

KfK 3178  
Juni 1981

# **Einfluß von Abstandshaltern auf den Wärmeübergang während der Flutphase eines DWR-Kühlmittelverluststörfalles**

P. Ihle, K. Rust  
Institut für Reaktorbauelemente  
Projekt Nukleare Sicherheit

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
INSTITUT FÜR REAKTORBAUELEMENTE  
Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 3178

Einfluß von Abstandshaltern auf den Wärmeübergang während der Flutphase  
eines DWR-Kühlmitteilverluststörfalles

P. Ihle und K. Rust

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## Einfluß von Abstandshaltern auf den Wärmeübergang während der Flutphase eines DWR-Kühlmittelverluststörfalles

### Zusammenfassung

Abstandshalter stellen lokale Versperrungen von ca. 20 % des freien Querschnitts der Kühlkanäle zwischen den Brennstäben dar und beeinflussen den Wärmeübergang. Anhand von zwei Versuchsserien des FEBA-Programmes wird der Einfluß von Abstandshaltern beim Zwangsfluten eines 25-Stabbündels untersucht.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

An den Abstandshaltern werden die Wassertropfen der Zweiphasenströmung teilweise zerstäubt. Durch turbulente Vermischung der Tröpfchen mit der Phase des überhitzten Dampfes in der Nachlaufströmung des Abstandshalters kommt es zur Absenkung des Überhitzungsgrades. Erhöhte Turbulenz und geringerer Überhitzungsgrad verbessern die Kühlung hinter jedem Abstandshalter zunächst für eine gewisse Wegstrecke. Bis zum nächsten Abstandshalter klingt die erhöhte Turbulenz wieder ab, der Überhitzungsgrad steigt wieder an, und eine Abnahme der Kühlung ist die Folge.

Für Flutgeschwindigkeiten von 3.8 und 5.8 cm/s und Systemdrücke von 2.0, 4.1 und 6.2 bar werden diese Effekte quantitativ analysiert und dargestellt.

## Effect of Spacer Grids on the Heat Transfer during the Flooding Phase of a PWR Loss-of-Coolant Accident

### Abstract

Spacer grids form local blockages of about 20 % of the free cross section of the cooling channels between the fuel rods and affect the heat transfer. The influence of spacer grids during forced-feed flooding is investigated on the basis of two FEBA-test series, for a 25-rod bundle.

The essential results obtained can be summarized as follows:

At the spacer grids the liquid droplets of the two-phase flow are partly atomized. In the wake of the spacer grids, a desuperheating of the steam is caused by the turbulent mixing of the liquid droplets with the superheated steam in the flow. Enhanced turbulence and desuperheating improve the cooling downstream of each spacer grid over a certain axial length. However, the enhanced turbulence decays during the flow to the next spacer grid, the degree of desuperheating is redeveloped, and consequently the cooling effect is reduced.

These effects are analyzed quantitatively and represented for flooding rates of 3.8 and 5.8 cm/s and system pressures of 2.0, 4.1, and 6.2 bar.

## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Versuchsdurchführung	1
3. Axiales Temperaturprofil	3
4. Temperaturtransienten	5
5. Wärmeübergang	6
6. Normierter Wärmeübergang	7
7. Einfluß der Flutgeschwindigkeit	8
8. Einfluß des Systemdrucks	9
9. Schlußfolgerungen	10
10. Literaturverzeichnis	11

## 1. Einleitung

Während der Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles (KVS) im Druckwasserreaktor (DWR) ist eine Vielzahl unterschiedlicher Wärmeübergangsmechanismen wirksam. Es ist bekannt, daß die Kühlbedingungen für einen bestimmten Ort im Stabbündel sich zeitabhängig während des Flutvorganges ändern. Es ist auch bekannt, daß die Kühlbedingungen im unteren Bündelbereich sich von denen im oberen Bündelbereich unterscheiden. Hier soll jedoch auf einen weiteren Einfluß auf die Ortsabhängigkeit der Kühlbedingungen eingegangen werden, der von den Abstandshaltern ausgeht.

Die folgenden Ausführungen befassen sich daher mit der Frage, welchen Einfluß Abstandshalter auf das axiale Temperaturprofil der Hüllrohre bei ausgewählten Randbedingungen von Flutgeschwindigkeit und Systemdruck haben. Als Vergleichsgrößen dienen der vom Flutbeginn bis zum Temperaturmaximum durchlaufene Temperaturanstieg der Hüllrohre und insbesondere die aus den gemessenen Temperaturtransienten errechneten Wärmeübergangszahlen für die Wärmeübertragung von den Stäben an das Kühlmittel.

Diese Untersuchungen, die im Rahmen des FEBA-Programms (Flutexperimente mit blockierten Anordnungen) /1/ durchgeführt wurden, dienen dazu, experimentelle Daten zur Weiterentwicklung und Verifizierung von Rechenprogrammen zu erstellen sowie zur Quantifizierung konservativer Vorhersagen über die DWR-Kernnotkühlung beizutragen.

