

# Realisierung eines innovativen In-Core Überwachungssystems für den PWR-Reaktortyp mit der Funktion des Posthavarienmonitorings

Dr.-Ing. Juri L. Tsoglin KIW- Gesellschaft e.V.

Tel./Fax +49(0)351 5633169

Email: [y.tsoglin@gmail.com](mailto:y.tsoglin@gmail.com)



# Bestandsaufnahme bestehender Überwachungssysteme

Aktuelle Überwachungssysteme für das Monitoring der Energiefreisetzung von Atomkraftwerken basieren auf der Messung des Neutronenflusses (Neutronenideologie). Hier besteht jedoch die Notwendigkeit, unkontrollierbare Parameter, die sich im Zusammenhang und als Folge

- der Abbrennung des Messfühlermaterials und des Brennstoffes
- des Unterschieds der Neutronen-Flüsse innerhalb des Brennstoffes /Detektorraums
- von Neutronenflussstörungen durch den Detektor

ergeben, mit Hilfe von komplexen Hochrechnungen einzuschätzen und zu berücksichtigen.

Dazu kommt die Unmöglichkeit, die Empfindlichkeit der Neutronen-Detektoren während des Betriebes direkt zu testen

# SEVAN- System – innovative Überwachung der Energiefreisetzung

In den 80-er Jahren wurde im Institut für Kernforschung Kiew ein innovatives In-Core Überwachungssystem für den zweiten Block des Armenischen Atomkraftwerks WWER 440 (AAKW Block 2) entwickelt, das den Status eines experimentellen Systems (Bezeichnung: „SEVAN“) erhielt.

Diesem System lag eine neuartige physikalische Ideologie zugrunde – *Verwirklichen der Energiefreisetzungskontrolle der Spaltzone durch Überwachung des Gamma-Strahlungsfeldes, weil die Gammastrahlung ein genaue numerisch definierter Wert als Folge des Spaltungsaktes und die Relation zwischen Gammastrahlungsdichte und Spaltungsrate eindeutig ist.*

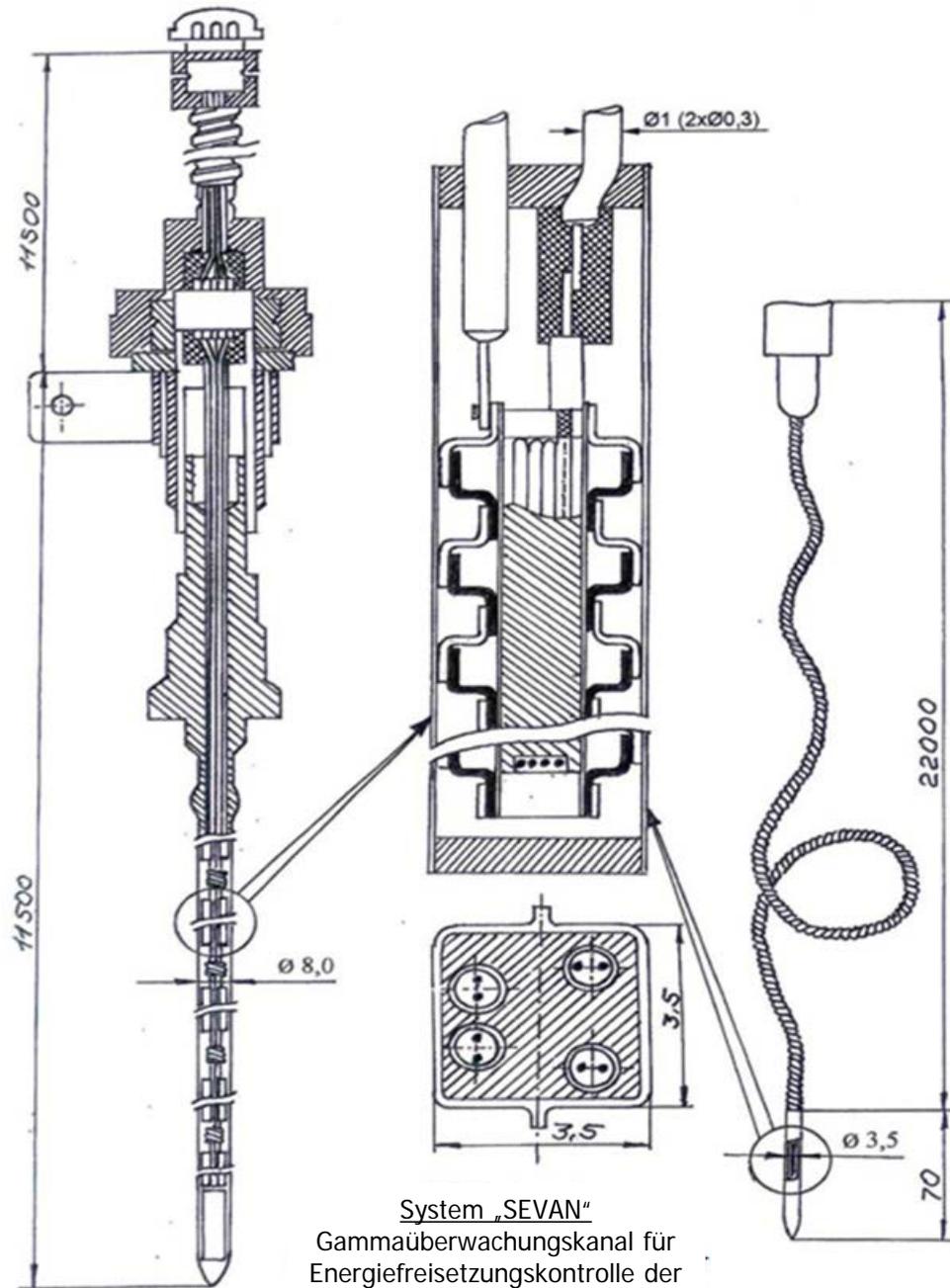
Als Primärsensoren wurden dabei *neue, speziell entwickelte, kalorimetrische Gammadetektoren (KGD) verwendet*

# SEVAN- System – innovative Überwachung der Energiefreisetzung

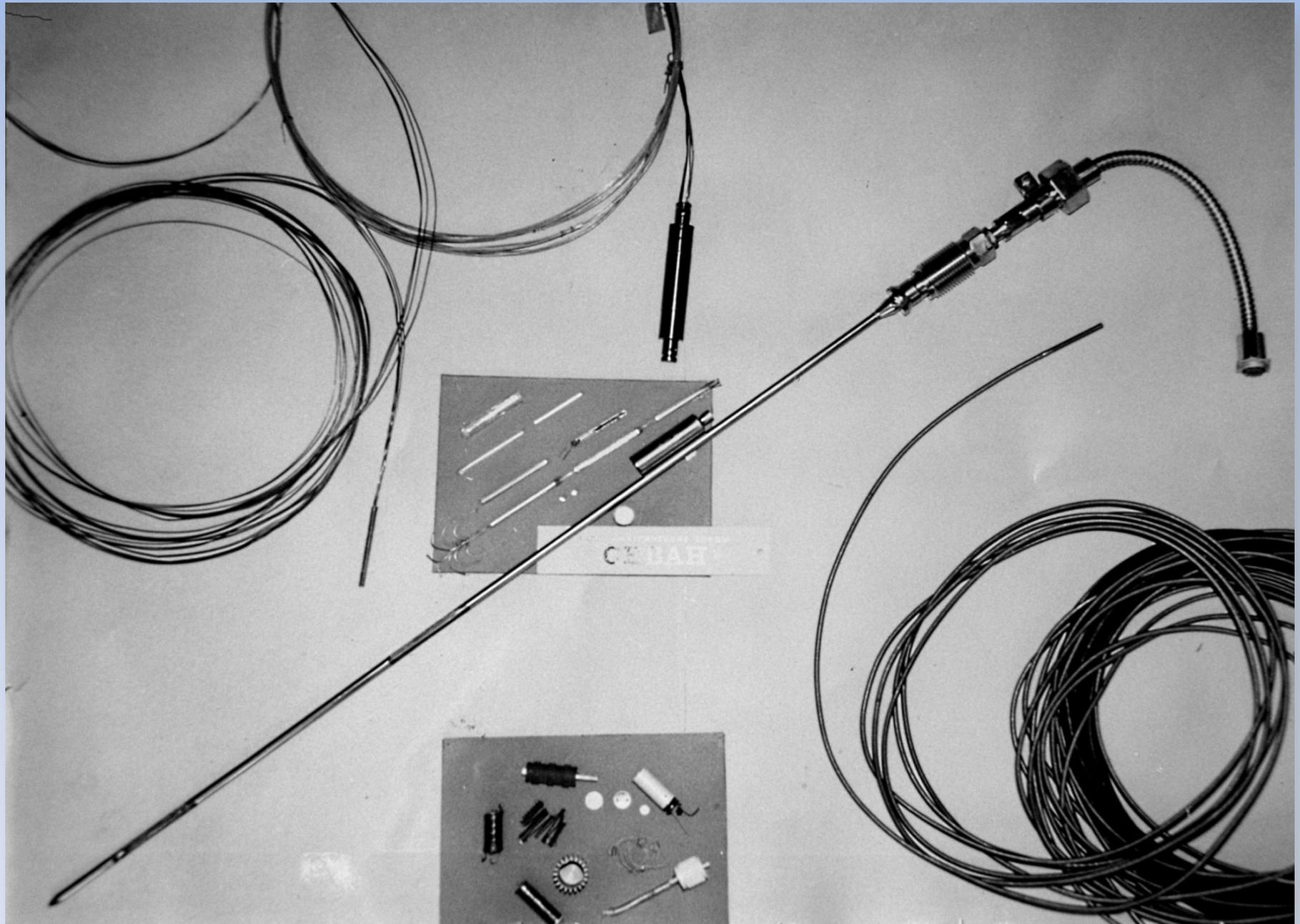
Die technische Realisierung der In-Core Überwachung läuft mittels die in der Spaltzone verteilten sog. Überwachungskanäle.

