

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

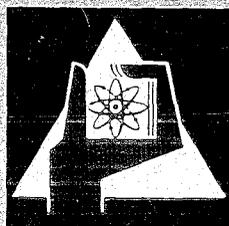
September 1969

KFK 1042

Institut für Reaktorbauelemente

Örtliche Temperaturen in natriumgekühlten Vielstabbündeln
- berechnet mit Hilfe eines digitalen Programmes -
Teil I: Einfluß der Kastenwand des Brennelementes

W. Baumann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

September 1969

KFK 1042

Institut für Reaktorbauelemente

Örtliche Temperaturen
in natriumgekühlten Vielstabbündeln

- berechnet mithilfe eines digitalen Programmes -

Teil I

Einfluß der Kastenwand des Brennelementes

von

W. Baumann

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE

Inhalt:

1. Einleitung
2. Verfahren zur Bestimmung örtlicher
Temperaturen
 - 2.1 Beschreibung
 - 2.2 Vereinfachungen
3. Anwendung des Rechenverfahrens auf
Vielstabbündel mit verschiedenen
Abstandshaltern
4. Diskussion der Ergebnisse
 - 4.1 Bündel I, Rhombusgitter
 - 4.2 Bündel II, abgekantete Wabengitter
 - 4.3 Bündel III, 1 aufgewickelter Draht
 - 4.4 Bündel IV, 3 Rippen
 - 4.5 Bündel V, 6 Rippen
5. Zusammenfassung
6. Anhang
 - Literatur
 - Verwendete Zeichen
 - Abbildungen

1. Einleitung

Die Auslegung von Reaktorkernen wird in entscheidendem Maße von der zu erwartenden maximalen Hüllrohrtemperatur beeinflusst /1/.

Die Berechnung dieser Temperatur kann sich nicht nur auf einen einheitlichen Strömungsquerschnitt und mittleren hydraulischen Durchmesser der Kühlkanäle stützen. Vielmehr gilt es dabei zu beachten:

- a) Jedes Brennelementbündel wird von einem Führungsrohr umschlossen. Die von der Rohrwand, die naturgemäß unbeheizt verbleibt, begrenzten Strömungskanäle besitzen nicht nur eine abweichende Gestalt, sondern auch Abmessungen, die von denen der unendlichen Anordnung verschieden sind.
- b) Der Wandeinfluß hängt von der Art der verwendeten Abstandshalterung und der Bündelgröße ab. Je nach Verwendung gitterförmiger Abstandshalter, aufgewickelter Drähte oder Wendelrippen zur Abstützung wird die Gestalt der wandnahen Strömungskanäle festgelegt (Abb. 1a-e). Bei der Abstützung Rippe/Can, z.B. durch einen aufgewickelten Draht, beträgt der Spalt zwischen Randstäben und Wand den gesamten, bei der Abstützung Rippe/Rippe, z.B. durch 3 und 6 Rippen, jedoch nur den halben Stababstand.

Mit Hilfe eines digitalen Rechenprogrammes soll Einblick gewonnen werden in die Auswirkung der Wandung auf die örtlichen Kühlmittel- und Hüllrohrtemperaturen.

2. Verfahren zur Bestimmung örtlicher Temperaturen

2.1 Beschreibung

Jedes hexagonal angeordnete, von einem Führungsrohr umschlossene Stabbündel weist drei Typen von Strömungskanälen auf (Abb.2). Diese werden nach Position, Größe und Zahl erfaßt und mit einem gemittelten Strömungskanal verglichen.

Dabei interessieren zwei einander entgegenwirkende Vorgänge:

- Aufgrund seiner besonderen geometrischen Eigenschaften und seiner Heizleistung besitzt jeder Kanal einen spezifischen Strömungswiderstand, der den durchfließenden Anteil des Gesamtmassenstromes und damit die Kühlmittel- bzw. Hüllrohrtemperatur des betreffenden Kanals festlegt.

Die Gleichungen:

$$\Delta P = - \frac{1}{2} \rho w^2 \frac{\Delta x}{d_h} \lambda - \rho w dw - i \cdot \xi \cdot \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (1)$$

und

$$\Delta t = \frac{\chi \Delta x}{\rho w F c_p} \quad (2)$$

werden dabei solange einem gekoppelten Iterationsprozess unterworfen, bis die Änderung der kalorischen und thermischen Daten der einzelnen axialen Rechenabschnitte eine Fehlerschwelle unterschreitet.

- Aufgrund der existierenden Parallelschaltung der Kühlkanäle besteht die Möglichkeit eines kontinuierlichen Massen- bzw. Energieaustausches zwischen den Kanälen durch Quervermischung und Wärmeleitung des Kühlmittels, so daß Temperaturdifferenzen zwischen den Teilkanälen teilweise abgebaut werden.

Eine eingehendere Beschreibung des Verfahrens und ein Vergleich zwischen Rechnung und experimenteller Untersuchung wird anhand von Beispielen in /2/ gegeben.

Über die Kühlmittel-Quervermischung in Natrium existieren zur Zeit noch keine Unterlagen. Sie wird daher nach der in /3/ beschriebenen Methode berechnet, die eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Untersuchungen in Luftströmung /4/ liefert. Durch Berücksichtigung der radialen Wärmeleitung des Kühlmittels wird diese Methode den für Natrium gegebenen thermischen Verhältnissen angepaßt.

2.2 Vereinfachungen

Die Anwendung des Verfahrens geschieht unter folgenden Vereinfachungen:

a) Reibungsbeiwert $\lambda = \lambda (Re)$ wird für alle Kanäle durch die gleiche Funktion dargestellt.

b) Die übliche Definition des hydraulischen Durchmessers

$$d_h = 4 F/U, \quad (3)$$

wobei F der freie Strömungsquerschnitt und U der benetzte Umfang ist,

wird als gültig betrachtet.

c) Bei der Bestimmung des hydraulischen Durchmessers der Teilkanäle werden die Rippen anteilmäßig berücksichtigt.

d) Jeder Teilkanal besitzt bei axial gemitteltem Rippenanteil über die gesamte Länge einen konstanten hydraulischen Durchmesser und freien Strömungsquerschnitt.

- e) Beeinträchtigungen der Strömungsverteilung durch Abstandshalter werden nur durch die Kühlmittelquervermischung beschrieben.
- f) Der Energieaustausch durch radiale Wärmeleitung findet in Kühlmittelsäulen mit der konstanten Breite des Stababstandes statt. Die linearisierten Temperaturgradienten ergeben sich aus den jeweiligen Kanalmittentemperaturen /2/.
- g) Auf dem Stabumfang wird eine konstante Wärmestromdichte angenommen. Die axiale Wärmeleitung in den Stäben wird vernachlässigt.

3. Anwendung des Rechenverfahrens auf Vielstabbündel mit verschiedenen Abstandshaltern

Im folgenden wird das beschriebene Verfahren zur Berechnung örtlicher Temperaturen auf natriumgekühlte Vielstabbündel angewendet. Es handelt sich dabei um hexagonale 19- und 61-Stabbündel mit verschiedener Abstützungsweise. Die zugrunde gelegten geometrischen und thermodynamischen Daten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

d = 6 mm
p = 7,9 mm
L = 100 cm

$P_{\text{ein}} = 6 \text{ ata}$
 $t_{\text{ein}} = 380 \text{ }^\circ\text{C}$
 $t_{\text{aus}} = 560 \text{ }^\circ\text{C}$

$\chi = 400 \text{ W/cm}$ (konstant über Bündelquerschnitt)
 $\varphi_{\text{ax}} = 0,79$
Abstützlänge der Stäbe: 100 mm

Bündel-Nr. Abstützung Stabzahl	I Rhombusgitter		II Wabengitter		III 1 Draht		IV 3 Rippen		V 6 Rippen	
	19	61	19	61	19	61	19	61	19	61
F_m	606,8	1 793,6	536,0	1668,8	601,4	1705,5	503,5	1564,5	471,0	1460,2
d_{h_m}	5,04	5,24	4,48	4,89	4,01	3,93	3,42	3,65	2,70	2,83
F_a	12,89		12,89		11,47		12,03		11,18	
F_b	21,57		17,07		23,16		16,21		15,36	
F_c	6,42		3,64		8,02		3,35		3,07	
d_{h_a}	5,47		5,47		3,07		3,92		2,96	
d_{h_b}	4,98		3,94		4,56		3,21		2,67	
d_{h_c}	3,22		1,99		3,41		1,62		1,33	
$\lambda =$ ++)	$0,1 \cdot \text{Re}^{-0,145}$				$0,136 \cdot \text{Re}^{-0,115}$		$0,108 \cdot \text{Re}^{-0,139}$		$0,0893 \cdot \text{Re}^{-0,134}$	
$\xi =$ +)	1,69	1,43	1,375	1,24	-		-		-	
$\Delta P \text{ (at)} =$	2,32	2,37	2,59	2,49	1,08	1,40	1,10	1,09	1,42	1,44

Tab. 1: Geometrische und thermodynamische Parameter
der der Rechnung zugrunde liegenden Bündel
+) siehe Anhang
++) siehe /6/

4. Diskussion der Ergebnisse

In den Abb. 3-12 sind die für das Bündelende berechneten radialen Temperaturprofile mit der Quervermischung als Parameter aufgetragen. Die Abszisse stellt dabei den Abstand der Teilkanalschwerpunkte von der Hauptachse des Bündels dar. Den durchgezogenen Linien liegt jeweils die für das betreffende Bündel erwartete Quervermischung zugrunde /3/, /4/, während die Kurven $\mu = 0$ %/cm nur Energieaustausch durch Wärmeleitung des Kühlmittels beinhalten.

