

# Protokoll Kritisches Experiment

Fuchs, Gutmann, Kosbab, Kowal, Steindorf, Falker, Richter

30. Januar 2023

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzbeschreibung des Versuches</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Messwerttabellen</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Berechnung der Anhebung</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Fehlerbetrachtung</b>	<b>7</b>
5.1	Statistischer Fehler . . . . .	7
5.2	Erreichen der asymptotischen Neutronendichte . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>9</b>

## 1 Kurzbeschreibung des Versuches

- Zu Beginn wird die Funktionsfähigkeit der Sicherheitssysteme getestet, indem manuell eine Totalabschaltung ausgelöst wird.
- Die Anfahrneutronenquelle wird eingefahren und das Signal „Kernhälften zusammen“ mit dem Schalter „Simulation Kernhälften zusammen“ überbrückt, um auch bei getrennten Kernhälften eine Veränderung der Steuerstäbe zu ermöglichen.
- Es wird die Untergrundaktivität bei ein- und ausgefahrenen Steuerstäben gemessen.
- Anschließend wird die untere Kernhälfte zunächst um 100 Digits angehoben, wonach die Impulsrate mit ein- und ausgefahrenen Steuerstäben gemessen wird.
- Aus den Impulsraten wird berechnet, um wie viele Digits die Kernhälfte erneut angehoben werden darf.
- Die letzten beiden Schritte werden wiederholt, bis durch Extrapolation der Schnittpunkte mit der X-Achse die Ungleichung  $X_{\text{krit, aus}}(i) < X_{\text{max}} < X_{\text{krit, ein}}(i)$  zuverlässig erfüllt ist.

## 2 Messwerttabellen

Zu Beginn werden die Impulsraten für beide Weitbereichsmesskanäle gemessen, wobei die untere Kernhälfte komplett abgesenkt ist.

	Steuerstabs stellung	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert $N_0$
WB 1	ein (0)	7.4	7.3	7.6	7.43
	aus (4000)	9.4	9.3	9.6	9.43
WB 2	ein (0)	6.9	6,6	6,7	6,73
	aus (4000)	10,4	10,3	10,1	10,26

Tabelle 1: Bestimmung der Ausgangswerte  $N_0$

Die originalen Messwerttabellen sind im Anhang aufgeführt, da jedoch ein Fehler in der Berechnung des Multiplikationsfaktors bei Weitbereichsmesskanal 1 enthalten ist, sind die Tabellen an dieser Stelle korrigiert gegeben.

Hubhöhe [ $x_i/dgts.$ ]	Stab- stellung	$N_{i,1}$	Zählraten $N_{i,2}$		$\overline{N}_i$	$N_0/\overline{N}_i$	$k_i$	$M_i$	$\rho_i$
0	ein				7.43	1.000	0.945	18.18	-0.0582
	aus				9.43	1.000	0.945	18.18	-0.0582
100	ein	8.5	8.6		8.55	0.869	0.952	20.92	-0.0502
	aus	10.8	10.7		10.75	0.878	0.952	20.70	-0.0508
200	ein	9.8	9.9		9.85	0.755	0.959	24.10	-0.0433
	aus	13.7	13.9		13.80	0.684	0.962	26.60	-0.0391
300	ein	12.5	12.7		12.60	0.590	0.968	30.86	-0.0335
	aus	18.5	18.3		18.40	0.513	0.972	35.46	-0.0290
400	ein	19.2	18.8		19.00	0.391	0.979	46.51	-0.0220
	aus	36.8	36.4		36.60	0.258	0.986	70.42	-0.0144
450	ein	31.1	30.1		30.60	0.243	0.987	75.19	-0.0135
	aus	87.4	88.6		88.00	0.107	0.994	169.49	-0.0059
500	ein	52.3	52.0		52.15	0.143	0.992	128.21	-0.0079

