

BERICHTE DER REAKTORGRUPPE

der Physikalischen Studiengesellschaft Düsseldorf m. b. H.

im

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PHYSIK

G Ö T T I N G E N

Nr. 5 (55/5)

15. Februar 1956

p- und f - Faktoren für in Aluminium eingefasste, mit schwerem Wasser gekühlte Brennstoffelemente in einem Schwerwasserreaktor.

W. HÄFELE, K. MEETZ und R. SCHULTEN

Wir beschreiben das in das Moderatormedium D_2O eingetauchte Brennstoffelement durch eine zylindrische Einheitszelle und nehmen folgende Schichtung an, (s. Abb. 1): 1. Kern aus natürlichem Uran vom Radius a . 2. Aluminiumcan- ning der Dicke t_1 . 3. D_2O Kühlschicht der Dicke c . 4. Aluminiumführungs- rohr der Dicke t_2 . 5. D_2O -Bremsschicht. Der Zellenradius b bestimmt den Gitterabstand der Brennstoffelemente durch die Forderung, daß der Querschnitt der Zelle gleich dem Quadrat des Gitterabstandes bei einer quadratischen Stabanordnung ist.

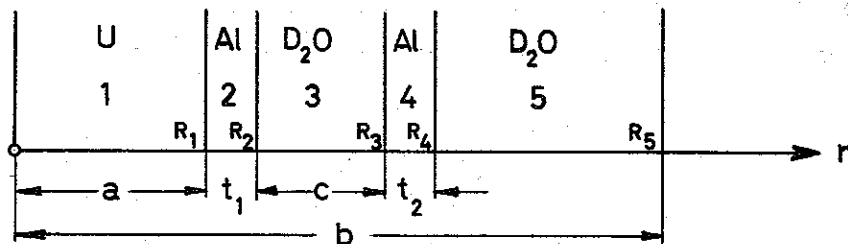


Abb. 1 Schichtung der Einheitszelle

I. Berechnung der thermischen f-Werte.

Der f-Faktor für thermische Neutronen ist definiert durch:

$$(1) f = \frac{\text{Anzahl der im Uran absorbierten thermischen Neutronen}}{\text{Anzahl der insgesamt absorbierten Neutronen}}$$

Als Bezugsvolumen kann man etwa eine Scheibe der Einheitszelle von der Dicke 1 cm wählen. Ist Q die Quellstärke der thermischen Neutronen im Moderator pro cm^3 und sec, so muß die Anzahl der insgesamt absorbierten Neutronen gleich $(V_3 + V_5)Q$ sein, wo V_3 und V_5 die Moderatorvolumina sind: $V_3 = \pi(R_3^2 - R_2^2)$, $V_5 = \pi(R_5^2 - R_4^2)$. Da das Problem linear ist, kann man eine beliebige Normierung vornehmen. Ist ϕ der thermische Neutronenfluß, so ist $j = -D \text{ grad } \phi$ die Stromdichte.

$R_1 D \text{ grad } \phi|_{r=a} = I_u$ ist die Anzahl der pro sec durch die Trenn- fläche Uran - Aluminium eines Scheibensektors vom Öffnungswinkel 1

[Kernreaktor - GmbH, Karlsruhe, Bericht No 5]

und der Höhe 1 cm in das Uran eintretenden Neutronen. Wir normieren nun ϕ durch die Forderung $I_U = 1$. Pro sec werden dann in einer Uranscheibe der Höhe 1 cm $n_U = 2\pi$ thermische Neutronen absorbiert; somit wird:

$$(2) \quad f = \frac{2\pi}{(V_3 + V_5)Q}$$

Die Formel (2) gestattet die Ermittlung von f , wenn Q unter der Nebenbedingung $I_U = 1$ berechnet werden kann. Dies kann so geschehen:

Im Uran und Aluminium, wo keine thermischen Neutronen erzeugt werden, gewinnt man den Neutronenfluß ϕ_k aus der Diff. Gleichung:

$$(3) \quad \Delta \phi_k - \kappa_k^2 \phi_k = 0 \quad \kappa_k^2 = \frac{\Sigma_{ak}}{D_k}$$

(Σ_a = makr. Abs. Querschnitt, D = Diffusionskonstante; $k = 1$: Uran; $k = 2, 4$: Aluminium). Die allgemeine Lösung von (3) lautet:

$$(4) \quad \phi_k(r) = a J_0(\kappa_k r) - b k_0(\kappa_k r)$$

wo $J_0(\kappa_k r)$ und $k_0(\kappa_k r)$ die modifizierte Bessel- bzw. Hankel-Funktion nullter Ordnung sind, die den hyperbolischen Funktionen im ebenen Fall entsprechen. Ferner ergibt sich für $l = Dr \text{ grad } \phi$

$$(5) \quad I_k(r) = D_k [a \kappa_k r J_1(\kappa_k r) + b \kappa_k r k_1(\kappa_k r)]$$