Der Gammaüberwachungskanal (GÜK) der Energiefreisetzung – als Analog zum Neutronenüberwachungskanal (NÜK) – enthält einen Detektorensatz von 5 KGD, die mit einem Abstand von 500 mm voneinander auf die Spaltzonenhöhe (2500 mm) verteilt werden. Jeder Detektor enthält ein in die Konstruktion integriertes Kalibrierungselement und einen Testkörper aus Zirkonium, dem reinen Gamma - Absorber, als Messstoff und hat folgende Parameter: das Außenmaß [L x B x H mm] – 3,9 x 3,9 x 50, die Arbeitstemperatur – bis 1000° C.

Die Gesamtansicht eines GÜK und die Konstruktion des Gamma-Kalorimeters sind auf der **Folie 5** dargestellt. Das GÜK –Modell und die Muster der kalorimetrischen Incore- Detektoren verschiedenen Typs sind auf dem Foto auf **Folie 6** zu sehen.



System „SEVAN“  
Gammaüberwachungskanal für  
Energiefreisetzungskontrolle der  
Spaltzone von WWER-440

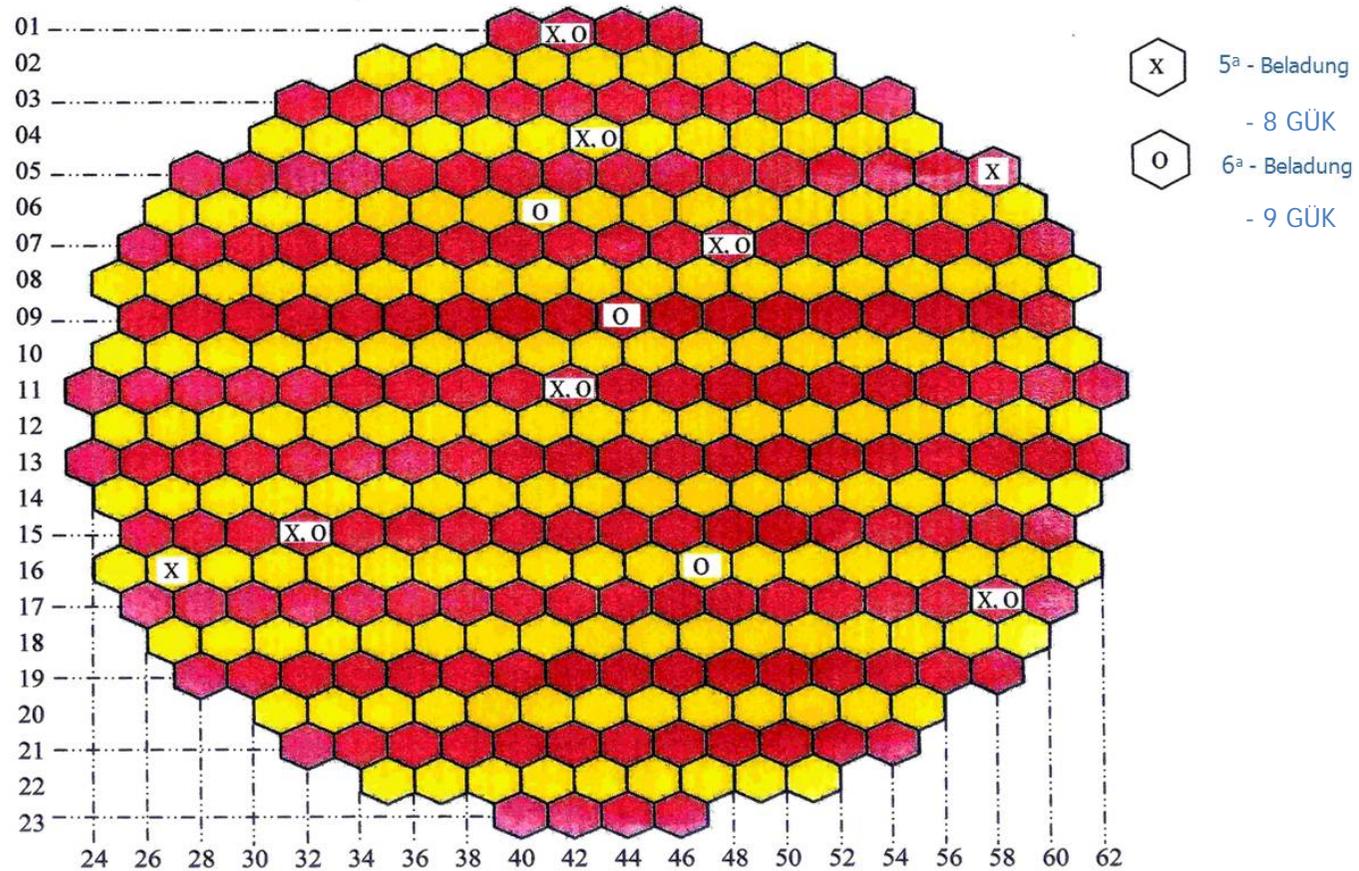


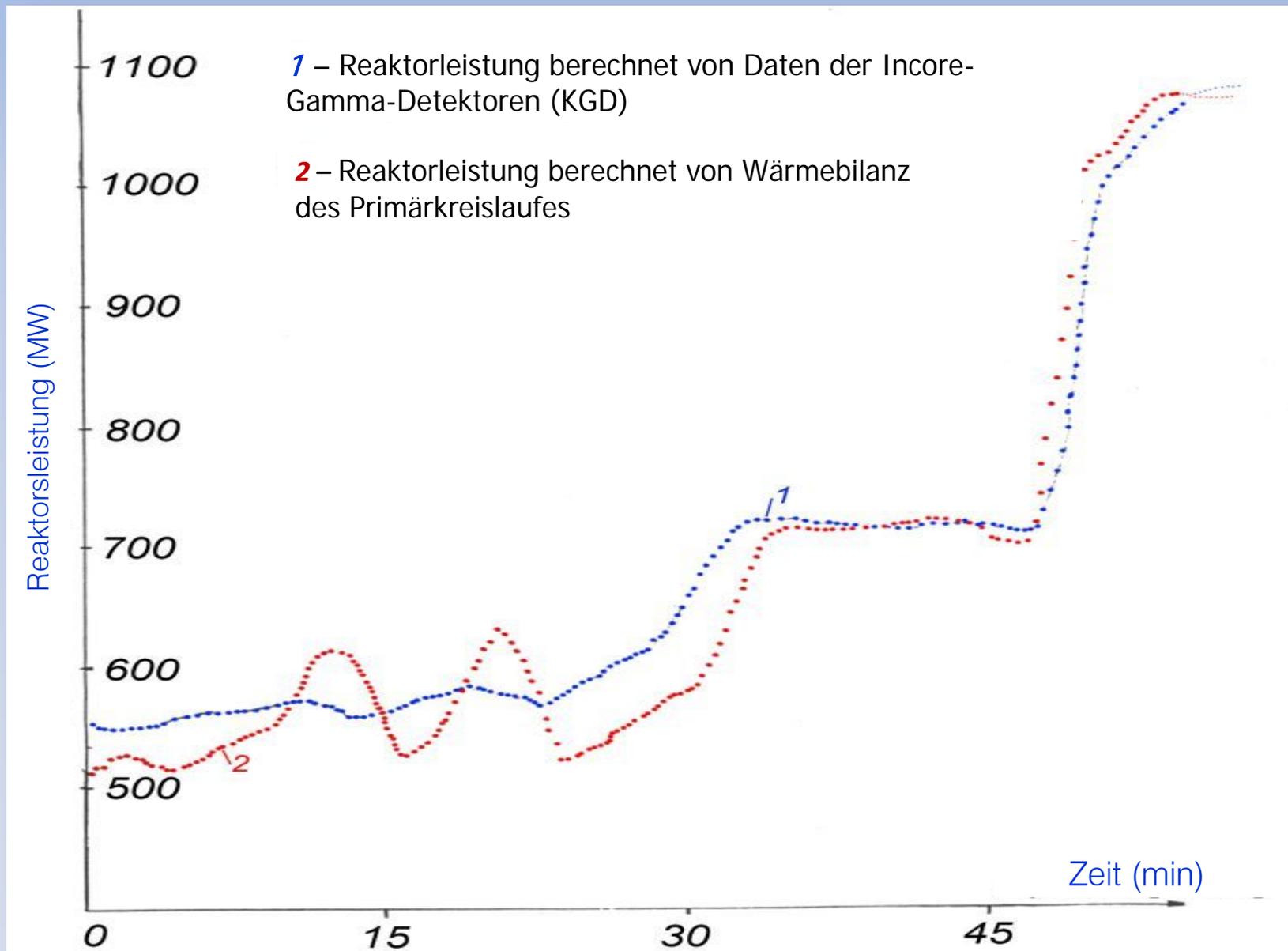
Folie 6

# SEVAN-System – innovative Überwachung der Energiefreisetzung

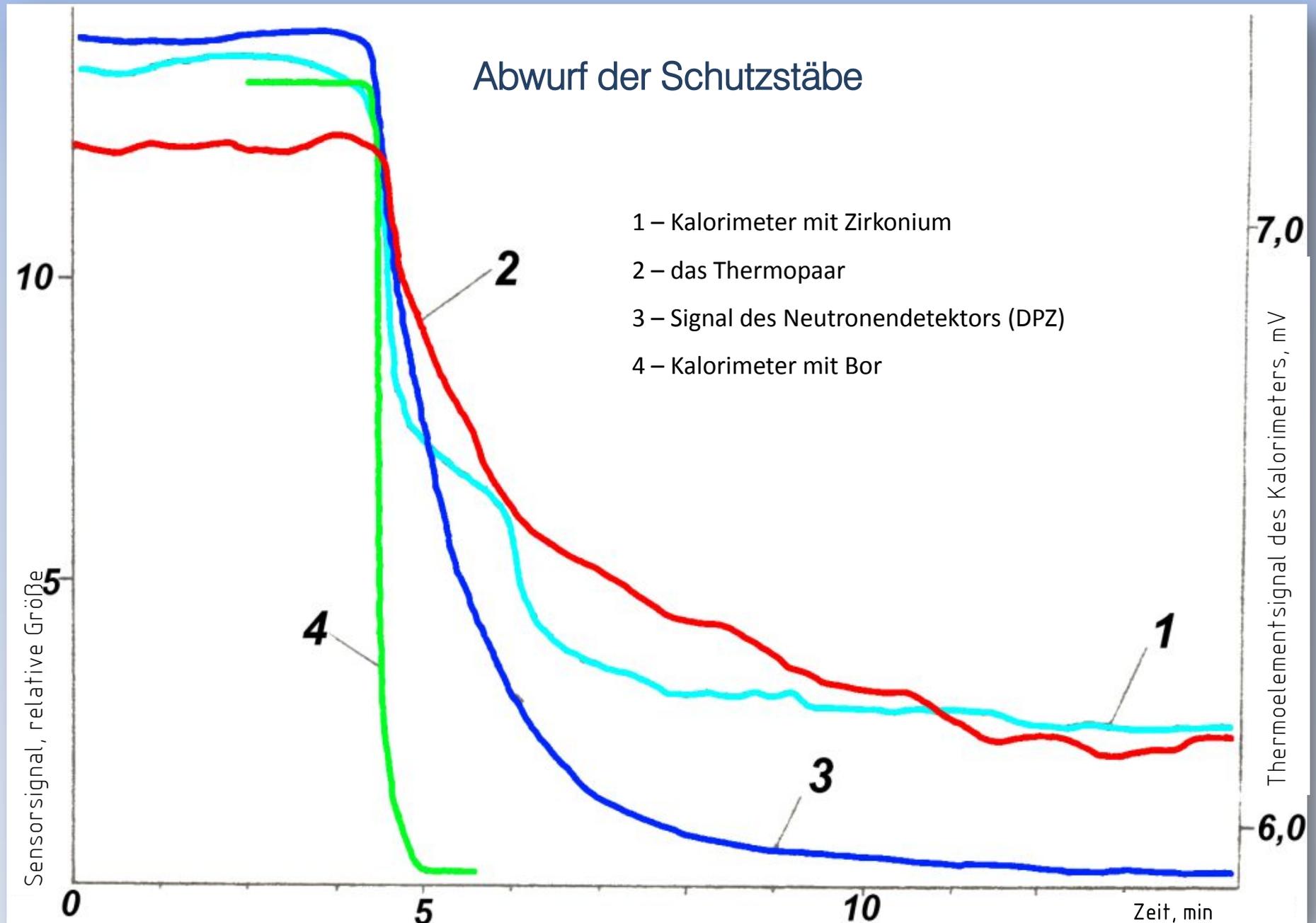