4.1 Bündel I, Rhombusgitter

Bei Verwendung rhombusförmiger Abstandsgitter treten im 19-Stabbündel Temperaturen auf, die ohne Berücksichtigung der Kühlmittel-Quervermischung in den Innenkanälen etwa 40° C über, in den Randkanälen etwa 40° C unter der mittleren Austrittstemperatur liegen (Abb.3). Die von der Kastenwand begrenzten Kühlkanäle besitzen aufgrund ihres größeren freien Strömungsquerschnittes (Tab. 1) einen entsprechend größeren Massendurchsatz, so daß sie bei gleicher Wärmezufuhr eine niedrigere Aufheizspanne als die zentralen Kanäle erreichen. Die Kühlmittel-Quervermischung reduziert die Abweichungen um nur 7° C innen und 15° C außen.

Erweitert man das Bündel auf 61 Stäbe, so nähern sich bei Quervermischung die Temperaturen der Innenkanäle bis auf etwa 25° C dem Mittelwert, während sich die Abweichung in den Randkanälen auf etwa 35° C vergrößert (Abb.4). Der Einfluß des Energieaustausches durch Wärmeleitung und Kühlmittel-Quervermischung bleibt auf eine schmale Randzone des Bündels (Kanäle 7 - 10, 12, 13) begrenzt.

4.2 Bündel II, abgekantete Wabengitter

Die durch hexagonale Abstandsgitter entstehenden großen Teilkanäle an der Kastenwand lassen sich auf zweierlei Weise vermeiden:

- a) Abrunden oder Abkanten der Gitterbleche an den Kastenwand
- b) Einbau von Verdrängerkörpern an der Kastenwand

Die Abb. 5 und 6 zeigen die grundsätzliche Auswirkung dieser Maßnahmen am Beispiel des abgekanteten Abstandsgitters (Abb.1b).

Sowohl beim 19- als auch beim 61-Stabbündel treten ohne Kühlmittel-Quervermischung die höchsten Abweichungen in den Eck- und Wandkanälen auf ($+ 40^{\circ} \text{C}$, $- 30^{\circ} \text{C}$), während die Innenkanäle den Mittelwert um nur etwa $10 - 15^{\circ} \text{C}$ überschreiten. Da die Eck- und Wandkanäle benachbart sind und ihre Temperaturunterschiede entgegengesetztes Vorzeichen aufweisen, werden diese Abweichungen durch Quervermischung stark vermindert.

4.3 Bündel III, 1 Rippe bzw. 1 aufgewickelter Draht

Gegenüber dem Abstandsgitter zeigen sich für diese Anordnung noch deutlichere Unterschiede zwischen den Temperaturen der zentralen und der wandnahen Kanäle (Abb. 7,8). Sie vergrößern sich bei 19 und 61 Stäben gegenüber Bündel I um durchweg 20°C , obwohl die zugrunde gelegte Mischrate den zweieinhalbfachen Wert hat.

Hieraus ergibt sich der Schluß:

Die Kühlmittel-Quervermischung kann die über den Bündelquerschnitt bestehenden Temperaturdifferenzen in der Regel nur sehr begrenzt vermindern. Es soll-

te daher bei der Bündelkonstruktion auf eine geometrische Angleichung der Teilkanäle geachtet werden, damit die Unterschiede auch ohne Berücksichtigung von Austauschmechanismen in vertretbaren Grenzen bleiben.

4.4 Bündel IV, 3 Rippen

Die Temperaturen der Innenkanäle überschreiten beim 6l-Stabbündel den Mittelwert um etwa 9° C. In den Eckkanälen (5 bzw. 11) tritt ohne Quervermischung eine starke Übertemperatur von $+ 58^{\circ}$ C, im 19- und 53° C im 6l-Stabbündel auf, während die Wandkanäle (4 bzw. 12 und 13) um 25° C bzw. 30° C unterkühlt sind (Abb. 9,10). Da die heißen und kalten Kanäle unmittelbar aneinandergrenzen, genügt die erwartete Mischrate /4/, um diese Abweichungen erheblich zu reduzieren.

4.5 Bündel V, 6 Rippen

Es zeigt sich bis auf geringfügige Unterschiede der gleiche günstige Temperaturverlauf (Abb. 11, 12) wie bei 3 Rippen.

Aus den Abb. 3-14 ergibt sich insgesamt:

Mit zunehmender Stabzahl nähert sich bei allen Bündeln die Temperatur der heißen Innenkanäle dem Mittelwert; die der kalten Wandkanäle sinkt weiter ab.

Nach Überschlagsrechnungen würde sich die für 6l Stabbündel ergebende Übertemperatur beim Einsatz von 469 Stäben je Brennelement auf etwa $1/3$ verringern. Sie würde beim Rhombusgitter etwa 8° C, beim abgekanteten Wabengitter 4° C, bei 1 Wendeldraht 14° C, bei 3 Rippen 3° C und bei 6 Rippen 4° C betragen.

Erklärung:

Die Zahl der Innenkanäle nimmt mit wachsender Bündelgröße schneller zu als die Zahl der Wandkanäle. Berechnet man die Kanaltemperaturen ohne jeden Energieaustausch, so verteilt sich der aufgrund der konstant kalten Wandkanäle vorhandene Wärmeüberschuß bei höherer Stabzahl auf relativ mehr Innenkanäle. Das heißt, die Übertemperatur der Innenkanäle nimmt ab. Da nun zum einen zwischen Innen- und Wandkanälen ein geringeres Potentialgefälle existiert und zum anderen Austauschmechanismen über mehrere Kanäle hinweg an Wirksamkeit verlieren (s. 4.1), kann die Temperatur der kalten Wandkanäle beim größeren Bündel durch Energieaustausch nicht im gleichen Maße angehoben werden wie beim kleineren Bündel.

Die für Bündel I bis V bei gleicher Stabteilung, gleicher Abstützlänge und gleichem Kühlmitteldurchsatz berechneten Druckverluste sind in Tab. 1 zusammengestellt. Danach ergeben beide gitterförmige Abstandshalter etwa den doppelten Druckverlust wie 1 Wendeldraht, 3 oder 6 Wendelrippen. Diese Werte dürfen jedoch nicht unengeschränkt auf größere Bündel übertragen werden, da die Einflußgrößen ρ_w , d_h und λ , insbesondere aber die Widerstandsbeiwerte ξ der Abstandsgitter eine Funktion der Stabzahl darstellen. (s. Anhang).

5. Zusammenfassung

Der vorstehende Bericht befaßt sich mit der Berechnung der Kühlmittel-Temperaturen in den Teilkanälen axial durchströmter Vielstabbündel. Das für diesen Zweck entwickelte Rechenverfahren berücksichtigt die radiale Expansion und den Energieaustausch zwischen benachbarten Teilkanälen.

Die radiale Temperaturverteilung in 19- und 61-Stabbündeln mit gitterförmigen Abstandshaltern, 1, 3 und 6 Wendelrippen je Stab wird diskutiert. Alle Bündel befinden sich in einem Sechskantführungsrohr und sind über den Querschnitt gleichmäßig beheizt.

Die Rechnung zeigt, daß beim Rhombusgitter und bei einem Wendeldraht die Kühlmitteltemperaturen in den zentralen Kanälen beträchtlich über, in den Außenkanälen beträchtlich unter der Mitteltemperatur liegen. Beim abgekanteten Wabengitter sowie bei 3- und 6-Rippen ergeben sich Temperaturprofile, die nur wenig vom Mittelwert abweichen. Mit zunehmender Stabzahl nähert sich die Temperatur der heißen Innenkanäle dem Mittelwert, während sich die Abweichung der kalten Wandkanäle vergrößert.

Der Druckverlust bei 3 und 6 Wendelrippen oder bei 1 Wendeldraht erreicht etwa nur die Hälfte des bei Abstandsgittern auftretenden Druckverlustes.

Die in Tab. 1 angegebenen Werte können nicht exakt auf größere Bündel extrapoliert werden, da die Einflußgrößen ρ_w , d_{hm} , ξ , λ eine z.T. gegenläufige Tendenz zeigen.

In einer weiteren Arbeit (Teil II) wird untersucht, wie sich partielle Kühlkanal-Blockagen bei natriumdurchströmten Bündeln auf die örtlichen Strömungstemperaturen auswirken.