Tabelle 2: Messwerte für Weitbereichsmesskanal 1

Hubhöhe [ $x_i/dgts.$ ]	Stab- stellung	Zählraten			$N_0/\overline{N}_i$	$k_i$	$M_i$	$\rho_i$
		$N_{i,1}$	$N_{i,2}$	$\overline{N}_i$				
0	ein			6.73	1.000	0.945	18.18	-0.0582
	aus			10.27	1.000	0.945	18.18	-0.0582
100	ein	8.2	7.8	8.00	0.842	0.954	21.60	-0.0486
	aus	11.9	11.5	11.70	0.877	0.952	20.70	-0.0508
200	ein	9.1	9.2	9.15	0.736	0.960	24.69	-0.0422
	aus	14.8	15.2	15.00	0.684	0.962	26.53	-0.0392
300	ein	11.9	11.6	11.75	0.573	0.969	31.75	-0.0325
	aus	21.5	20.8	21.15	0.485	0.973	37.45	-0.0274
400	ein	17.8	18.4	18.10	0.372	0.980	49.02	-0.0208
	aus	40.8	41.3	41.05	0.250	0.986	72.46	-0.0140
450	ein	28.5	29.1	28.80	0.234	0.987	78.12	-0.0130
	aus	96.7	99.3	98.00	0.105	0.994	172.41	-0.0058
500	ein	49.6	49.2	49.40	0.136	0.993	133.33	-0.0076

Tabelle 3: Messwerte für Weitbereichsmesskanal 2

### 3 Berechnung der Anhebung

Dadurch, dass die Neutronendichte in einem kritischen Reaktor bei eingefahrener Anfahrneutronenquelle gegen Unendlich strebt, geht gleichermaßen der reziproke Wert der Neutronendichte gegen Null. Da die Impulsrate eines Neutronenmesskanals direkt proportional zur Neutronendichte ist, kann diese als Messgröße verwendet werden. Ebenfalls kann die Größe normiert werden, indem statt dem reziproken Wert der Impulsrate der Wert  $N_0/N_i$  verwendet wird. Dabei ist  $N_0$  die Impulsrate im Ausgangszustand, wodurch die Größe zu Beginn den Wert 1 annimmt.

Es können nun wiederholte Messungen durchgeführt werden, bei denen ein Parameter verändert wird. Der Schnittpunkt des so gebildeten Graphs mit der X-Achse bestimmt den Wert des Parameters, bei dem der Reaktor kritisch wird.

In diesem Experiment ist dieser Parameter die Hubhöhe der unteren Spaltzonenhälfte.

Nach jeder Veränderung der Position wird eine Messung durchgeführt und die kritische Hubhöhe approximiert. Die Distanz, mit der im nächsten Schritt angehoben wird, wird mit folgender Formel berechnet:

$$\Delta x_{\max} = \frac{x_{\text{krit, min}} - x}{2} \leq 100 \text{ digit}$$

Die untere Kernhälfte wird also um die Hälfte der Distanz zur kritischen Position angehoben, jedoch nie mehr als 100 digit.

Im Verlauf des Experiments ergibt sich folgender Verlauf der Messpunkte:

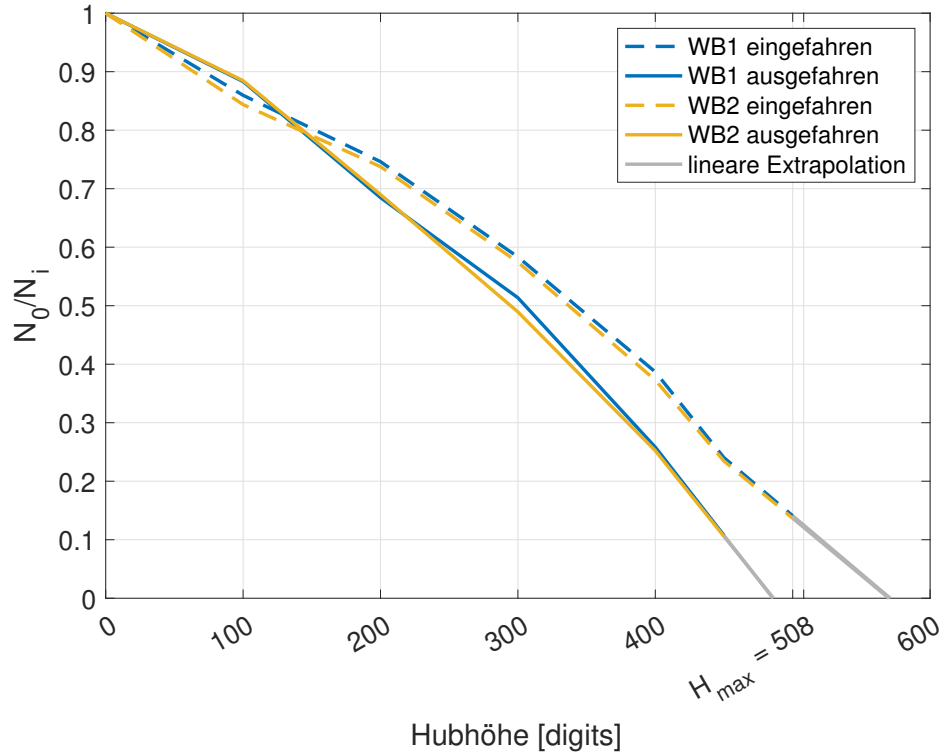


Abbildung 1: Verlauf von  $N_0/N_i$

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, lässt sich aus den letzten zwei Messpunkten die ungefähren kritischen Positionen der unteren Kernhälfte extrapolieren. Bei eingefahrenen Steuerstäben ergibt sich eine kritische Hubhöhe von 571,5 digit (WB1) und 569,4 digit (WB2), bei ausgefahrenen Steuerstäben liegen die kritischen Positionen bei 485,4 digit (WB1) und 486,2 digit (WB2).

## 4 Auswertung

Aus der Veränderung der Neutronendichte lässt sich, mithilfe des initialen Werts, der Multiplikationsfaktor zu jeder Position der unteren Kernhälfte bestimmen.

Aus den Messwerten lässt sich, wie in Tabellen 2 & 3 eingetragen, der Multiplikationsfaktor berechnen:

$$k_0 = 0.945$$

$$k_i = 1 + \frac{N_{i-1}}{N_i} \cdot (k_{i-1} - 1)$$

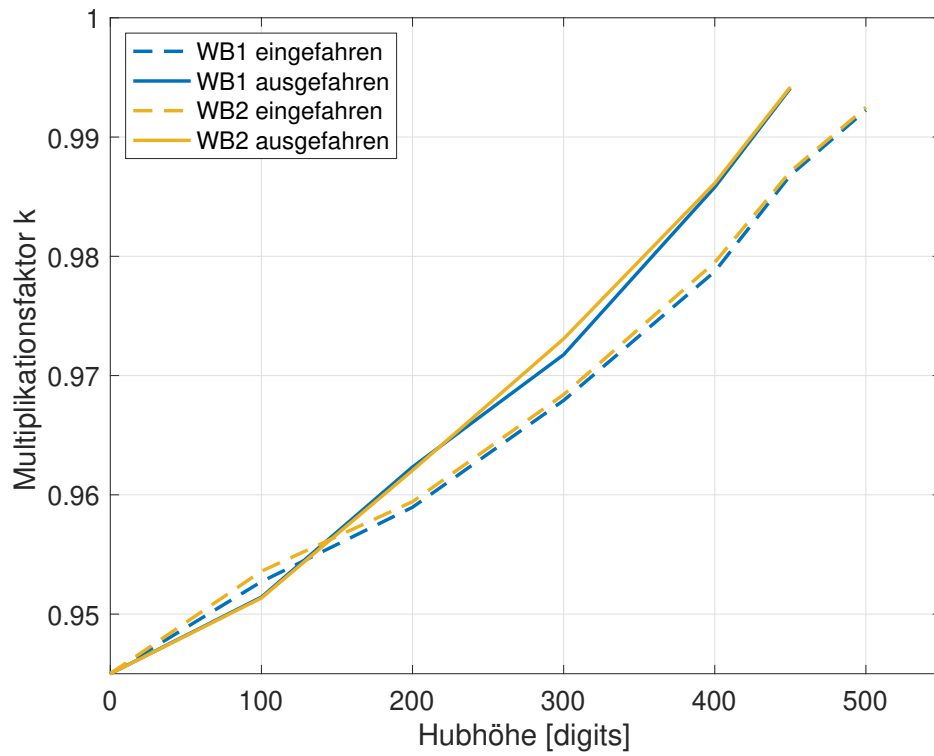


Abbildung 2: Multiplikationsfaktor

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wächst der Multiplikationsfaktor stetig an, wobei er jedoch 1 nicht erreicht, da der Reaktor keinen kritischen Zustand erlangt.

Aus dem Multiplikationsfaktor lässt sich ebenfalls berechnen, wie stark die unterkritische Verstärkung  $M_i$  ist, die der Reaktor aufweist, wenn die Anfahrneutronenquelle eingefahren ist.

Dabei bezeichnet die unterkritische Verstärkung den Parameter, der bestimmt, wie groß die asymptotische Neutronendichte nach unendlich langer Zeit ist, sofern die Quellstärke der Neutronenquelle und die Neutronengenerationszeit konstant sind.

$$M_i = \frac{1}{1 - k_i}$$

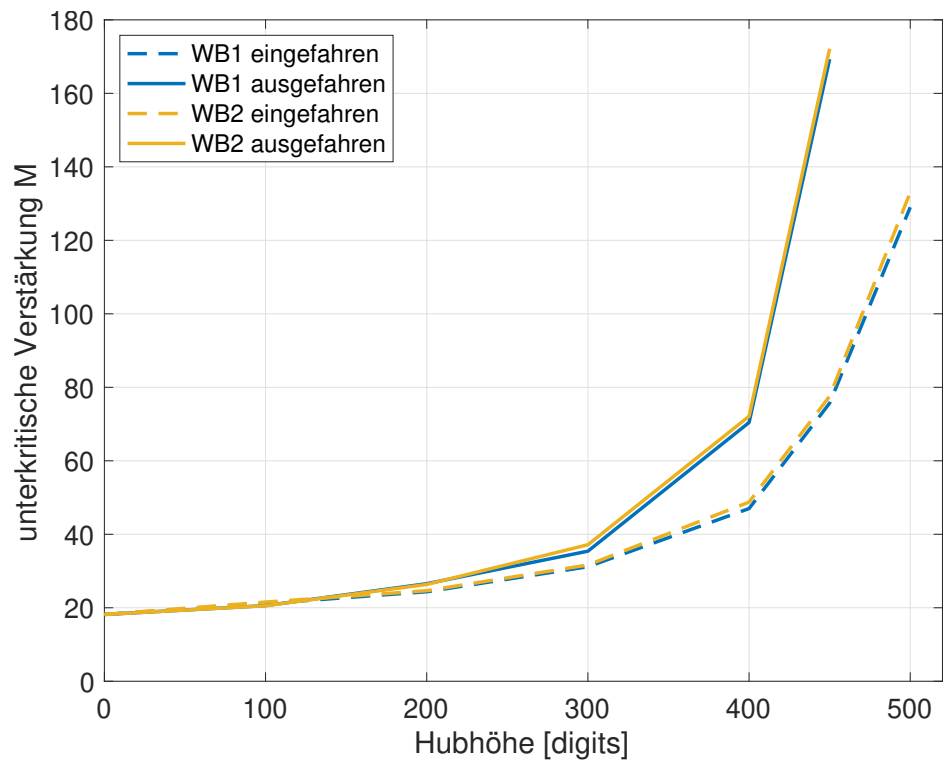


Abbildung 3: unterkritische Verstärkung

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, wächst die unterkritische Verstärkung ins unendliche, wenn  $k_i$  gegen 1 geht.