- Die Primärsensoren wurden unter Arbeitsbedingungen im AAKW Block 2 (Reaktortyp WWER-440) im Rahmen von vier Brennstoffkampagnen mit je 8-10 Kanälen innerhalb einer Kampagne getestet (**Folie 8**, für zwei Brennstoffbeladungen Nr. 5 und Nr. 6, entsprechend „X“ und „O“ – Lage der Messkanäle). Die Tests bestätigten:
  - eine hohe Arbeitsfähigkeit der Detektoren (8-10 % Leistungsversagen pro Kampagne **unter** Beibehaltung der Funktionsfähigkeit von GÜK im Ganzen)
  - eine adäquate Reaktion der Detektoren auf die Situationsänderungen in der Spaltzone; s. **Folie 9**
  - gute dynamische Charakteristiken der Detektoren – Zeitkonstante  $< 2$  sec; s. **Folie 10**
  - Beibehaltung der Kalibrierungscharakteristik innerhalb der Kampagne, also hohe metrologische Zuverlässigkeit der Primärsensoren des Systems; s. **Folie 11**
- Diese Testergebnisse waren der **primäre** Beweis für die Richtigkeit des Übergangsalgorithmus von der Anzeige der Gamma-Detektoren zu den Energiefreisetzungsgrößen in der Kassette.