## 2. Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der Größe und Reichweite der lokalen Kühlungsänderung in der Nachlaufströmung der Abstandshalter wurde eine Anordnung von indirekt elektrisch beheizten Brennstabsimulatoren durch Fluten gekühlt /2/. Die Abb. 1 zeigt im unteren Teil einen Querschnitt durch das Stabbündel, die Position der Hüllrohr- und Fluidthermoelemente sowie die Nummerierung der Stäbe. Das Bündel besteht aus Brennstabsimulatoren in einer quadratischen Anordnung mit einem Stabmittenabstand von 14.3 mm. Die Stäbe haben Original-DWR-Abmessungen, einen Außendurchmesser von 10.75 mm und eine beheizte Länge von 3900 mm. Das cosinusförmige axiale Leistungsprofil ist durch 7 Leistungsstufen angenähert, wie im oberen Teil der Abbildung, links, gezeigt wird. Die Stäbe werden in einem dickwandigen, außen isolierten Kasten durch 7 Original-DWR-Abstandshalter geführt, die im Abstand von 545 mm symmetrisch zur Bündel-

mittenebene, axiales Niveau 2025 mm, angebracht sind, wie im oberen Teil der Abbildung, rechts, schematisch dargestellt ist.

Das Programm zur Untersuchung der Kühlwirkung von Abstandshaltern bei Zwangsfluten bestand aus zwei Versuchsserien /3/:

Mit der ersten Versuchsserie, Fluten des Stabbündels in Originalanordnung, wurde die Versuchsbasis gelegt. Für die zweite Versuchsserie wurde der Abstandshalter in der Bündelmittenebene, axiales Niveau 2025 mm, entfernt. Durch einen Vergleich der beiden Versuchsserien konnten die Auswirkungen des Abstandshalters auf die Hüllrohrtemperatur und die Wärmeübertragung in der Zweiphasenströmung festgestellt werden.

Die Experimente wurden mit verschiedenen Flutgeschwindigkeiten und Systemdrücken durchgeführt, die jedoch während der Versuchsdauer konstant blieben. Hierdurch werden alle Systemeffekte ausgeschlossen.

Zur Verdeutlichung des Einflusses von Abstandshaltern wurden bei den Flutversuchen folgende Randbedingungen variiert:

- die "kalte" Flutgeschwindigkeit (3.8 und 5.8 cm/s) und
- der Systemdruck (2.0, 4.1 und 6.2 bar absolut).

Die Nachwärmeleistung basierte auf dem ANS-Standard zuzüglich eines Sicherheitszuschlages von 20 %. Die Leistung zu Beginn des Flutens entspricht etwa 5 % der Nennleistung eines DWR's 40 Sekunden nach dem Abschalten. Die Einspeisetemperatur des Flutwassers betrug 40 °C. Die Hüllrohrtemperaturen wurden mit vollständig eingebetteten Thermoelementen von 0.5 mm Durchmesser an 19 interessierenden axialen Ebenen gemessen. Für die vorliegende Auswertung werden 9 Meßebenen herangezogen, die im Bereich der höchsten Stableistung liegen, und zwar an Stab Nr. 7 die 4 Meßstellen unterhalb der Mittenebene (axiales Niveau: 2425, 2325, 2225 und 2125 mm), an Stab Nr. 9 die Meßstelle in Mittenebene (axiales Niveau 2025 mm) und an Stab Nr. 19 die 4 Meßstellen oberhalb der Mittenebene (axiales Niveau 1925, 1825, 1725 und 1625 mm) mit jeweils 100 mm Abstand zwischen den Meßebenen. Die Fluidtemperaturen wurden in einem Kühlkanal gemessen, der von den Stäben Nr. 18, 19, 23 und 24 begrenzt wurde. Gemessen wurde an drei axialen Positionen (axiales Niveau 1925, 1725 und 1625 mm) oberhalb der Mittenebene mit Thermoelementen von 0.25 mm Durchmesser ohne Abschirmung gegen Einflüsse durch Wärmestrahlung oder Benetzung durch Wassertropfen /4/.

### 3. Axiales Temperaturprofil

Für den Vergleich von Experimenten mit Abstandshalter und ohne Abstandshalter in Bündelmittenebene werden Versuche herangezogen, die unter sonst gleichen Anfangs- und Randbedingungen durchgeführt wurden. Die Anfangsbedingungen werden als ausreichend gleichwertig betrachtet, wenn bei den zu vergleichenden Versuchen die Anfangstemperaturen sich nicht mehr als  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei Flutbeginn zur Zeit  $t = 0\text{ s}$  unterscheiden.

In Abb. 2 sind für die 9 axialen Meßebenen die Temperaturverläufe einer Stabanordnung mit Abstandshalter in Bündelmittenebene dargestellt, wobei eine Flutgeschwindigkeit von  $3.8\text{ cm/s}$  und ein Systemdruck von  $2.0\text{ bar}$  gewählt wurden.