6. Anhang (zu Tab. 1)

Der Druckverlust der Strömung bei Bündeln mit Abstandsgittern wird nach Gl. (1) berechnet. Der Reibungsdruckverlust ΔP_R ist dabei um eine additive, die Stoßverluste berücksichtigende Größe erweitert /5/.

Es gilt:

$$\Delta P = \Delta P_R + i \cdot \xi \cdot \frac{\rho w^2}{2} \quad (4)$$

mit:

$$\xi = k \cdot (F_V/F_B)^2 \quad (5)$$

und:

$$k \approx 6 \dots 7 \quad (6)$$

F_V = durch die Gitter versperrender Strömungsquerschnitt

F_B = Strömungsquerschnitt des Bündels ohne Gitter

ΔP_R = Druckverlust infolge Reibung /6/

	Stabzahl	19	61	169
Rhombus- gitter	F_V/F_B	0,51	0,47	0,30
	ξ	1,69	1,43	0,585
Waben- gitter	F_V/F_B	0,46	0,435	0,42
	ξ	1,375	1,24	1,15

Tab. 2: Widerstandsbeiwerte ξ der Abstandsgitter als Funktion der Bündelgröße

Literatur:

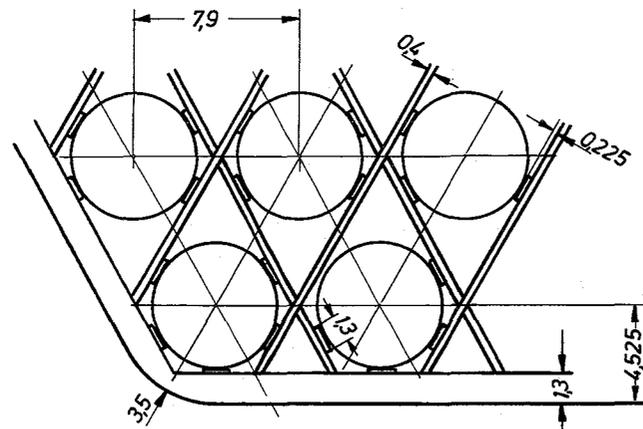
- [1] DOETSCHMANN K.:
Kühlmittel-Quervermischung und deren Auswirkung
auf die Heisskanal-Temperaturen in dampfgekühlten
Schnellen Reaktoren.
KFK 848, EUR 4151d, Oktober 1968
- [2] BAUMANN W.:
MISTRAL, Thermodynamischer Mischströmungsalgorithmus für Stabbündel,
- ein digitales Rechenprogramm zur Ermittlung örtlicher
Temperaturen und Massenströme in 6l-Stabbündeln unter Berücksichtigung der Kühlmittel-
Quervermischung und des Energieaustausches durch
Wärmeleitung.
KFK 988, Juni 1969
- [3] BAUMANN W.:
Cross mixing by natural turbulence in fuel-element
bundles.
Atomkernenergie 2/69, S. 107 - 111
- [4] BAUMANN W., R. MÖLLER:
Experimental study of coolant cross-mixing in
multirod bundles.
Atomkernenergie 5/69
- [5] REHME K.:
Widerstandsbeiwerte von Gitterabstandshaltern für
Reaktorbrennelemente
(Atomkernenergie, im Druck)
- [6] BAUMANN W., V. CASAL, H. HOFFMANN, R. MÖLLER, K. RUST:
Brennelemente mit wendelförmigen Abstandshaltern
für Schnelle Brutreaktoren.
KFK 768, EUR 3694 d, April 1968

Verwendete Zeichen:

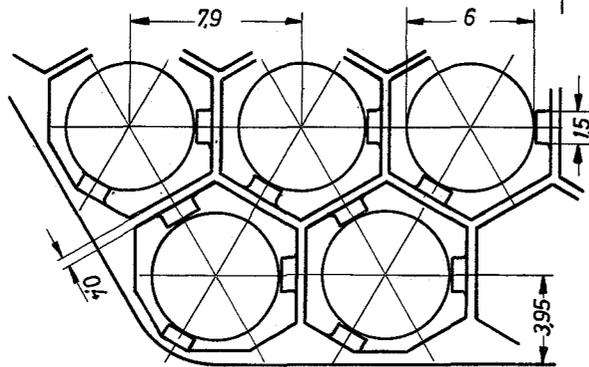
c_p	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{grad}}$	spez. Wärme bei konst. Druck
d	mm	Stabdurchmesser
d_h	mm	hydraulischer Durchmesser
F	mm^2	Strömungsquerschnitt
i		Zahl der Gitter über die Länge L
L	cm	Bündellänge
\dot{M}	kg/s	Massenstrom
P	at	Druck
p	mm	Stabteilung
r	mm	radiale Kanalposition gemessen von der Bündelachse, s. Abb. 2
t	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
w	m/s	Geschwindigkeit
x	cm	axiale Stabkoordinate
ξ		Widerstandsbeiwert eines Gitters
$\mathcal{J} = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$		Übertemperatur der Kanäle am Bündelaustritt
λ		Druckverlustbeiwert
μ	%/cm	Mischrate pro Kanal
$\xi = \frac{x}{L}$		normierte axiale Stabkoordinate
ρ	kg/m^3	Kühlmitteldichte
φ_{ax}		axiale Leistungsverteilung
χ	W/cm	Stableistung

Indizes:

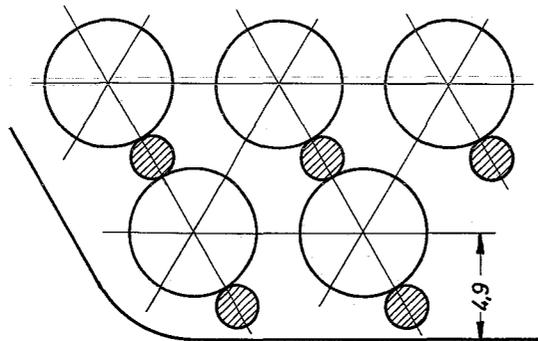
a	Innenkanal eines Bündels, z.B. Kanal 1
b	Wandkanal eines Bündels, z.B. Kanäle 12, 13
c	Eckkanal eines Bündels, z.B. Kanal 11
aus	Bündelaustritt
ein	Bündeleintritt
m	Mittel über den Bündelquerschnitt



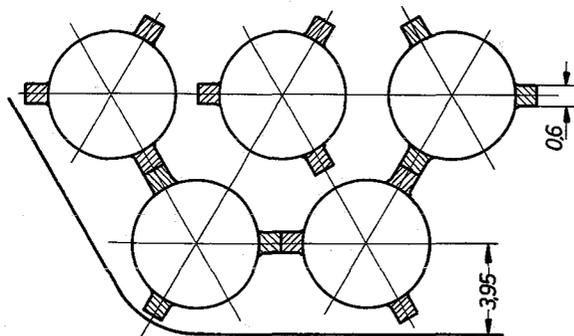
a) Abstandsgitter I
rhombisch



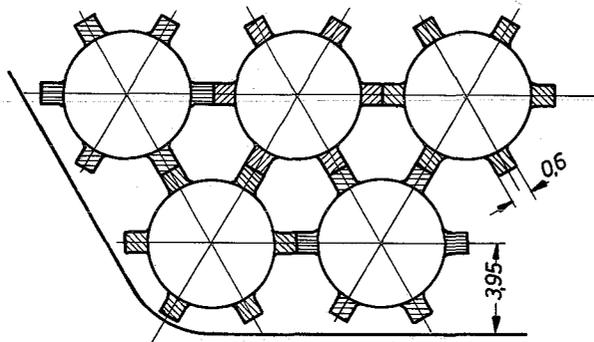
b) Abstandsgitter II
hexagonal



c) 1 Wendeldraht/
Stab



d) 3 Rippen/Stab



e) 6 Rippen/Stab

Abb.1 Bündelgeometrie bei verschiedenen Abstandshaltern.