Weiterhin lässt sich aus dem Multiplikationsfaktor die Reaktivität berechnen:

$$\rho_i = \frac{k_i - 1}{k_i}$$

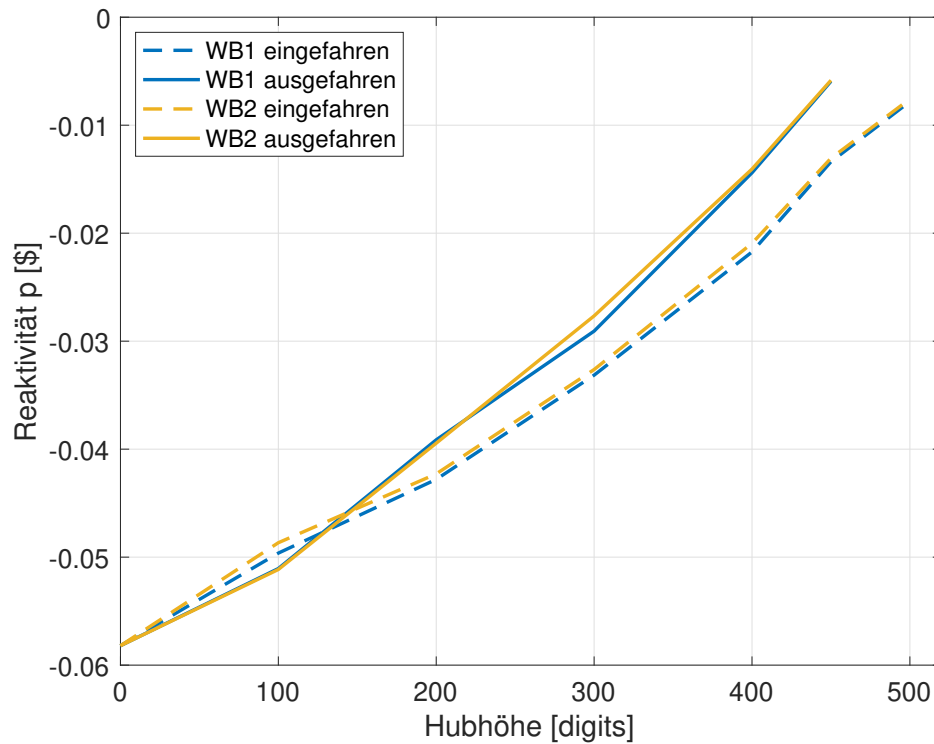


Abbildung 4: Reaktivität

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist nähert sich die Reaktivität an 0 an, was einem kritischen Zustand entspricht.

## 5 Fehlerbetrachtung

### 5.1 Statistischer Fehler

Die Neutronendetektoren unterliegen einem statistischen Fehler, da die Zählrate  $Z$  der Neutronen ein statistischer Wert ist. Aufgrund der POISSON-Verteilung lässt sich der Fehler durch  $\Delta Z = \pm\sqrt{Z}$  berechnen.

Zu Beginn des Experiments liegen die Zählraten im Bereich von 8 - 12 Impulsen pro Sekunde. Damit liegt der Fehler bei  $\pm 35\%$  bzw.  $\pm 29\%$ , was auch die Überkreuzung der Graphen in Abbildung 1 erklärt, welche in der Theorie nicht vorkommen sollte.

Da die Zählraten am Ende des Experiments im Bereich von 95 Impulsen pro Sekunde liegen, womit der Fehler auf  $\pm 10\%$  zurückgeht, hat sich die Sicherheit der Extrapolation entsprechend erhöht. Aus diesem Grund wird das Experiment in der Regel fortgeführt, bis die extrapolierten kritischen Parameterwerte mit Sicherheit die Ungleichung erfüllen.

## 5.2 Erreichen der asymptotischen Neutronendichte

Die Zeitabhängigkeit zum Erreichen der asymptotischen Neutronendichte  $n$  lautet

$$n(t) = \frac{S \cdot l}{1 - k} \cdot \left( 1 - \exp \left[ -\frac{1 - k}{l} \cdot t \right] \right)$$

Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass die Erreichung des asymptotischen Zustandes länger dauert, je näher sich der Reaktor an den kritischen Zustand annähert, der Multiplikationsfaktor also gegen 1 geht.

