T_{KBÜ2N} - 2K_{67} \cdot T_{STR3N} - K_{68} \cdot T_{BÜR} \\
&= 0,037147 \\
K_{65} &= \alpha_{KBÜR} &= -0,0609 \cdot 10^{-5} &\frac{1}{\text{sec}} \\
K_{66} &= \alpha_{STR2} &= -0,18 \cdot 10^{-5} &\frac{1}{\text{sec}} \\
K_{67} &= \frac{\alpha_{KBÜZ}}{2} = \frac{\alpha_{STR3}}{2} &= -0,11 \cdot 10^{-5} &\frac{1}{\text{sec}} \\
K_{68} &= \alpha_{BÜR} &= -0,529 \cdot 10^{-5} &\frac{1}{\text{sec}} \\
K_{70} &= \frac{K_{R1}}{T_{n1}} \\
K_{71} &= K_{R1} \\
K_{73} &= \frac{K_{R2}}{T_{n2}} \\
K_{74} &= K_{R2} \\
K_{75} &= &= 0,4 \\
K_{76} &= &= 0,6 \\
K_{77} &= K_{R3} \cdot K_M &= 0,05 \\
K_{81} &= \tau_{BÜ} &= 0,062 &\text{Sec}
\end{aligned}$$

$$K_{83} = \tau_B = 0,049 \text{ Sec}$$

$$K_{84} = \frac{S_{B2}}{C_B \cdot \gamma_B} = 509,1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$K_{91} = \tau_{TH1} = 1 \text{ Sec}$$

$$K_{92} = \tau_{TH2} = 5 \text{ Sec}$$

$$K_{96} = \tau_{TNEUTR}$$

$$K_{97} = \tau_{VNEUTR}$$

Die in Abb.3 verwendeten K-Werte sind nicht alle identisch mit den hier angegebenen Werten. Bedingt durch die Realisierung des Blockschaltbildes können sie um einen konstanten Faktor von diesen Werten abweichen.

2.5 Temperaturwerte bei Nennleistung

$$T_{B1} = 1026,44 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{B2} = 1324,66 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{B3} = 1156,24 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_B = 1169,11 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{BÜR} = 454,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{BÜZ1} = 401,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{BÜZ2} = 589,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{CB1} = 431,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

| | | |
|-------------|---|-----------|
| T_{CB2} | = | 504,99 °C |
| T_{CB3} | = | 561,65 °C |
| T_{CB} | = | 499,5 °C |
| T_{KE} | = | 380 °C |
| T_{KB1} | = | 380 °C |
| T_{KB2} | = | 381,40 °C |
| T_{KB3} | = | 382,80 °C |
| T_{KB3}^* | = | 382,80 °C |
| T_{KB4}^* | = | 240,75 °C |
| T_{KB4} | = | 410,1 °C |
| T_{KB5} | = | 437,4 °C |
| T_{KB5}^* | = | 437,4 °C |
| T_{KB6}^* | = | 280,95 °C |
| T_{KB6} | = | 475 °C |
| T_{KB7} | = | 512,6 °C |
| T_{KB7}^* | = | 512,6 °C |
| T_{KB8}^* | = | 312,49 °C |
| T_{KB8} | = | 539,9 °C |
| T_{KB9} | = | 567,2 °C |
| T_{KB9}^* | = | 567,2 °C |
| T_{KB10} | = | 568,6 °C |
| T_{KB11} | = | 570,0 °C |

| | | |
|------------|---|----------|
| T_{KBA} | = | 570 °C |
| T_{KBTH} | = | 570 °C |
| $T_{KBÜ1}$ | = | 380 °C |
| $T_{KBÜ2}$ | = | 434,6 °C |
| $T_{KBÜ3}$ | = | 489,2 °C |
| $T_{KBÜA}$ | = | 489,2 °C |
| T_{KA} | = | 559,6 °C |
| T_{KRA} | = | 559,6 °C |
| T_{KRTH} | = | 559,6 °C |
| T_{KRE} | = | 380 °C |
| T_{STR1} | = | 475 °C |
| T_{STR2} | = | 475 °C |
| T_{STR3} | = | 434,6 °C |

3. Ergebnisse

3.1 Untersuchte Varianten des Rechenmodells

Es wurden Untersuchungen an den folgenden 4 verschiedenen Varianten des in Abschnitt 2 beschriebenen Rechenmodells ausgeführt:

Rechenmodell A: ist identisch mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Rechenmodell. In diesem Rechenmodell sind die Gleichungen (1) bis (8) durch Totzeitglieder

simuliert worden. Das Blockschaltbild dieses Modells ist in Abb.3 wiedergegeben. Das Rechenmodell A enthält:

- 21 Differentialgleichungen
- 8 Verzögerungsgleichungen 1.Ordnung
- 9 Totzeitgleichungen

Rechenmodell B: dasselbe Rechenmodell wie A, nur sind die Gleichungen (1) bis (8) durch Verzögerungsglieder 1.Ordnung simuliert worden. Das Rechenmodell B enthält:

- 21 Differentialgleichungen
- 16 Verzögerungsgleichungen 1.Ordnung
- 1 Totzeitgleichung

Rechenmodell C: dies ist ein Rechenmodell, das den Na2-Reaktor, den Kühlmittelprimärkreislauf und den Zwischenwärmetauscher erfaßt. Hier wurde jedoch für die Simulierung des Reaktors ein vereinfachtes Reaktor-rechenmodell benutzt. Der Brennstab wurde in axialer Richtung nur in eine axiale Brennstoffzone unterteilt und die Gleichungen(9) und (10) wurden nicht berücksichtigt. Die Totzeitbeziehungen wurden durch Totzeitglieder simuliert. Das Rechenmodell C enthält:

- 18 Differentialgleichungen
- 9 Verzögerungsgleichungen 1.Ordnung
- 10 Totzeitgleichungen

Rechenmodell D: dasselbe Rechenmodell wie C, nur sind die Totzeitbeziehungen durch Verzögerungsglieder 1.Ordnung simuliert worden. Das Rechenmodell D enthält:

- 18 Differentialgleichungen
- 19 Verzögerungsgleichungen 1.Ordnung

3.2 Regelschaltung

Die Regelschaltung ist in Abb.2 schematisch dargestellt. Regelgröße ist die Kühlmitteltemperatur am Reaktorausgang. Am Eingang des PI-Führungsreglers wird die Regelgröße mit ihrem Sollwert verglichen. Das Ausgangssignal des Führungsreglers ist die Führungsgröße des PI-Folgereglers. Hilfsregelgröße des PI-Folgereglers ist die Kühlmitteltemperatur am Brennelementkühlkanalausgang. Die Führungsgröße des nachgeschalteten P-Folgereglers setzt sich aus dem Ausgangssignal des PI-Folgereglers und dem Durchflußsignal des Primärkreislaufes zusammen. Hilfsregelgröße dieses Reglers ist die Reaktorleistung (bzw.der Neutronenfluß). Das Ausgangssignal des P-Folgereglers steuert den Regelstabantrieb.

3.3 Reglereinstellung

Die beiden PI-Regler(siehe Abb.1) sind bei rampenförmigen Kühlmitteldurchflußänderungen von 100% auf 10% Nenndurchfluß mit einer Durchflußänderungsgeschwindigkeit von 10% Nenndurchfluß pro Minute optimiert worden. Bei den Rechenmodellen C und D wurde der Kühlmitteldurchfluß im Primärkreislauf durch die Beziehung

$$\frac{M_{K1}}{M_{K1N}} = 1.01111 \frac{M_{K2}}{M_{K2N}} - 0.01111$$

festgelegt. Damit wird trotz sinkender Grädigkeit des Zwischenwärmetauschers vermieden, daß die Kühlmitteltemperatur am Zwischenwärmetauscherausgang auf der Sekundärseite bei niedrigem Kühlmitteldurchfluß höher wird als die Kühlmitteltemperatur am Zwischenwärmetauschereingang auf der Primärseite. Das Produkt $K_{R3} \cdot K_M$ wurde nicht optimiert. Es ist gleich

$$K_{R3} \cdot K_M = 0,05 \frac{\% \text{ Reaktivitätsänderung}}{\% \text{ Leistungsänderung}}$$

gesetzt worden.

Abb.00004 bzw. Abb.00005 zeigt den Verlauf der Regelgröße T_{KRA} und der Hilfsgröße T_{KBA} beim Rechenmodell A bzw. B für eine rampenförmige Kühlmitteldurchflußänderung von 100% auf 10% Nenndurchsatz bei einer Durchflußänderungsgeschwindigkeit von 10% Nenndurchfluß pro Minute. (Das Totzeitglied und das Verzögerungsglied 1.Ordnung (Gleichung (9) und (10)), die die Verzögerungen in der Meßelektronik und im Regelstab wiedergeben, sind bei diesen Untersuchungen nicht im Rechenmodell enthalten gewesen.) Man sieht, daß die Regelgröße T_{KRA} und die Hilfsgröße T_{KBA} bei beiden Rechenmodellen in etwa denselben Verlauf haben. Die beiden Rechenmodelle haben aber nicht dieselbe Reglereinstellung. Beim Rechenmodell A mußte beim PI-Folgeregler die Nachstellzeit T_{n2} und der Verstärkungsfaktor K_{R2} gegenüber den Werten beim Rechenmodell B etwas verkleinert werden. Bei gleicher Reglereinstellung zeigt das Rechenmodell A eine stärkere Tendenz zur Instabilität.

| <u>Ein-</u> <u>stell-</u> <u>werte:</u> | <u>Rechenmodell A</u> | <u>Rechenmodell B</u> |
|---|--|--|
| K_{R1} | 0,03 $\frac{\% \text{Stellbereichsänderung}}{\text{Grd Celsius}} \frac{\text{Temperaturänderung}}$ | idem |
| T_{n1} | 5 sec | idem |
| K_{R2} | 0,20 $\frac{\% \text{Stellbereichsänderung}}{\text{Grd Celsius}} \frac{\text{Temperaturänderung}}$ | 0,25 $\frac{\% \text{Stellbereichsänderung}}{\text{Grd Celsius}} \frac{\text{Temperaturänderung}}$ |
| T_{n2} | 8 sec | 10 sec |

Um beim Rechenmodell C auch nur annähernd dieselbe Stabilität wie beim Rechenmodell D für rampenförmige Kühlmitteldurchflußänderungen zu erhalten, mußte der Verstärkungsfaktor und die Nachstellzeit beider PI-Regler gegenüber den Werten beim Rechenmodell D verändert werden. Beim Rechenmodell C konnte, bedingt durch das einfachere Rechenmodell des Reaktors eine günstigere Reglereinstellung als bei den Rechenmodellen A und B genommen werden.

Ein-
stell-
werte:

| | <u>Rechenmodell C</u> | | <u>Rechenmodell D</u> | |
|----------|-----------------------|--|-----------------------|--|
| K_{R1} | 0,025 | $\frac{\% \text{Stellbereichsänderung}}{\text{Grd Celsius}} \cdot \text{Temperaturänderung}$ | 0,03 | $\frac{\% \text{Stellbereichsänderung}}{\text{Grd Celsius}} \cdot \text{Temperaturänderung}$ |
| T_{n1} | 4,17 | sec | 1,5 | sec |
| K_{R2} | 0,2 | $\frac{\% \text{Stellbereichsänderung}}{\text{Grd Celsius}} \cdot \text{Temperaturänderung}$ | 0,3 | $\frac{\% \text{Stellbereichsänderung}}{\text{Grd Celsius}} \cdot \text{Temperaturänderung}$ |
| T_{n2} | 10 | sec | 7,5 | sec |

3.4 Störverhalten bei rampenförmigen Kühlmitteldurchflußänderungen

Die Abb.00006 bis 00016 und 00018 bis 00020 zeigen den zeitlichen Verlauf der Temperaturen bzw. der Reaktorleistung, der Reaktivität oder der Kühlmitteldurchflüsse bei einer rampenförmigen Kühlmitteldurchflußänderung (des Kühlmittelprimärkreislaufes bei den Rechenmodellen A und B bzw. des Kühlmittelsekundärkreislaufes bei den Rechenmodellen C und D) von 100% auf 25% Nenndurchfluß mit einer Durchflußänderungsgeschwindigkeit von 10% Nenndurchfluß pro Minute. Die Abb.00006 bis 00015 beziehen sich auf das Rechenmodell A, Abb.00016 auf das Rechenmodell B, Abb.00018 und 00019 auf das Rechenmodell C und Abb.00020 auf das Rechenmodell D. In den Abb.00006 und 00016, die den zeitlichen Verlauf der Regelgröße T_{KRA} und der Hilfsregelgröße T_{KBA} beim Rechenmodell A(00006) und beim Rechenmodell B(00016) wiedergeben, ist ersichtlich, daß bei beiden Rechenmodellen das Regelverhalten in etwa gleich gut ist. Den in den Abb. 00006 und 00016 dargestellten Untersuchungen liegt ein Totzeitfaktor (τ_{TNEUTR}) von 40 Millisekunden und ein Verzögerungsfaktor (τ_{VNEUTR}) 1. Ordnung von 400 Millisekunden für die Berücksichtigung der Verzögerungen in der Meßelektronik und beim Regelstab zugrunde. Diese beiden Faktoren haben für diese Werte

keinen Einfluß auf das Regelverhalten des Na₂-Reaktors für die oben genannte Durchflußstörung. Es ist also nicht notwendig bei dynamischen Untersuchungen an Reaktoren, in denen die Störgröße als rampenförmige Änderung des Kühlmitteldurchflusses auftritt, Rechenmodelle mit echter Totzeitsimulation zu benutzen, solange die Totzeitfaktoren nicht wesentlich größer (im Vergleich zu den übrigen Zeitkonstanten) als in dem vorliegenden Rechenmodell A sind.

Ein Vergleich der Abb.00006 und 00016 mit der Abb.00020, die den zeitlichen Verlauf der Regelgröße T_{KRA} und der Hilfsregelgröße T_{KBA} bei Rechenmodell D wiedergibt, zeigt, daß das Regelverhalten des Rechenmodells D ebenso gut ist wie das Regelverhalten der Rechenmodelle A und B (man muß von dem etwas besseren Regelverhalten beim Rechenmodell D absehen, denn dieses ist auf die günstigere Reglereinstellung infolge der einfacheren Reaktordarstellung zurückzuführen). Beim Rechenmodell D wird dieses günstige Regelverhalten erzielt, obwohl es, zusätzlich zu den Rechenmodellen A und B, den Kühlmittelprimärkreislauf und den Zwischenwärmetauscher beinhaltet und damit eine zusätzliche Störgröße, nämlich die Kühlmitteltemperatur am Reaktoreingang, enthält. Daraus kann geschlossen werden, daß die Simulierung der Transportzeiten der Rohrleitungen des Kühlmittelprimärkreislaufes beim Rechenmodell D durch Verzögerung 1.Ordnung ein zu günstiges Regelverhalten ergibt. Diese Feststellung wird erhärtet durch den Vergleich der Abb.00020 mit Abb.00018, die das Verhalten der Regelgröße T_{KRA} und der Hilfsregelgröße T_{KBA} beim Rechenmodell C zeigt. Beim Rechenmodell C werden die Transportzeiten der Rohrleitungen des Kühlmittelprimärkreislaufes durch Totzeitglieder simuliert. Abb.00018 zeigt ein wesentlich schlechteres Regelverhalten als Abb.00020, die maximale Regelabweichung für T_{KBA} beträgt $10,12^{\circ}\text{C}$ beim Rechenmodell C, mehr als das Doppelte des Wertes ($4,75^{\circ}\text{C}$) beim Rechenmodell D. Natürlich entspricht die Simulierung der Rohrleitungstransportzeiten auch nicht ganz genau dem tatsächlichen Sachverhalt, denn es werden z.B. keine Turbulenzen und nicht der Wärmeübergang zwischen dem Kühlmittel und der Rohrwand berücksichtigt. Da aber die Vernachlässigung dieser Dämpfungseffekte ein schlechteres Regelverhalten ergibt, liegt man mit dieser Simulierung auf der sicheren Seite. Deshalb sollte man bei dynamischen Untersuchungen, in denen Transportzeiten

in der Größenordnung wie für die Rohrleitungen des Kühlmittelprimärkreislaufes des Rechenmodells C vorkommen, die Totzeiten durch echte Totzeitglieder simulieren.

In Abb.00017 ist der zeitliche Verlauf der Regelgröße T_{KRA} und der Hilfsregelgröße T_{KBA} bei einer rampenförmigen Kühlmitteldurchflußänderung von 100% auf 25% Nenndurchfluß mit einer Durchflußänderungsgeschwindigkeit von 20% Nenndurchfluß pro Minute für das Rechenmodell A wiedergegeben. Die maximale Regelabweichung für T_{KBA} beträgt $15,96^{\circ}\text{C}$ gegenüber $7,17^{\circ}\text{C}$ bei Abb.00006.

Aus den Abb.00006, 00016, 00018 und 00020 ist die Dämpfungswirkung des Kühlmittelplenums über dem Reaktorkern auf die Temperaturänderungen ersichtlich. Bei den rampenförmigen Kühlmitteldurchflußänderungen mit einer Durchflußänderungsgeschwindigkeit von 10% Nenndurchfluß pro Minute beträgt die maximale Regelabweichung T_{KRA} - Sollwert 1 bis 2°C weniger als die maximale Regelabweichung T_{KBA} - Sollwert.

Abschließend wird die benötigte Rechenmaschinenzeit auf der IBM 360/65 der GfK für einige oben dargestellte Untersuchungen angegeben:

| | |
|---------------------|---------------------|
| Abb.00004 | 1 Stunde 20 Minuten |
| Abb.00005 | 1 " 11,5 " |
| Abb.00006 bis 00015 | 1 " 55 " |

Die längere Rechenmaschinenzeit für die Abb.00006 bis 00015 gegenüber Abb.00004 ergibt sich aus dem Hinzufügen des Totzeitgliedes und des Verzögerungsgliedes 1.Ordnung, zur Berücksichtigung der Verzögerungen in der Meßelektronik und im Regelstab, im Rechenmodell.