In Abb. 3 sind für die korrespondierenden Meßstellen die Temperaturverläufe einer Stabanordnung ohne Abstandshalter in Bündelmittenebene dargestellt, wobei unter gleichen Randbedingungen geflutet wurde. In beiden Diagrammen ist die Fläche zwischen den Temperaturverläufen, die in und oberhalb der Bündelmittenebene gemessen wurden, durch Schraffur gekennzeichnet. Während der ersten etwa 150 Sekunden des Flutvorganges, einem Zeitraum, währenddessen die für eine Hüllrohrschädigung wichtige maximale Temperatur durchlaufen wird, ergibt sich folgendes Bild:

In der Nachlaufströmung des Abstandshalters kommt es zu einer verbesserten Kühlung, wodurch im Vergleich zu einer Stabanordnung ohne Abstandshalter in Bündelmittenebene ein verminderter Temperaturanstieg und eine geringere Maximaltemperatur der Hüllrohre bewirkt wird. Noch deutlicher wird der Einfluß des Abstandshalters, wenn anstelle der in den Abbildungen 2 und 3 gewählten Darstellungsweise die Hüllrohrtemperaturen als Funktion des Ortes aufgetragen werden. Die Abb. 4 zeigt in je einem Diagramm 30, 90 und 150 Sekunden nach Flutbeginn je zwei axiale Profile von Hüllrohrtemperaturen zwischen drei Abstandshalterebenen (axiales Niveau 2570, 2025 und 1480 mm). Die mit dreieckigen Symbolen markierten Temperaturprofile ergeben sich beim Fluten des Stabbündels in Originalanordnung. Die mit Quadraten gekennzeichneten Temperaturprofile wurden beim Fluten des Stabbündels nach Entfernen des Abstandshalters in Bündelmittenebene gemessen. Zwischen den einzelnen Meßpositionen, die durch die Symbole ausgewiesen sind, wurde linear interpoliert.

Das untere Diagramm der Abbildung zeigt für die Anfangsphase des Flutvorganges, d.h. 30 Sekunden nach Flutbeginn, relativ flache Temperaturprofile für die

vergleichenen Versuche. Die Wiederbenetzungsfront befindet sich zu dieser Zeit im untersten Bündelbereich. Die Abb. 5 zeigt, daß nach 30 Sekunden die Quenchfront das axiale Niveau 3665 mm erreicht hat, also 310 mm der beheizten Bündellänge benetzt sind. Die Meßstellen unterhalb der Bündelmittenebene zeigen 30 Sekunden nach Flutbeginn nahezu deckungsgleiche Temperaturen, wodurch die Vergleichbarkeit der Versuche demonstriert wird. Durch die querschnittsverengende Wirkung des Abstandshalters in der Mittenebene kommt es aber schon zu diesem Zeitpunkt der Flutphase in der Nachlaufströmung des Abstandshalters zu einer Absenkung der Hüllrohrtemperaturen. Korrespondierende Meßstellen aus den beiden Versuchen lassen 100 mm oberhalb der Bündelmittenebene eine Temperaturdifferenz von ca. 30 K erkennen.

Das mittlere Diagramm der Abb. 4 zeigt, daß 90 Sekunden nach Flutbeginn die Hüllrohrtemperaturen insgesamt weiter angestiegen sind. Bei fortschreitender Quenchfront, die entsprechend Abb. 5 das axiale Niveau 3235 mm erreicht hat und somit 740 mm der beheizten Bündellänge benetzt sind, ist erwartungsgemäß der Temperaturanstieg der untersten aufgetragenen Meßpositionen bei den beiden Versuchen am geringsten. Im Versuch ohne Abstandshalter in Bündelmittenebene steigt das axiale Temperaturprofil nahezu linear von der untersten zur obersten Meßposition an. Im Stabbündel mit allen Abstandshaltern wird nun in der Nachlaufströmung des Abstandshalters die Beeinflussung der Hüllrohrtemperatur deutlicher. In einem Abstand von 100 mm oberhalb der Bündelmittenebene beträgt die Temperaturabsenkung ca. 65 K.

Das obere Diagramm der Abb. 4 zeigt das axiale Temperaturprofil 150 Sekunden nach Flutbeginn. Die Quenchfront hat gemäß Abb. 5 das axiale Niveau 2895 mm erreicht, d. h. 1080 mm der beheizten Bündellänge sind benetzt. Bei den unteren Meßpositionen haben die Hüllrohrtemperaturen das Maximum bereits durchlaufen und fallen. Das Gesamtverhalten der Temperaturprofile oberhalb der Mittenebene bleibt unverändert. Strömungsabwärts bewirkt der Abstandshalter nach wie vor eine Verbesserung der Kühlung, so daß 100 mm oberhalb der Bündelmittenebene die Hüllrohrtemperaturen ca. 86 K und 400 mm oberhalb der Mittenebene die Temperaturen ca. 74 K niedriger sind als bei dem zu vergleichenden Versuch ohne Abstandshalter in Bündelmittenebene.