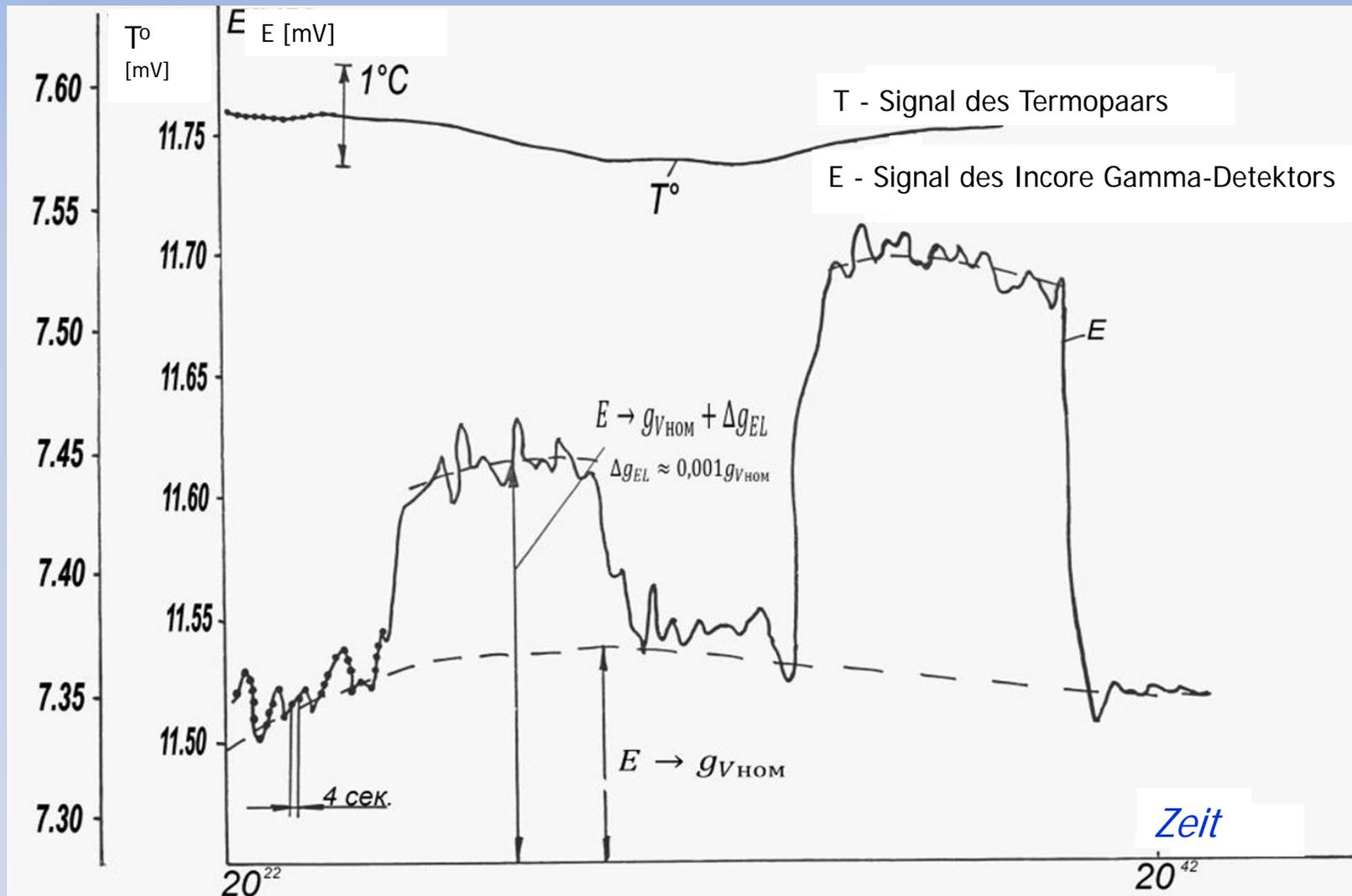
## Das Kartogramm der Spaltzone des AAKW Block 2





Darstellung der Hochfahrendynamik des Reaktors des AAKW  
Block 2 nach Messangaben des „SEVAN“-Systems





Graduierung des kalorimetrischen Gamma-Detektors in einem GÜK von WWER-440-Reaktor (Block 2 des AAKW Block 2) bei Nominalleistung 1200 MW-Warm.

- Eine weitere Bestätigung der Richtigkeit der Übergangsalgorithmen und der gesamten physikalischen Modelle des Sevan-Systems wurde anhand spezieller Berechnungen und direkter zielgerichteter Experimente im Reaktor AAKW Block 2 durchgeführt, und zwar wie folgt:
  - In theoretischen Untersuchungen unter Berücksichtigung von zwei Gruppen von Gamma-Quellen und ihrer räumlich-energetischen Verteilung in der Spaltzone, basierend auf neutronen-physikalischen Berechnungen nach dem **BIPR7-Code** (Programm-Code), wurde die Proportionalität zwischen der Gammaquellendichte in einem bestimmten Raumpunkt der Spaltzone und der Reaktorleistung zu einem bestimmten Zeitpunkt formalisiert.
  - Bei den Incore-Experimenten wurde die gemessene Energiefreisetzungsdichte in den Testkörpern der Gammadetektoren (KGD), die in den Brennstoffkassetten mit jeweils unterschiedlicher Anreicherung und Abbrennung für die 5.- und 6. Brennstoffbeladung des Reaktors installiert wurden, mit denselben berechneten Größen verglichen. Die Vergleichsergebnisse haben ganz korrekt konvergiert.
- Demzufolge wurde die Richtigkeit der Messungen/Bestimmungen der Energiefreisetzung in den Überwachungskassetten der Spaltzone bestätigt. **(Folien 13, 14, 15)**

Experimentelle und berechnete spezifische Energieleistung in Testkörpern der KGD  
(die 5. Beladung AAKW Block 2,  $N = 50\%$  von  $N_{\text{nom}}$ )

Koordinaten von Kassetten	Anreicherung %	Abbrennung $\text{Kg}_{\text{ Schlacken}} / T_u$	$q_{\text{exp.}}$ $\text{W}/\text{cm}^3$	$q_{\text{berechn.}}$ $\text{W}/\text{cm}^3$	Abweichung %
11 - 42	3,6	27,4	5,65	5,42	-4,2
07 - 48	3,6	22,8	5,14	5,03	-2,1
15 - 32	3,6	14,7	4,97	5,07	+1,9
04 - 43	3,6	15,6	4,29	4,72	+9,0
16 - 27	3,6	4,0	4,98	4,85	+2,6
17 - 58	3,6	10,6	4,56	4,60	+0,8
01 - 42	3,6	2,6	4,12	4,28	+3,8
05 - 58	3,6	2,1	4,11	4,32	+5,1

Experimentelle und berechnete spezifische Energieleistung in Testkörpern der KGD  
(die 6. Beladung AAKW Block 2,  $N = 38\%$  von  $N_{nom}$ )