3.5 Störverhalten bei Reaktivitätsänderungen

Um den Einfluß der Verzögerungen der Meßelektronik und des Regelstabes zu erfassen, wurde der zeitliche Verlauf der bezogenen Reaktorleistung bei einer sprungförmigen Reaktivitätsänderung von

$5 \cdot 10^{-4}$ bei einer Reaktorleistung von 100% Nennleistung für verschiedene Werte von $\bar{\tau}_{TNEUTR}$ und $\bar{\tau}_{VNEUTR}$ untersucht. Außer den in Abb.00027 dargestellten Untersuchungen wurden alle diese Untersuchungen mit dem Rechenmodell A durchgeführt. Der Reaktivitäts-sprung erfolgte bei den Untersuchungen am Rechenmodell A bei $t = 2$ Sekunden und am Rechenmodell B bei $t = 2,5$ Sekunden.

In der Abb.00021 bzw.00022 ist der zeitliche Verlauf der bezogenen Reaktorleistung für den unregulierten bzw. für den regulierten Na2 - Reaktor mit $\bar{\tau}_{TNEUTR} = 0$ und $\bar{\tau}_{VNEUTR} = 0$ wiedergegeben.

Die Abb.00023 und 00024 zeigen den zeitlichen Verlauf der Regelgröße T_{KRA} und der Hilfsregelgrößen T_{KBA} und N/N_N beim regulierten Na2-Reaktor mit:

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_{TNEUTR} &= 10 \text{ Millisekunden} \\ \bar{\tau}_{VNEUTR} &= 100 \text{ Millisekunden}\end{aligned}$$

Die Regelabweichung T_{KBA} - Sollwert ist kleiner als 1°C und die Regelgröße T_{KRA} ändert sich überhaupt nicht. Auch der Verlauf der Reaktorleistung ist nicht wesentlich schlechter als bei Abb.00022. Diese Werte für $\bar{\tau}_{TNEUTR}$ und $\bar{\tau}_{VNEUTR}$ sind in der Praxis ohne allzuviel Aufwand zu erreichen. Deshalb sollte die Steuerung des Regelstabantriebes und der Regelstabantrieb selbst, die den Hauptanteil der Verzögerung ergeben, so ausgelegt werden, daß $\bar{\tau}_{TNEUTR} \leq 10$ Millisekunden und $\bar{\tau}_{VNEUTR} \leq 100$ Millisekunden ist.

Die Abb.00025 und 00026 zeigen den Verlauf der Regelgröße T_{KRA} und der Hilfsregelgrößen T_{KBA} und N/N_N beim regulierten Na2-Reaktor mit:

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_{TNEUTR} &= 40 \text{ Millisekunden} \\ \bar{\tau}_{VNEUTR} &= 400 \text{ Millisekunden}\end{aligned}$$

In Abb.00027 werden für das Rechenmodell B dieselben Untersuchungen wie in Abb.00026 für das Rechenmodell A wiedergegeben. Zwischen den beiden Abbildungen gibt es keinen merklichen Unterschied. Es besteht

also auch für diese Art von Untersuchungen keine Notwendigkeit, die Gleichungen (1) bis (8) im Rechenmodell A durch Totzeitglieder zu simulieren. Das in den Abb.00026 und 00027 wiedergegebene Regelverhalten ist viel schlechter als das in Abb.00024 dargestellte Regelverhalten. Aber dieses Regelverhalten ist noch befriedigend, denn der Regelkreis ist stabil und das Ausregeln der Störung ist noch relativ schnell. Zieht man außerdem in Betracht, daß bei diesen Werten τ_{TNEUTR} und τ_{VNEUTR} keinen Einfluß auf das Verhalten des geregelten Reaktors für rampenförmige Kühlmitteldurchflußänderungen haben, so sind $\tau_{TNEUTR} = 40$ Millisekunden und $\tau_{VNEUTR} = 400$ Millisekunden noch zulässige Werte.

In Abb.00028 ist der Verlauf der bezogenen Reaktorleistung beim geregelten Na2-Reaktor wiedergegeben für:

$$\begin{aligned}\tau_{TNEUTR} &= 95 \text{ Millisekunden} \\ \tau_{VNEUTR} &= 0 \text{ Millisekunden}\end{aligned}$$

Mit diesem Wert von τ_{TNEUTR} liegt man schon an der Stabilitätsgrenze, die sich für diesen Fall bei $\tau_{TNEUTR} = 97$ Millisekunden befindet. Mit steigenden τ_{VNEUTR} - Werten wird die Stabilitätsgrenze für noch niedrigere τ_{TNEUTR} - Werte erreicht. Aber mit τ_{TNEUTR} - Werten, die kleiner als 60 Millisekunden sind, wird selbst bei τ_{VNEUTR} - Werten von einigen Sekunden die Stabilitätsgrenze nicht mehr erreicht. Bei $\tau_{VNEUTR} = 100$ Millisekunden wird die Stabilitätsgrenze bei einem τ_{TNEUTR} - Wert von etwa 66 Millisekunden erreicht.

Die Abb.00029 und 00030 zeigen den Verlauf der Regelgröße T_{KRA} und der Hilfsregelgrößen T_{KBA} und N/N_N beim geregelten Na2-Reaktor mit:

$$\begin{aligned}\tau_{TNEUTR} &= 0 \\ \tau_{VNEUTR} &= 8 \text{ Sekunden}\end{aligned}$$

Für diesen τ_{VNEUTR} - Wert ist das Regelverhalten schlecht, aber noch stabil. Die Ausregelung der Störung erfolgt auch noch relativ schnell.

Aus den Abb.00021 bis 00030 geht hervor, daß nur die Totzeiten in der Meßelektronik und im Regelstab zu Unstabilitäten bei den diesen Untersuchungen zugrunde liegenden Störgrößen führen. $\bar{\tau}_{VNEUTR}$ -Werte von 8 Sekunden werden mit den heute üblichen Meßgeräten und Regelstabantrieben weit unterschritten. $\bar{\tau}_{TNEUTR}$ sollte nicht größer als 40 Millisekunden gewählt werden. Um eine sehr schnelle Ausregelung von Reaktivitätsänderungen zu bekommen, muß man $\bar{\tau}_{TNEUTR}$ -Werte um 10 Millisekunden erreichen. Kleinere $\bar{\tau}_{TNEUTR}$ -Werte bringen nur noch unwesentliche Verbesserungen. Für $\bar{\tau}_{TNEUTR} = 1$ Millisekunde und $\bar{\tau}_{VNEUTR} = 10$ Millisekunden ist überhaupt kein Unterschied gegenüber Abb.00022 festzustellen.

Die benötigte Rechenmaschinenzeit auf der IBM 360/65 der GfK lag zwischen 6 und 30 Minuten für eine Untersuchung.

3.6 Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen

Aus den Untersuchungen in diesem Bericht lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

1. Diese Untersuchungen bestätigen für kleine Reaktivitätsänderungen ($< 0,33$ Dollar) die in [1] nachgewiesene inhärente Stabilität des unregulierten Reaktors bei großen Reaktivitätsänderungen.
2. Die hier vorgeschlagene Regelung des Na2-Reaktors ist für die vorliegenden Temperaturkoeffizienten sehr gut. Wäre die Betriebsart des Kernkraftwerkes bekannt, könnte sie noch optimaler ausgebaut werden. Für die meisten Betriebsarten ist eine so gute Stabilität, wie die in Abb.00004 gezeigte, bei 10% Nennleistung nicht notwendig, da die Regelung nicht benutzt wird, um das Kraftwerk bis auf 10% Nennleistung herunterzufahren.
3. Bei der Reaktorsimulation für Untersuchungen des Regelverhaltens sollte die Totzeit, die durch die Meßelektronik und den Regelstab hervorgerufen wird, durch ein Totzeitglied simuliert werden.

4. Dasselbe gilt für die Transportzeiten der Rohrleitungen im Kühlmittelprimärkreislauf, sofern sie gegenüber den übrigen Zeitkonstanten nicht um mindestens eine Größenordnung kleiner sind als bei den vorliegenden Rechenmodellen.

5. Das einfachere Rechenmodell des Brennstabes (keine axiale Unterteilung der Brennstoffzone des Brennstabes) hat ein merklich besseres Regelverhalten als das Rechenmodell, wo die Brennstoffzone des Brennstabes axial in 3 Zonen unterteilt ist. Für genaue Untersuchungen genügt das einfachere Rechenmodell nicht.

6. Der DAS2-Simulator hat sich für diese Art von dynamischen Untersuchungen bewährt. Sein größter Nachteil sind die höheren Kosten gegenüber dem Analogrechner.

4. Literaturverzeichnis

- [1] KFK 660 [EUR 3706 d]
K. Gast, E.G.Schlechtendahl und al.
Schneller Natriumgekühlter Reaktor Na2.
- [2] KFK 465
W. Frisch, E.Schönfeld
Rechenprogramme für Dynamik und Stabilität eines
schnellen Leistungsreaktors.
- [3] KFK 657 [EUR 3693d]
W. Frisch, G.Woite
Analogrechnermodell für dampfgekühlte schnelle Reaktoren
mit Direktkreislauf.
- [4] KFK 1142 [EUR 3695d]
C. Koeppe
DAS2 - Ein dynamischer Simulator mit TOTZEIT-Gliedern
für Digitalrechner.
- [5] O.E.Dwyer
A.I.CH. E Journal, Vol.9, Nr.2, 1963

5. Anhang

Nomenklatur

Die Bedeutung der Blocksymbole in Abb.3 ist [4] zu entnehmen.
Der Index N bedeutet den Wert bei Nennleistung.

| <u>Symbol</u> | <u>Bedeutung</u> |
|----------------------|--|
| C_B | Spezifische Wärme des Brennstoffes |
| $C_{BÜ}$ | Spezifische Wärme des Brutstoffes |
| C_C | Spezifische Wärme des Stabhüllenmaterials |
| C_K | Spezifische Wärme des Kühlmittels |
| $\frac{C_i}{C_{iN}}$ | Die auf den Wert bei Nennleistung bezogene Konzentration der i-ten Gruppe der verzögerten Neutronen |
| $d_{B \text{ hydr}}$ | Hydraulischer Durchmesser des Brennstabkühlkanals |
| d_{B3} | Äußerer Durchmesser der Brennstabhülle |
| F_{KB} | Querschnittsfläche des Brennstabkühlkanals |
| $F_{KBÜ}$ | Querschnittsfläche des radialen Brutstabkühlkanals |
| K_M | Die auf die Zeit 1 Sekunde bezogene maximale Änderung der Regelstabstellung |
| K_{R1} | Verstärkungsfaktor des PI-Führungsreglers |
| K_{R2} | Verstärkungsfaktor des PI-Folgereglers |
| K_{R3} | Verstärkungsfaktor des P-Folgereglers |
| L_{BA} | Abstand vom Ende der oberen axialen Brutstoffzone des Brennstabes bis zum Brennstab-Thermoelement |
| L_{BE} | Abstand vom Ausgang des unteren Kühlmittelplenums bis zum Anfang der unteren axialen Brutstoffzone des Brennstabes |
| $L_{BÜ}$ | Länge der Brutstoffzone des radialen Brutstabes |
| $L_{BÜA}$ | Abstand vom Ende der Brutstoffzone des radialen Brutstabes bis zum Eingang des oberen Kühlmittelplenums |
| $L_{BÜE}$ | Abstand vom Ausgang des unteren Kühlmittelplenums bis zum Anfang der Brutstoffzone des radialen Brutstabes |

SymbolBedeutung

| | |
|-----------|---|
| $L_{BÜZ}$ | Länge der Brutstoffzone des Brennstabes |
| L_{BZ} | Länge der axialen Brennstoffzonen des Brennstabes |
| L_{St} | Abstand zwischen 2 benachbarten Brennstäben |
| M_{KB} | Kühlmitteldurchfluß im Brennstabkühlkanal |
| $M_{KBÜ}$ | Kühlmitteldurchfluß im Brutstabkühlkanal |
| M_{K1} | Kühlmitteldurchfluß im Primärkreislauf |
| M_{K11} | Kühlmitteldurchfluß in allen Brennelementen |
| M_{K12} | Kühlmitteldurchfluß in allen radialen Brutelementen |
| M_{K2} | Kühlmitteldurchfluß im Sekundärkreislauf |
| N | Reaktorleistung |
| Pe | Peclet - Zahl |
| r_{B1} | Radius des Brennstoffpellets des Brennstabes |
| r_{B2} | Innerer Radius der Brennstabhülle |
| r_{B3} | Äußerer Radius der Brennstabhülle |
| $r_{BÜ1}$ | Radius des Brutstoffpellets des radialen Brennstabes |
| $r_{BÜ2}$ | Innerer Radius der radialen Brennstabhülle |
| $r_{BÜ3}$ | Äußerer Radius der radialen Brennstabhülle |
| R_{B1} | Wärmewiderstand zwischen dem Brennstoff und der Hülle in den axialen Brennstoffzonen des Brennstabes |
| R_{B2} | Wärmewiderstand zwischen der Hülle und dem Kühlmittel in den axialen Brennstoffzonen des Brennstabes |
| $R_{BÜR}$ | Wärmewiderstand zwischen dem Brutstoff und dem Kühlmittel beim radialen Brutstab |
| $R_{BÜZ}$ | Wärmewiderstand zwischen dem Brutstoff und dem Kühlmittel in den axialen Brutstoffzonen des Brennstabes |
| S_{B1} | Spezifische Wärmeleistung des Brennstoffes in der 1. und 3. axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| S_{B2} | Spezifische Wärmeleistung des Brennstoffes in der 2. axialen Brennstoffzone des Brennstabes |

SymbolBedeutung

| | |
|-------------|--|
| $S_{BÜR}$ | Spezifische Wärmeleistung des Brutstoffes des radialen Brutstabes |
| $S_{BÜZ}$ | Spezifische Wärmeleistung des Brutstoffes in den axialen Brutstoffzonen des Brennstabes |
| T_{B1} | Brennstofftemperatur in der 1.axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{B2} | Brennstofftemperatur in der 2.axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{B3} | Brennstofftemperatur in der 3.axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_B | Mittlere Brennstofftemperatur des Brennstabes |
| $T_{BÜR}$ | Brutstofftemperatur des radialen Brutstabes |
| $T_{BÜZ1}$ | Brutstofftemperatur in der unteren axialen Brutstoffzone des Brennstabes |
| $T_{BÜZ2}$ | Brutstofftemperatur in der oberen axialen Brutstoffzone des Brennstabes |
| T_{CB1} | Hüllentemperatur in der 1.axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{CB2} | Hüllentemperatur in der 2.axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{CB3} | Hüllentemperatur in der 3.axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{CB} | Mittlere Hüllentemperatur in den axialen Brennstoffzonen des Brennstabes |
| T_{KA} | Kühlmitteltemperatur am Eingang des oberen Kühlmittelplenums |
| T_{KB1} | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanaleingang der unteren axialen Brutstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB2} | Mittlere Kühlmitteltemperatur im Kühlkanal der unteren axialen Brutstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB3} | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanalausgang der unteren axialen Brutstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB3}^* | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanaleingang der 1.axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB4} | Mittlere Kühlmitteltemperatur des Kühlkanals der 1. axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB4}^* | Hilfsgröße für die Bestimmung von T_{KB4} |
| T_{KB5} | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanalausgang der 1.axialen Brennstoffzone des Brennstabes |

SymbolBedeutung

| | |
|-------------|--|
| T_{KB5}^* | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanaleingang der 2. axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB6} | Mittlere Kühlmitteltemperatur des Kühlkanals der 2. axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB6}^* | Hilfsgröße für die Bestimmung von T_{KB6} |
| T_{KB7} | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanalausgang der 2. axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB7}^* | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanaleingang der 3. axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB8} | Mittlere Kühlmitteltemperatur des Kühlkanals der 3. axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB8}^* | Hilfsgröße für die Bestimmung von T_{KB8} |
| T_{KB9} | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanalausgang der 3. axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB9}^* | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanaleingang der oberen axialen Brutstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB10} | Mittlere Kühlmitteltemperatur im Kühlkanal der oberen axialen Brutstoffzone des Brennstabes |
| T_{KB11} | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanalausgang der oberen axialen Brutstoffzone des Brennstabes |
| T_{KBA} | Kühlmitteltemperatur am Brennstab-Thermoelement |
| T_{KBTH} | Meßwert von T_{KBA} hinter dem Thermoelement |
| $T_{KBÜ1}$ | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanaleingang der Brutstoffzone des radialen Brutstabes |
| $T_{KBÜ2}$ | Mittlere Kühlmitteltemperatur im Kühlkanal der Brutstoffzone des radialen Brutstabes |
| $T_{KBÜ3}$ | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanalausgang der Brutstoffzone des radialen Brutstabes |
| $T_{KBÜA}$ | Kühlmitteltemperatur am Kühlkanalausgang des Brutstabes |
| T_{KE} | Kühlmitteltemperatur am Ausgang des unteren Kühlmittelplenums |
| T_{KRA} | Kühlmitteltemperatur am Ausgang des oberen Kühlmittelplenums |
| T_{KRE} | Kühlmitteltemperatur am Eingang des unteren Kühlmittelplenums |
| T_{KRTH} | Meßwert von T_{KRA} hinter dem Thermoelement |
| T_{STR1} | Mittlere Strukturmaterialtemperatur des Kühlkanals der axialen Brennstoffzonen des Brennstabes |