Das k -te Medium reiche von r_k bis R_k . Dann sei:

$$(6) \quad \begin{aligned} \phi_k &\equiv \phi_k(r_k) = a J_0(\kappa_k r_k) - b k_0(\kappa_k r_k) \\ I_k &\equiv I_k(r_k) = D [a \kappa_k r_k J_1(\kappa_k r_k) + b \kappa_k r_k k_1(\kappa_k r_k)] \\ \phi_k &\equiv \phi_k(R_k) = a J_0(\kappa_k R_k) - b k_0(\kappa_k R_k) \\ I_k &\equiv I_k(R_k) = D [a \kappa_k R_k J_1(\kappa_k R_k) + b \kappa_k R_k k_1(\kappa_k R_k)] \end{aligned}$$

Eliminiert man aus diesen Gleichungen die Konstanten a und b , so gelangt man nach P. S c h m i d (1) zu folgender Darstellung:

$$(7) \quad \begin{pmatrix} \phi_k \\ I_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11}^{(k)} & t_{12}^{(k)} \\ t_{21}^{(k)} & t_{22}^{(k)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_k \\ i_k \end{pmatrix} \quad k = 1, 2, 4$$

wo:

$$t_{11}^{(k)} \equiv x_{k-1} (J_0(x_k) k_1(x_{k-1}) + k_0(x_k) J_1(x_{k-1}))$$

$$t_{12}^{(k)} \equiv \frac{1}{D_k} (J_0(x_k) k_0(x_{k-1}) - k_0(x_k) J_0(x_{k-1}))$$

(8)

$$t_{21}^{(k)} \equiv x_k x_{k-1} D_k (J_1(x_k) k_1(x_{k-1}) - k_1(x_k) J_1(x_{k-1}))$$

$$t_{22}^{(k)} \equiv x_k (J_0(x_{k-1}) k_1(x_k) + k_0(x_{k-1}) J_1(x_k))$$

$$x_k = \kappa_k R_k ; \quad x_{k-1} = \kappa_k r_k$$

Im quellfreien Fall kann man also den Übergang von einer Mediengrenze zur anderen durch Multiplikation des Vektors $\sigma_k = \begin{pmatrix} \varphi_k \\ i_k \end{pmatrix}$ mit der Matrix $T^{(k)}$ vollziehen.

(9)
$$\sigma_k = T^{(k)} \sigma_k$$

Im Urkern der Zelle muß man etwas anders vorgehen. $I_1 = I_U$ war auf 1 normiert. Ferner ist $\text{grad } \phi|_{r=0} = 0$ und daher $i_1 = 0$. Also gilt nach (7):

(10)
$$\begin{pmatrix} \phi_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11}^{(1)} & t_{12}^{(1)} \\ t_{21}^{(1)} & t_{22}^{(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

oder:
$$\phi_1 = t_{11}^{(1)} \varphi_1 ; \quad 1 = t_{21}^{(1)} \varphi_1$$

(11)
$$\phi_1 = \frac{t_{11}^{(1)}}{t_{21}^{(1)}} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x(J_0(y) k_1(x) + k_0(y) J_1(x))}{D_1 x y (J_1(y) k_1(x) - k_1(y) J_1(x))} = \frac{1}{D_1 x_1} \frac{J_0(x_1)}{J_1(x_1)}$$

Im Moderatormedium tritt in der Differentialgleichung (3) noch das Quellglied Q/D auf:

(12)
$$\Delta \phi_k - \kappa_k^2 \phi_k + \frac{Q}{D_k} = 0 \quad k = 3; 5$$

Die allgemeine Lösung lautet:

(13)
$$\phi_k = \alpha J_0(\kappa_k r) - \beta k_0(\kappa_k r) + \frac{Q}{\kappa_k^2 D_k}$$

$$I_k = D_k \kappa_k r (\alpha J_1(\kappa_k r) + \beta k_1(\kappa_k r))$$

Eliminiert man wieder α und β aus den zu (6) analog mit (13) gebildeten Gleichungen, so erhält man die Übergangsformel für

das Bremsmedium:

$$(14) \quad \begin{pmatrix} \phi_k \\ I_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11}^{(k)} & t_{12}^{(k)} \\ t_{21}^{(k)} & t_{22}^{(k)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_k \\ i_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 - t_{11}^{(k)} & -t_{12}^{(k)} \\ -t_{21}^{(k)} & 1 - t_{22}^{(k)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{Q}{\kappa_k^2 D_k}$$

wo die t_{ik} wiederum durch (8) gegeben sind.

Die Bedingungen für die Grenzflächen kann man so formulieren: $\sigma_1 = \sigma_2$; $\sigma_2 = \sigma_3$; $\sigma_3 = \sigma_4$; $\sigma_4 = \sigma_5$

Dann folgt:

$$(15) \quad \sigma_5 = T^{(5)} T^{(4)} T^{(3)} T^{(2)} \sigma_1 + T^{(5)} T^{(4)} (1 - T^{(3)}) \nu_1 \frac{Q}{\kappa_3^2 D_3} + (1 - T^{(5)}) \nu_1 \frac{Q}{\kappa_3^2 D_3}$$

wo: $\nu_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

Es muß sein: $\sigma_5 = \begin{pmatrix} \phi_5 \\ 0 \end{pmatrix}$. Multipliziert man daher (15) mit $\nu_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, so kann man Q ausdrücken durch:

$$(16) \quad Q = -\kappa_3^2 D_3 \frac{\langle \nu_2 T^{(5)} T^{(4)} T^{(3)} T^{(2)} \sigma_1 \rangle}{\langle \nu_2 T^{(5)} T^{(4)} (1 - T^{(3)}) \nu_1 \rangle + \langle \nu_2 (1 - T^{(5)}) \nu_1 \rangle}$$

Dabei ist $\sigma_1 = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ 1 \end{pmatrix}$, wo ϕ_1 aus (11) berechnet werden kann. Damit ist Q ermittelt und mit Hilfe von (2) kann auch f berechnet werden.