Aus dem Vergleich der beiden Versuche kann zusammenfassend festgehalten werden: Am Abstandshalter kommt eine Zweiphasenströmung an, die aus stark überhitztem Dampf und Wassertropfen von nahezu Sättigungstemperatur besteht. Durch die querschnittsverengende Wirkung der senkrecht zueinander angeordneten, scharf-

kantigen Abstandshalterbleche die sich jeweils im Zentrum von Unterkanälen kreuzen, werden die von der Strömung mitgerissenen Wassertropfen teilweise zerstäubt. Durch turbulente Vermischung der Tröpfchen mit dem überhitzten Dampf in der Nachlaufströmung des Abstandshalters kommt es zur Absenkung der Dampfüberhitzung. Erhöhte Turbulenz und Absenkung des Überhitzungsgrades verbessern die Kühlung hinter jedem Abstandshalter zunächst für eine gewisse Wegstrecke. Bis zum nächsten Abstandshalter in Strömungsrichtung klingt die erhöhte Turbulenz ab, der Überhitzungsgrad steigt wieder an, und eine Abnahme der Kühlung ist die Folge. Diese Abnahme der Kühlwirkung ist auch bei den experimentellen Untersuchungen des Aufblähvorganges von Brennstäben deutlich geworden. Versuche im Rahmen des REBEKA-Programmes /5/ haben gezeigt, daß unmittelbar hinter dem Abstandshalter die Hüllrohrverformung am geringsten ist und in Strömungsrichtung zunimmt. Durch diesen Effekt des Abstandshalters kommt es zu den in Abb. 6 gezeigten typischen Deformationen von Stäben, bei denen das Dehnungsmaximum in Strömungsrichtung zum nächsten Abstandshalter verschoben ist, wenn die Dehnung vorwiegend während des Flutvorganges erfolgt.

#### 4. Temperaturtransienten

In den Abbildungen 7 und 8 ist der zeitliche Verlauf von Hüllrohrtemperaturen vom Flutbeginn bis zum Benetzen der betrachteten Meßstellen für zwei vergleichbare Versuche dargestellt, die bei einer Flutgeschwindigkeit von 3.8 cm/s und einem Systemdruck von 4.1 bar durchgeführt wurden. Die Meßstellen liegen wiederum in dem bereits erwähnten Bereich maximaler Stableistung unterhalb, in und oberhalb der Mitenebene mit jeweils 100 mm Abstand zwischen den Meßebenen. Die Flächen zwischen den Temperaturtransienten, die in der Mitenebene und oberhalb derselben gemessen wurden, sind wiederum durch Schraffur gekennzeichnet. Die beiden Diagramme zeigen, daß in beiden Versuchen die Benetzungsfront stetig von unten nach oben fortschreitet und die Meßstellen in der Reihenfolge ihrer axialen Positionen erreicht. Es entsteht also keine zweite Benetzungsfront im Einflußbereich des Abstandshalters. Dies wird auch bestätigt durch Abb. 9, die das axiale Niveau der Benetzungsfront in Abhängigkeit von der Flutzeit wiedergibt. Die aus den beiden Versuchen ermittelten Wärmeübergangszahlen sind in den Abbildungen 10 und 11 dargestellt, auf die in einem der folgenden Abschnitte noch näher eingegangen wird.

Eine direkte Gegenüberstellung korrespondierender Meßstellen aus den beiden Versuchen ist in Abb. 12 für das axiale Niveau 1625 mm dargestellt. Der Ab-

standshalter in der Bündelmittenebene verursacht im Vergleich zu dem entsprechenden Versuch ohne querschnittsverengende Wirkung des Abstandshalters eine zeitweilige Absenkung der Dampfüberhitzung von ca. 100 K. Die verbesserte Kühlung hat eine geringere Maximaltemperatur des Hüllrohres von ca. 35 K zur Folge.

## 5. Wärmeübergang

In Abb. 13 sind über der Zeit nach Flutbeginn die Hüllrohrtemperaturen und Wärmeübergangszahlen dargestellt, die sich 100 mm oberhalb der Bündelmittenebene einstellen. Geflutet wurden die beiden Stabbündel wiederum bei einer kalten Flutgeschwindigkeit von 3.8 cm/s und einem Systemdruck von 4.1 bar.

Zwei Auswirkungen auf die korrespondierenden Meßstellen sind zu erkennen:

1. Durch die turbulente Vermischung der am Abstandshalter zerstäubten Wassertröpfchen mit dem überhitzten Dampf hat die Zweiphasenströmung hinter dem Abstandshalter eine verbesserte Kühlwirkung, wodurch ein verminderter Temperaturanstieg und eine um fast 60 K geringere Maximaltemperatur verursacht werden.
2. Im weiteren Verlauf der Flutphase nimmt der Unterschied zwischen den Hüllrohrtemperaturen langsam ab. Die vergleichbaren Meßstellen werden aber schließlich zur gleichen Zeit aus gleicher Temperatur benetzt.

Der zeitliche Verlauf der Wärmeübergangszahlen ist unter Verwendung einer modifizierten Version des HETRAP-Programms /6/ aus dem angegebenen Verlauf der Hüllrohrtemperaturen und der zeitabhängigen Stableistung bestimmt worden. Als Kühlmitteltemperatur wurde diejenige Sättigungstemperatur eingesetzt, die dem gemessenen Systemdruck entspricht.