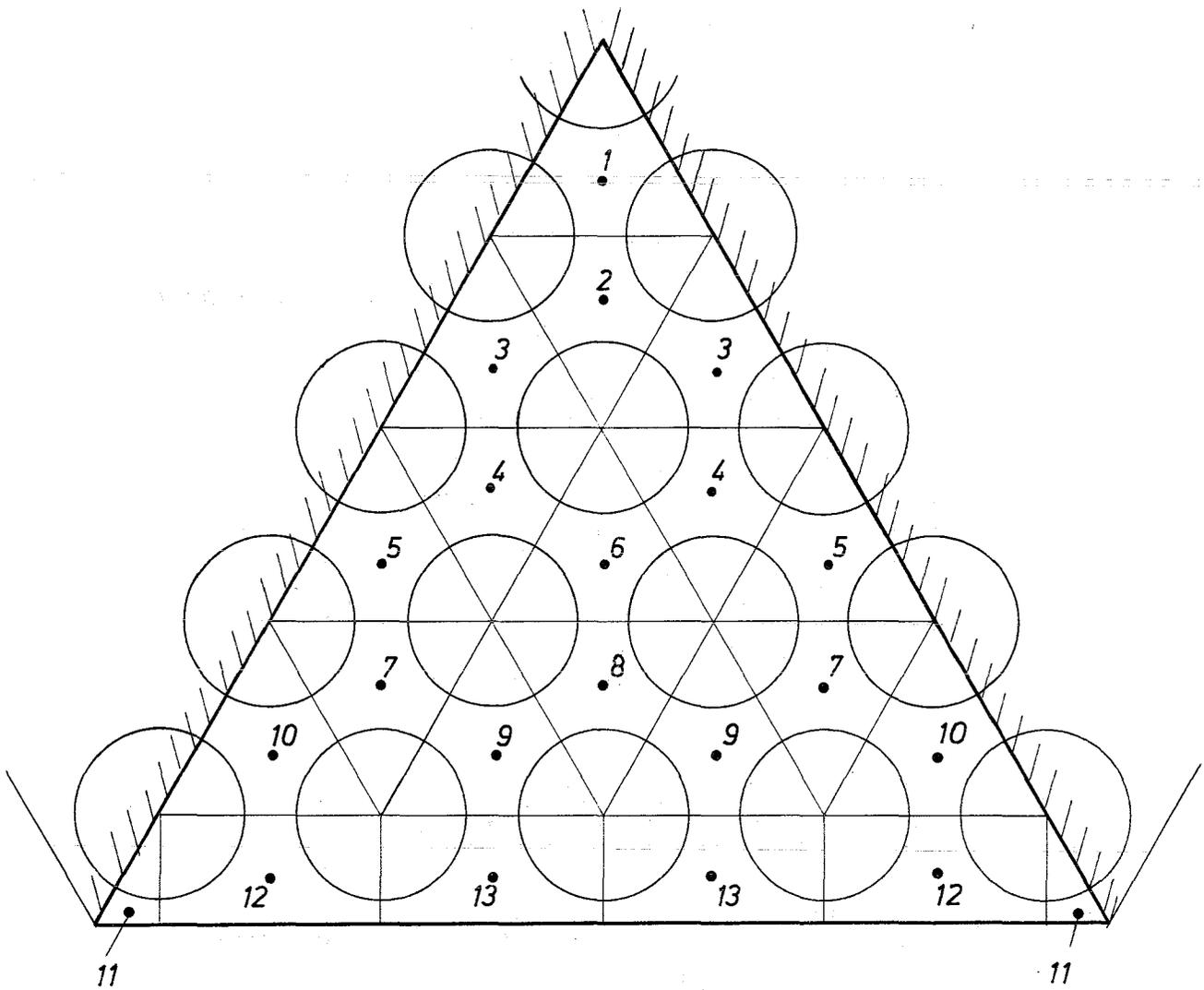
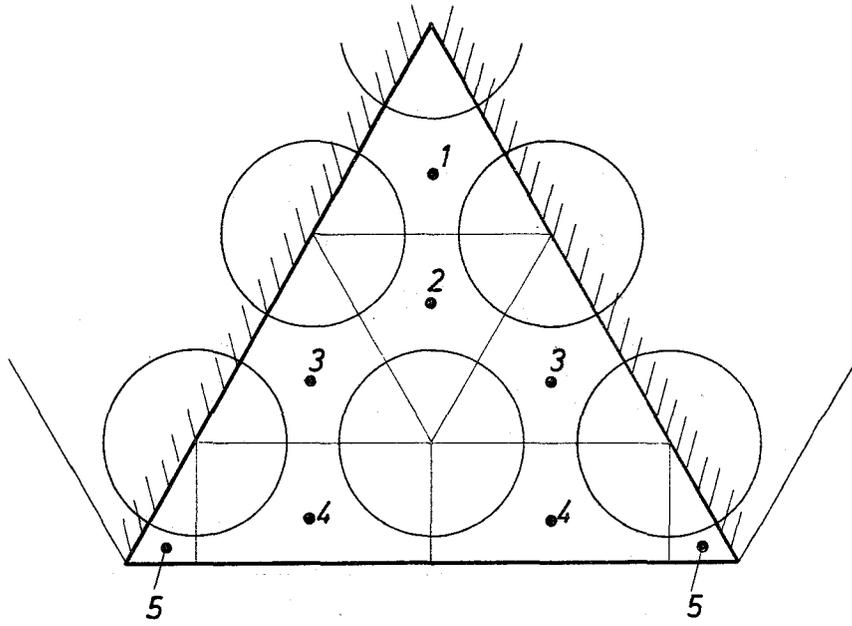


Abb. 2 Anordnung der Teilkanäle beim hexagonalen
19- und 61- Stabbündel

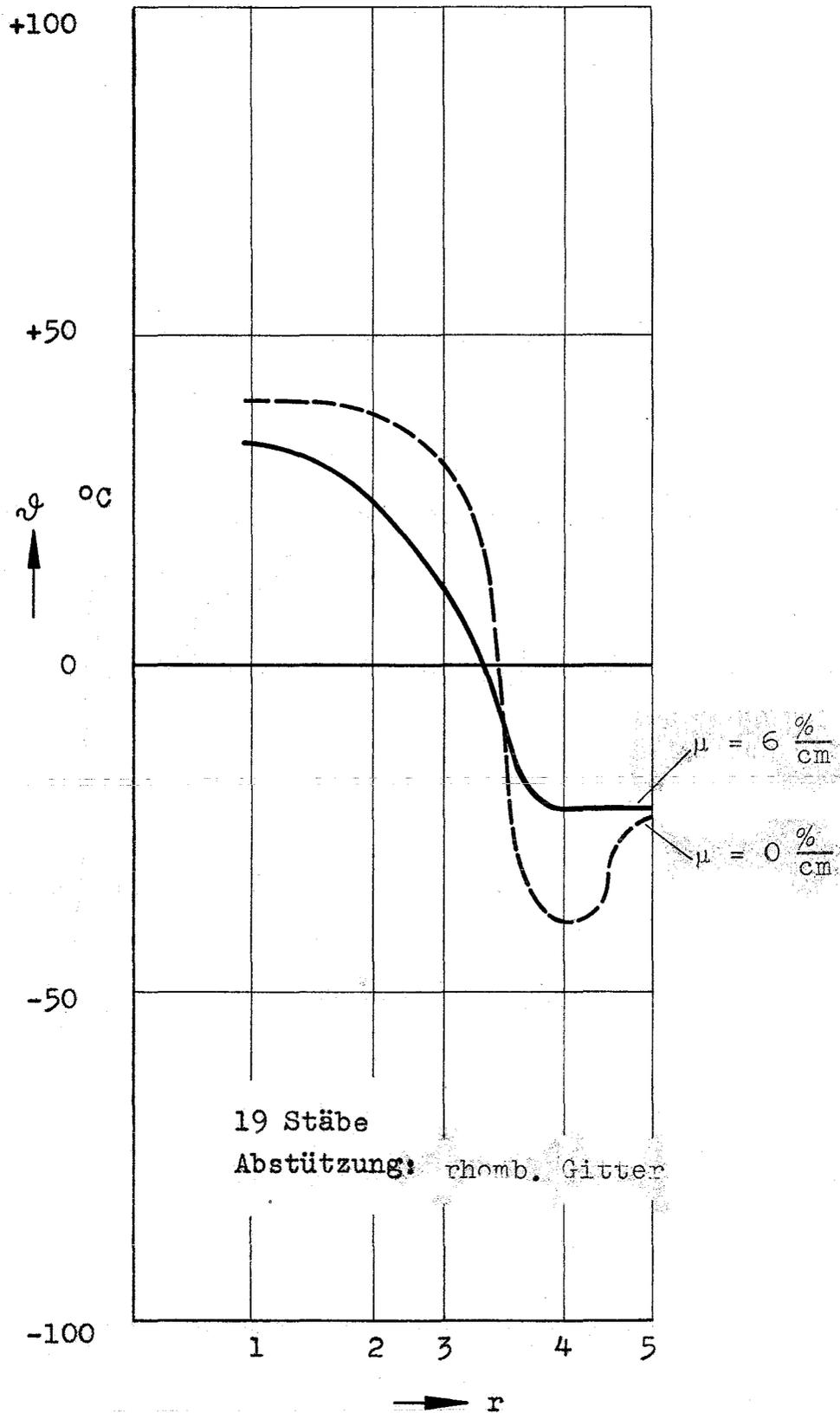


Abb. 3 : Austritts-Übertemperatur $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$
in Abhängigkeit von der radialen
Kanalposition r mit der Mischrate μ als
Parameter