In der Tabelle sind die Ergebnisse der Rechnung zusammengefasst. Kombiniert wurden 4 Werte für den Uranradius a:

1,0; 1,2; 1,4; 1,6 cm mit $t_1 = 0,1$; 0,12 cm; $c = 0,3$; 0,4 cm; $t_2 = 0,15$; 0,20; 0,25 cm und $b = 9$; 10; 11; 12 cm.

II. Berechnung der p-Werte.

Die Resonanz-Entkommwahrscheinlichkeit p kann mit Hilfe der gleichen Methode berechnet werden, wenn man auf die ziemlich summarische Theorie zurückgreift, die p durch die f-Werte der Resonanzneutronen darstellt. Das Ergebnis lautet (s. etw.

(2)):

$$(17) \quad p = e^{-\frac{f_r}{1-f_r}}$$

wo:

$$(18) \quad f_r = \frac{\text{Anzahl der im Uran absorbierten Resonanzneutronen}}{\text{Anzahl der insges.erzeugten Resonanzneutronen}}$$

Die Berechnung des f-Wertes für Resonanzneutronen verläuft dann völlig analog zu der Berechnung der thermischen f-Werte in I. Natürlich muß man aber jetzt die Gruppenkonstanten Σ_a und D für Resonanzneutronen verwenden. Ferner kann man die Absorption der Resonanzneutronen im Aluminium vernachlässigen, d.h. die Matrizen $T^{(2)}$ und $T^{(4)}$ werden Einheitsmatrizen. Wir haben dann nur noch ein 2-Medienproblem Uran-Schweres Wasser, das mit 1,2 indiziert sei. Anstelle von (16) ergibt sich also jetzt für Resonanzneutronen:

$$(19) \quad Q = - \frac{\langle \kappa_2 T^{(2)} \gamma_1 \rangle}{\langle \kappa_2 (1 - T^{(2)}) \kappa_1 \rangle} \kappa_2^2 D_2$$

f_r erhält man aus

$$(20) \quad f_r = \frac{2\pi}{V_2 Q}$$

wo V_2 das Gesamtvolumen des schweren Wassers ist. Die Ergebnisse der Rechnung können aus der Tabelle für die gleichen Kombinationen von a, t_1 , c, t_2 und b entnommen werden.

Tabelle der benutzten Konstanten

Thermische Neutronen				
	$\kappa [\text{cm}^{-1}]$	D[cm]	$\rho [\text{gcm}^{-3}]$	Quelle der Daten
Uran	0,766	0,595	18,6	(3) S.53
Aluminium	0,057	4,06	2,7	s.u.
D ₂ O	0,01	0,8	1,1	(2) S.127
Resonanzneutronen				
	$\kappa [\text{cm}]$	D[cm]		
Uran	0,42	0,4408 + 0,1266/a	(2) S.273	
D ₂ O	0,155	1,3028	(2) S.274	

Die Aluminium-Werte sind mit Hilfe der Formeln für schwache Absorber berechnet:

$$\kappa^2 = 3 \Sigma \Sigma_a (1 - \bar{\mu}_0) \left(1 - \frac{4}{5} \frac{\Sigma_a}{\Sigma} + \frac{\bar{\mu}_0}{1 - \bar{\mu}_0} \frac{\Sigma_a}{\Sigma} \right)$$

$$D = \frac{\Sigma_a}{\kappa^2}$$

(S.(2) S.116) wo

Σ = Totaler makroskopischer Wirkungsquerschnitt

Σ_a = Makroskopischer Absorptionsquerschnitt

$$\bar{\mu}_0 = \frac{2}{3A} (A = \text{Massenzahl})$$

Die mikroskopischen Querschnitte sind:

Absorption: $\sigma_a = 0,22 \text{ b}$

Streuung: $\sigma_s = 1,35 \text{ b}$

S.(2) S.58

Im Resonanzfall hängt die Diffusionskonstante des Urans vom Radius a des Urankerns ab. Es ist ja: $D = \frac{\Sigma_a}{\kappa^2}$

wo:

$$\bar{\Sigma}_a = \frac{N_0 \int_{E_2}^{E_1} (\sigma_{ao})_{\text{eff}} \frac{dE}{E}}{\ln \frac{E_1}{E_2}} = N_0 \frac{(9,25 + 24,7 \cdot \frac{S}{M})}{5,6} \cdot 10^{-24}$$

(siehe (2) p.273,260). S/M ist das Verhältnis von Oberfläche zu Masse des Uranstabes und N_0 die Anzahl der Uranatome pro cm^3 .

Wir danken Herrn Prof.Dr.L.Biermann für die Möglichkeit, die elektronische Rechenmaschine G 1 des Max-Planck-Instituts für Physik zu benutzen. Die Durchführung der Rechnungen wurde durch dieses Hilfsmittel erst ermöglicht.

Literatur.