SymbolBedeutung

| | |
|-----------------|--|
| T_{STR2} | Mittlere Strukturmaterialtemperatur des Kühlkanals der unteren und oberen Brutstoffzone des Brennstabes |
| T_{STR3} | Mittlere Strukturmaterialtemperatur des Kühlkanals des radialen Brutstabes |
| T_{n1} | Nachstellzeit des PI-Führungsreglers |
| T_{n2} | Nachstellzeit des PI-Folgereglers |
| V_{BZ} | Brennstoffvolumen der axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| $V_{BÜR}$ | Brutstoffvolumen des radialen Brutstabes |
| $V_{BÜZ}$ | Brutstoffvolumen der unteren bzw. oberen Brutstoffzone des Brennstabes |
| V_{CBZ} | Hüllenmaterialvolumen der axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| V_{KBZ} | Kühlmittelvolumen des Kühlkanals der axialen Brennstoffzone des Brennstabes |
| α_B | Konstanter Anteil des Brennstofftemperaturkoeffizienten der Reaktivität |
| α_{BA} | Temperaturabhängiger Anteil des Brennstofftemperaturkoeffizienten der Reaktivität |
| $\alpha_{BÜR}$ | Brutstofftemperaturkoeffizient der Reaktivität des Brutstabes |
| $\alpha_{BÜZ}$ | Brutstofftemperaturkoeffizient der Reaktivität des Brennstabes |
| α_{KB} | Kühlmitteltemperaturkoeffizient der Reaktivität der axialen Brennstoffzonen des Brennstabes |
| $\alpha_{KBÜR}$ | Kühlmitteltemperaturkoeffizient der Reaktivität des radialen Brutstabes |
| $\alpha_{KBÜZ}$ | Kühlmitteltemperaturkoeffizient der Reaktivität der unteren und oberen Brutstoffzone des Brennstabes |
| α_{CB} | Hüllenmaterialtemperaturkoeffizient der Reaktivität der axialen Brennstoffzonen des Brennstabes |
| α_{STR1} | Strukturmaterialtemperaturkoeffizient der Reaktivität der axialen Brennstoffzonen des Brennstabes |
| α_{STR2} | Strukturmaterialtemperaturkoeffizient der Reaktivität der unteren und oberen Brutstoffzone des Brennstabes |

| <u>Symbol</u> | <u>Bedeutung</u> |
|-------------------------|--|
| α_{STR3} | Strukturmaterialtemperaturkoeffizient der Reaktivität des radialen Brutstabes |
| α_{BC} | Wärmeübergangszahl zwischen Brennstoff und Hülle beim Brennstab |
| $\alpha_{BÜC}$ | Wärmeübergangszahl zwischen Brutstoff und Hülle beim Brennstab und beim radialen Brutstab |
| α_{CBK} | Wärmeübergangszahl zwischen Brennstabhülle und Kühlmittel |
| $\alpha_{CBÜK}$ | Wärmeübergangszahl zwischen Brutstabhülle und Kühlmittel |
| β | Anteil der verzögerten Neutronen an der gesamten Neutronenzahl |
| β_i | Anteil der i-ten Gruppe der verzögerten Neutronen an der gesamten Neutronenzahl |
| S_K | Reaktivität |
| S_y | Anteil des Regelstabes an der Reaktivität |
| S_{St} | Störreaktivität |
| r_B | Spezifisches Gewicht des Brennstoffes |
| $r_{BÜ}$ | Spezifisches Gewicht des Brutstoffes |
| r_C | Spezifisches Gewicht des Stabhüllenmaterials |
| r_K | Spezifisches Gewicht des Kühlmittels |
| λ_i (i=1 bis 6) | Zerfallskonstante der Emittoren der i-ten Gruppe der verzögerten Neutronen |
| λ_B | Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes |
| $\lambda_{BÜ}$ | Wärmeleitfähigkeit des Brutstoffes |
| λ_C | Wärmeleitfähigkeit des Stabhüllenmaterials |
| λ_K | Wärmeleitfähigkeit des Kühlmittels |
| τ_B | Totzeitkonstante des axialen Brennstoffzonenkühlkanals des Brennstabes |
| τ_{BA} | Totzeitkonstante des Abschnittes des Brennstabkühlkanals vom Ende der 3. axialen Brennstoffzone bis zum Thermoelement |
| $\tau_{BÜ}$ | Totzeitkonstante des unteren Brutstoffzonenkühlkanals des Brennstabes |
| $\tau_{BÜA1}$ | Totzeitkonstante des Abschnittes des radialen Brutstabkühlkanals vom Ende des unteren Kühlmittelplenums bis zum Anfang der Brutstoffzone |
| $\tau_{BÜA2}$ | Totzeitkonstante des Abschnittes des radialen Brutstabkühlkanals vom Anfang der Brutstoffzone bis zum Ende des Kühlkanals |

SymbolBedeutung

| | |
|-----------------|---|
| τ_{BE} | Totzeitkonstante des Abschnittes des Brennstabkühlkanals vom Ende des unteren Kühlmittelpenums bis zum Anfang der unteren Brutstoffzone |
| τ_{PLO} | Verzögerungskonstante des oberen Kühlmittelpenums |
| τ_{PLU} | Verzögerungskonstante des unteren Kühlmittelpenums |
| τ_{STR} | Verzögerungskonstante des Strukturmaterials |
| τ_{TH1} | Verzögerungskonstante des Thermoelements am Ausgang des Brennstabkühlkanals |
| τ_{TH2} | Verzögerungskonstante des Thermoelements am Reaktorausgang |
| τ_{TNEUTR} | Totzeitkonstante der Meßelektronik und des Regelstabes |
| τ_{VNEUTR} | Verzögerungskonstante der Meßelektronik und des Regelstabes |
| ψ | Konstante in der Wärmeübergangszahl α_{CBK} . Diese Konstante ist [5] zu entnehmen. |

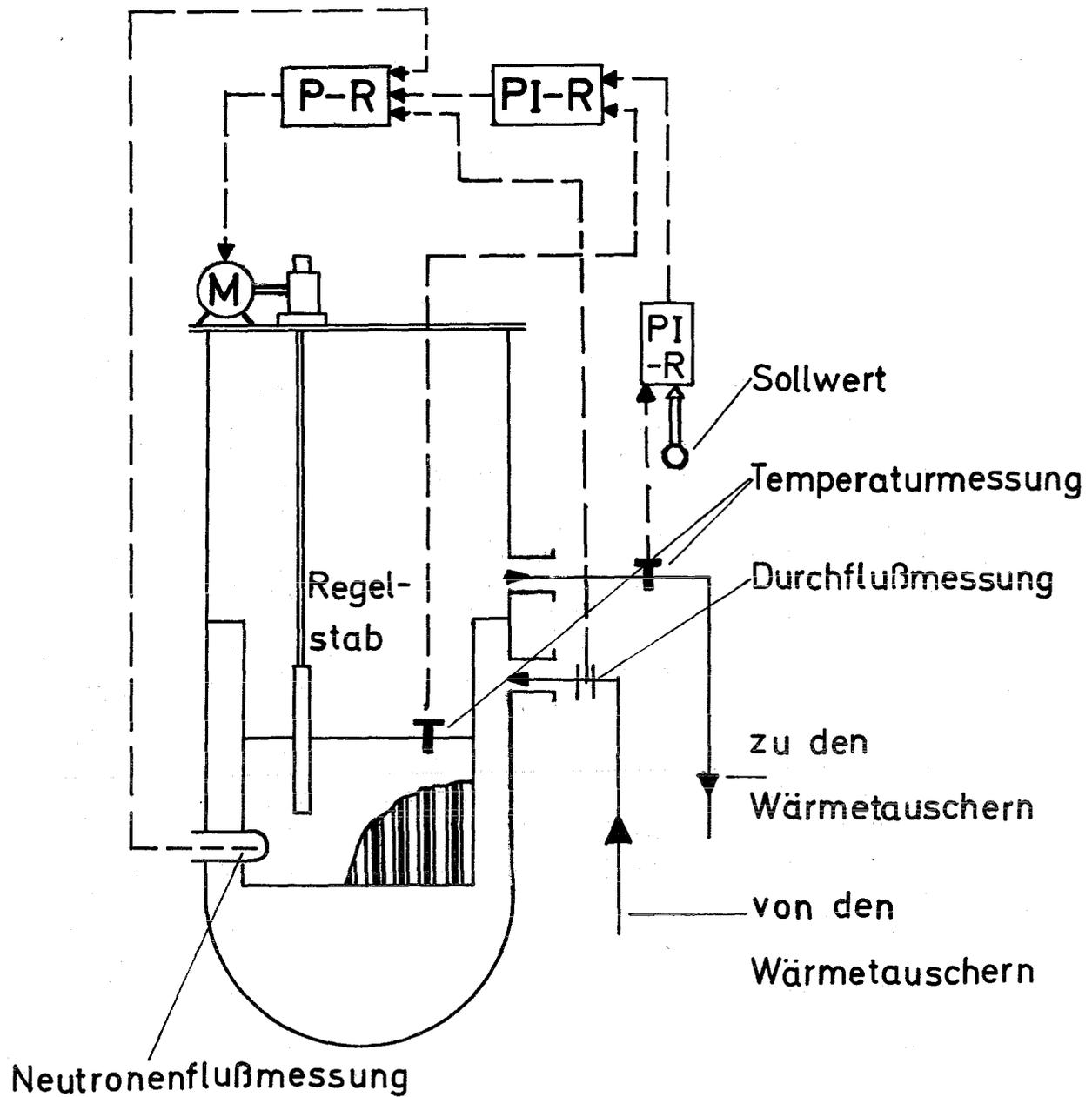


Abb.1 Schematische Darstellung des geregelten Na₂-Reaktors.

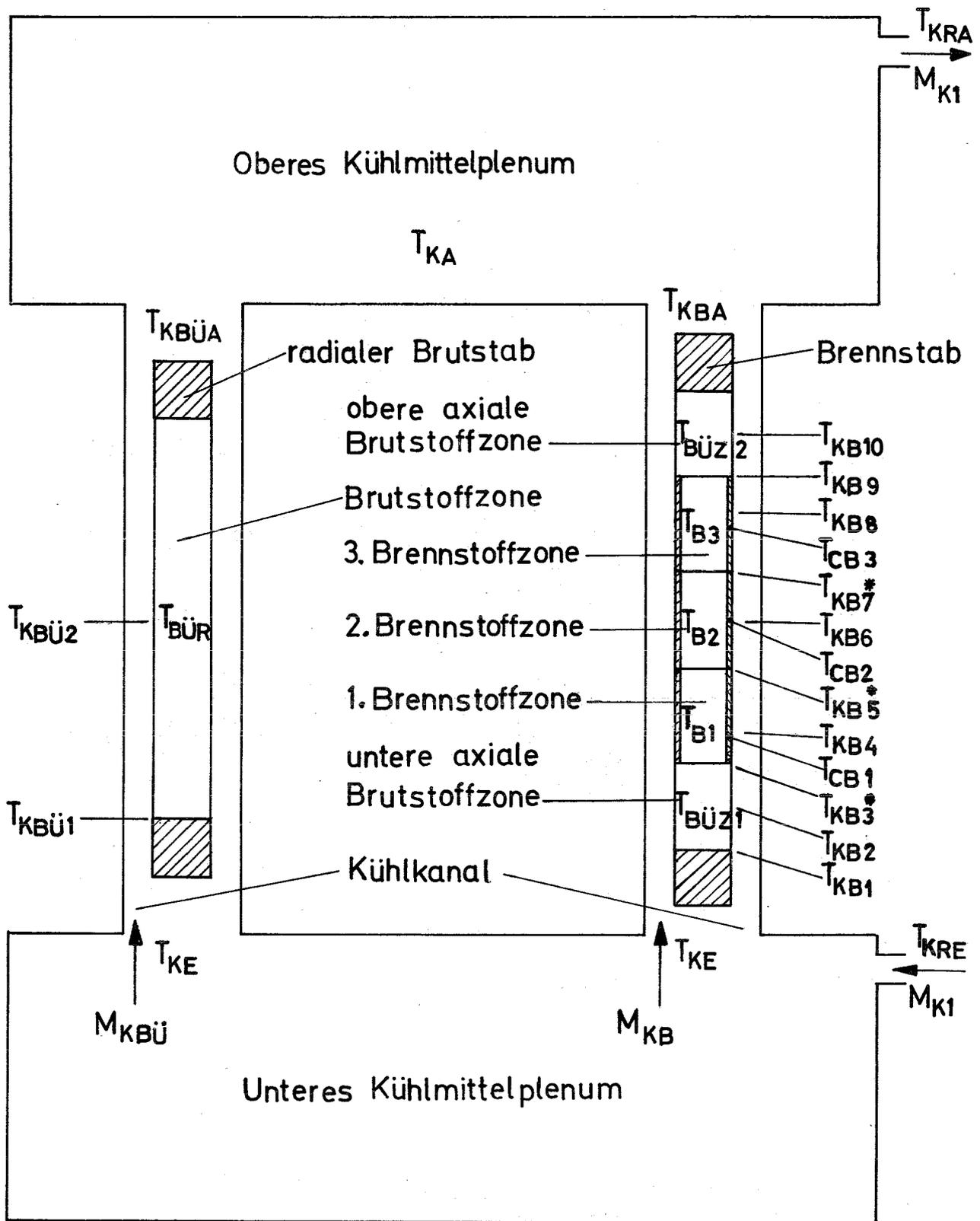


Abb.2 Schematische Darstellung des Rechenmodells des Na₂-Reaktors.