Der zeitliche Verlauf der Wärmeübergangszahlen wird durch unterschiedliche Wärmeübergangsmechanismen bestimmt; das sind vor allem Nebelkühlung, Filmsieden und Blasensieden. In den ersten Minuten des Flutvorgangs entsteht Dampf, der Wassertröpfchen mitreißt, wodurch die Wärmeabfuhr durch Nebelkühlung erfolgt. Dieser Dampf ist aber wesentlich heißer als die von ihm mitgeführten Wassertröpfchen. Der Abstandshalter bewirkt seinerseits durch die genannten Vorgänge eine Absenkung der Dampfüberhitzung und damit eine Verbesserung der Kühlung zu einer Zeit, während der die für eine mögliche Hüllrohrschädigung wichtige maximale Hüllrohrtemperatur durchlaufen wird.

Wenn sich der Abstand der Meßstelle zur Benetzungsfront verkleinert hat, werden die Stäbe zunehmend von Wasser bzw. von einem Gemisch aus Wasser- und Dampfblasen umgeben, das nur durch einen Dampffilm von der Staboberfläche getrennt ist. Dampfblasen bilden sich erst an der Grenzschicht zwischen dem Dampffilm und der Flüssigkeit. Die Wärme wird durch Filmsieden abgeführt. Die Versuche haben gezeigt, daß in dem Filmsiedebereich eine stärkere Durchmischung von Wasser und Dampf durch den Abstandshalter nur eine geringfügige Verbesserung der Kühlung bewirkt. Da zu diesem Zeitpunkt die Hüllrohrtemperaturen längst das Maximum durchlaufen haben, wird im nachfolgenden nur noch der Bereich der Nebelkühlung untersucht.

## 6. Normierter Wärmeübergang

Im folgenden sind die Wärmeübergangszahlen, die sich ergeben aus einem Versuch mit Abstandshalter in Bündelmittenebene, durch Division mit den Wärmeübergangszahlen ohne den entsprechenden Abstandshalter normiert worden. Bei gleichen Versuchsbedingungen läßt sich auf diese Weise der Einfluß eines Abstandshalters im Bereich der Nebelkühlung verdeutlichen. In den Abbildungen 14 und 15 sind die Wärmeübergangszahlen für zwei verschiedene Meßebenen und zwar 100 mm axiales Niveau 1925 mm) und 400 mm (axiales Niveau 1625 mm) oberhalb der Bündelmittenebene dargestellt. Die Abb. 16 zeigt den normierten Wärmeübergang, der für diese Meßebenen ermittelt wurde. Aufgetragen sind geglättete Kurven, indem für jeden Punkt, der mit einer Frequenz von 10 Hz während eines Versuches erfaßten und verarbeiteten Daten, das arithmetische Mittel aus jeweils 51 Werten gebildet wurde, wobei 25 Werte vor und 25 Werte hinter dem betrachteten Punkt in die Mittelwertbildung einbezogen wurden. Dieser Glättungsprozeß wurde zweimal durchlaufen. Aus den abgebildeten Transienten ist ersichtlich, daß die normierten Wärmeübergangszahlen mit der Zeit abfallen. Dieser allgemeinen Tendenz sind einzelne Maxima und Minima überlagert. Eine detaillierte Analyse des Flutvorgangs ergab, daß diese Extreme durch die Stufen im axialen Leistungsprofil der Heizstäbe verursacht werden. Abb. 17 zeigt den Einfluß dieser Experimenteffekte. Daher wurde versucht, die zeitlich abnehmende Tendenz der normierten Wärmeübergangszahlen durch Geraden anzunähern unter Verwendung der GAUSS'schen Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

Aus dem Verlauf der Geraden ist folgend Schlußfolgerung zu ziehen:

- Die normierten Wärmeübergangszahlen liegen über "1.0", d.h. der Abstands-

halter verursacht eine Kühlungsverbesserung der Hüllrohre.

- Der Einfluß des Abstandshalters auf die Kühlung der Stäbe ist ortsabhängig.
- Die lokale Verbesserung der Kühlung ist zeitabhängig. Die Kühlverbesserung ist am Anfang am besten, wenn die Dampfgeschwindigkeit in der Bündelmittenebene groß und der Wasseranteil in der Kühlmittelströmung relativ gering sind. Mit Näherrücken der Benetzungsfront nimmt die Kühlungsverbesserung ab. Die Ursachen für diese Abnahme bedürfen noch detaillierter Untersuchungen, d.h. ob es sich hierbei um zeitabhängige Auswirkungen der Dampfgeschwindigkeit, des Wasseranteils in der Zweiphasenströmung, des Tropfenspektrums oder der Dampfenthitzung handelt.

Die Abb. 18 vermittelt einen Eindruck über die Fehlerbandbreite. Sie wird im wesentlichen dadurch beeinflusst, inwieweit gleiche Anfangs- und Randbedingungen für verschiedene Versuche eingehalten werden können. Aufgetragen sind die Ausgleichsgeraden des normierten Wärmeübergangs für insgesamt 9 axiale Meßpositionen. Für die Positionen unterhalb der Bündelmittenebene bei 2025 mm sollte der normierte Wärmeübergang über den betrachteten Bereich der Nebelkühlung konstant gleich 1.0 sein. Die Abweichung beträgt etwa 8 %. Für die Meßpositionen hinter dem Abstandshalter, die oberhalb der gestrichelten Linie bei 1.0 dargestellt sind, wird man in erster Näherung eine ähnliche Unschärfe annehmen können.