- (1) SCHMID, P. f-Calculation in Heterogeneous Nuclear Reactors by Matrix Formalism. J.Nucl.Energy Vol.I (1954) pp.101-109
- (2) GLASSTONE, S. The Elements of Nuclear Reactor Theory. EDLUND, M.C. New York 1952
- (3) GUGGENHEIM, E.A. Uranium - Graphite Lattices. PRYCE, M.H.L. Nucleonics Vol. 11 (1953) pp.50-60

Göttingen, den 15.2.1956

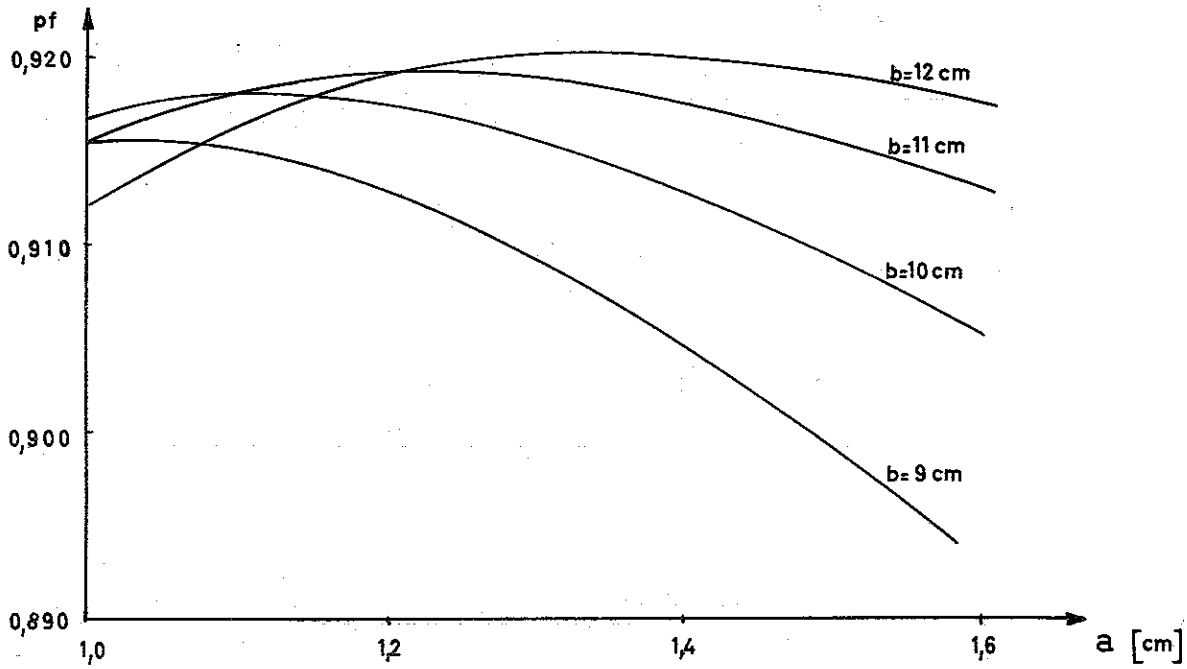
Tabelle der f , f_r , p und pf -Werte.