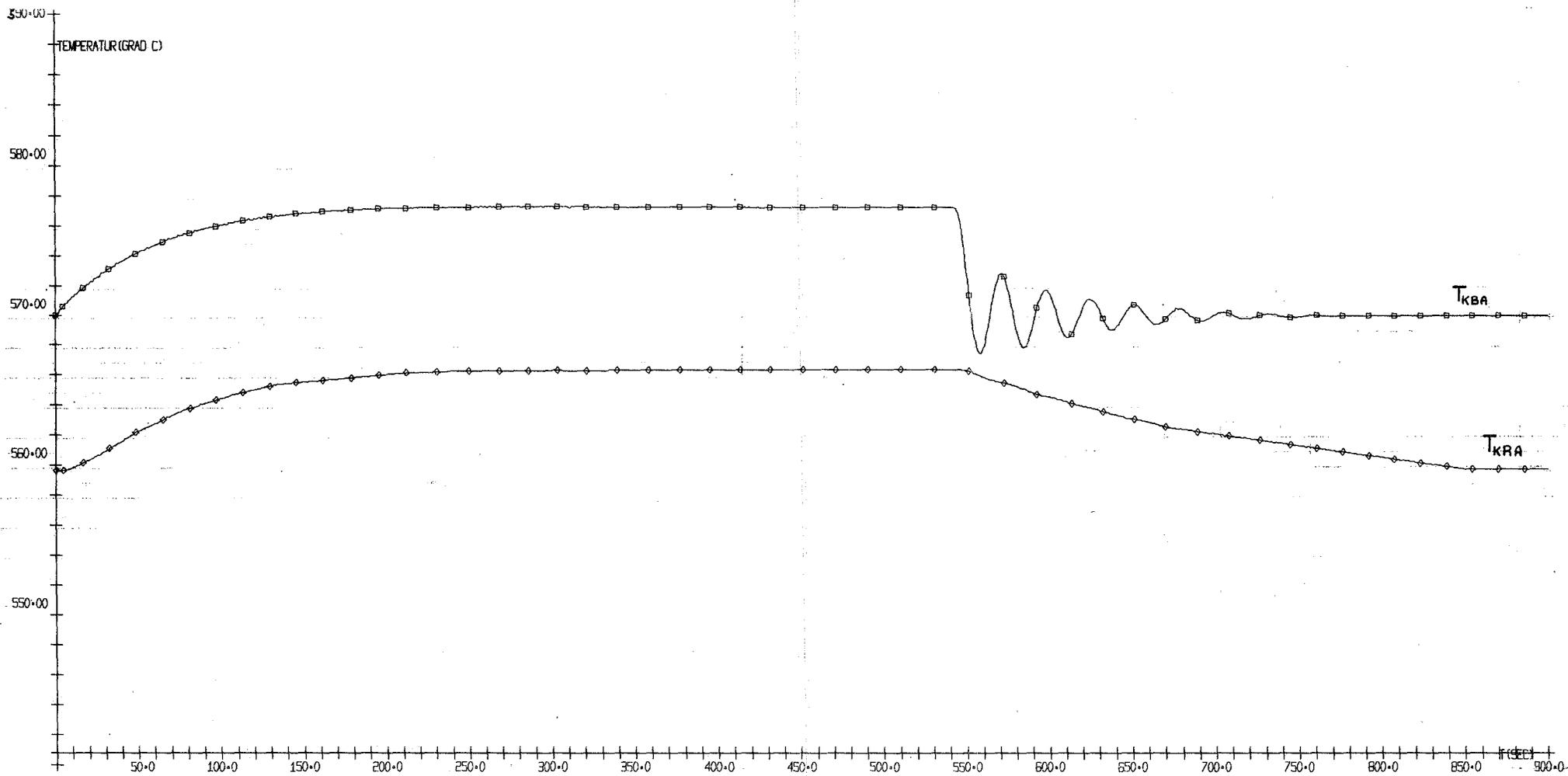


ABB.00004 VERLAUF DER REGELGRÖSSEN TKBA UND TKRA BEI MK=1-0-1 MINENN

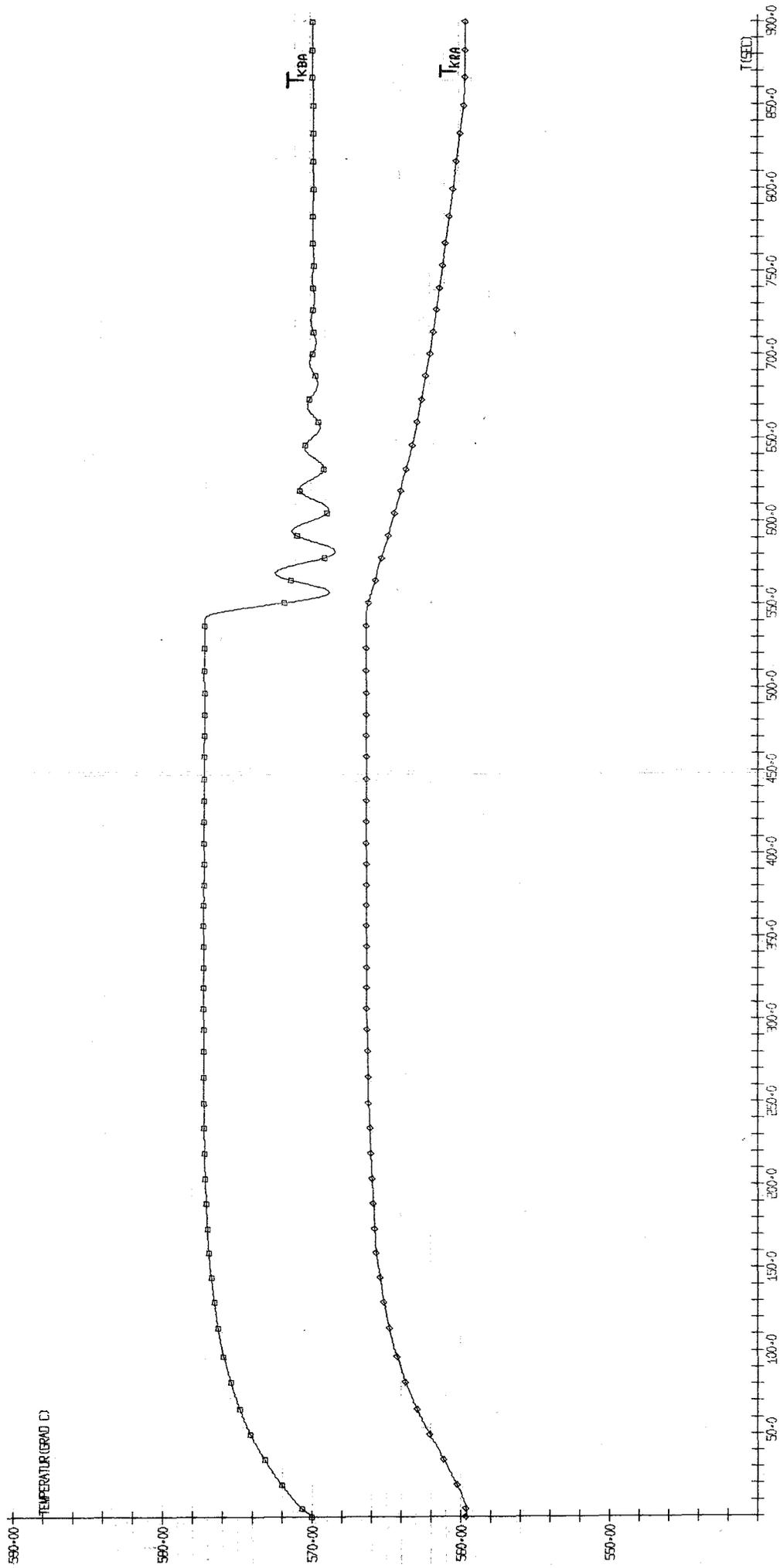


ABB.00005 VERLAUF DER BEHELDRESSEN TKBA UND TKRA BEI $MW=1.0 \cdot 10^{-1}$ MNEMNI

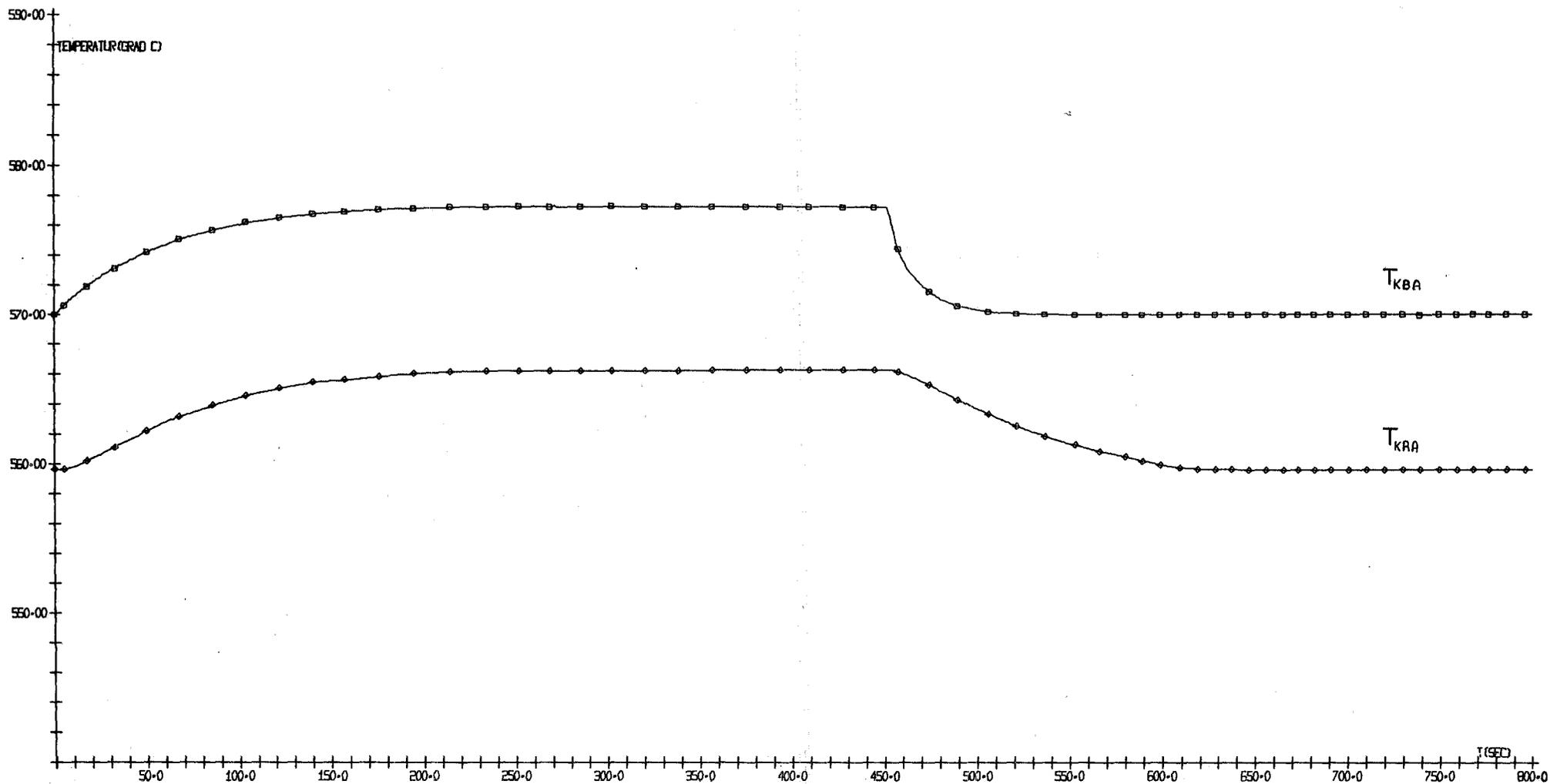


Abb. 00006 Verlauf der Regelgröße T_{KRA} und der Hilfsregelgröße T_{KBA} bei Durchflußänderungen $M_{K1} = 1$ auf $0.25 M_{K1N}$

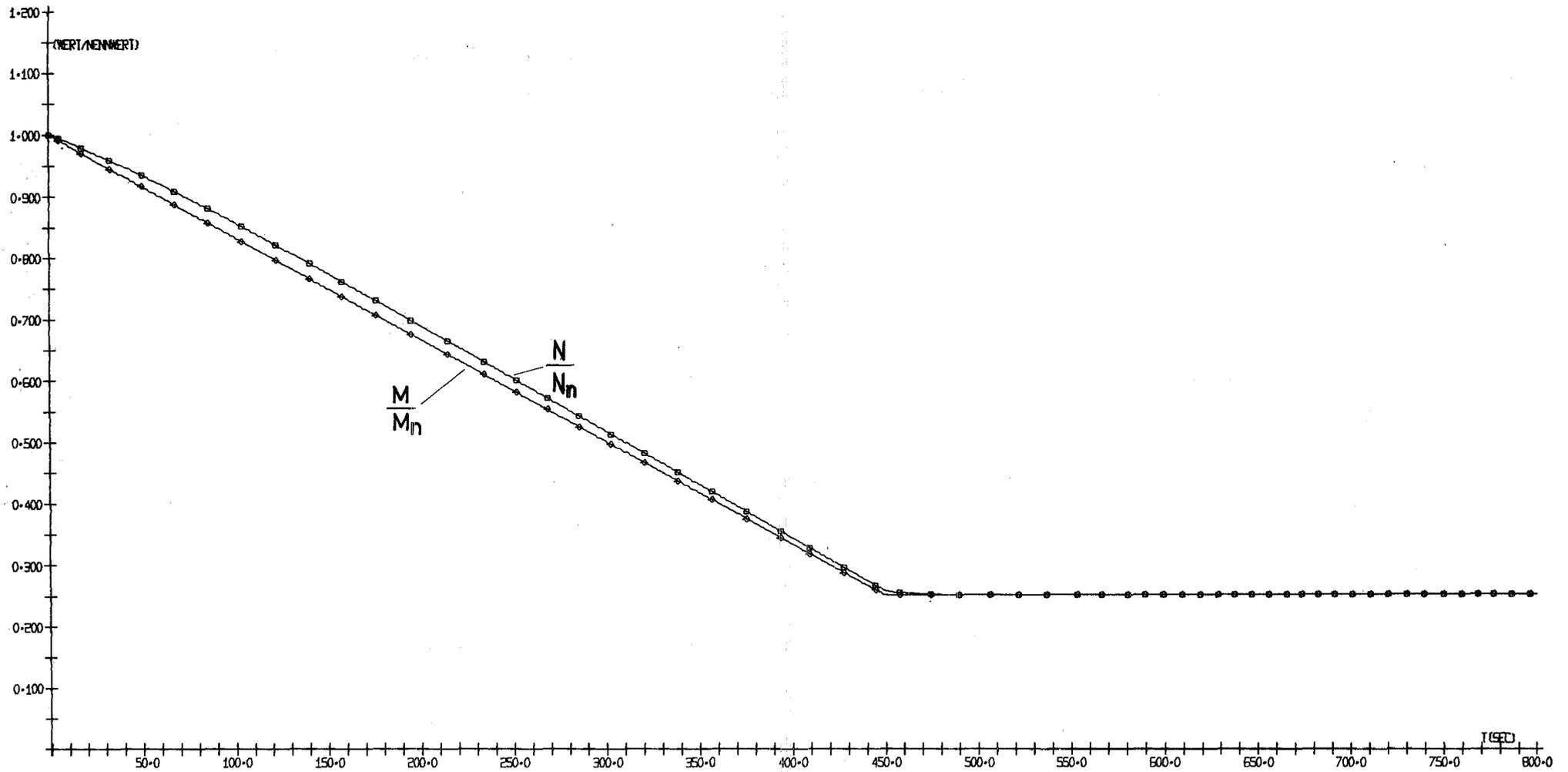


Abb. 00007 Verlauf der Reaktorleistung N/N_n u. des Kühlmitteldurchflusses M_{K1}/M_{K1n} bei Durchflußänd. $M_{K1} = 1$ auf $0.25 M_{K1n}$

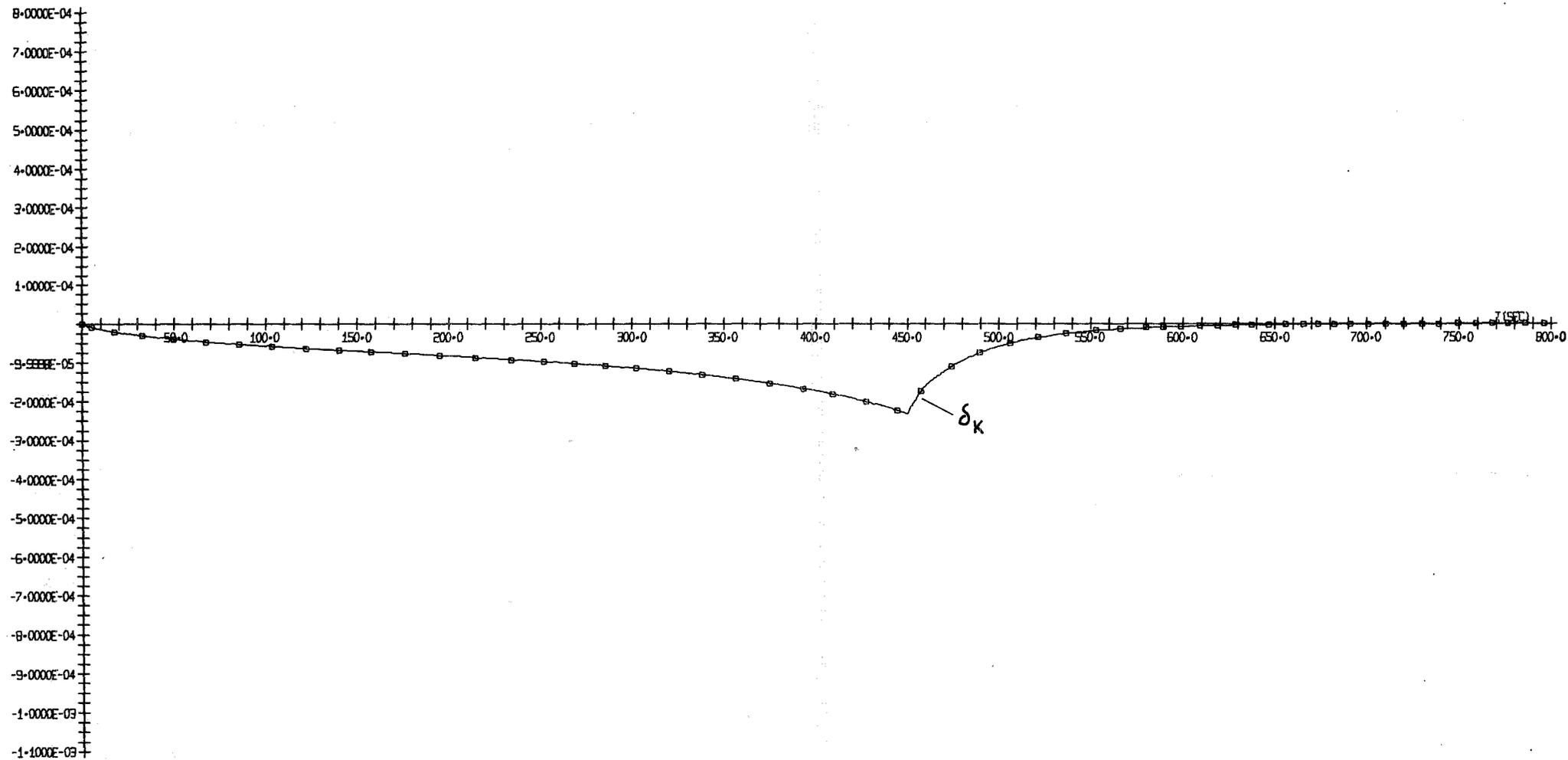


Abb. 00008 Verlauf der Reaktivität DELTK bei Durchflussänderungen $M_{K1} = 1$ auf $0.25 M_{K1N}$

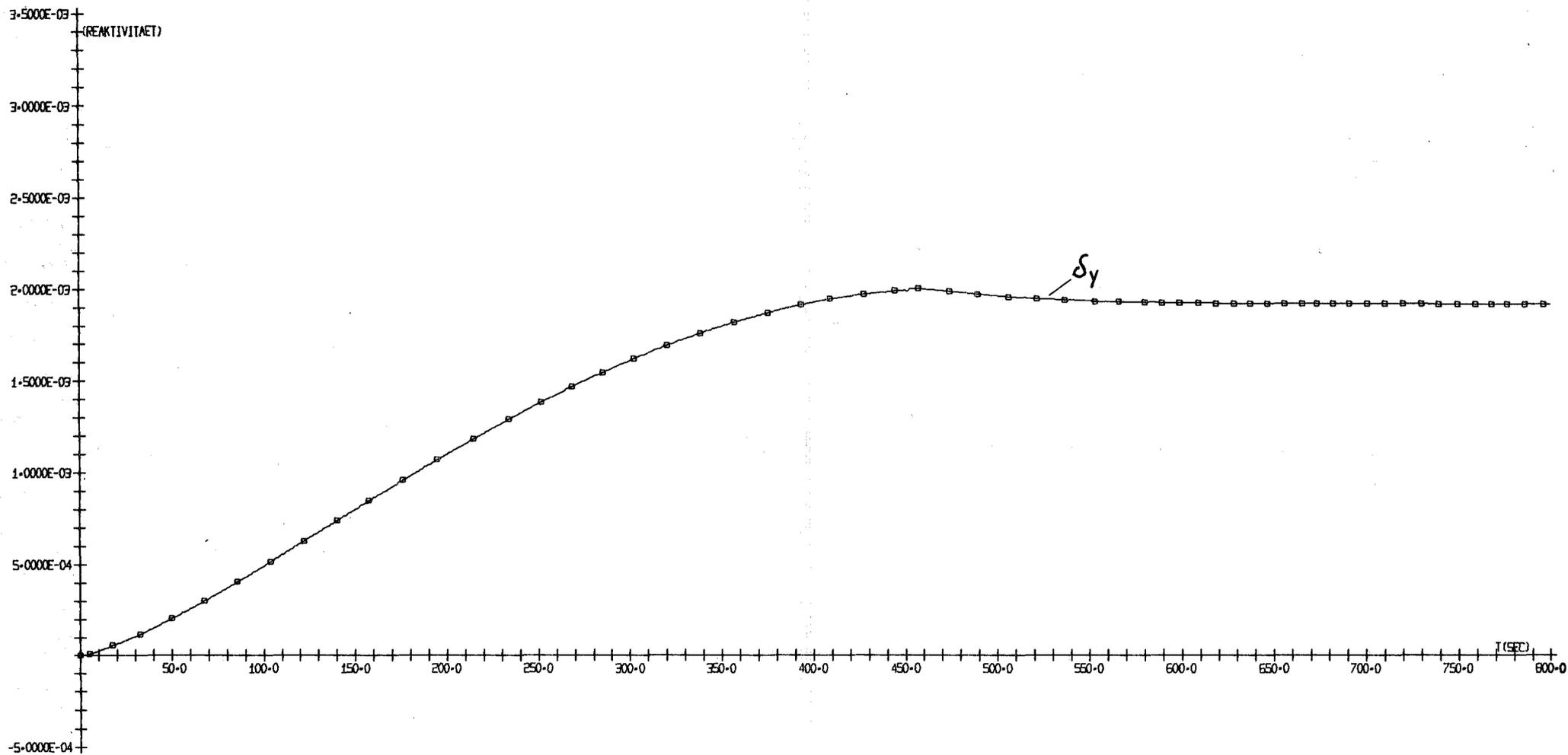


Abb. 00009 Verlauf der durch den Regelstab hervorgerufenen Reaktivitätsänd. DELTY bei Durchflußänd. $M_{K1} = 1$ auf $0.25 M_{K1N}$