Da bei Ausführen des Experiments jedoch nur begrenzt lange gewartet werden kann, wird die asymptotische Neutronendichte nie ganz erreicht, was zu einem weiteren Fehler führt.



## 6 Anhang

Bestimmung der Ausgangswerte  $N_0$  :

	Steuerstab- stellung	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert $N_0$
WB 1	ein (0)	7,4	7,3	7,6	7,43
	aus (4000)	9,4	9,3	9,6	9,43

Abbildung 5: Ausgangswerte Weitbereichskanal 1

Messkanal ( WB1 / WB2 ) : WB1

Hubhöhe $x_i$ / digits	Stab- stellung	Zählraten			Verhält- nisse $N_0 / \bar{N}_i$	Multiplika- tionsfaktor $k_i$	unterkrit. Verstär- kung $M_i$	Reaktivität $\rho_i$
		$N_{i,1}$	$N_{i,2}$	$\bar{N}_i$				
0	ein			7,43	1,00	0,945	18,18	-0,0582
	aus			9,43	1,00	0,945	18,18	-0,0582
100	ein	8,5	8,6	8,55	0,869	0,952	20,83	-0,0504
	aus	10,8	10,6	10,7	0,881	0,952	20,83	-0,0504
<del>200</del> 100	ein	9,8	9,9	9,85	0,754	0,964	27,77	-0,0373
	aus	13,7	13,9	13,8	0,683	0,967	30,30	-0,0341
300	ein	12,5	12,7	12,6	0,590	0,979	47,62	-0,0215
	aus	18,5	18,3	18,4	0,513	0,983	58,82	-0,0173
400	ein	19,2	18,8	19,0	0,391	0,992	125	-0,0081
	aus	36,8	36,4	36,6	0,258	0,996	256	-0,0040
450	ein	31,1	30,1	30,6	0,243	0,998	500	-0,0020
	aus	87,4	88,6	88,0	0,107	0,999	1000	-0,0010
500	ein	52,3	52,0	52,15	0,142	0,9997(=1)	3333	-0,0003
	aus							

Abbildung 6: Messtabelle Weitbereichskanal 1

Bestimmung der Ausgangswerte  $N_0$  :

	Steuerstab- stellung	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert $N_0$
WB 1	ein (0)				
	aus (4000)				
WB 2	ein (0)	6,9	6,6	6,7	6,73
	aus (4000)	10,4	10,3	10,7	10,26

Abbildung 7: Ausgangswerte Weitbereichskanal 2

Messkanal ( WB1 / WB2 ) : WB.2

Hubhöhe $x_i$ / digits	Stab- stellung	Zählraten			Verhält- nisse $N_0 / \bar{N}_i$	Multiplika- tionsfaktor $k_i$	unterkrit. Verstär- kung $M_i$	Reaktivität $\rho_i$
		$N_{i,1}$	$N_{i,2}$	$\bar{N}_i$				
0	ein	6,73			1.00	0.945	18.18	-0.0582
	aus	10,26			1.00	0.945	18.18	-0.0582
100	ein	8,2	7,8	8	0,841	0,954	21,61	-0,0485
	aus	11,9	11,5	11,7	0,878	0,952	20,7	-0,0507
200	ein	9,1	9,2	9,15	0,736	0,9597	24,86	-0,0419
	aus	14,8	15,2	15	0,6844	0,963	26,77	-0,0389
300	ein	11,9	11,6	11,75	0,5728	0,969	31,86	-0,0324
	aus	21,5	20,8	21,15	0,485	0,9738	38,108	-0,02694
400	ein	17,8	18,4	18,1	0,372	0,9799	49,697	-0,0205
	aus	40,8	41,3	41,05	0,25	0,9865	74,08	-0,0137
450	ein	28,5	29,1	28,8	0,234	0,987	79,162	-0,0128
	aus	96,7	99,3	98	0,105	0,9943	176,839	-0,00569
500	ein	49,6	49,2	49	0,136	0,9924	137,99	-0,0076
	aus							

Abbildung 8: Messtabelle Weitbereichskanal 2