## 7. Einfluß der Flutgeschwindigkeit

Die Abb. 19 zeigt den Einfluß der Flutgeschwindigkeit auf den normierten Wärmeübergang. Je höher die Flutgeschwindigkeit ist, desto höher sind die Dampferzeugung und der Wassermittelschlag, der von der superfiziellen Dampfgeschwindigkeit abhängt. Der Einfluß des Abstandshalters auf die Zweiphasenströmung führt zu einer verstärkten Wärmeabfuhr hinter dem Abstandshalter. In Tab. 1 ist zusammengefaßt, inwieweit die für die Hüllrohrschädigung wichtige maximale Temperatur abgesenkt wird, wenn die kalte Flutgeschwindigkeit von 3.8 auf 5.8 cm/s erhöht ist bei einem konstanten Systemdruck von 4.1 bar.

Tab. 1: Einfluß der Flutrate auf die Temperaturabsenkung

Systemdruck  $p = 4.1$  bar

axiales Niveau mm	Flutrate cm/s	
	3.8	5.8
1925	58 K	76 K
1625	35 K	56 K

8. Einfluß des Systemdrucks

Die Abb. 20 zeigt den Einfluß des Systemdrucks auf den normierten Wärmeübergang. Mit zunehmendem Druck führt die mit der größeren Dampfdichte verbundene kleinere Dampfgeschwindigkeit zu einem verminderten Wassermitriß, so daß die turbulenz erhöhende Wirkung des Abstandshalters abnimmt. Aus Tab. 2 geht hervor, welche Absenkung die maximale Hüllrohrtemperatur erfährt, wenn der Systemdruck von 6.2 über 4.1 auf 2.0 bar reduziert wird bei einer konstanten kalten Flutgeschwindigkeit von 3.8 cm/s.

Tab. 2: Einfluß des Systemdrucks auf die Temperaturabsenkung

kalte Flutgeschwindigkeit  $v = 3.8$  cm/s

axiales Niveau mm	Systemdruck bar		
	6.2	4.1	2.0
1925	32 K	58 K	79 K
1625	21 K	35 K	59 K

## 9. Schlußfolgerung

Der Einfluß des Abstandshalters auf den Wärmeübergang für den Bereich der Nebelkühlung wurde anhand einiger ausgewählter FEBA-Experimente untersucht. Die für den normierten Wärmeübergang dargestellten Ausgleichsgeraden zeigen

- eine generelle Verbesserung der Kühlung hinter dem Abstandshalter, die in Strömungsrichtung zum nächsten Abstandshalter wieder abnimmt,
- eine mit zunehmender Zeit nach Flutbeginn abnehmende Kühlungsverbesserung,
- eine mit erhöhter Flutgeschwindigkeit zunehmende Kühlungsverbesserung und
- eine mit reduziertem Systemdruck zunehmende Verbesserung der zu kühlenden Hüllrohre.

Vom Standpunkt des Programmentwicklers gesehen, wäre es aber wünschenswert zu wissen, welchen Einfluß der Abstandshalter hat auf die Orts- und Zeitabhängigkeit der Geschwindigkeit von Dampf- und Wassertropfen sowie das Spektrum der Tropfendurchmesser.

10. Literaturverzeichnis

- /1/ Ihle P., et al.,  
" Flutexperimente mit blockierten Anordnungen"  
In: Projekt Nukleare Sicherheit  
KFK - 2435, April 1977, S. 377 - 391,  
KFK - 2500, Dez. 1977, S. 404 - 417,  
KFK - 2600, Mai 1978, S. 401 - 415,  
KFK - 2700, Nov. 1978, S. 4200/121 - 152  
KFK - 2750, Sept. 1979, S. 4200/145 - 165
- /2/ Rust, K., Ihle, P.,  
Heat Transfer and Fluid Flow during  
Reflooding of Blocked Arrays.  
Proc. of the ANS/ASME/NRC Internat. Topical  
Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics  
held at Saratoga Springs, N.Y., October 5-8, 1980  
NUREG/CP-0014 Vol. 2, S. 1237-1251
- /3/ Ihle, P., Rust, K.,  
Einfluss der Stababstandshalter auf den Wärmeübergang in der Flutphase  
eines DWR-Kühlmittelverluststörfalles.  
Jahrestagung Kerntechnik 80. Reaktortagung 1980, Berlin, 25.-27. März 1980.  
Kerntechnische Ges. e. V. Deutsches Atomforum e. V.; Eggenstein-Leopoldshafen:  
Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1980. S. 145-148
- /4/ Ihle, P., Müller, St.,  
Experience with Steam Temperature and Water  
Detection Probes for Transient Mist Flow in Hot  
Rod Bundles.  
Proc. of the ANS/ASME/NRC Internat. Topical  
Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics  
held at Saratoga Springs, N.Y., October 5-8, 1980  
NUREG/CP-0014 Vol.2, S. 970-981