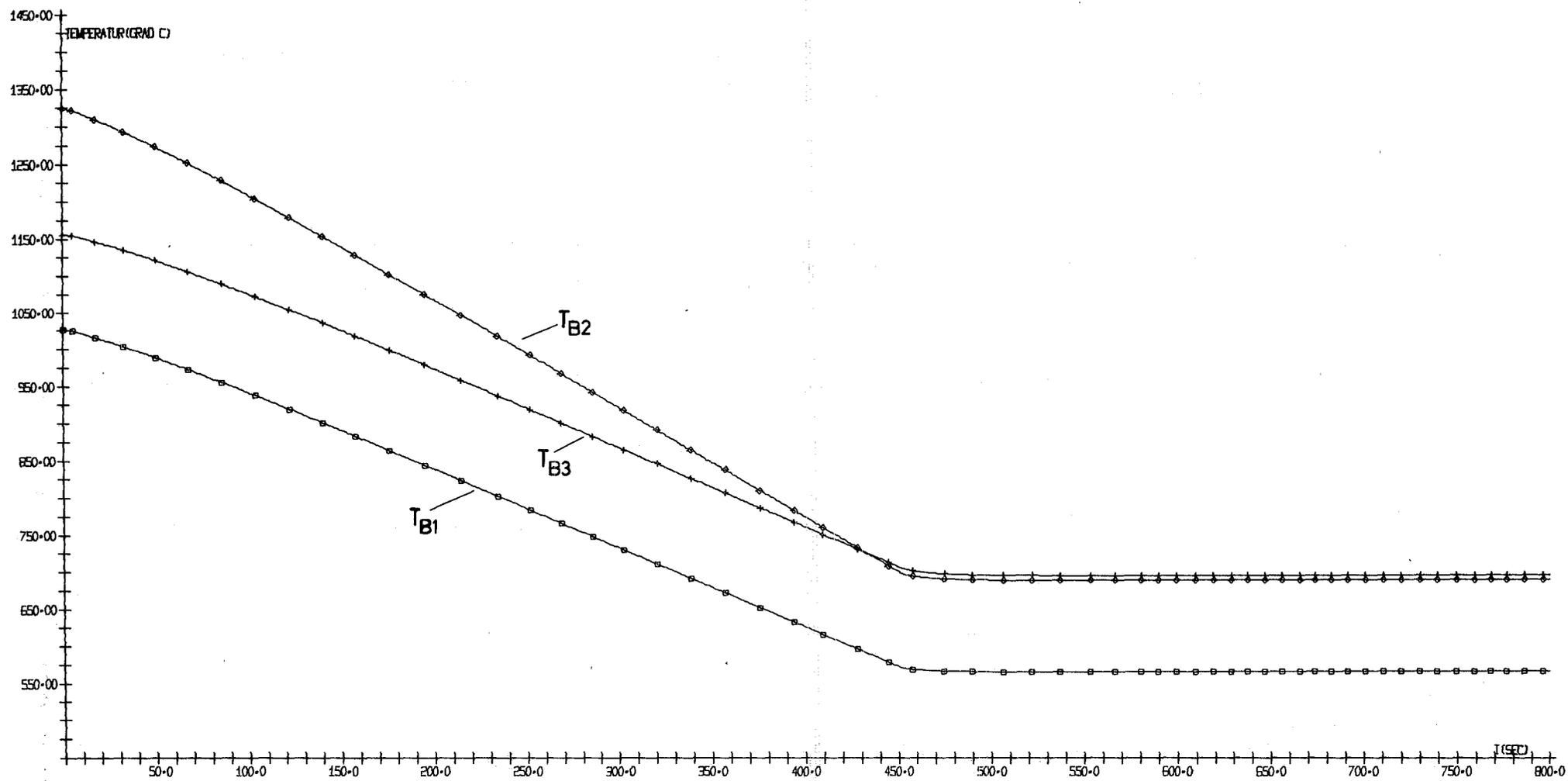


Abb. 00010 Verlauf der Brennstofftemperaturen T_{B1} , T_{B2} und T_{B3} bei Durchflußänderungen $M_{K1} = 1$ auf $0.25 M_{K1N}$

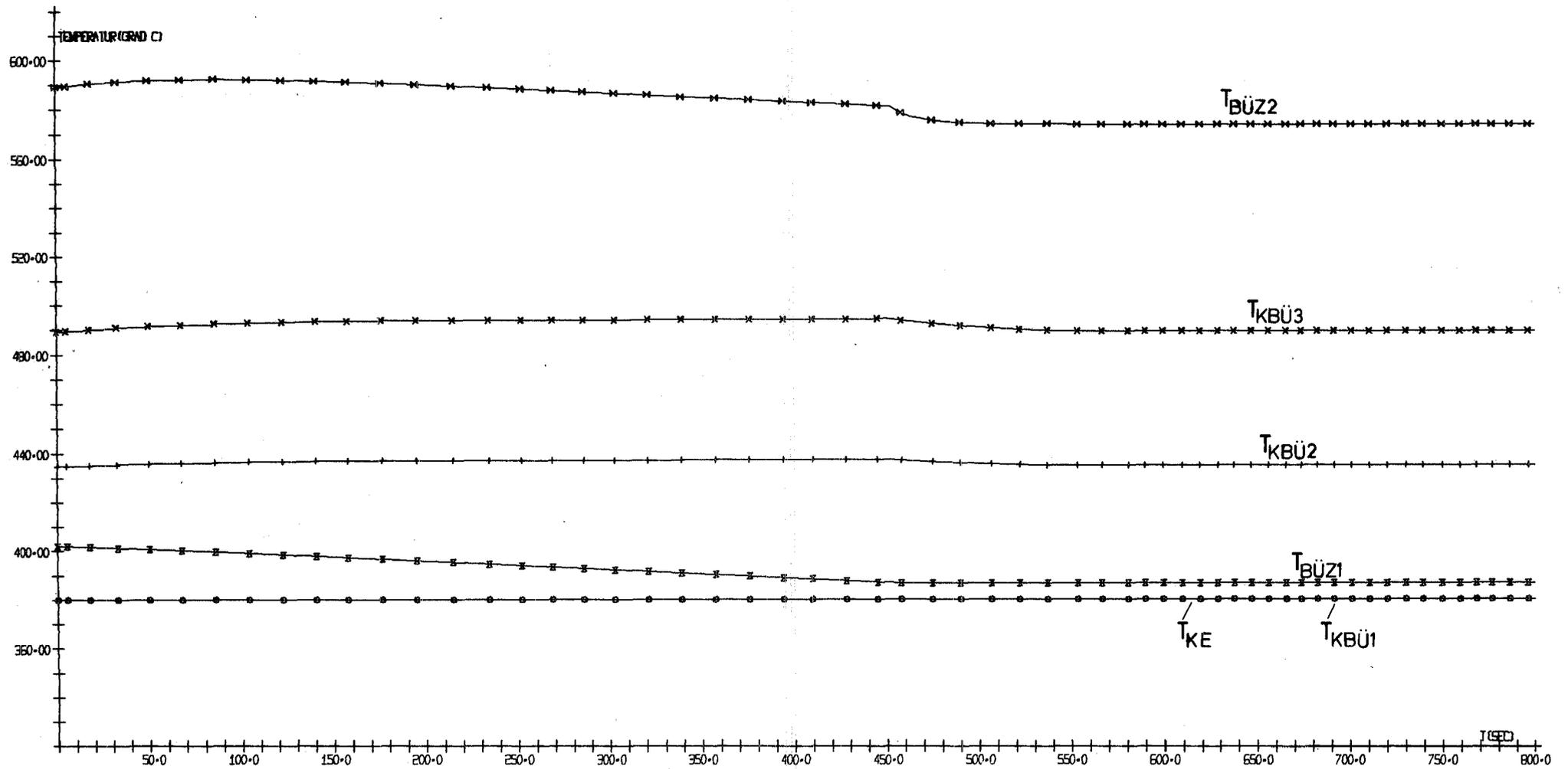


Abb. 00011 Verlauf der Temperaturen T_{KE} , $T_{KBÜ1}$, $T_{BÜ1}$, $T_{KBÜ2}$, $T_{KBÜ3}$ und $T_{KBÜZ2}$ bei Durchflußänd. $M_{K1} = 1$ auf $0.25 M_{K1N}$

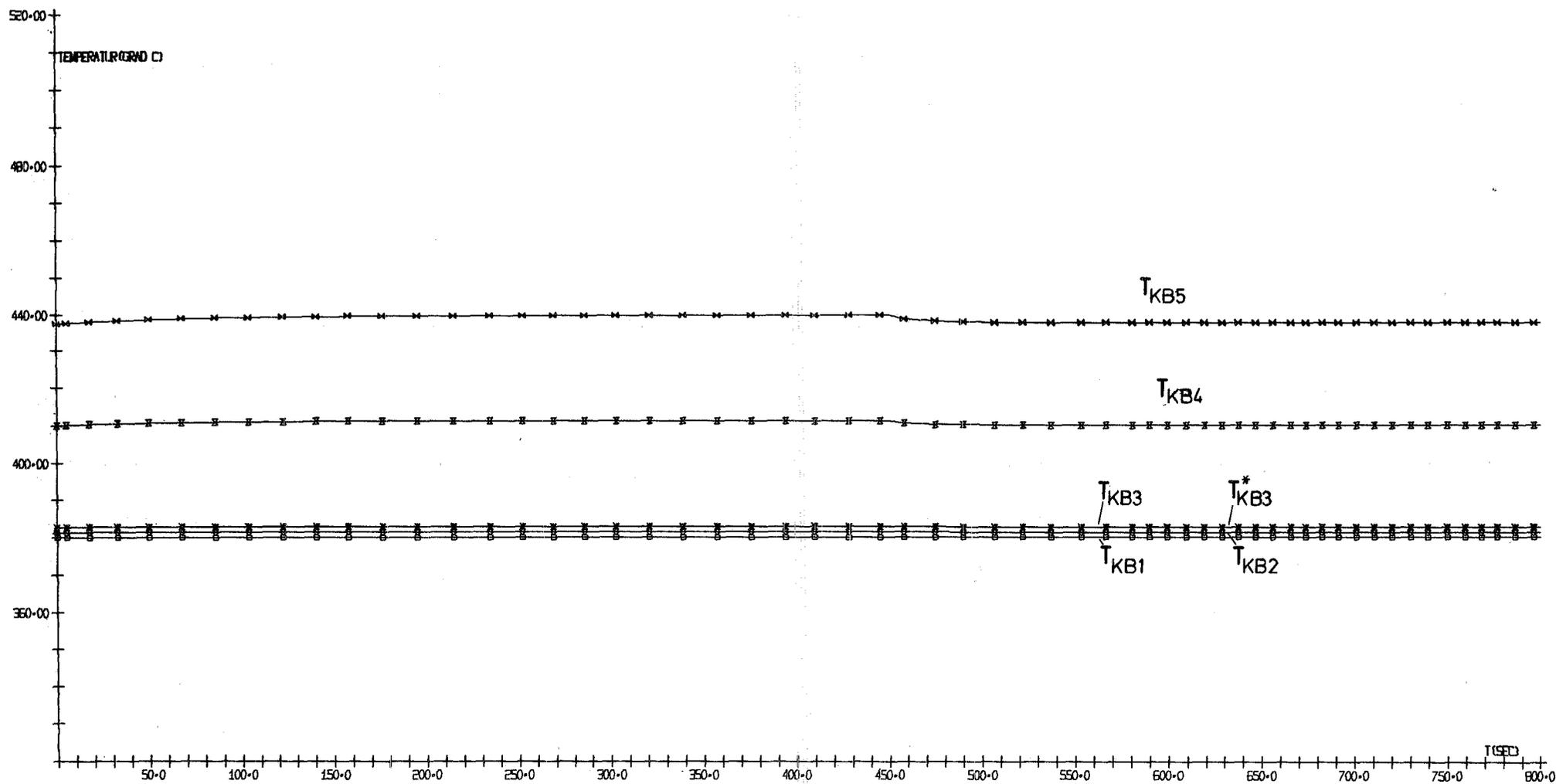


Abb. 00012 Verlauf der Temperaturen T_{KB1} , T_{KB2} , T_{KB3} , T_{KB3}^* , T_{KB4} und T_{KB5} bei Durchflußänderungen $M_{K1} = 1$ auf $0,25 M_{K1N}$

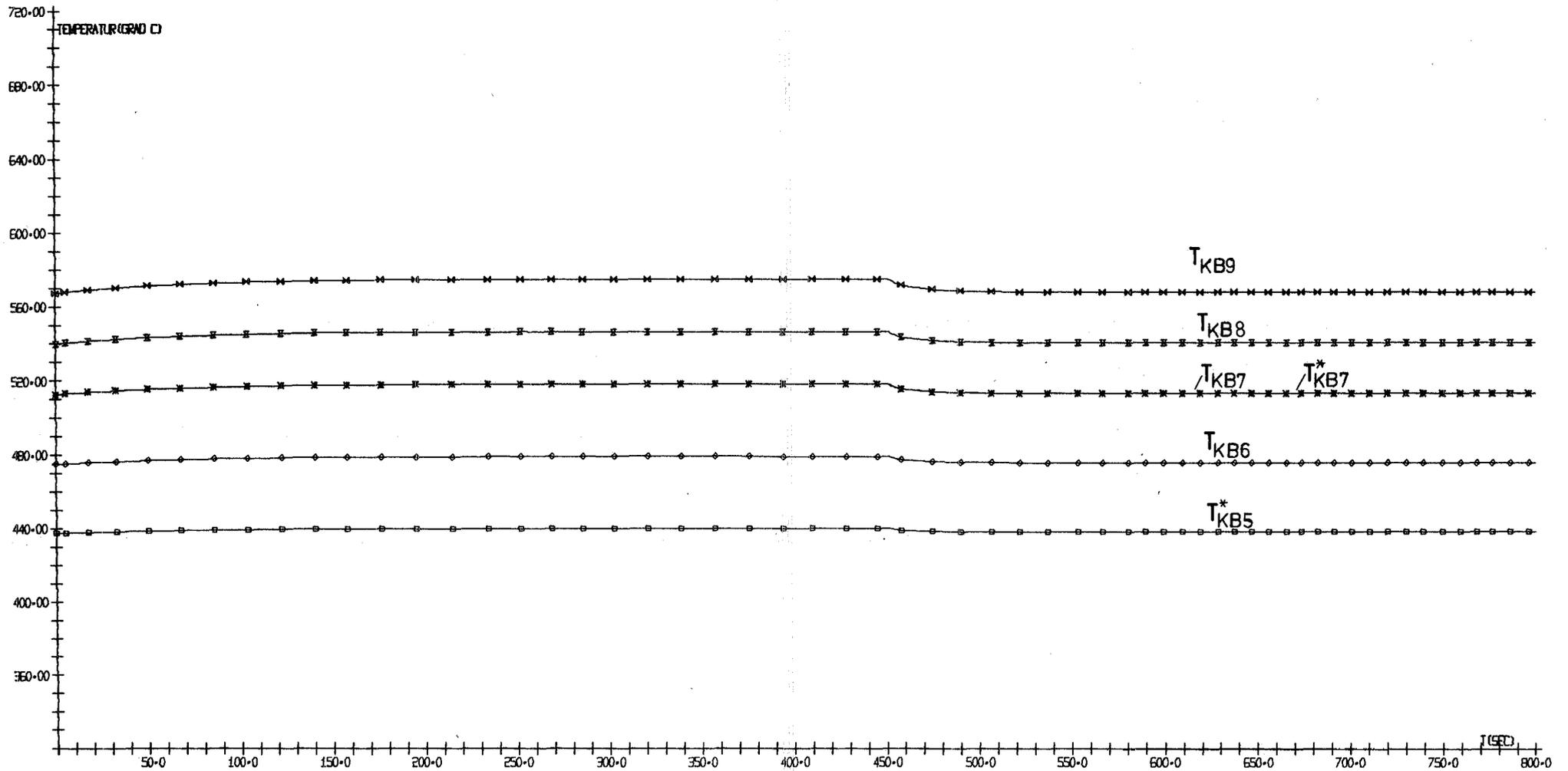


Abb. 00013 Verlauf der Temperaturen T_{KB5}^* , T_{KB6} , T_{KB7} , T_{KB7}^* , T_{KB8} und T_{KB9} bei Durchflußänderungen $M_{K1} = 1$ auf $0.25 M_{K1N}$

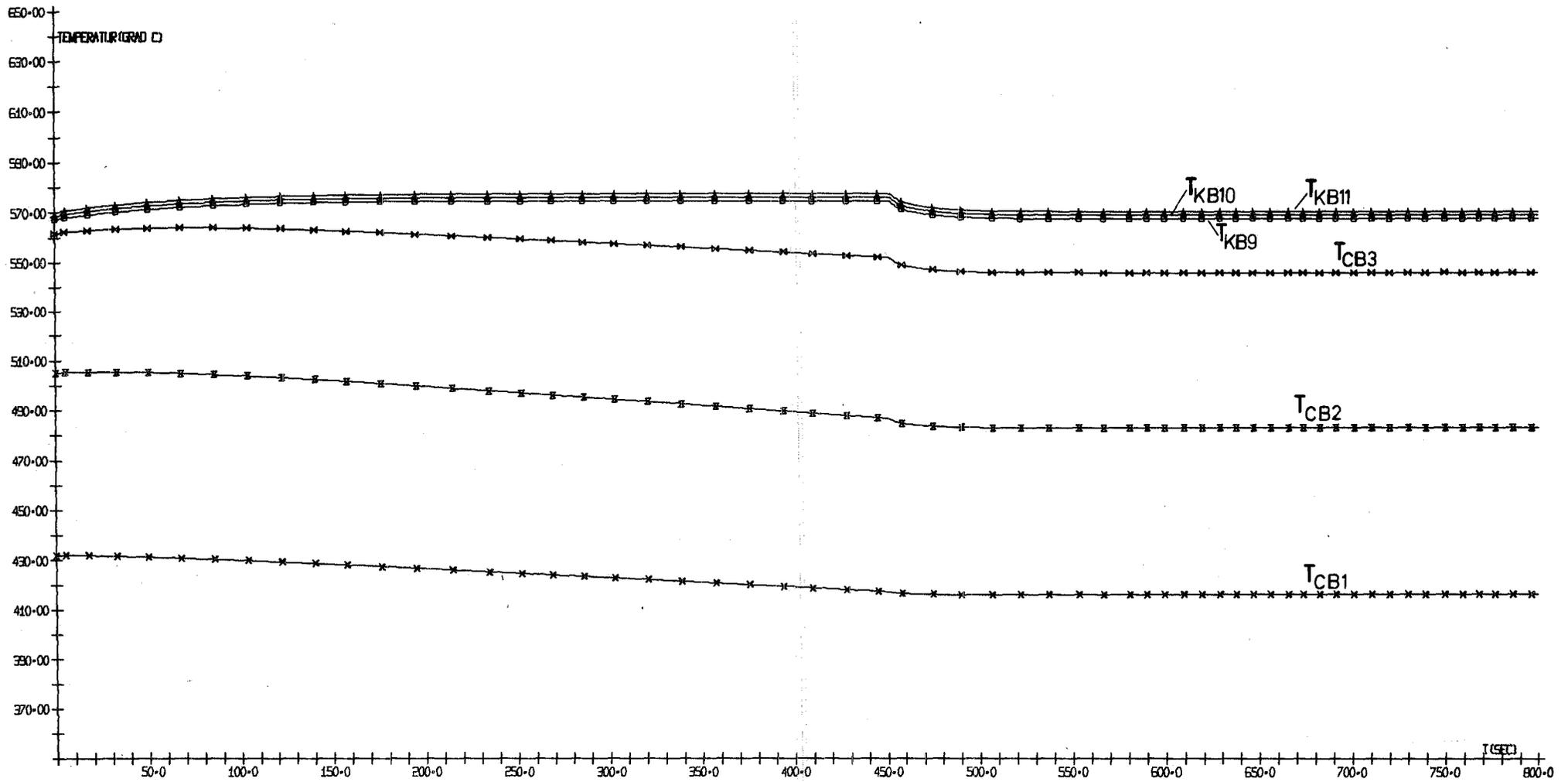


Abb. 00014 Verlauf der Temperaturen T_{CB1} , T_{CB2} , T_{CB3} , T_{KB9} , T_{KB10} und T_{KB11} bei Durchflußänd. $M_{K1} = 1$ auf $0.25 M_{K1N}$