a [cm]	t_1 [cm]	c [cm]	t_2 [cm]	b [cm]	f	f_r	p	pf
1,0	0,10	0,3	0,15	9	0,95017	0,03611	0,96323	0,91524
1,0	0,10	0,3	0,15	10	0,94438	0,02926	0,97031	0,91634
1,0	0,10	0,3	0,15	11	0,93796	0,02418	0,97553	0,91501
1,0	0,10	0,3	0,15	12	0,93091	0,02031	0,97948	0,91181
1,0	0,10	0,3	0,20	9	0,94422	0,03618	0,96316	0,90944
1,0	0,10	0,3	0,20	10	0,93850	0,02930	0,97026	0,91059
1,0	0,10	0,3	0,20	11	0,93218	0,02421	0,97550	0,90933
1,0	0,10	0,3	0,20	12	0,92522	0,02033	0,97646	0,90621
1,0	0,10	0,3	0,25	9	0,93813	0,03625	0,96308	0,90350
1,0	0,10	0,3	0,25	10	0,93250	0,02935	0,97021	0,90472
1,0	0,10	0,3	0,25	11	0,92627	0,02424	0,97546	0,90354
1,0	0,10	0,3	0,25	12	0,91945	0,02036	0,97944	0,90054
1,0	0,12	0,3	0,15	9	0,94837	0,03613	0,96321	0,91348
1,0	0,12	0,3	0,15	10	0,94260	0,02927	0,97030	0,91460
1,0	0,12	0,3	0,15	11	0,93619	0,02419	0,97552	0,91327
1,0	0,12	0,3	0,15	12	0,92922	0,02032	0,97948	0,91015
1,0	0,12	0,3	0,20	9	0,94235	0,03620	0,96314	0,90761
1,0	0,12	0,3	0,20	10	0,93668	0,02932	0,97025	0,90881
1,0	0,12	0,3	0,20	11	0,93038	0,02422	0,97549	0,90757
1,0	0,12	0,3	0,20	12	0,92348	0,02034	0,97945	0,90451
1,0	0,12	0,3	0,25	9	0,93621	0,03628	0,96306	0,90163
1,0	0,12	0,3	0,25	10	0,93062	0,02937	0,97020	0,90289
1,0	0,12	0,3	0,25	11	0,92440	0,02425	0,97545	0,90171
1,0	0,12	0,3	0,25	12	0,91762	0,02036	0,97943	0,89875
1,0	0,10	0,4	0,15	9	0,94878	0,03612	0,96322	0,91389
1,0	0,10	0,4	0,15	10	0,94299	0,02926	0,97030	0,91498
1,0	0,10	0,4	0,15	11	0,93657	0,02418	0,97552	0,91365
1,0	0,10	0,4	0,15	12	0,92956	0,02031	0,97948	0,91049
1,0	0,10	0,4	0,20	9	0,94235	0,03620	0,96314	0,90762
1,0	0,10	0,4	0,20	10	0,93667	0,02931	0,97025	0,90880
1,0	0,10	0,4	0,20	11	0,93035	0,02422	0,97549	0,90755
1,0	0,10	0,4	0,20	12	0,92344	0,02034	0,97945	0,90446
1,0	0,10	0,4	0,25	9	0,93585	0,03627	0,96306	0,90128
1,0	0,10	0,4	0,25	10	0,93024	0,02937	0,97020	0,90252
1,0	0,10	0,4	0,25	11	0,92401	0,02425	0,97545	0,90133
1,0	0,10	0,4	0,25	12	0,91721	0,02036	0,97943	0,89834
1,0	0,12	0,4	0,15	9	0,94695	0,03614	0,96320	0,91210
1,0	0,12	0,4	0,15	10	0,94122	0,02928	0,97029	0,91325
1,0	0,12	0,4	0,15	11	0,93482	0,02419	0,97551	0,91193
1,0	0,12	0,4	0,15	12	0,92784	0,02032	0,97947	0,90879
1,0	0,12	0,4	0,20	9	0,94050	0,03622	0,96312	0,90581
1,0	0,12	0,4	0,20	10	0,93484	0,02933	0,97024	0,90702
1,0	0,12	0,4	0,20	11	0,92853	0,02423	0,97548	0,90576
1,0	0,12	0,4	0,20	12	0,92168	0,02035	0,97945	0,90273
1,0	0,12	0,4	0,25	9	0,93394	0,03630	0,96303	0,89942
1,0	0,12	0,4	0,25	10	0,92834	0,02938	0,97018	0,90066
1,0	0,12	0,4	0,25	11	0,92216	0,02426	0,97544	0,89851
1,0	0,12	0,4	0,25	12	0,91539	0,02037	0,97942	0,89655