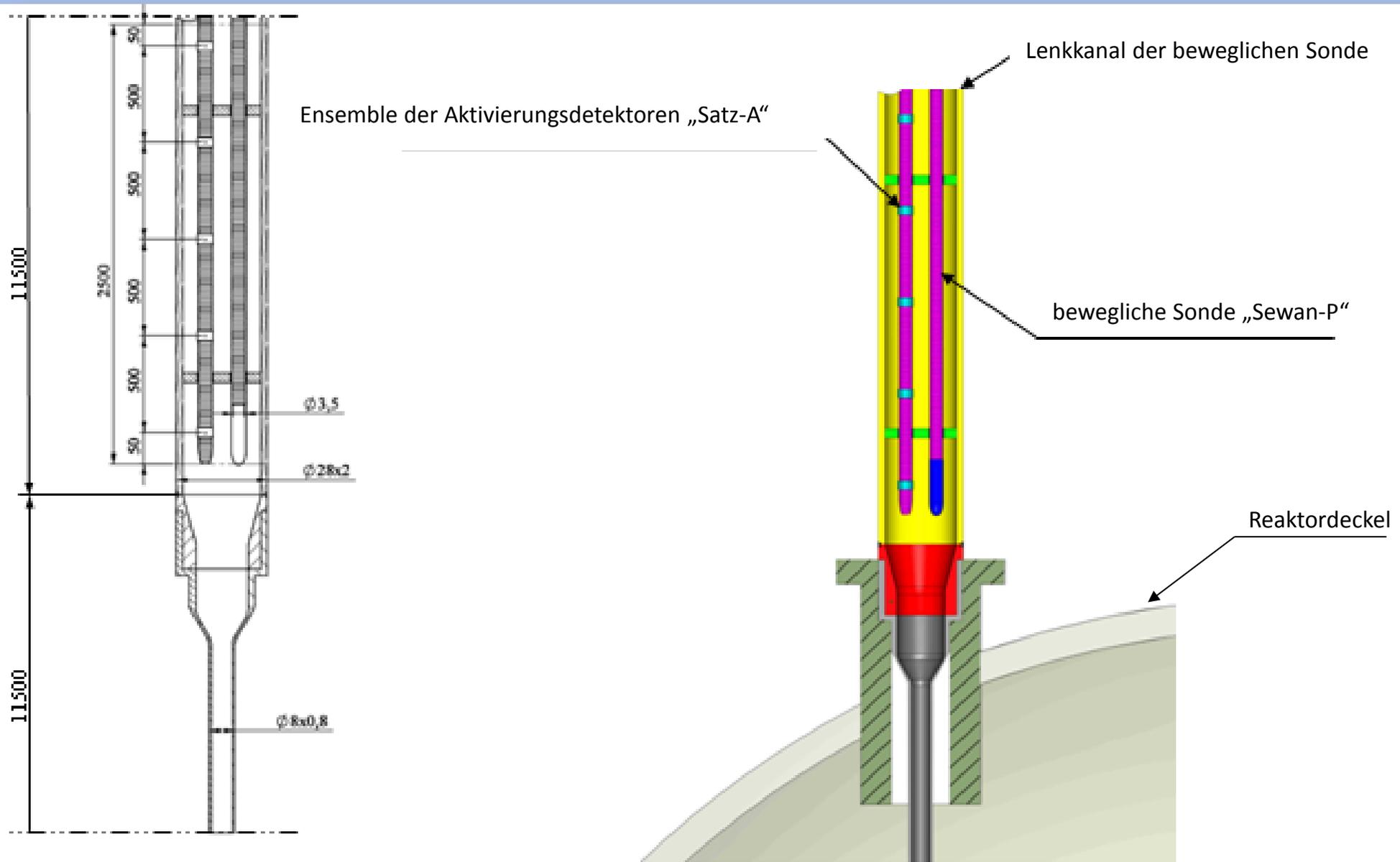
Koordinaten von Kassetten	Anreicherung %	Abbrennung Kg Schlacken / $T_u$	$q_{exp.}$ W/cm <sup>3</sup>	$q_{berechn.}$ W/cm <sup>3</sup>	Abweichung %
07 - 48	3,6	9,8	3,81	3,68	-3,5
09 - 44	3,6	7,3	3,24	3,21	-0,8
04 - 43	3,6	24,4	3,89	3,69	-5,3
11 - 42	3,6	13,3	2,95	2,49	-15,5
06 - 41	3,6	12,8	3,53	3,12	-12,0
15 - 32	3,6	12,4	3,38	3,07	-9,3
01 - 42	3,6	0,5	1,79	1,79	0,0
17 - 58	3,6	0,8	2,39	2,52	+5,3
16 - 47	3,6	1,0	2,72	2,79	+8,5

Experimentelle und berechnete spezifische Energieleistung in Testkörpern der KGD  
(die 6. Beladung AAKW Block 2,  $N = N_{\text{nom}}$ )

Koordinaten von Kassetten	Anreicherung %	Abbrennung $\text{Kg}_{\text{Schlacken}} / T_u$	$q_{\text{exp.}}$ $\text{W/cm}^3$	$q_{\text{berechn.}}$ $\text{W/cm}^3$	Abweichung %
07- 48	3,6	9,8	12,01	11,65	-3,4
09 - 44	3,6	7,3	10,78	10,99	+2,0
04 - 43	3,6	24,4	8,78	8,57	-2,4
11 - 42	3,6	13,3	10,88	10,54	-3,2
06 - 41	3,6	12,8	10,84	10,63	-2,0
15 - 32	3,6	12,4	10,44	10,50	+0,6
01 - 42	3,6	0,5	5,91	6,13	+3,7
17 - 58	3,6	0,8	9,77	10,09	+3,3
16 - 47	3,6	1,0	10,37	9,56	-7,8

- Eine vollständige Prüfung der Zuverlässigkeit des Überwachungsalgorithmus der Energiefreisetzung in der Spaltzone wurde in den Langzeitversuchen im AAKW Block 2 realisiert. Dabei wurde in ein und derselben Kassette der schnelle Neutronenfluss des Spaltungsspektrums mit einer Energie ab 8 MeV gleichzeitig nach zwei Verfahren bestimmt:
  - durch direkte Aktivierungsmessungen
  - durch Berechnungen auf der Basis der Spaltungsdichte, die in kalorimetrischen Messungen von den Gamma-Detektoren mittels des Übergangsalgorithmus bestimmt wurde.

- Für das Experiment wurde eine spezielle Einrichtung an der Eingangsbuchse des leeren Überwachungskanal installiert. In der Einrichtung wurden am Kanaleingang zwei Bemessungssätze gleichzeitig angebracht und zwar: einer, der „Satz-A“, mit einer Reihe von Aktivierungsdetektoren mit der Energieschwelle ab **8 MeV**, und der andere – eine bewegliche kalorimetrische Sonde „Sevan-P“ mit einem KGD standardisierter Ausführung. Beide Sätze konnten sich schnell in die Spaltzone bewegen bzw. im Falle der Sonde „Sevan-P“ die Energieverteilung scannen oder, im Falle – der „Satz-A“, für einige Minuten bestrahlt werden (**Folien 18, 19**)
- Die experimentellen Ergebnisse wurden für die Kasette beim unterschiedlichen Abbrand und für zwei unterschiedliche Brennstoffbeladungen ermittelt (vgl. Tabelle). Eine gute Datenübereinstimmung bestätigt die Zuverlässigkeit des entwickelten Algorithmus, (**Folie 20**)