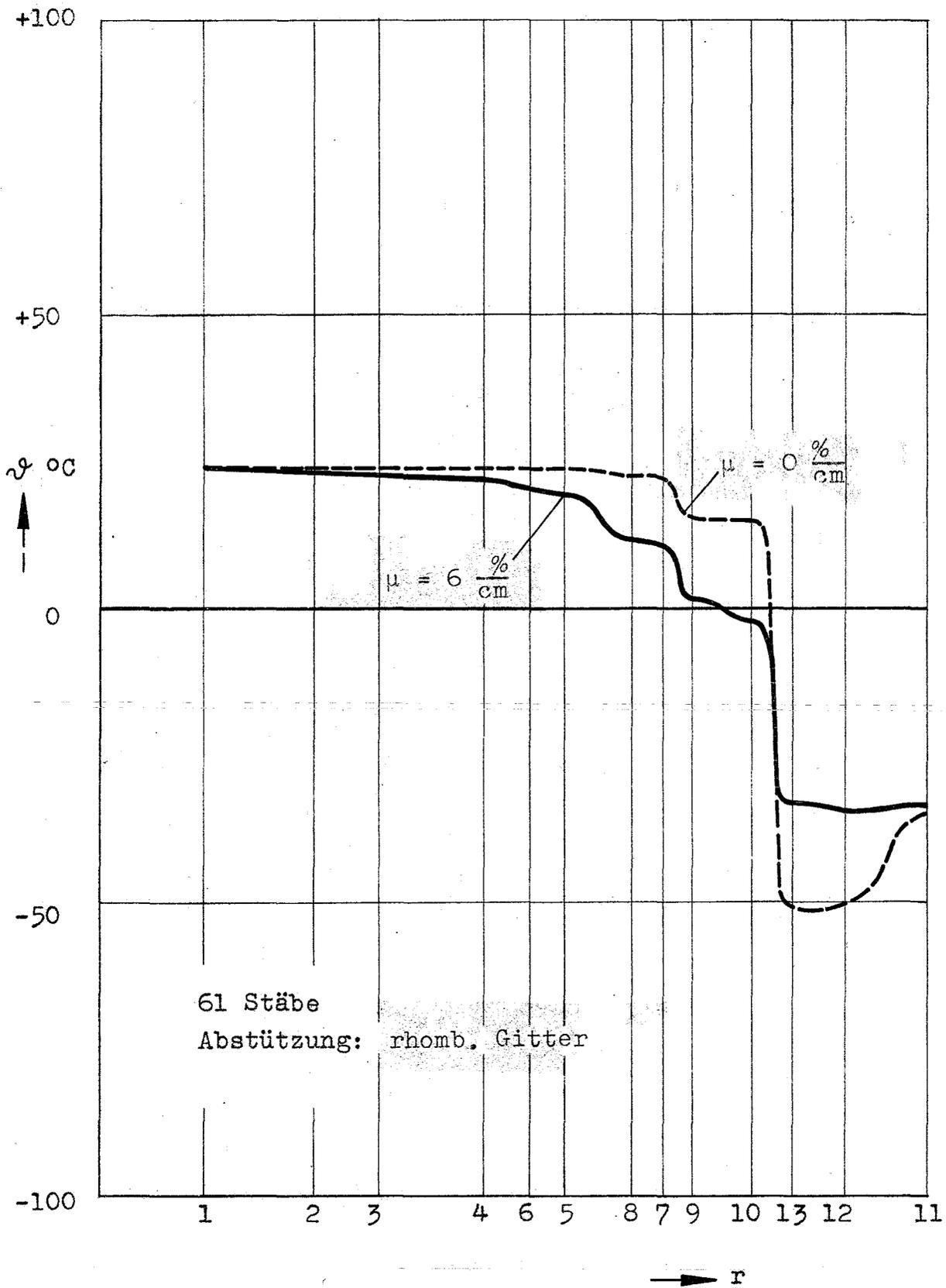


Abb. 4: Austritts-Übertemperatur $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ in Abhängigkeit von der radialen Kanalposition r mit der Mischrate μ als Parameter

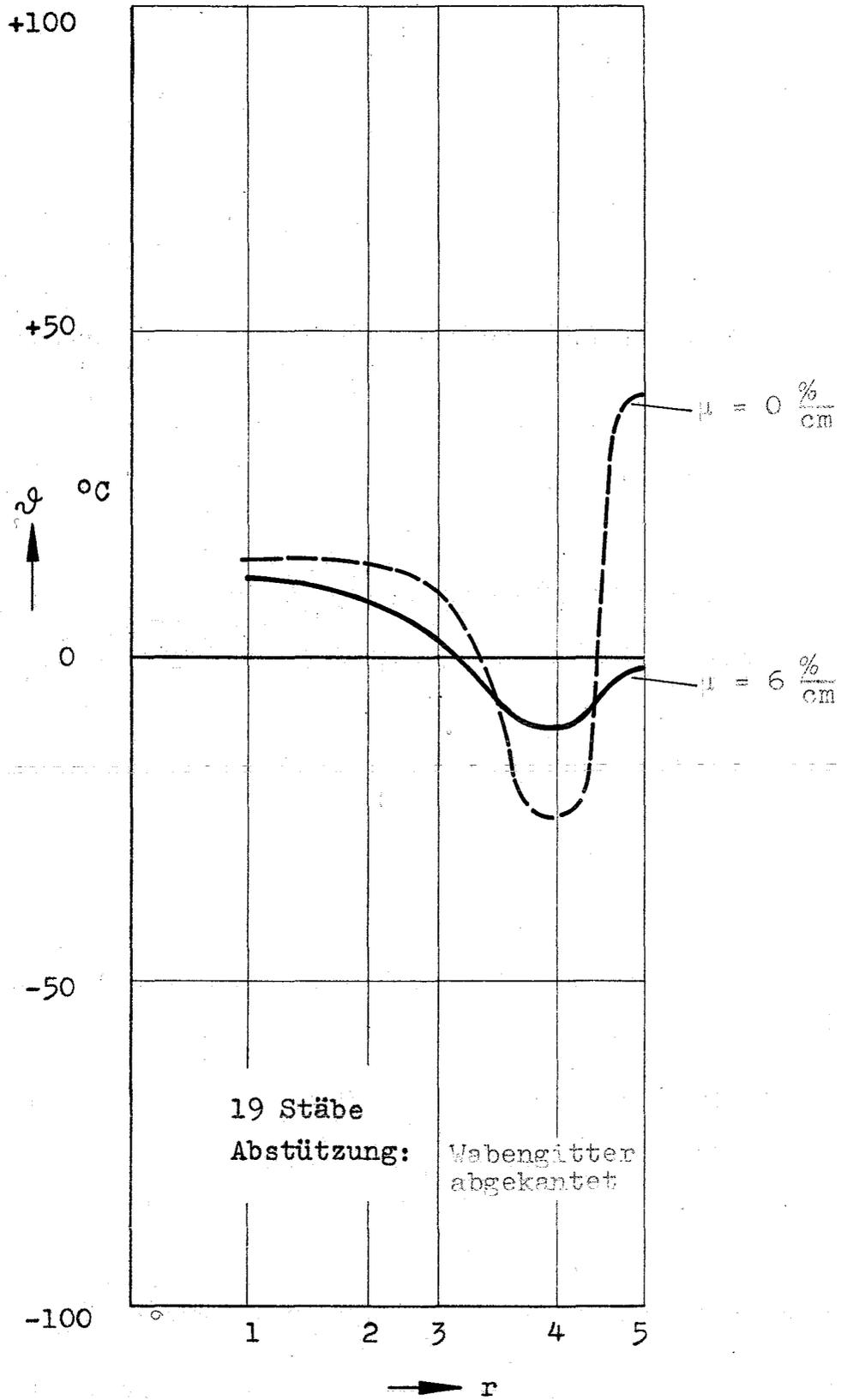


Abb. 5: Austritts-Übertemperatur $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ in Abhängigkeit von der radialen Kanalposition r mit der Mischrate μ als Parameter