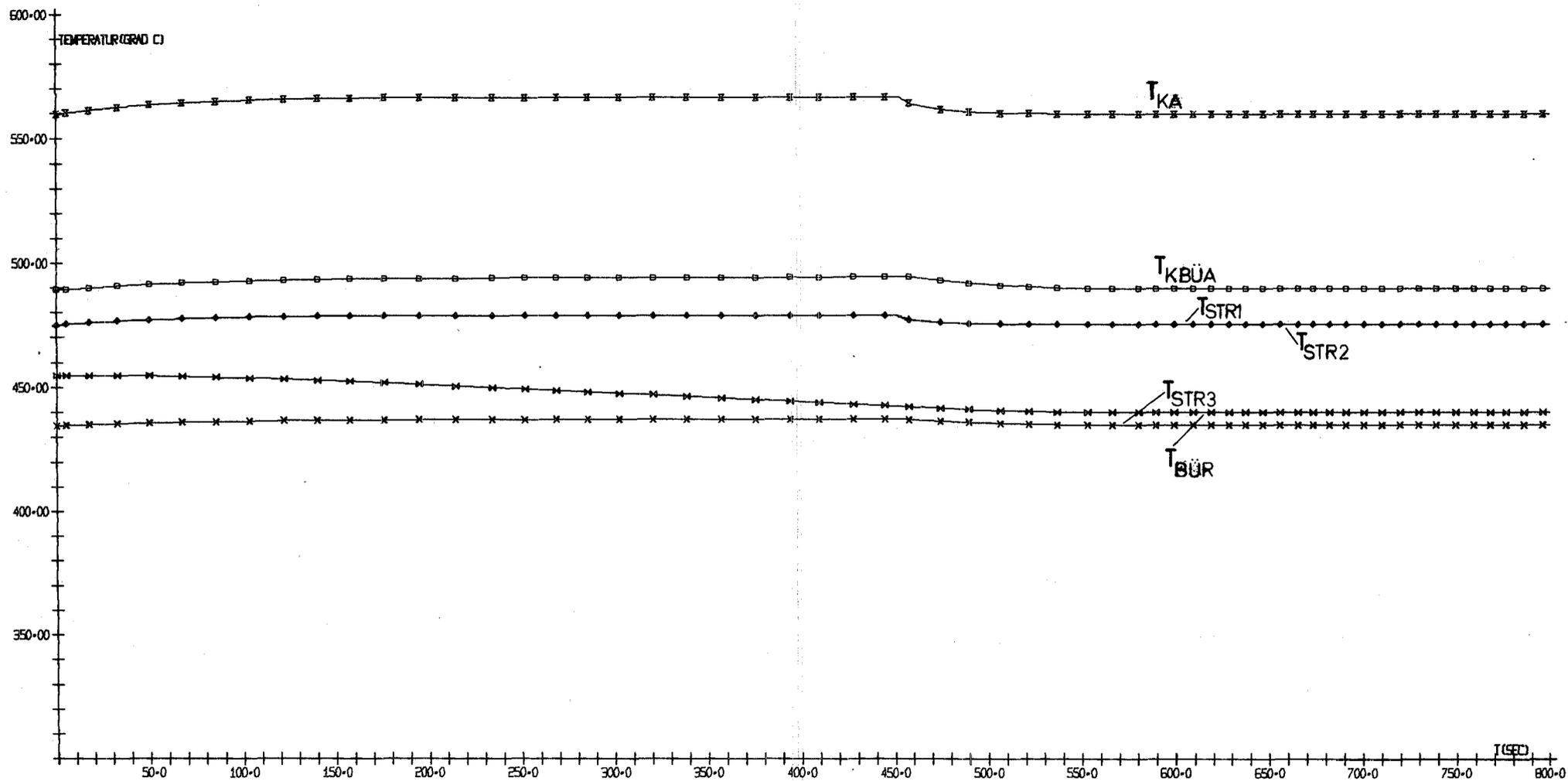


Abb. 00015 Verlauf der Temperaturen $T_{BÜR}$, T_{STR3} , T_{STR2} , T_{STR1} , $T_{KBÜA}$ und T_{KA} bei Durchflußänd. $M_{K1} = 1$ auf $0.25 M_{K1N}$

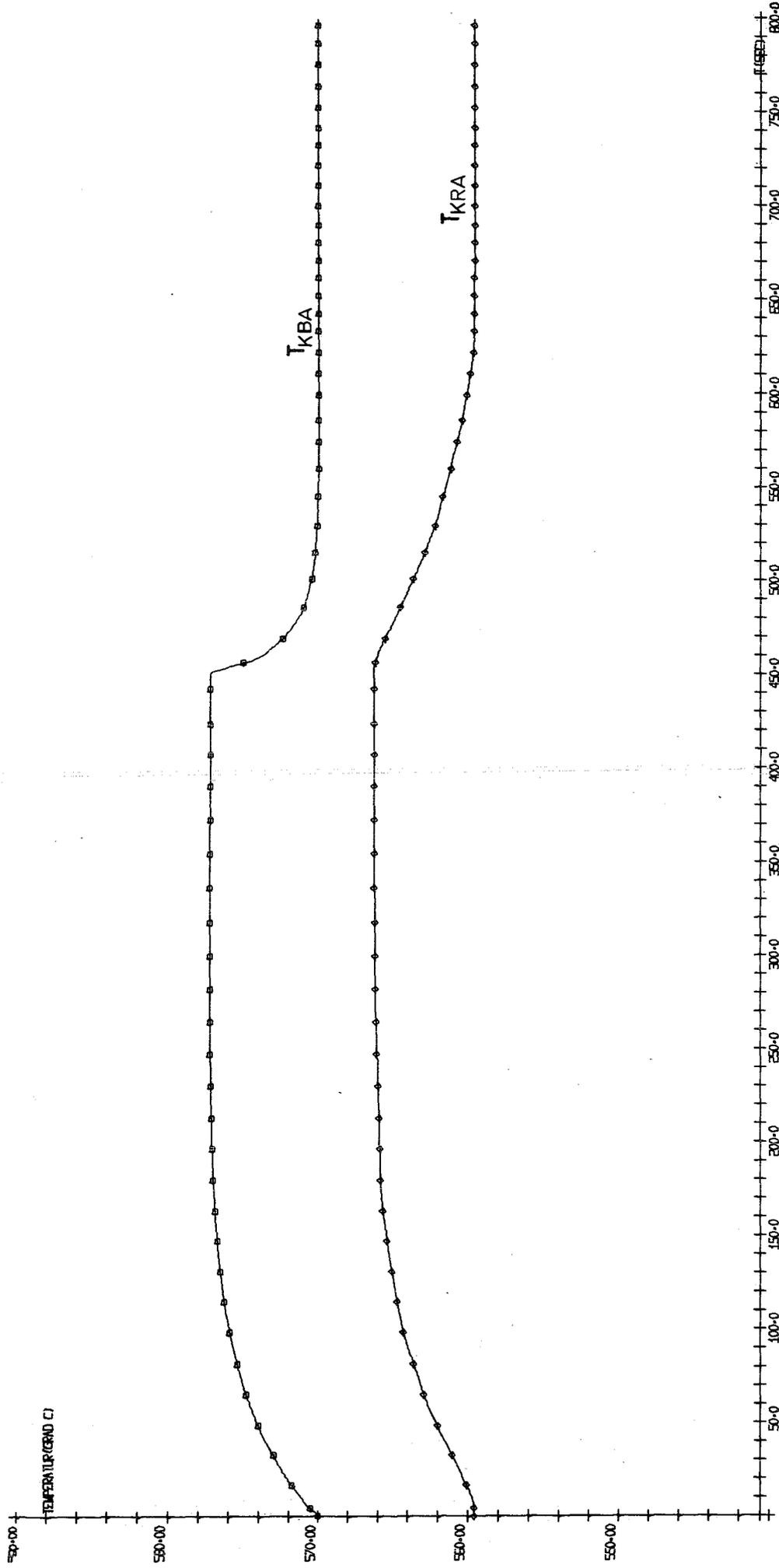


ABB.00016 VERLAUF DER REBELGESSEN T_{KBA} UND T_{KRA} BEI M=1-0-25MINNEN

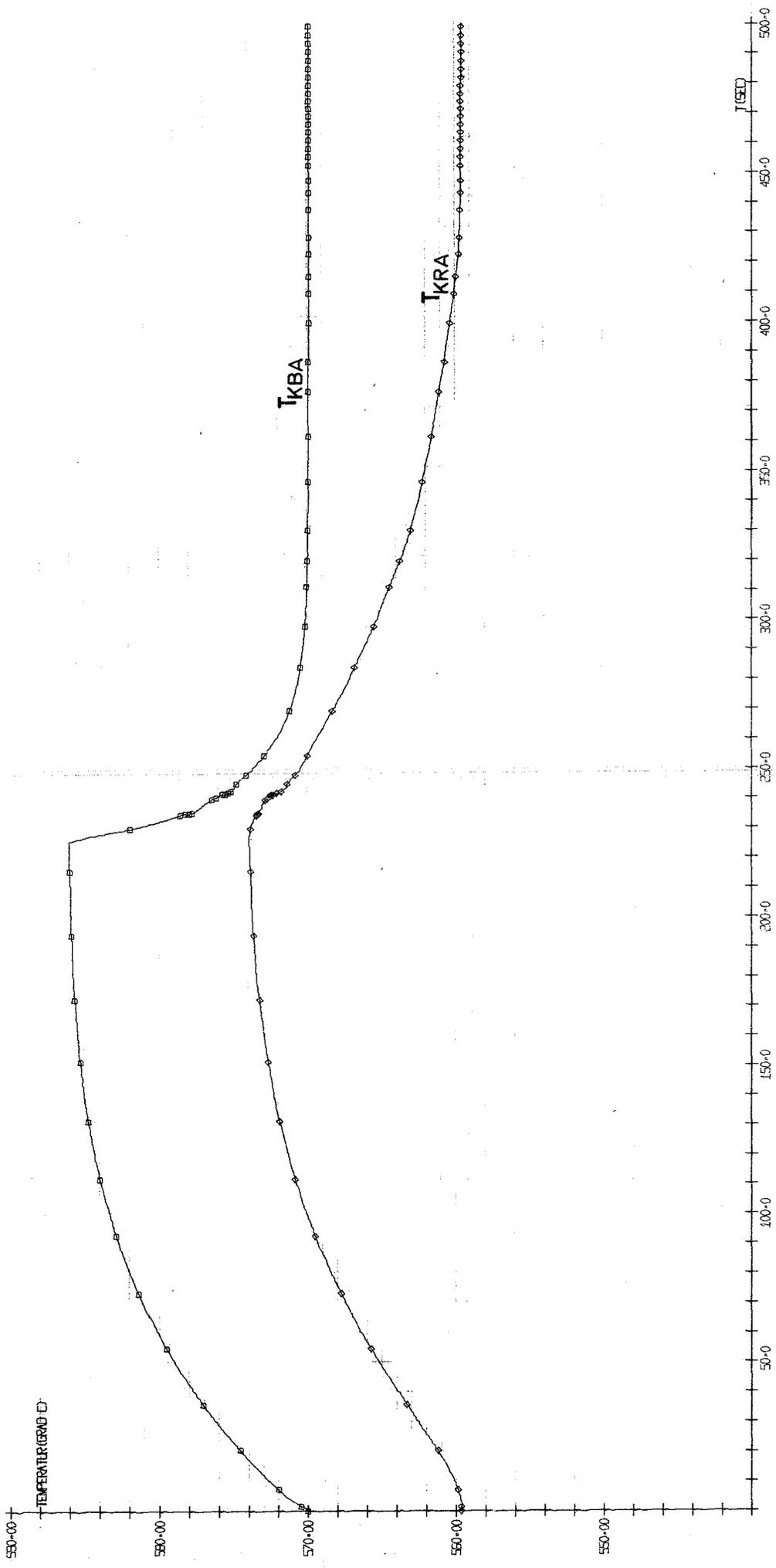
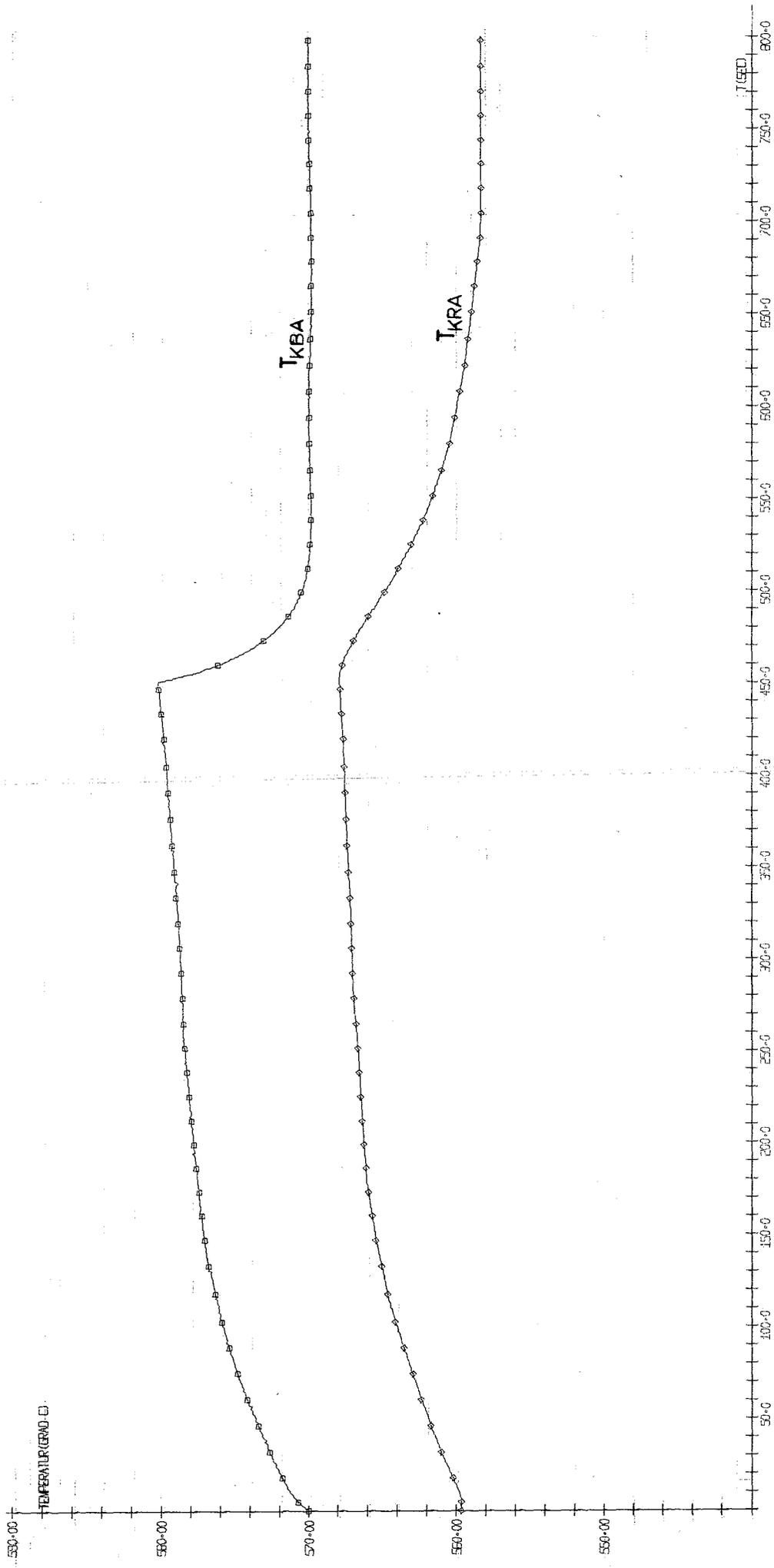
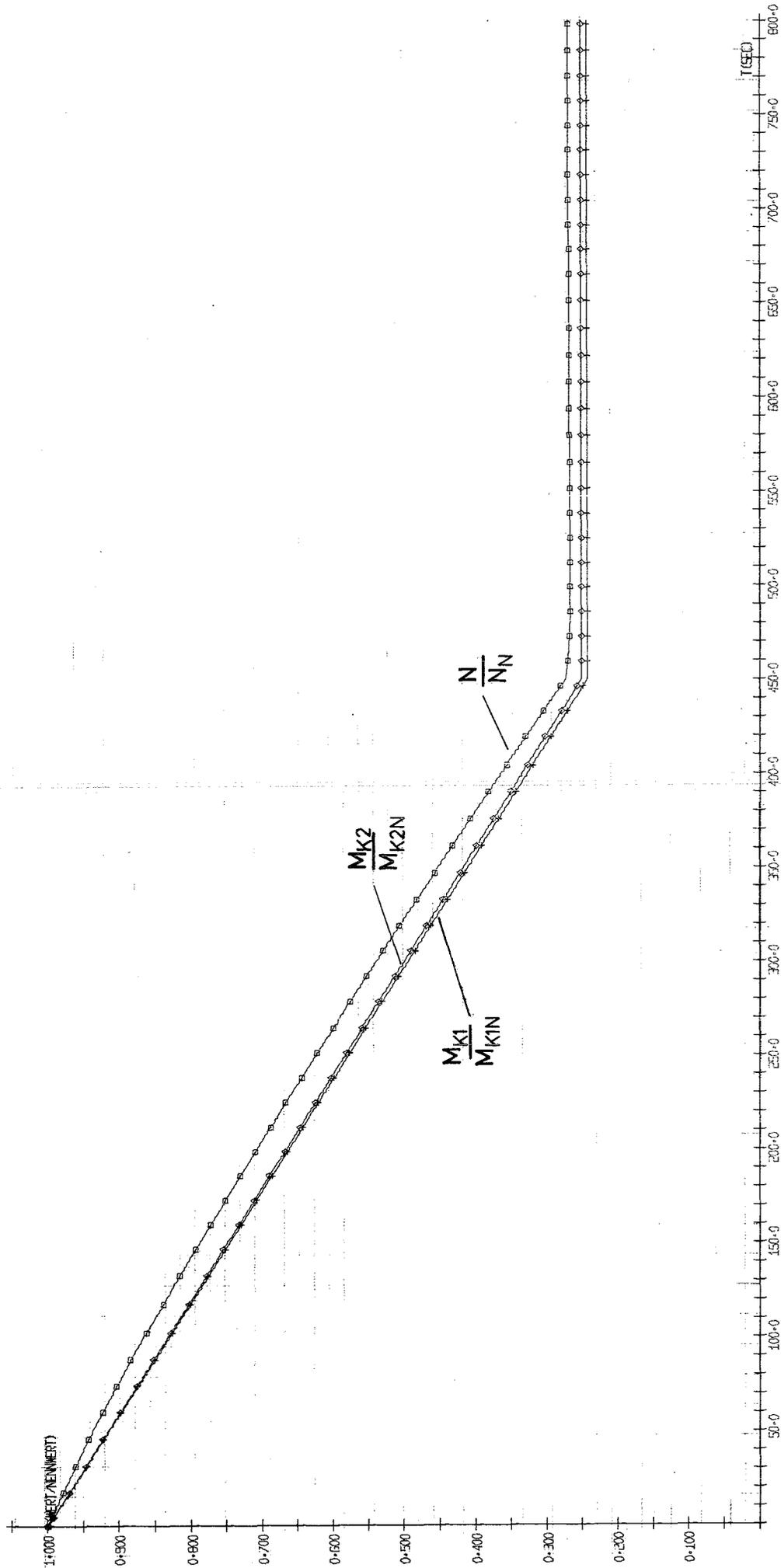