- /5/ Erbacher, F., Neitzel, H.J., Wiehr, K.,  
"Studies on Zircaloy Fuel Clad Ballooning in a LOCA,  
Results of Burst Tests with Indirectly Heated Fuel Rod Simulators"  
4. International Conference on Zirconium in the Nuclear Industry  
Stratford-upon-Avon, England, 27. - 29. Juni 1978
- /6/ Malang, S., Rust, K.,  
"Heat Transfer Analysis of Experiments Simulating a LOCA"  
Conference on Heat and Fluid Flow in Water Reactor Safety  
Manchester, England, 13. - 15. Sept. 1977
- /7/ Ihle, P., Politzky, M., Rust, K.,  
FEBA-Flooding Experiments with Blocked  
Arrays. Heat Transfer in Partly Blocked 25-Rod Bundle.  
Hochreiter, L.E.(Hrsg.)  
Experimental and Analytical Modeling of LWR  
Safety Experiments. 19th Nat. Heat Transfer  
Conf., Orlando, Fla., July 27-30, 1980.  
New York, N.Y.: ASME 1980. S. 129-38. (HTD - Vol. 7)
- /8/ Ihle, P.,  
Flooding Experiments in Blocked Arrays.  
FEBA  
Recent Results and Future Plans.  
8th Water Reactor Safety Research Information  
Meeting, Gaithersburg, Md., October 27-31, 1980 .