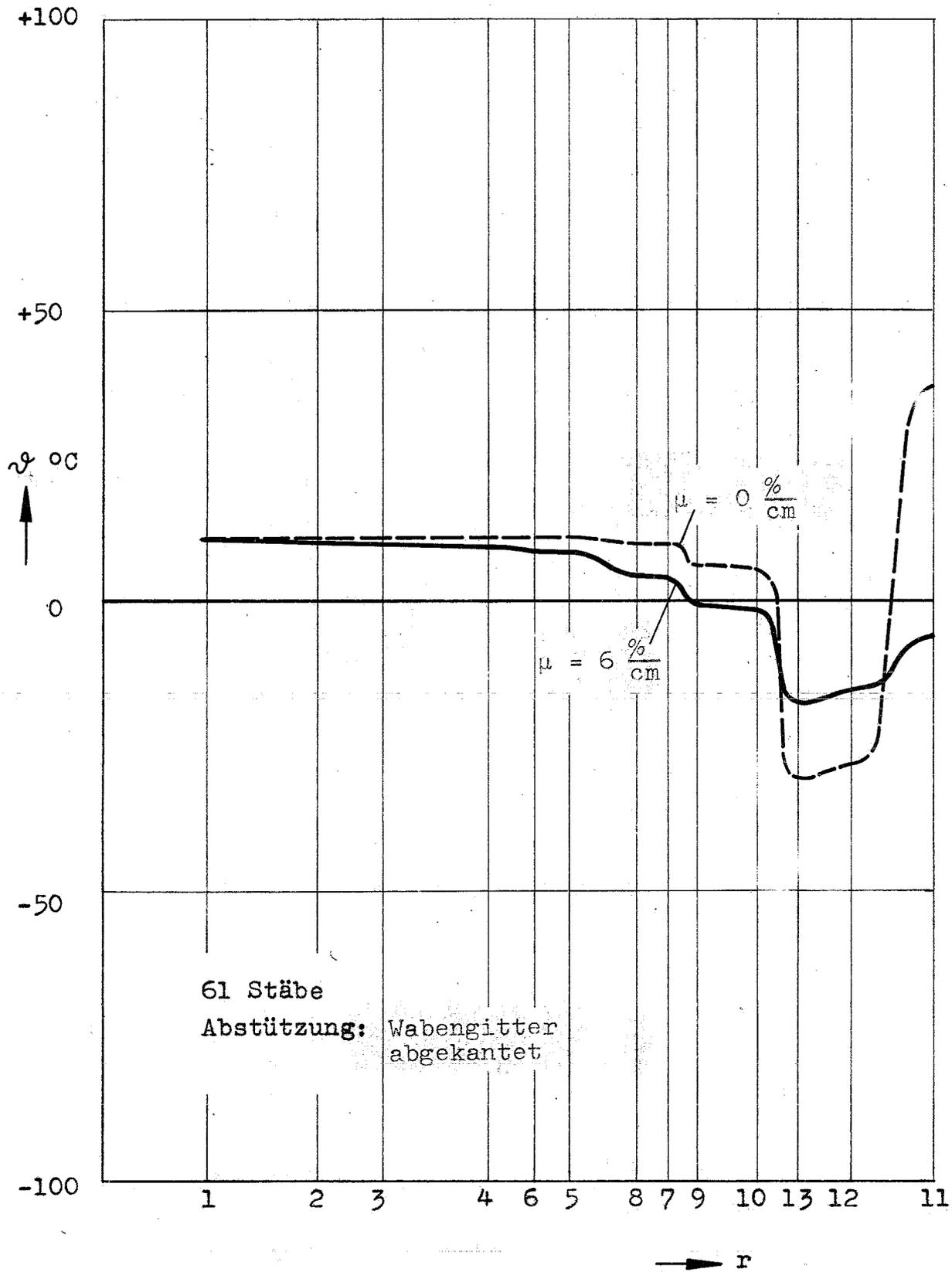


Abb. 6: Austritts-Übertemperatur $\Delta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ in Abhängigkeit von der radialen Kanalposition r mit der Mischrate μ als Parameter

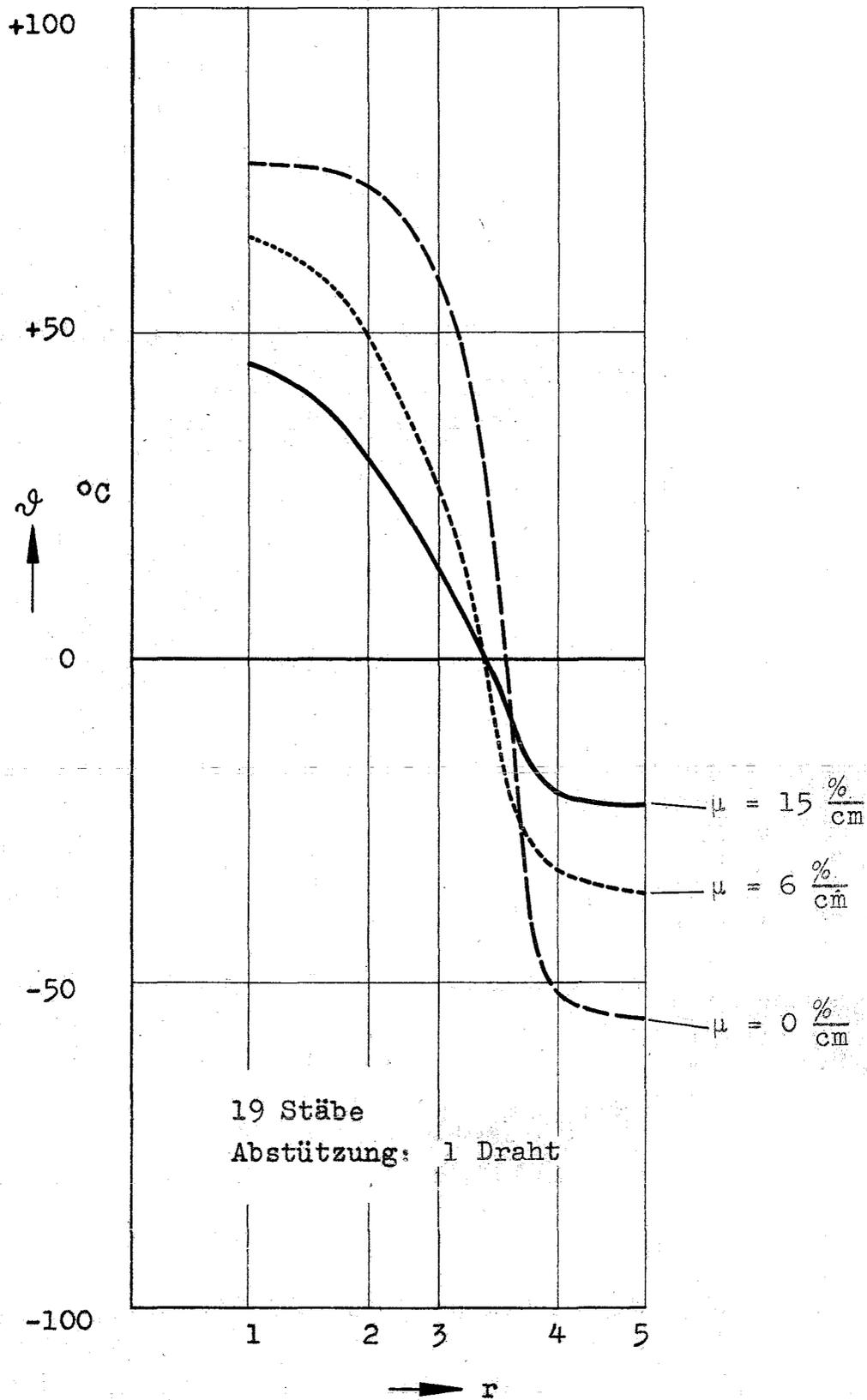


Abb. 7 : Austritts-Übertemperatur $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ in Abhängigkeit von der radialen Kanalposition r mit der Mischrate μ als Parameter