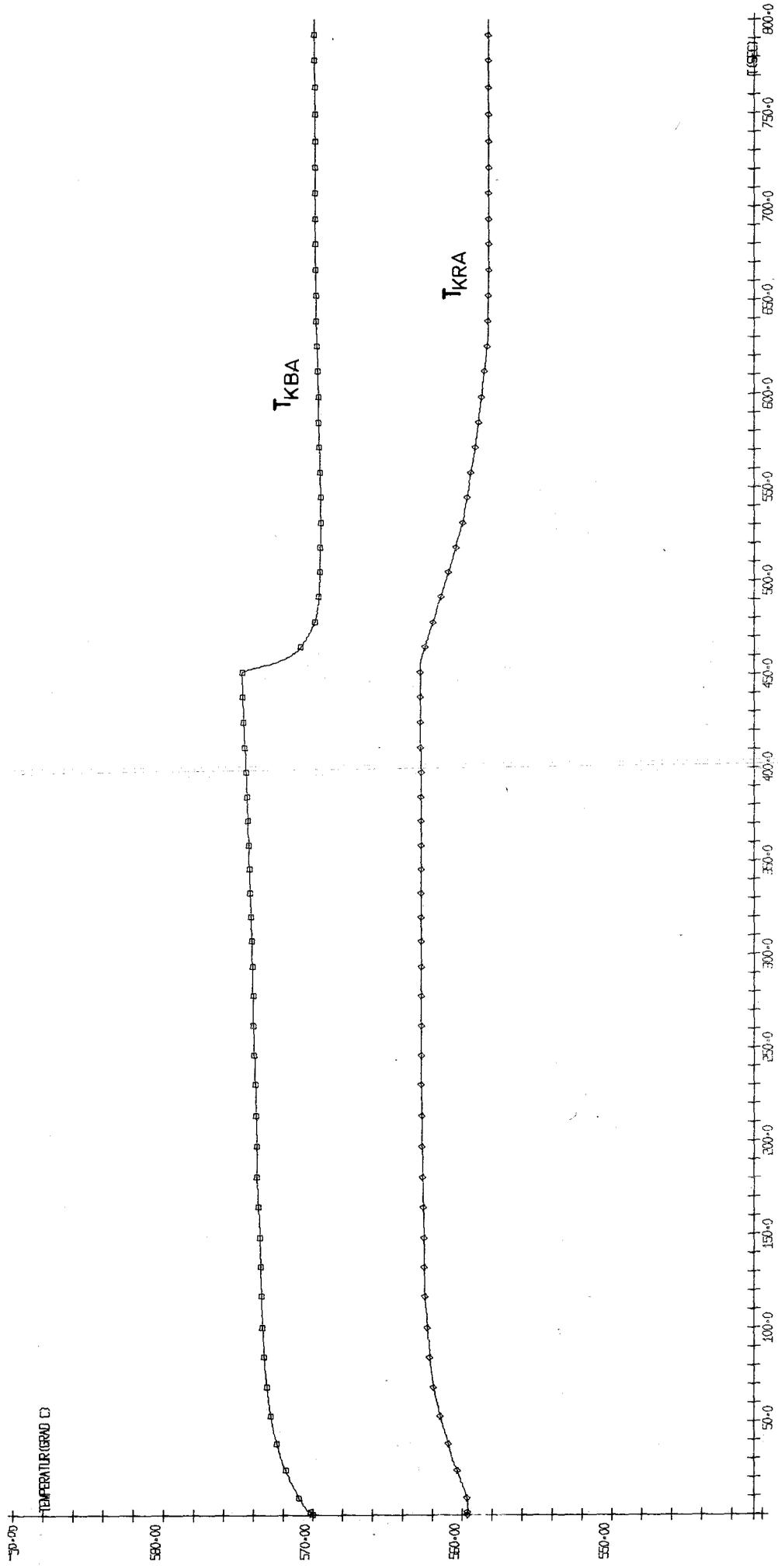
ABB-00017 VERLAUF DER BEGELMESSSEN TKBA UND TKRA BEI MK-I-0-25 KNOEHN



ABE-00016 VERLAUF DER BEGELGESSEN TKBA UND TKRA BEI IK=1,0-25 KW/KW



ABG. 60018 REKTORLEISTUNGS- M_{K2}/M_{K2N} UND M_{K1}/M_{KIN} BEI $M_{K1}=1-0.05$ NENNERT



AEB-00020 VERLAUF DER REKURRESSEN T_{KBA} UND T_{KRA} BEI $\lambda = 0.25 \mu\text{m}$ NEU