Ensemble der Aktivierungsdetektoren „Satz-A“

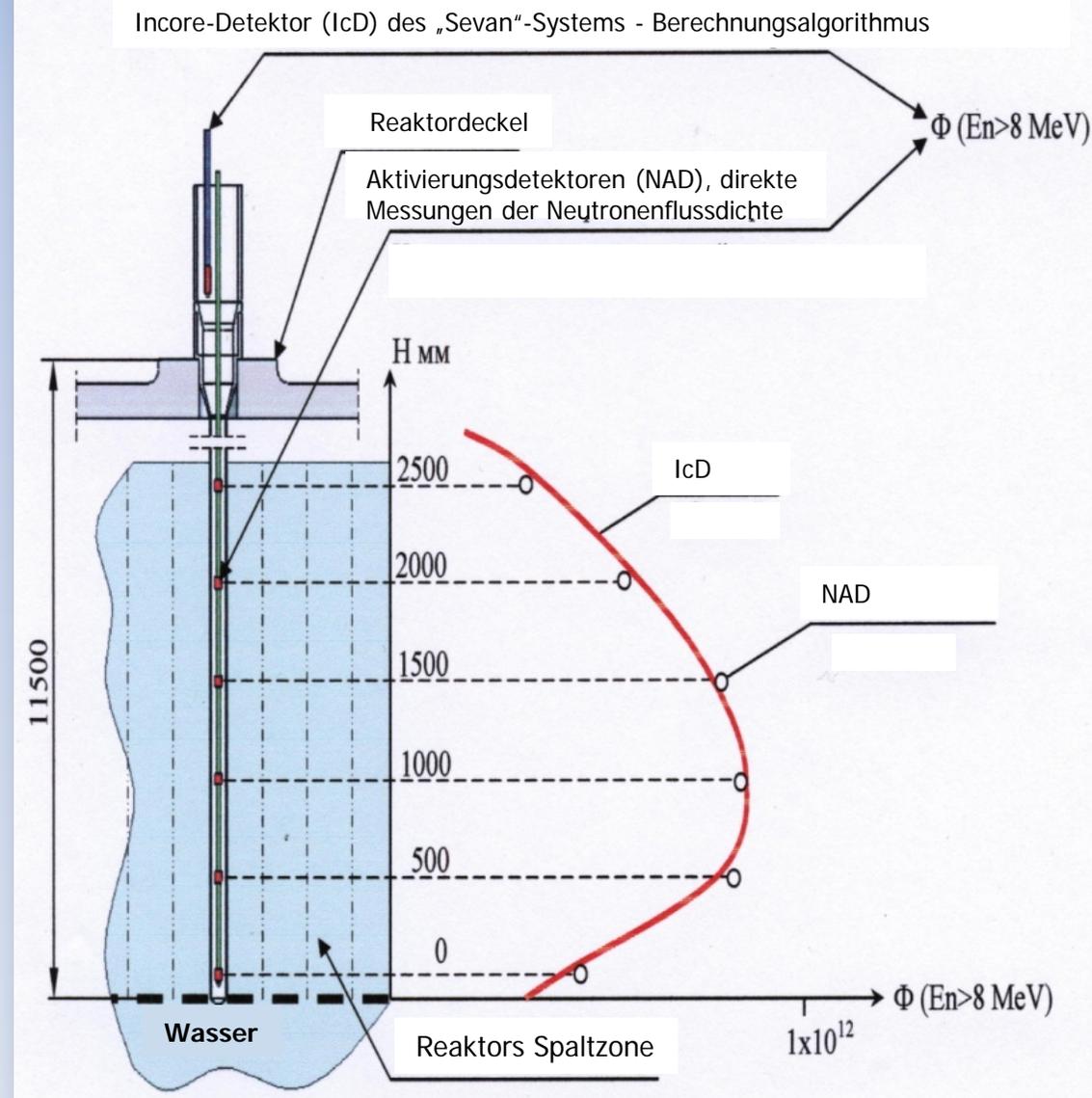
Lenkkanal der beweglichen Sonde

bewegliche Sonde „Sewan-P“

Reaktordeckel

Experimentelle Einrichtungen für Vergleichsbemessungen

## Schema des Experiments



## Datenvergleich

Abbrand H MM	80 MWd/T <sub>u</sub>		204 MWd/T <sub>u</sub>		236 MWd/T <sub>u</sub>		264 MWd/T <sub>u</sub>		336 MWd/T <sub>u</sub>	
	2500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	4,9E11	4,8E11	5,4E11	5,6E11	7,0E11	7,1E11	5,8E11	5,9E11	6,2E11	6,1E11
1500	6,0E11	6,1E11	8,1E11	7,7E11	8,2E11	8,6E11	6,7E11	6,7E11	6,7E11	6,8E11
1000	7,7E11	7,2E11	8,4E11	8,5E11	1,0E12	9,7E11	6,7E11	6,6E11	6,5E11	6,4E11
500	7,8E11	7,8E11	-	-	8,6E11	8,7E11	6,8E11	6,9E11	6,7E11	6,9E11
0	3,7E11	3,6E11	4,3E11	4,3E11	4,5E11	4,8E11	3,7E11	3,7E11	3,8E11	3,6E11
Detektortyp	IcD	NAD	IcD	NAD	IcD	NAD	IcD	NAD	IcD	NAD

Experimentelle Überprüfung des Übergangsberechnungsalgorithmus von Detektorenangaben zur Energieleistung in der Kasette (5. und 6. Beladung)

# Resümee

1. Das „SEVAN“-System wurde Mitte 1985 in den Versuchsbetrieb genommen und hat bis Ende 1988 erfolgreich funktioniert. Nach dem verheerenden Erdbeben im Dezember 1988 in Armenien wurde das AAKW abgeschaltet. Die Stillsetzung und Abkühlung des zweiten Reaktors wurde absolut sicher vom System „Sevan“ kontrolliert.

Während des Versuchsbetriebs wurde die Richtigkeit der ins System installierten Projektlösungen vollkommen bestätigt, sowohl im Bereich der Detektoren als auch im Bereich der gewählten physikalischen Ideologie.

## Resümee (Fortsetzung)

2. Es wurden wichtige Daten bezüglich der Qualität der Gammaüberwachung ermittelt.

Beispielsweise wurde festgestellt:

- dass die Gamma-Energiefreisetzung im Zirkonium – Testkörper des KGD`'s unmittelbar von der Kassette mit installiertem Messkanal 82 ÷ 89 % beträgt (Messungslokalität)
- dass die Parameter des Algorithmus von der Lokalisierung des Detektors sehr gering abhängig sind und
- dass sie sich auch in den Kassetten mit unterschiedlicher Abbrennung bzw. Verschlackung wenig ändern

Das bedeutet, dass die freien Parameter in den System-Algorithmen die Konstanten sind.

## Resümee (Fortsetzung)

3. Das „SEVAN“- System war in der Lage, die Nachwärmefreisetzung und die Temperatur-Verteilung des abgeschalteten Reaktors sogar bei **einem** Totspannungsausfall zu kontrollieren.
4. Die hohe metrologische Charakteristik von KGD, die **vor allem durch** die Möglichkeit der Kalibrierung während des Betriebs **gegeben** ist, und die Art der gemessenen Größe – der Gamma-Energiefreisetzung – machen die Einfachheit der System-Software aus und sichern die Zuverlässigkeit sowie die Stabilität der Kontrollfunktion, selbst in kritischen Situationen.

## Resümee (Fortsetzung)

5. Die hohe Qualität der Messergebnisse und die positiven praktischen Erfahrungen, die wir in der Life-Anwendung in Armenien mit dem SEVAN-System gemacht haben, sind für uns der Beweis, dass ein System, das *das Gamma-Strahlungsfeld in der Spaltzone überwacht*, den herkömmlichen, Neutronenfluß-basierten Systemen deutlich überlegen ist.

6. Daher kann man herausziehen: es ist sinnvoll, auf der Grundlage des SEVAN-Systems, ein lokales Referenzsystem für den modernen Reaktortyp PWR zu entwickeln, das als Subsystem im Rahmen eines Standard Überwachungssystems (Neutronen) zum Einsatz kommen soll.

Danke  
für Ihre  
Aufmerksamkeit!

# Wirkungsprinzip des kalorimetrischen Detektors (KGD) – als Kalorimeter des integralen Wärmeflusses

- 1 – kontrolliertes Wärmefreisetzungsvolumen –  $V$
- 2 – Meßleitungen
- 3 – Außenmedium
- 4 – Meßhülle – Thermobatterie
- 5 – Differentialthermoelement
- 6 – Thermoelektrode №1 – Alumel
- 7 – Thermoelektrode №2 – Chromel.
- 8 – Elektroisolation

In der Gleichung:

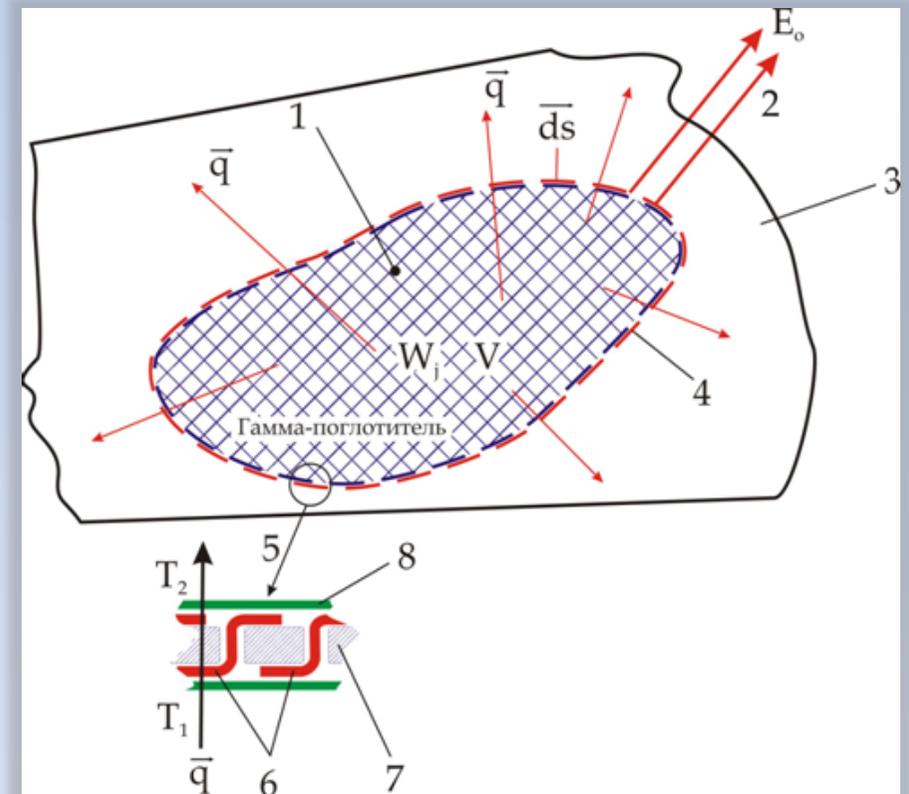
$W_v$  – Gesamtleistung der Wärmefreisetzung  
 $W_j$  – lokale Leistung der Wärmefreisetzung von  
 $j$ -punktformigen Wärmequellen