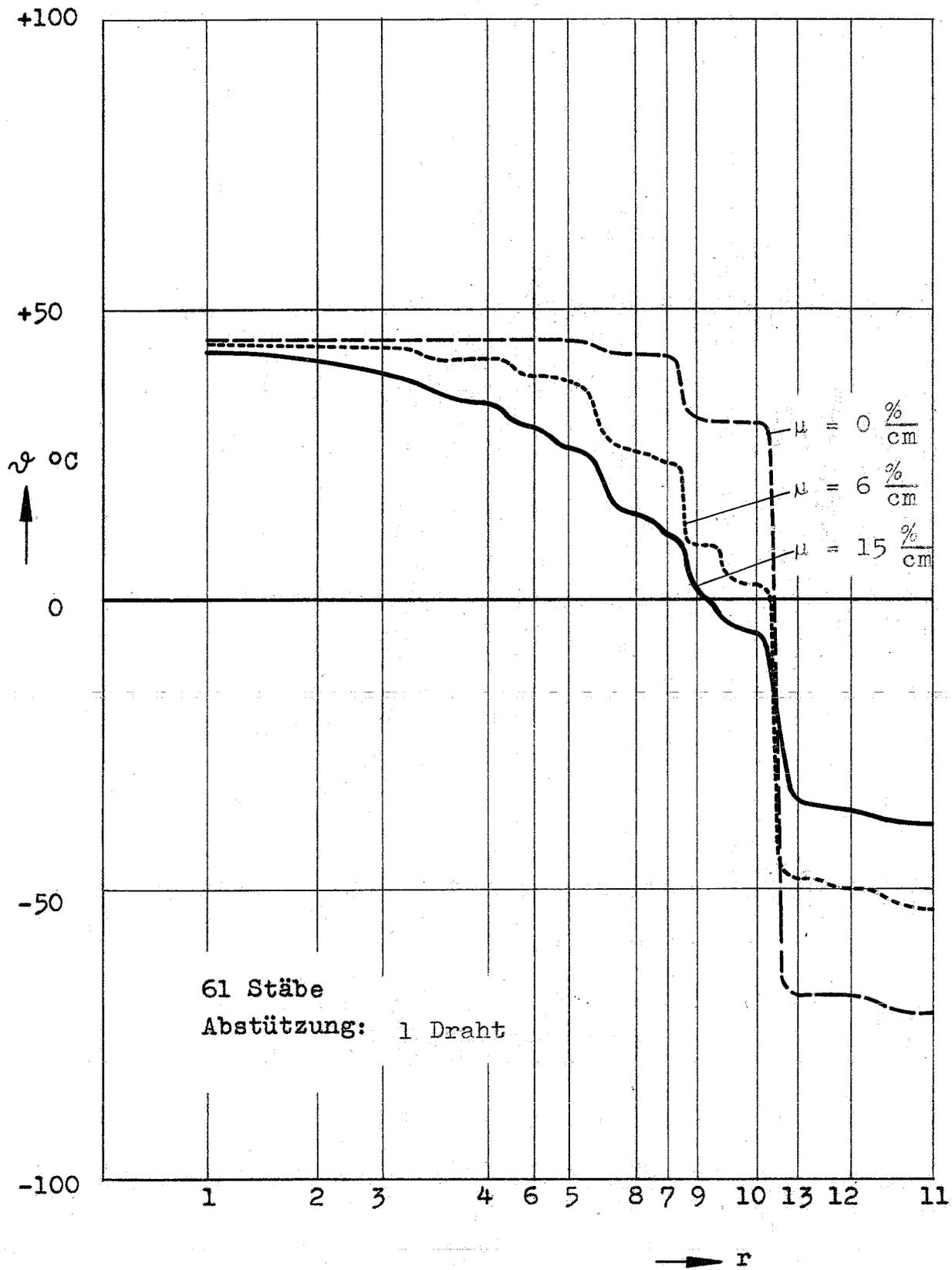


Abb. 8 : Austritts-Übertemperatur $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ in Abhängigkeit von der radialen Kanalposition r mit der Mischrate μ als Parameter

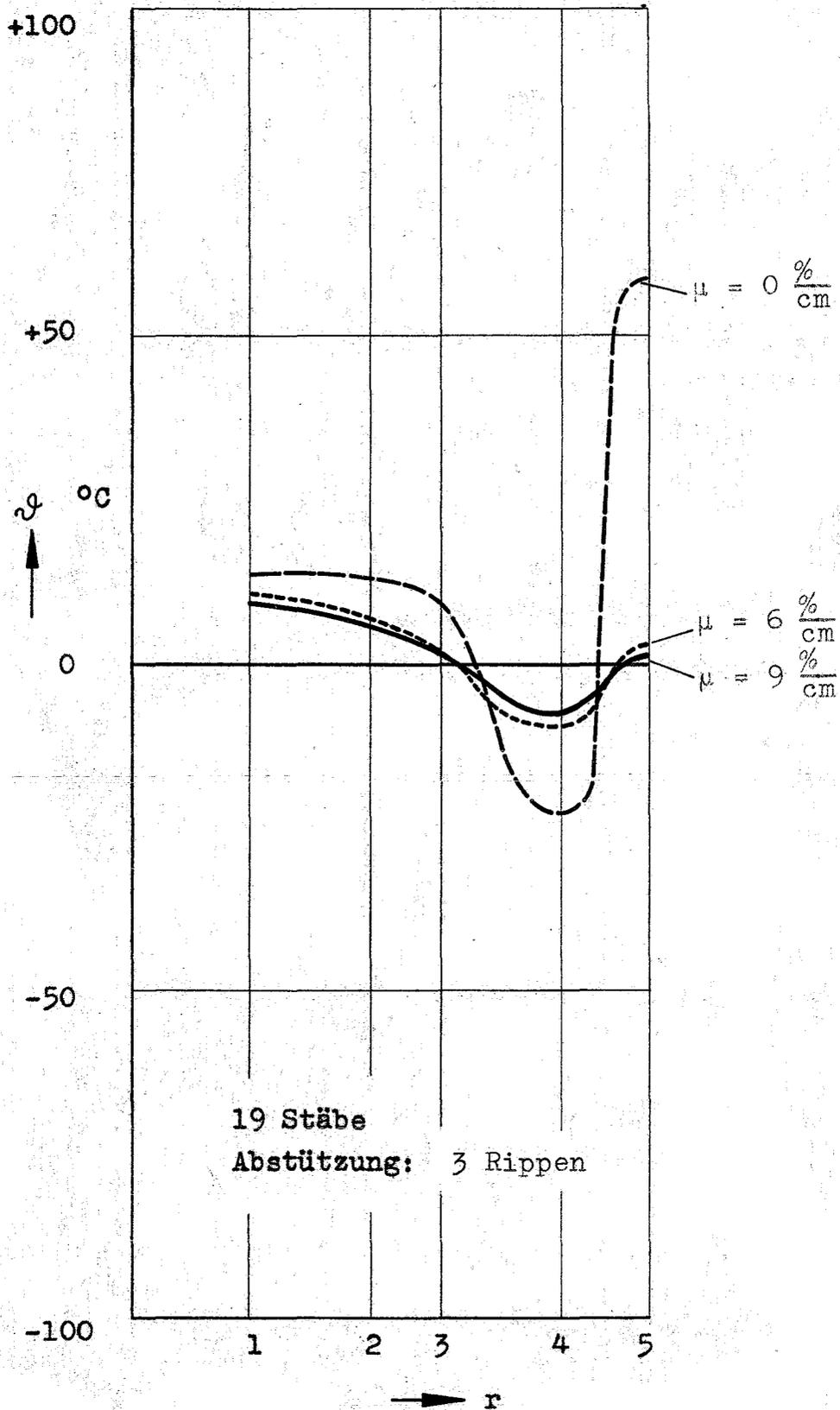


Abb. 9 : Austritts-Übertemperatur $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ in Abhängigkeit von der radialen Kanalposition r mit der Mischrate μ als Parameter

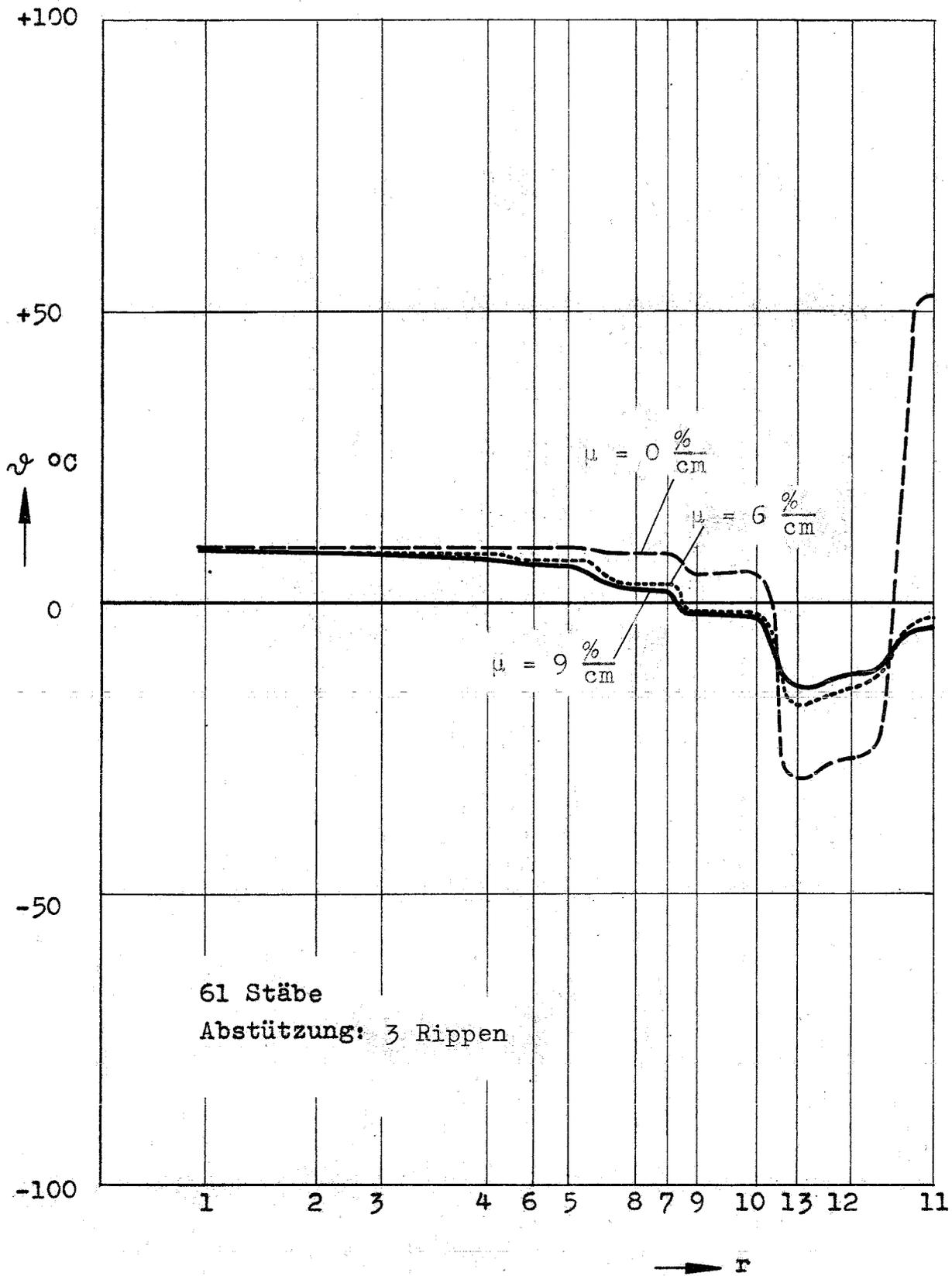


Abb. 10: Austritts-Übertemperatur $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ in Abhängigkeit von der radialen Kanalposition r mit der Mischrate μ als Parameter