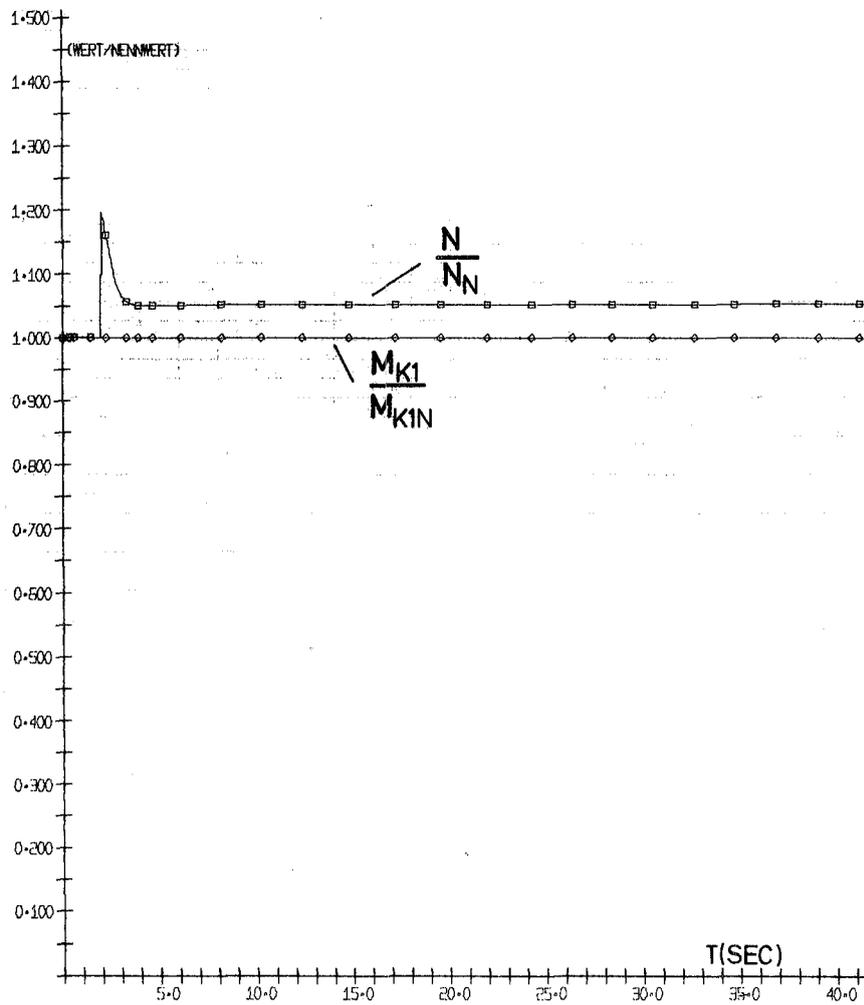


ABB-00021 REAKTORLEISTUNG UND NA-DURCHFLOSS BEI DELK=5E-03

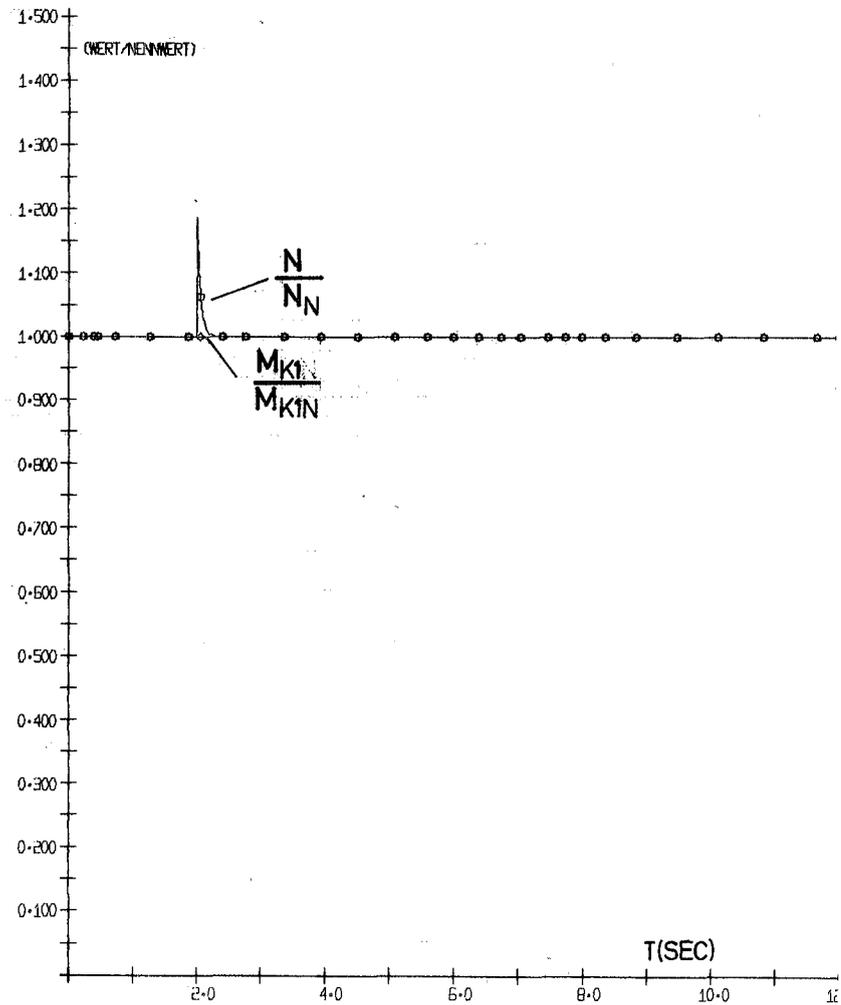


ABB-00022 REAKTORLEISTUNG UND NA-DURCHFLOSS BEI DELK=5E-03

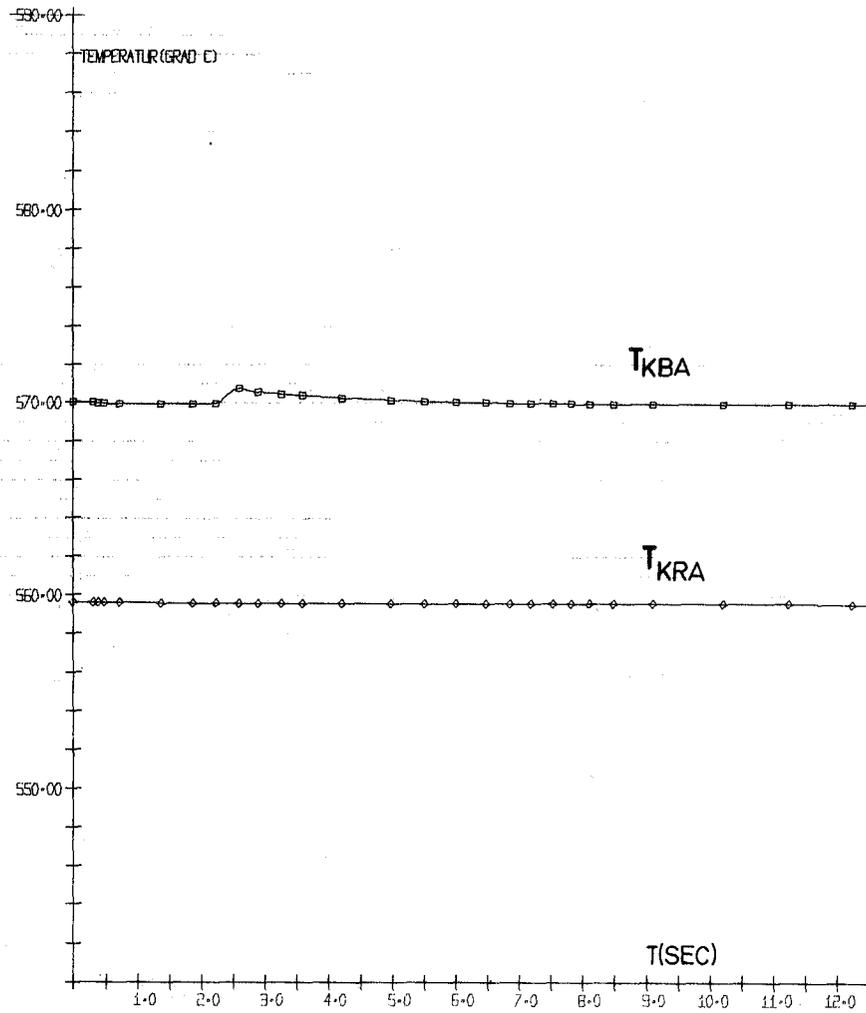


ABB-00023 VERLAUF DER REGELGRÖSSEN TKBA UND TKRA BEI DELK=5E-03

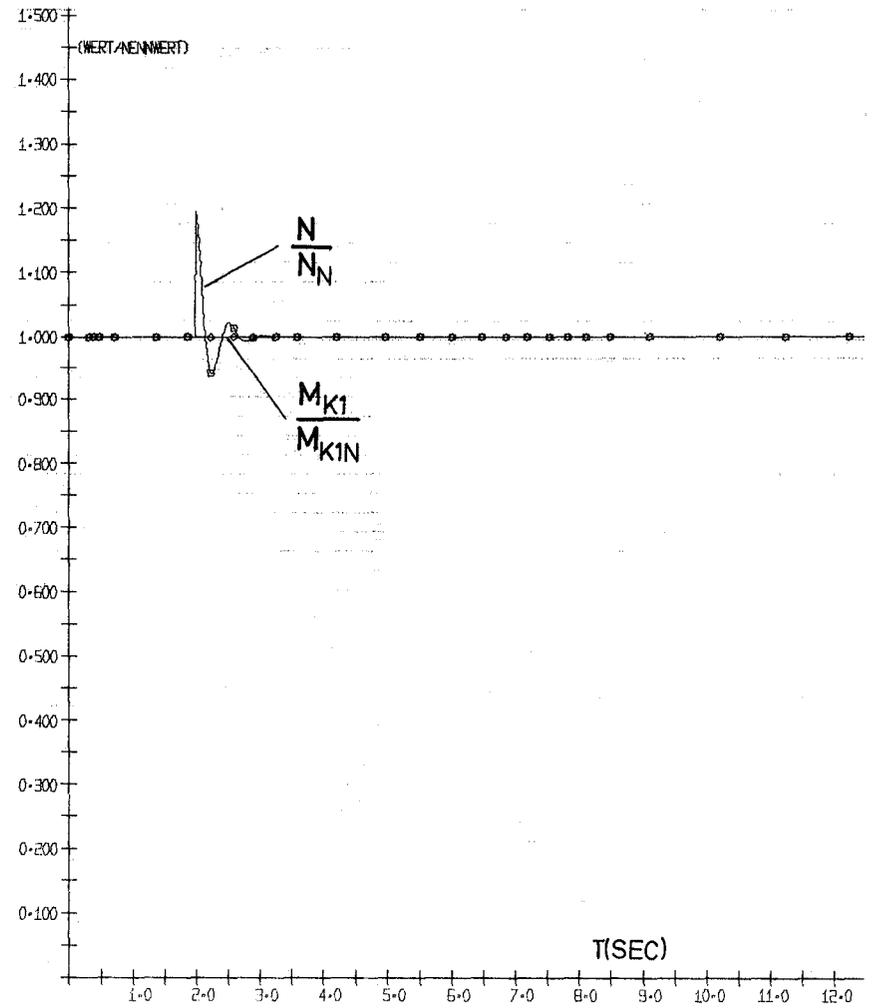


ABB-00024 REAKTORLEISTUNG UND NA₂O₃-DURCHFLOß BEI DELK=5E-03

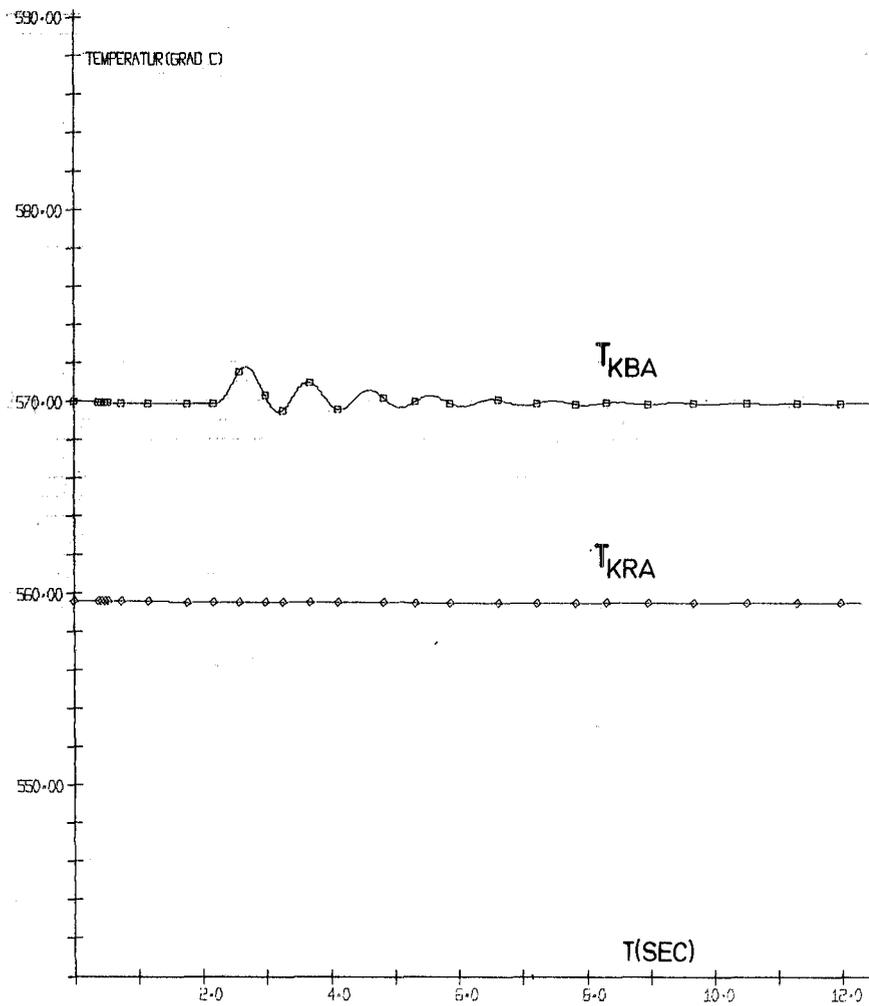


ABB-00025 VERLAUF DER REGELGRÖßEN TKBA UND TKRA BEI DELK=5E-03

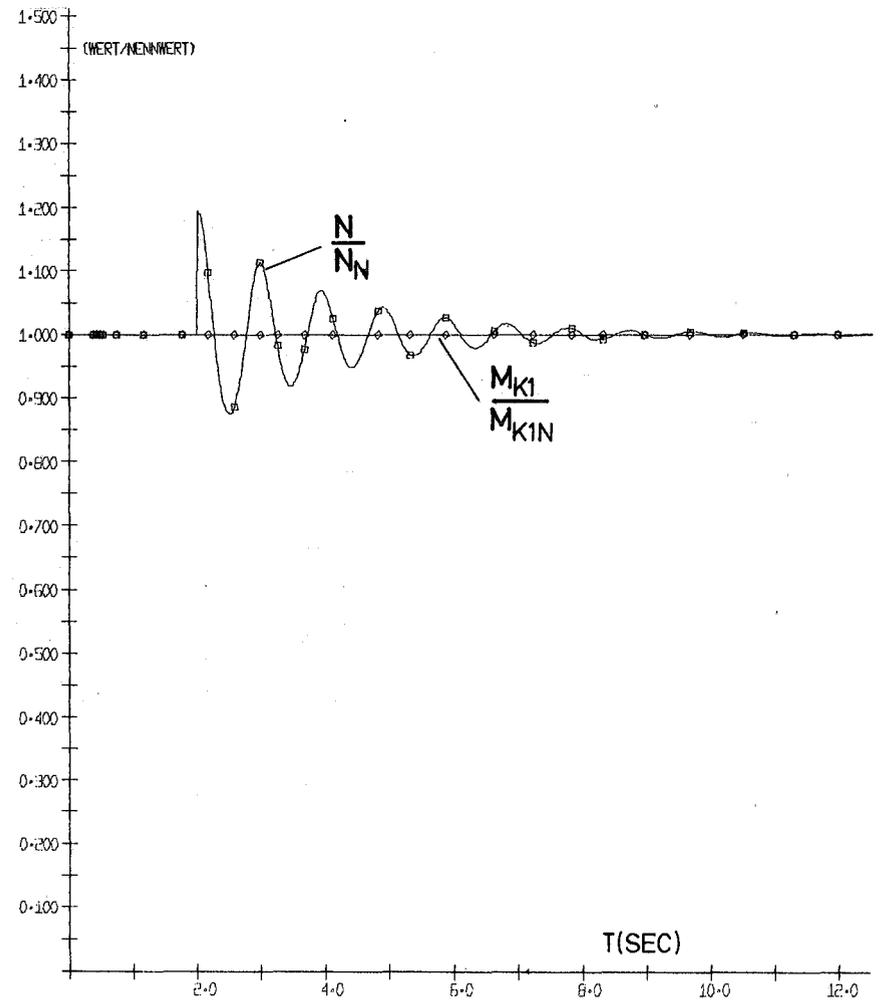


ABB-00026 REAKTORLEISTUNG UND NA-DURCHFLOSS BEI DELK=5E-03

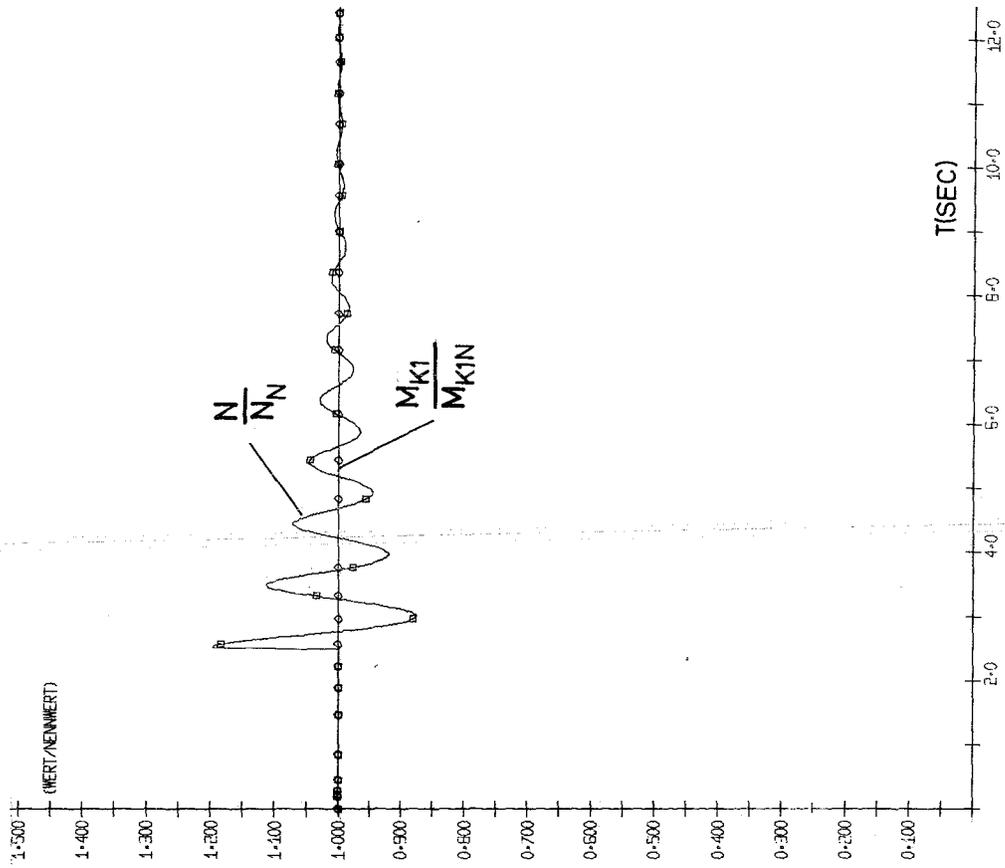


ABB-00027 REAKTORLEISTUNG UND NA-DURCHFLOSS BEI DELT=5E-3

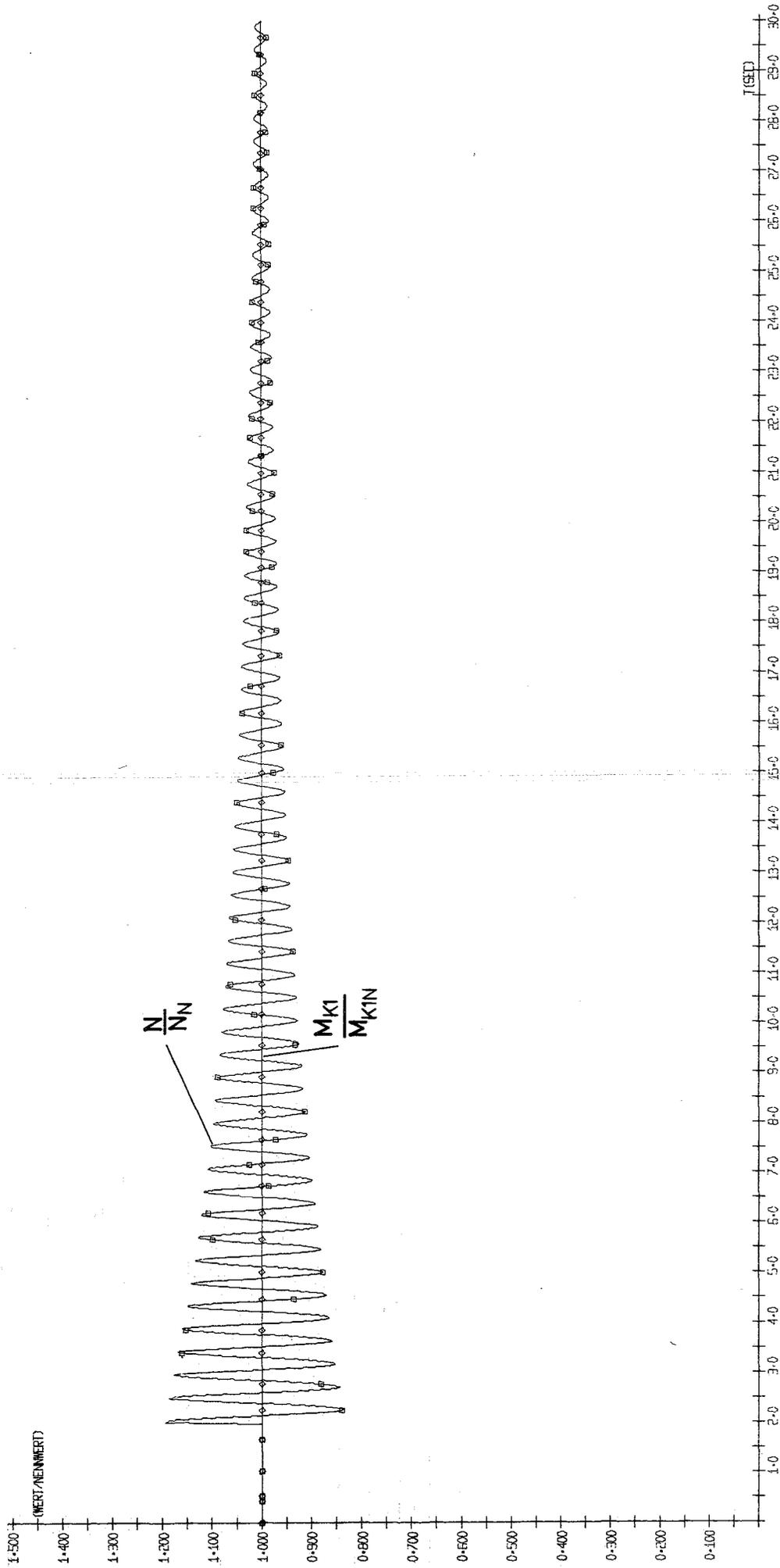


ABB-00028 REAKTORLEISTUNG UND NA-DURCHFLOß BEI DELK-5F-03

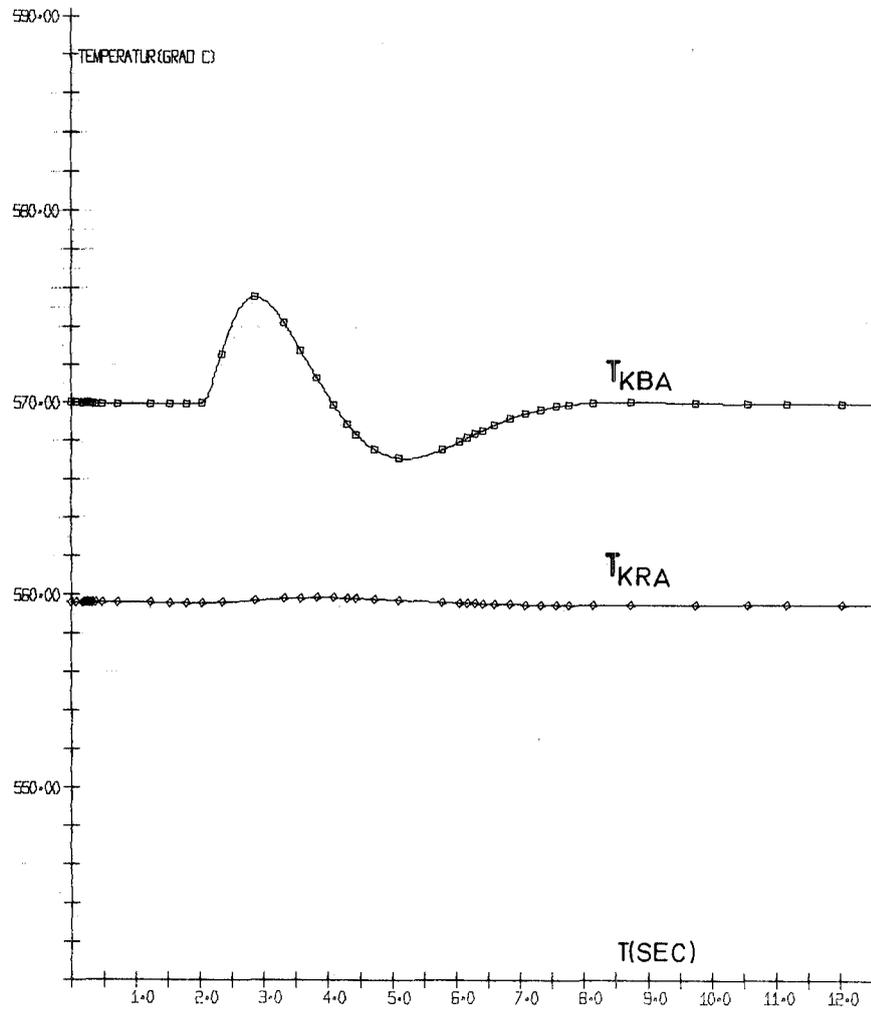


ABB-00029 VERLAUF DER REGELGRÖSSEN T_{KBA} UND T_{KRA} BEI $DELK=5E-03$

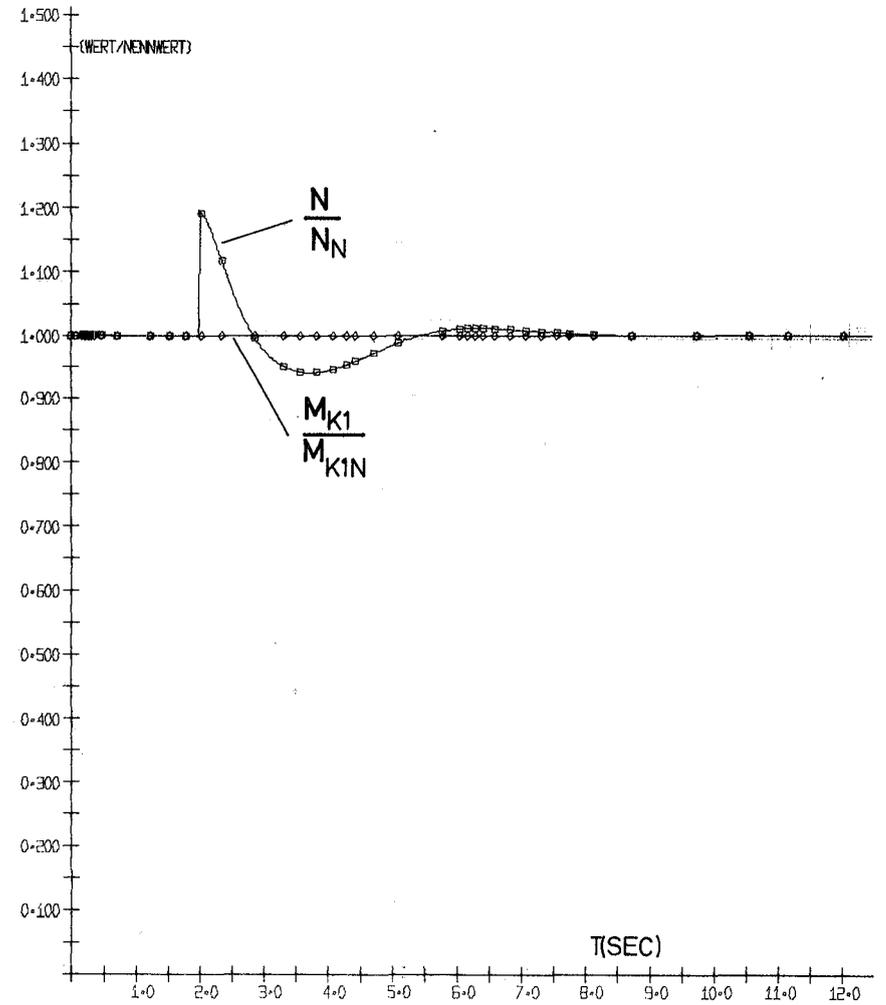


ABB-00030 REAKTORLEISTUNG UND NA-DURCHFLOSS BEI $DELK=5E-03$