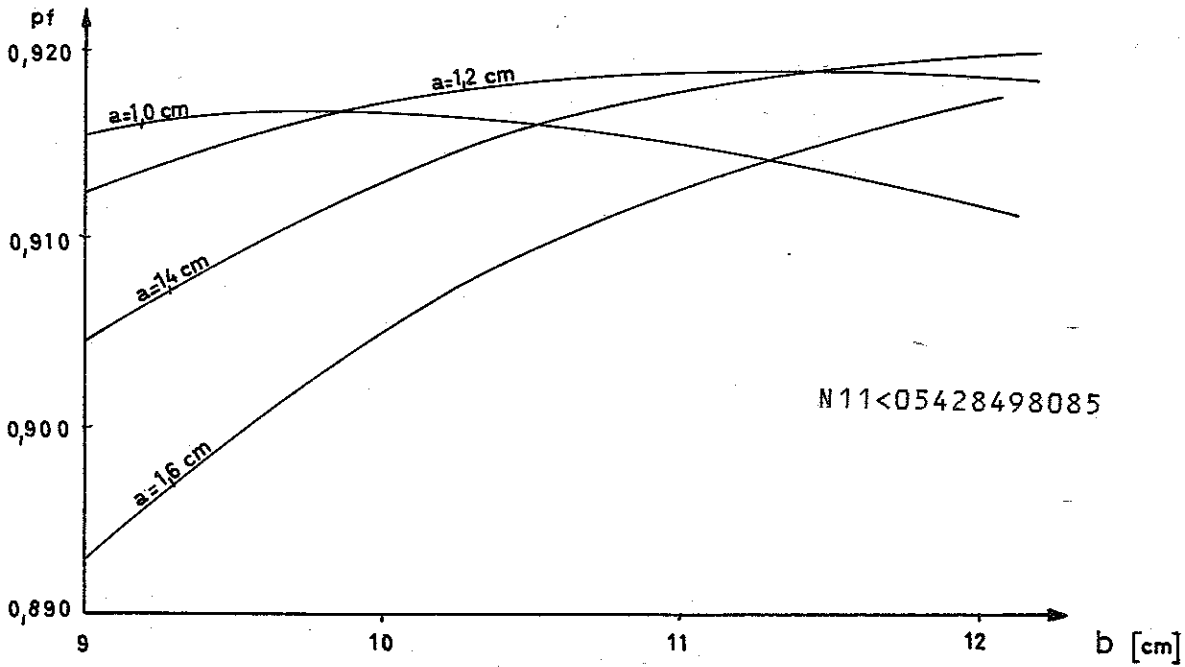
a [cm]	t [cm]	c [cm]	t ₂ [cm]	b [cm]	f	f _r	p	pf
1,2	0,10	0,3	0,15	9	0,96019	0,04875	0,95004	0,91242
1,2	0,10	0,3	0,15	10	0,95564	0,03951	0,95969	0,91713
1,2	0,10	0,3	0,15	11	0,95054	0,03266	0,96680	0,91899
1,2	0,10	0,3	0,15	12	0,94494	0,02743	0,97219	0,91866
1,2	0,10	0,3	0,20	9	0,95527	0,04886	0,94992	0,90743
1,2	0,10	0,3	0,20	10	0,95073	0,03959	0,95962	0,91234
1,2	0,10	0,3	0,20	11	0,94572	0,03271	0,96675	0,91428
1,2	0,10	0,3	0,20	12	0,94019	0,02747	0,97215	0,91401
1,2	0,10	0,3	0,25	9	0,95023	0,04897	0,94981	0,90253
1,2	0,10	0,3	0,25	10	0,94577	0,03966	0,95954	0,90751
1,2	0,10	0,3	0,25	11	0,94081	0,03276	0,96670	0,90948
1,2	0,10	0,3	0,25	12	0,93537	0,02750	0,97211	0,90929
1,2	0,12	0,3	0,15	9	0,95866	0,04879	0,95000	0,91074
1,2	0,12	0,3	0,15	10	0,95413	0,03954	0,95967	0,91565
1,2	0,12	0,3	0,15	11	0,94905	0,03267	0,96679	0,91753
1,2	0,12	0,3	0,15	12	0,94346	0,02744	0,97218	0,91721
1,2	0,12	0,3	0,20	9	0,95367	0,04890	0,94989	0,90588
1,2	0,12	0,3	0,20	10	0,94919	0,03961	0,95960	0,91083
1,2	0,12	0,3	0,20	11	0,94419	0,03272	0,96674	0,91280
1,2	0,12	0,3	0,20	12	0,93868	0,02748	0,97214	0,91253
1,2	0,12	0,3	0,25	9	0,94860	0,04901	0,94977	0,90095
1,2	0,12	0,3	0,25	10	0,94414	0,03968	0,95952	0,90592
1,2	0,12	0,3	0,25	11	0,93921	0,03277	0,96668	0,90792
1,2	0,12	0,3	0,25	12	0,93378	0,02751	0,97210	0,90773
1,2	0,10	0,4	0,15	9	0,95912	0,04877	0,95002	0,91118
1,2	0,10	0,4	0,15	10	0,95454	0,03953	0,95968	0,91606
1,2	0,10	0,4	0,15	11	0,94945	0,03267	0,96680	0,91793
1,2	0,10	0,4	0,15	12	0,94387	0,02744	0,97218	0,91761
1,2	0,10	0,4	0,20	9	0,95380	0,04889	0,94990	0,90601
1,2	0,10	0,4	0,20	10	0,94929	0,03960	0,95960	0,91094
1,2	0,10	0,4	0,20	11	0,94428	0,03272	0,96674	0,91287
1,2	0,10	0,4	0,20	12	0,93875	0,02748	0,97214	0,91260
1,2	0,10	0,4	0,25	9	0,94840	0,04901	0,94977	0,90077
1,2	0,10	0,4	0,25	10	0,94395	0,03968	0,95952	0,90574
1,2	0,10	0,4	0,25	11	0,93899	0,03277	0,96669	0,90771
1,2	0,10	0,4	0,25	12	0,93355	0,02751	0,97211	0,90752
1,2	0,12	0,4	0,15	9	0,95757	0,04881	0,94998	0,90968
1,2	0,12	0,4	0,15	10	0,95303	0,03955	0,95966	0,91459
1,2	0,12	0,4	0,15	11	0,94796	0,03268	0,96678	0,91647
1,2	0,12	0,4	0,15	12	0,94239	0,02745	0,97217	0,91616
1,2	0,12	0,4	0,20	9	0,95222	0,04892	0,94986	0,90448
1,2	0,12	0,4	0,20	10	0,94775	0,03963	0,95958	0,90944
1,2	0,12	0,4	0,20	11	0,94276	0,03273	0,96672	0,91139
1,2	0,12	0,4	0,20	12	0,93726	0,02749	0,97213	0,91114
1,2	0,12	0,4	0,25	9	0,94680	0,04904	0,94973	0,89920
1,2	0,12	0,4	0,25	10	0,94236	0,03971	0,95950	0,90419
1,2	0,12	0,4	0,25	11	0,93743	0,03279	0,96667	0,90618
1,2	0,12	0,4	0,25	12	0,93200	0,02753	0,97209	0,90599