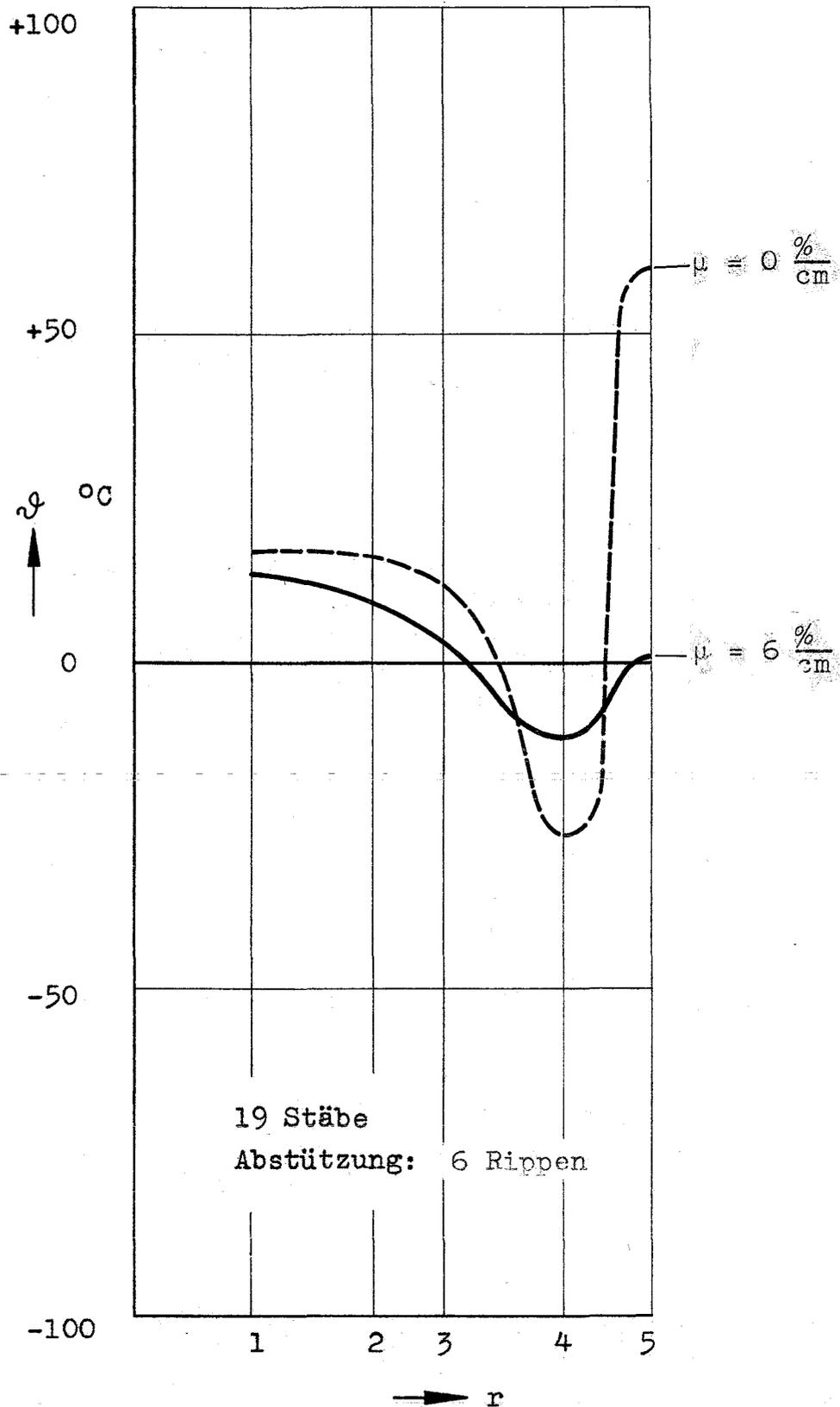


Abb. 11: Austritts-Übertemperatur $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ in Abhängigkeit von der radialen Kanalposition r mit der Mischrate μ als Parameter

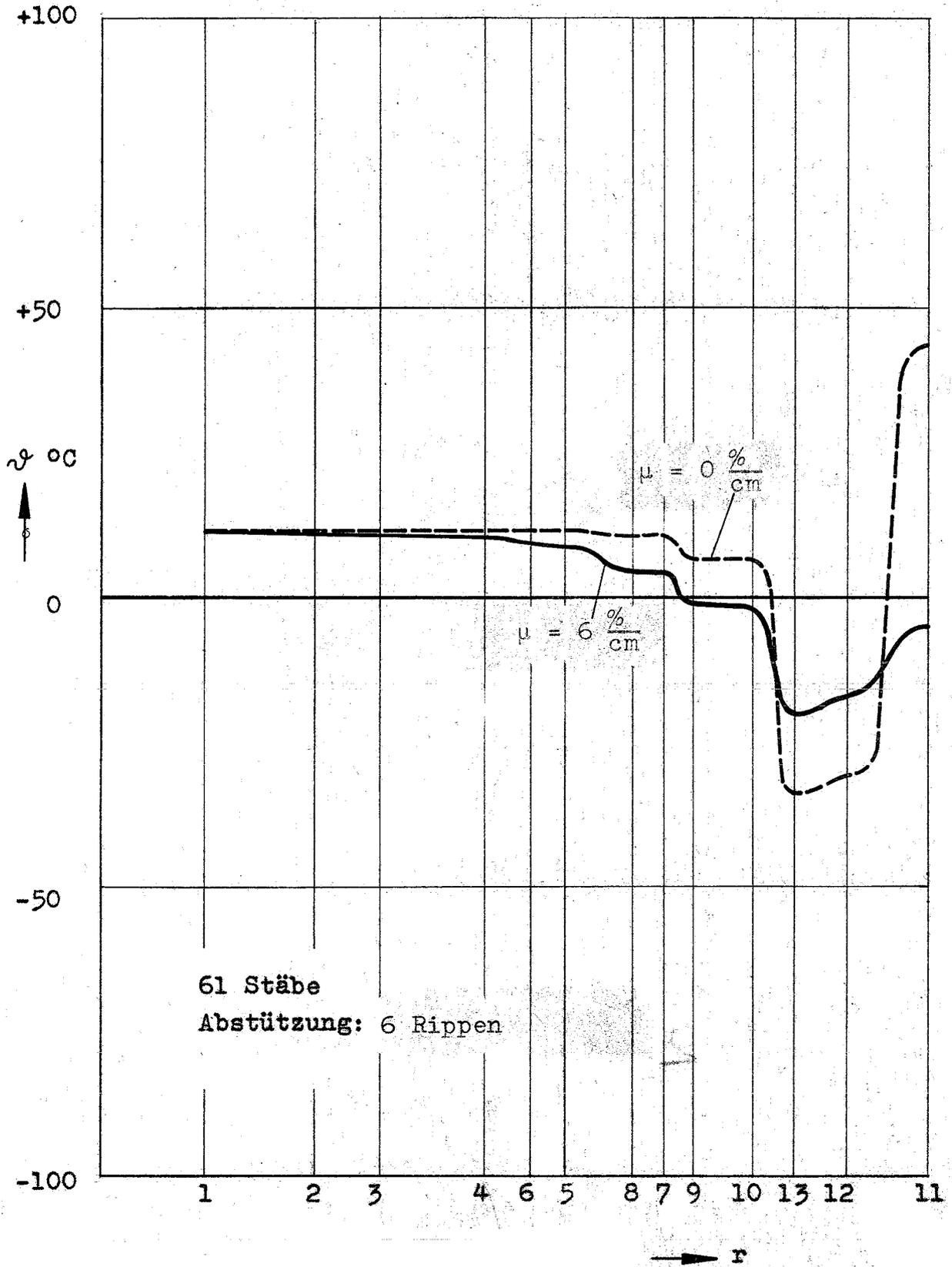


Abb. 12: Austritts-Übertemperatur $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ in Abhängigkeit von der radialen Kanalposition r mit der Mischrate μ als Parameter