→

$\vec{q}$  – Wärmeflußvektor

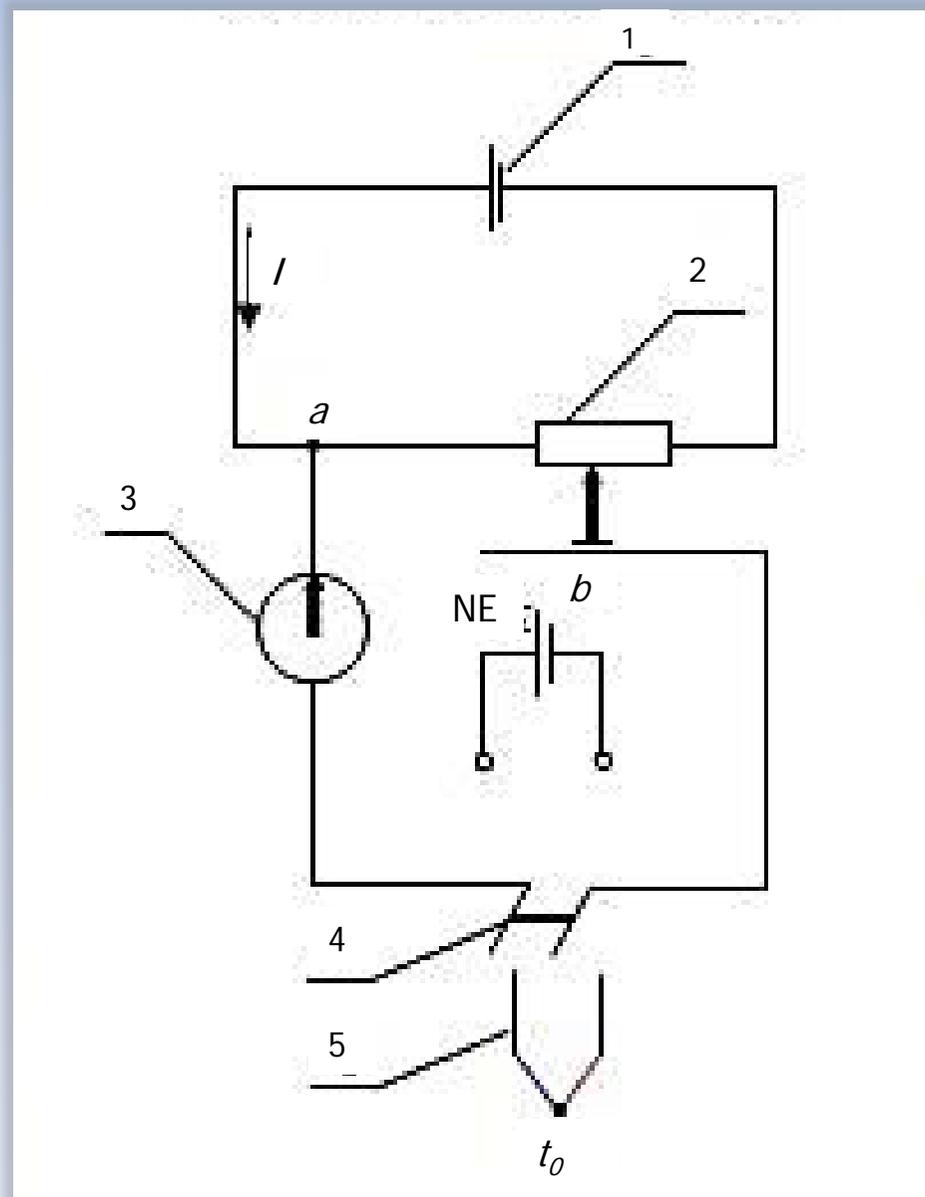
→

$d\vec{s}$  – Flächenelement



$$W_v = \sum_{j=1}^{\infty} w_j = \int_V \operatorname{div} \vec{q} dV = \oint_S \vec{q} \cdot d\vec{s} = \sum_{i=1}^N q_i \Delta S_i = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\lambda}{\delta} \right)_{\text{эфф}} \Delta t_i \Delta S_{\text{эт}} = \left( -\frac{\lambda}{\delta} \right)_{\text{эфф}} \frac{\Delta S_{\text{эт}}}{\alpha} \sum_{i=1}^N \Delta E_i = k E_0$$

# EMK - Kompensationsmessverfahren

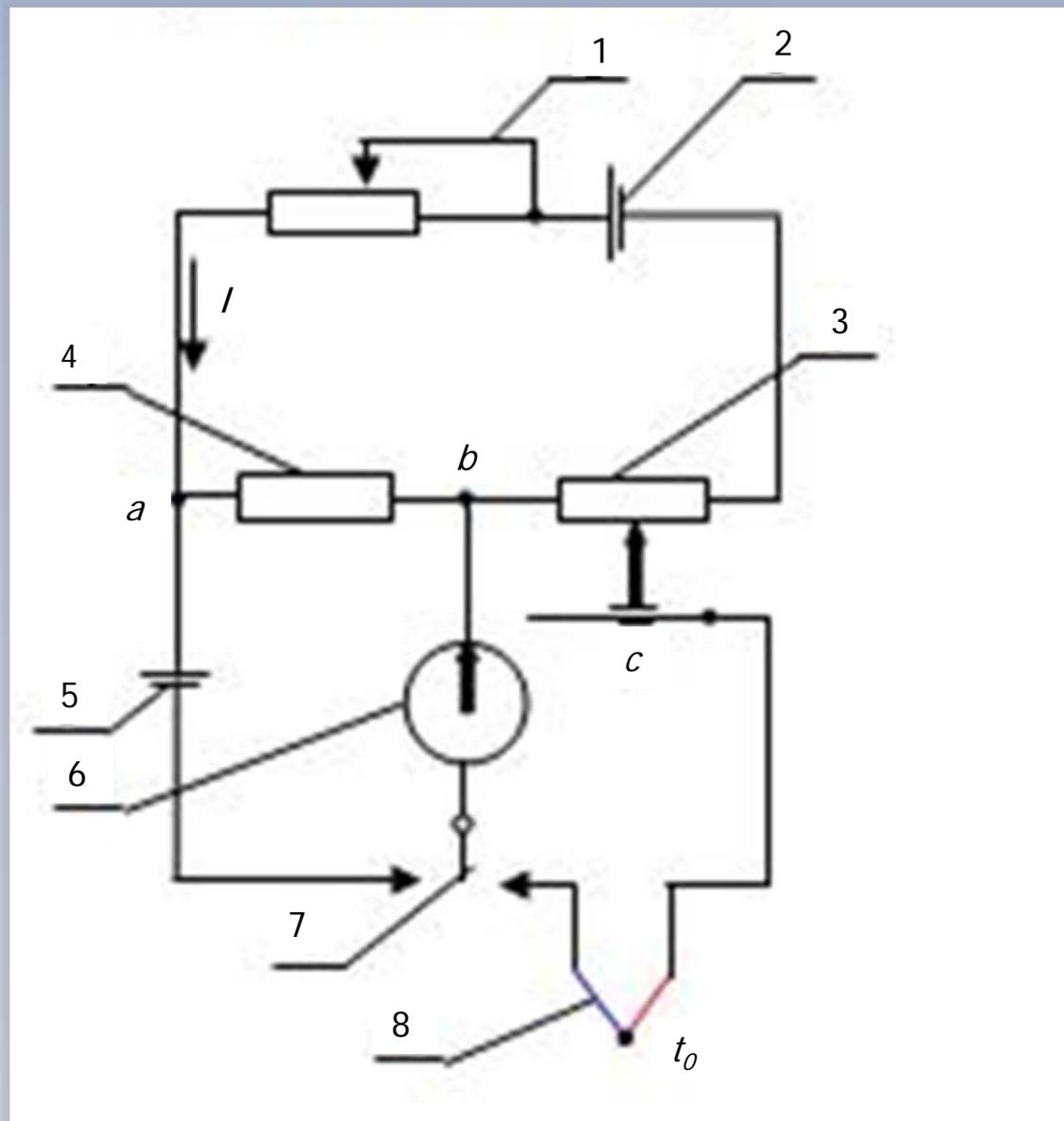


## Legende

1. Arbeitsstromquelle
2. Schiebewiderstand
3. Null-Galvanometer
4. Umschalter
5. Thermocouple

NE. Normalelement

# Schema des Messpotentiometers



## Legende

1. Gesteuerter Widerstand
2. Arbeitsstromquelle
3. Schiebewiderstand
4. Überwachungswiderstand
5. Normalelement
6. Null-Galvanometer
7. Umschalter
8. Thermocouple