a	t ₁	c	t ₂	b	f	f _r	p	pf
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]				
1,4	0,10	0,3	0,15	9	0,96672	0,06275	0,93525	0,90412
1,4	0,10	0,3	0,15	10	0,96299	0,05087	0,94781	0,91273
1,4	0,10	0,3	0,15	11	0,95878	0,04205	0,95705	0,91760
1,4	0,10	0,3	0,15	12	0,95409	0,03532	0,96405	0,91979
1,4	0,10	0,3	0,20	9	0,96246	0,06290	0,93508	0,89997
1,4	0,10	0,3	0,20	10	0,95876	0,05098	0,94770	0,90862
1,4	0,10	0,3	0,20	11	0,95460	0,04212	0,95698	0,91353
1,4	0,10	0,3	0,20	12	0,94997	0,03537	0,96399	0,91577
1,4	0,10	0,3	0,25	9	0,95811	0,06307	0,93490	0,89574
1,4	0,10	0,3	0,25	10	0,95444	0,05108	0,94759	0,90442
1,4	0,10	0,3	0,25	11	0,95032	0,04219	0,95691	0,90937
1,4	0,10	0,3	0,25	12	0,94575	0,03542	0,96394	0,91165
1,4	0,12	0,3	0,15	9	0,96540	0,06280	0,93519	0,90283
1,4	0,12	0,3	0,15	10	0,96166	0,05091	0,94778	0,91144
1,4	0,12	0,3	0,15	11	0,95746	0,04207	0,95703	0,91632
1,4	0,12	0,3	0,15	12	0,05282	0,03534	0,96403	0,91855
1,4	0,12	0,3	0,20	9	0,96110	0,06296	0,93502	0,89864
1,4	0,12	0,3	0,20	10	0,95740	0,05101	0,94767	0,90730
1,4	0,12	0,3	0,20	11	0,95324	0,04214	0,95696	0,91221
1,4	0,12	0,3	0,20	12	0,94866	0,03539	0,96398	0,91448
1,4	0,12	0,3	0,25	9	0,95672	0,06313	0,93484	0,89438
1,4	0,12	0,3	0,25	10	0,95306	0,05112	0,94755	0,90308
1,4	0,12	0,3	0,25	11	0,94894	0,04222	0,95688	0,90802
1,4	0,12	0,3	0,25	12	0,94442	0,03544	0,96392	0,91034
1,4	0,10	0,4	0,15	9	0,96583	0,06277	0,93522	0,90326
1,4	0,10	0,4	0,15	10	0,96208	0,05089	0,94780	0,91185
1,4	0,10	0,4	0,15	11	0,95786	0,04206	0,95704	0,91671
1,4	0,10	0,4	0,15	12	0,95321	0,03533	0,96404	0,91894
1,4	0,10	0,4	0,20	9	0,96126	0,06294	0,93504	0,89882
1,4	0,10	0,4	0,20	10	0,95755	0,05099	0,94768	0,90745
1,4	0,10	0,4	0,20	11	0,95338	0,04213	0,95697	0,91235
1,4	0,10	0,4	0,20	12	0,94880	0,03538	0,96398	0,91463
1,4	0,10	0,4	0,25	9	0,95661	0,06311	0,93486	0,89430
1,4	0,10	0,4	0,25	10	0,95294	0,05111	0,94756	0,90297
1,4	0,10	0,4	0,25	11	0,94883	0,04221	0,95689	0,90792
1,4	0,10	0,4	0,25	12	0,94429	0,03544	0,96393	0,91023
1,4	0,12	0,4	0,15	9	0,96449	0,06282	0,93516	0,90195
1,4	0,12	0,4	0,15	10	0,96075	0,05092	0,94776	0,91056
1,4	0,12	0,4	0,15	11	0,95656	0,04208	0,95702	0,91545
1,4	0,12	0,4	0,15	12	0,95191	0,03535	0,96402	0,91766
1,4	0,12	0,4	0,20	9	0,95990	0,06299	0,93498	0,89749
1,4	0,12	0,4	0,20	10	0,95618	0,05103	0,94764	0,90612
1,4	0,12	0,4	0,20	11	0,95206	0,04216	0,95694	0,91107
1,4	0,12	0,4	0,20	12	0,94747	0,03540	0,96397	0,91333
1,4	0,12	0,4	0,25	9	0,95518	0,06317	0,93480	0,89290
1,4	0,12	0,4	0,25	10	0,95155	0,05115	0,94752	0,90162
1,4	0,12	0,4	0,25	11	0,94746	0,04224	0,95686	0,90658
1,4	0,12	0,4	0,25	12	0,94293	0,03545	0,96391	0,90890

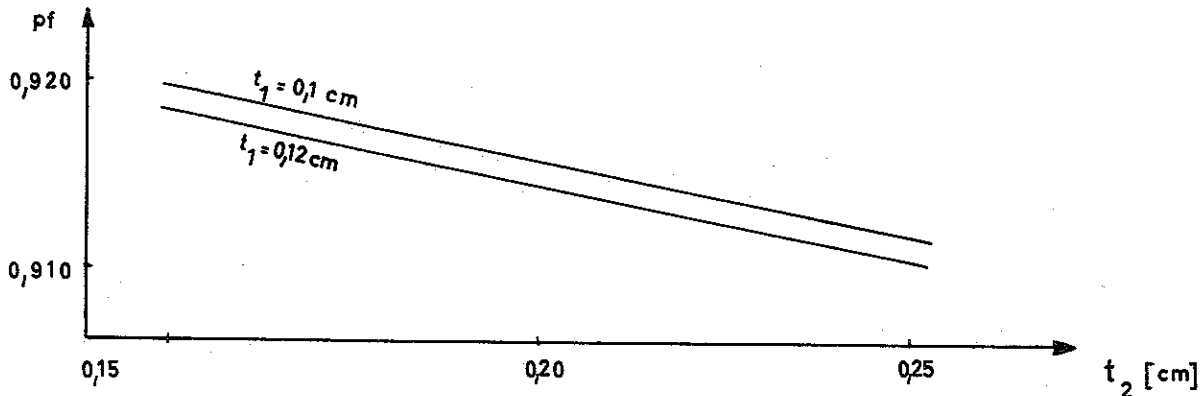
a	t ₁	c	t ₂	b	f	f _r	p	pf
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]				
1,6	0,10	0,3	0,15	9	0,97129	0,07791	0,91898	0,89259
1,6	0,10	0,3	0,15	10	0,96809	0,06319	0,93477	0,90494
1,6	0,10	0,3	0,15	11	0,96450	0,05224	0,94638	0,91278
1,6	0,10	0,3	0,15	12	0,96048	0,04388	0,95514	0,91739
1,6	0,10	0,3	0,20	9	0,96749	0,07813	0,91874	0,88887
1,6	0,10	0,3	0,20	10	0,96431	0,06333	0,93462	0,90126
1,6	0,10	0,3	0,20	11	0,96077	0,05233	0,94627	0,90915
1,6	0,10	0,3	0,20	12	0,95681	0,04395	0,95507	0,91382
1,6	0,10	0,3	0,25	9	0,96363	0,07836	0,91849	0,88508
1,6	0,10	0,3	0,25	10	0,96049	0,06348	0,93446	0,89755
1,6	0,10	0,3	0,25	11	0,95698	0,05243	0,94617	0,90547
1,6	0,10	0,3	0,25	12	0,95305	0,04402	0,95500	0,91016
1,6	0,12	0,3	0,15	9	0,97007	0,07799	0,91889	0,89140
1,6	0,12	0,3	0,15	10	0,96690	0,06324	0,93472	0,90378
1,6	0,12	0,3	0,15	11	0,96331	0,05227	0,94634	0,91162
1,6	0,12	0,3	0,15	12	0,95932	0,04390	0,95512	0,91627
1,6	0,12	0,3	0,20	9	0,96626	0,07821	0,91865	0,88766
1,6	0,12	0,3	0,20	10	0,96310	0,06338	0,93457	0,90008
1,6	0,12	0,3	0,20	11	0,95957	0,05237	0,94624	0,90798
1,6	0,12	0,3	0,20	12	0,95563	0,04397	0,95505	0,91267
1,6	0,12	0,3	0,25	9	0,96236	0,07844	0,91841	0,88384
1,6	0,12	0,3	0,25	10	0,95926	0,06353	0,93441	0,89634
1,6	0,12	0,3	0,25	11	0,95574	0,05247	0,94613	0,90425
1,6	0,12	0,3	0,25	12	0,95185	0,04404	0,95498	0,90899
1,6	0,10	0,4	0,15	9	0,97050	0,07794	0,91894	0,89184
1,6	0,10	0,4	0,15	10	0,96731	0,06321	0,93475	0,90419
1,6	0,10	0,4	0,15	11	0,96371	0,05225	0,94636	0,91202
1,6	0,10	0,4	0,15	12	0,95971	0,04389	0,95514	0,91665
1,6	0,10	0,4	0,20	9	0,96643	0,07817	0,91869	0,88785
1,6	0,10	0,4	0,20	10	0,96330	0,06336	0,93459	0,90029
1,6	0,10	0,4	0,20	11	0,95973	0,05235	0,94625	0,90815
1,6	0,10	0,4	0,20	12	0,95577	0,04396	0,95506	0,91282
1,6	0,10	0,4	0,25	9	0,96232	0,07841	0,91844	0,88383
1,6	0,10	0,4	0,25	10	0,95920	0,06351	0,93443	0,89630
1,6	0,10	0,4	0,25	11	0,95569	0,05246	0,94616	0,90422
1,6	0,10	0,4	0,25	12	0,95177	0,04403	0,95498	0,90893
1,6	0,12	0,4	0,15	9	0,96931	0,07802	0,91886	0,89066
1,6	0,12	0,4	0,15	10	0,96614	0,06326	0,93470	0,90305
1,6	0,12	0,4	0,15	11	0,96255	0,05228	0,94633	0,91089
1,6	0,12	0,4	0,15	12	0,95854	0,04391	0,95511	0,91551
1,6	0,12	0,4	0,20	9	0,96523	0,07825	0,91861	0,88667
1,6	0,12	0,4	0,20	10	0,96208	0,06341	0,93454	0,89910
1,6	0,12	0,4	0,20	11	0,95853	0,05239	0,94622	0,90698
1,6	0,12	0,4	0,20	12	0,95458	0,04398	0,95504	0,91166
1,6	0,12	0,4	0,25	9	0,96106	0,07849	0,91835	0,88259
1,6	0,12	0,4	0,25	10	0,95798	0,06356	0,93437	0,89511
1,6	0,12	0,4	0,25	11	0,95447	0,05249	0,94611	0,90303
1,6	0,12	0,4	0,25	12	0,95057	0,04406	0,95496	0,90776



pf-Werte in Abhängigkeit vom Urandurchmesser mit dem Zellenradius b als Parameter für minimale Aluminiumdicken.



pf-Werte in Abhängigkeit vom Zellenradius mit dem Urandurchmesser als Parameter für minimale Aluminiumdicken.



Einfluß der Aluminiumschichtdicken auf den optimalen pf-Wert.