Die Gesamtgröße der spezifischen Leistung  $q_{\Sigma}$  der allen  $\gamma$ -Quellen, zum Zeitpunkt  $t$  im Raumpunkt  $r$  der Spaltzone ist:

$$q_{\Sigma}(\vec{r}, E, t) = [\chi_M(E) + \chi_r(E, t_s)] J_f(\vec{r}, t) + \sum_i \chi_e^i(E) \cdot J_e^i(\vec{r}, t)$$

$$C_n = \frac{J_e^i(\vec{r}, \Delta t)}{J_f(\vec{r}, \Delta t)} \approx const, \quad \text{wo } J_f(\vec{r}, t) = N_0 \omega_T(\vec{r}, t),$$

$$N_0 = 3,07 \cdot 10^{10} [\text{Spalt} \cdot \text{vt}^{-1} - 1] \quad \text{für } U^{235},$$

$$\omega_T(\vec{r}, t) [\text{vt} \cdot \text{cm}^{-1} - 3 \cdot \text{s}^{-1} - 1] \quad \text{spezifische Energiefreisetzung zum Zeitpunkt } t, \text{ Raumpunkt } r$$

$$\omega_T(\vec{r}, t) = k_V(\vec{r}) \cdot \bar{\omega}_T(t) \quad \bar{\omega}_T(t) = \frac{N_{\text{warm}}(t)}{V_T}$$

$N_{\text{warm}}(t)$  - Laufende Wärmeleistung zum vorgegebenen Zeitpunkt  $t$

$V_T$  - Brennstoffvolumen in der Spaltzone

$$q_{\Sigma}(\vec{r}, E, t) = \left[ \chi_M(E) + \chi_r(E, t_s) + \sum_i \chi_e^i(E) \cdot C_n^i \right] N_0 \cdot k_V(\vec{r}) \frac{N_{\text{warm}}(t)}{V_T}$$

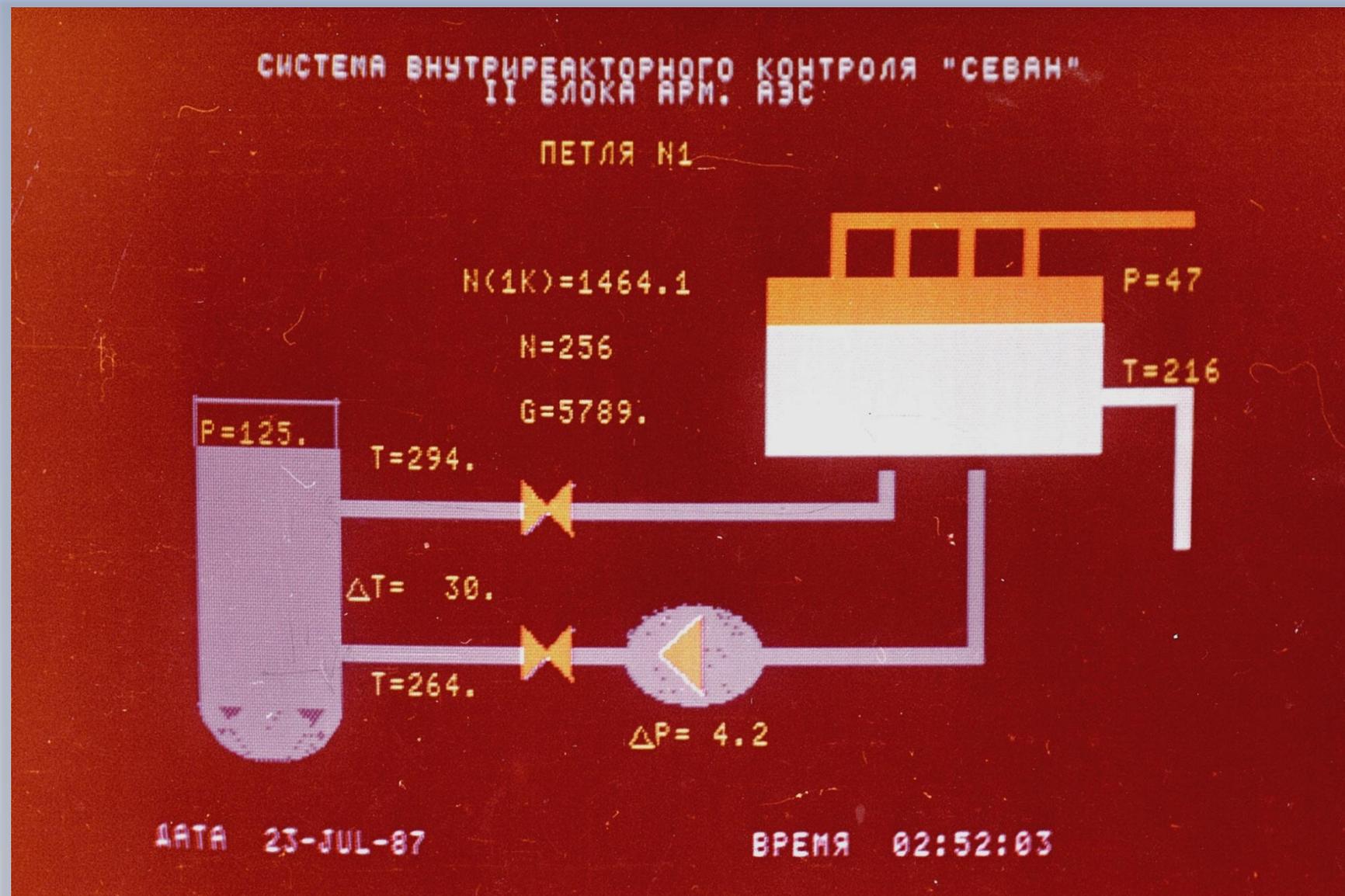
Die Möglichkeit die Gammadetektoren in dem In-core Überwachungssystem zu nutzen besteht darin, dass die bedeutende Leistungsanteil der  $\gamma$ -Quellen der Reaktorleistung zu dem vorgegebenen Zeitpunkt  $t$  proportional ist

# Энергия гамма-квантов, покидающих кассету ВВЭР-440

П. №	Источник гамма $\gamma$ -квантов	Энергия $M_{\text{эв/дел}}$	Обозначение
1	Мгновенные $\gamma$ -кванты деления	7,0	$\chi_m$
2	Запаздывающие $\gamma$ -кванты продуктов деления	5,2	$\chi_\tau$
3	Захватные $\gamma$ -кванты $U^{238}(n; \gamma)$	1,5	$\chi_c^8$
4	Захватные $\gamma$ -кванты $U^{235}(n; \gamma)$	1,2	$\chi_c^5$
5	Захватные $\gamma$ -кванты констр.ист. и замедлитель	1,2	$\chi_c^{\text{констр.}}$
6	Захватные $\gamma$ -кванты на шлаках	1,2	$\chi_c^{\text{шл.}}$
7	сумма	19	$\Sigma$



# Format Primärkreislauf



# Format Reaktoranlage