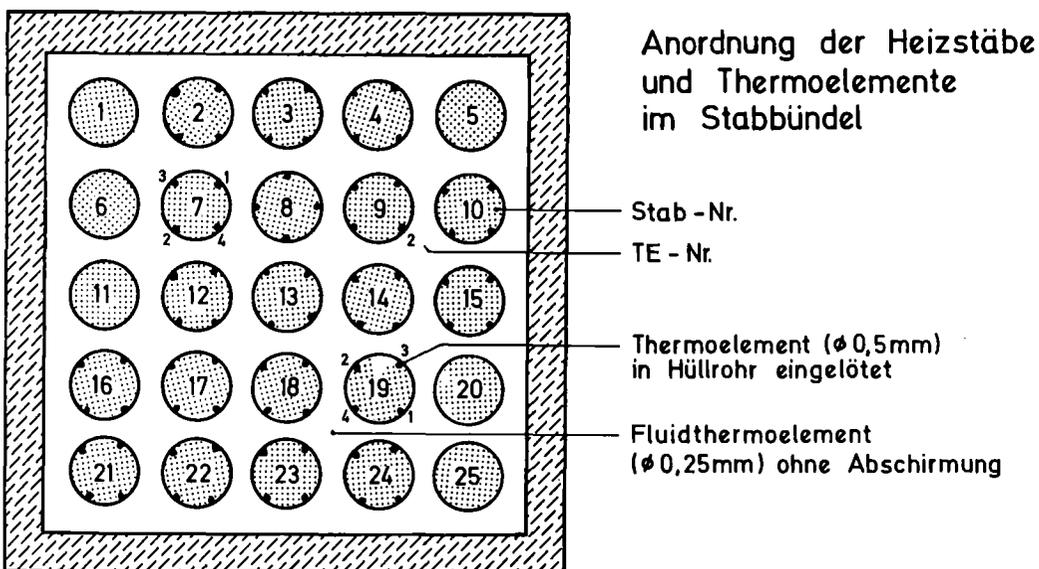
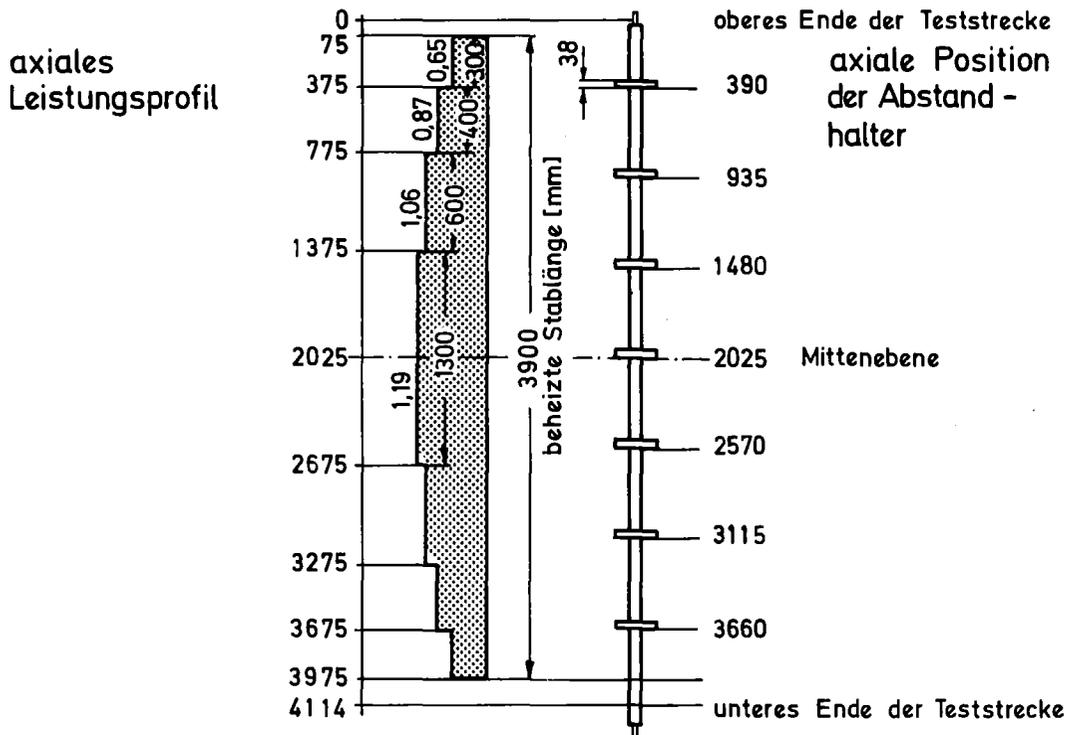
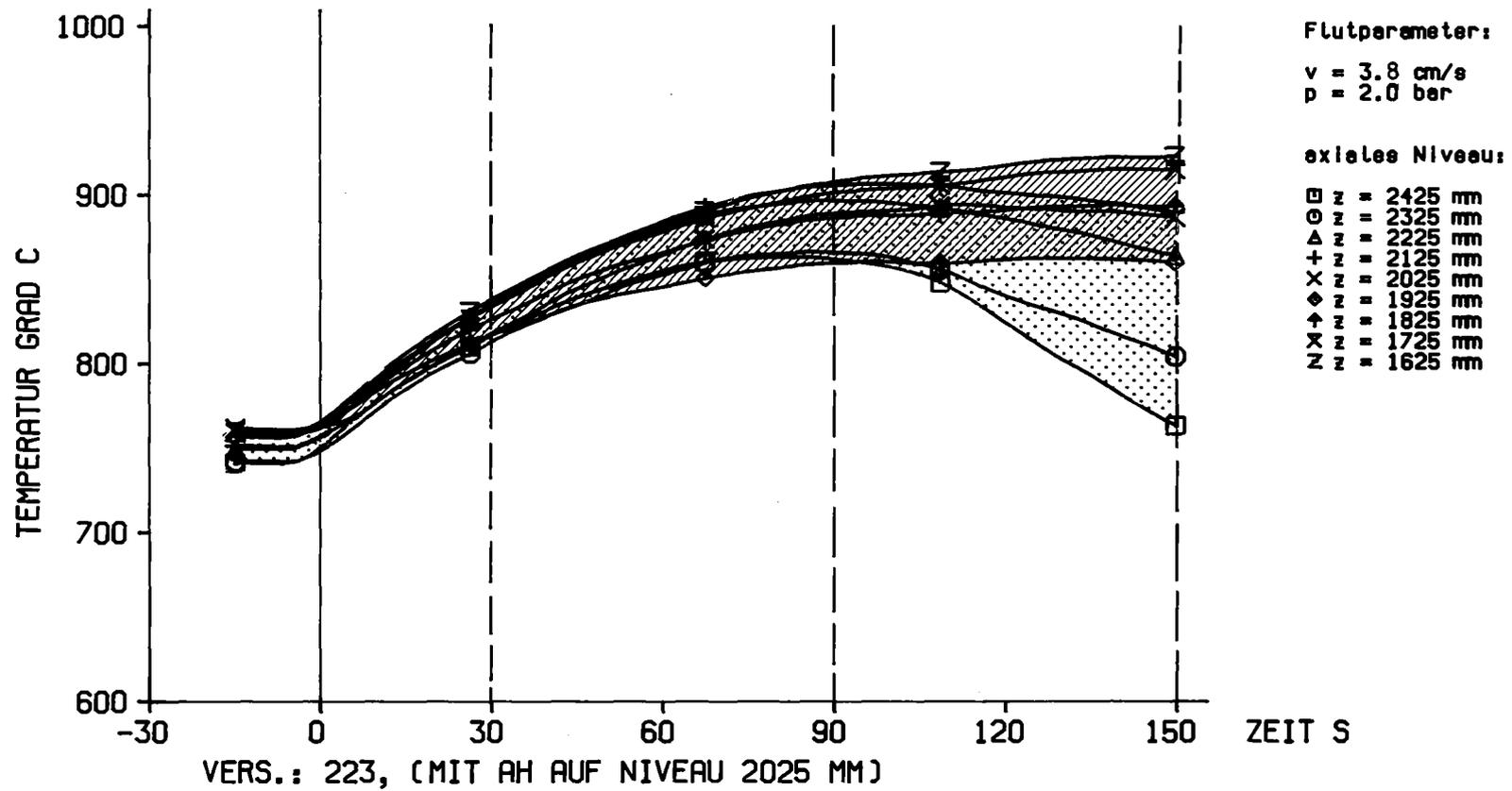
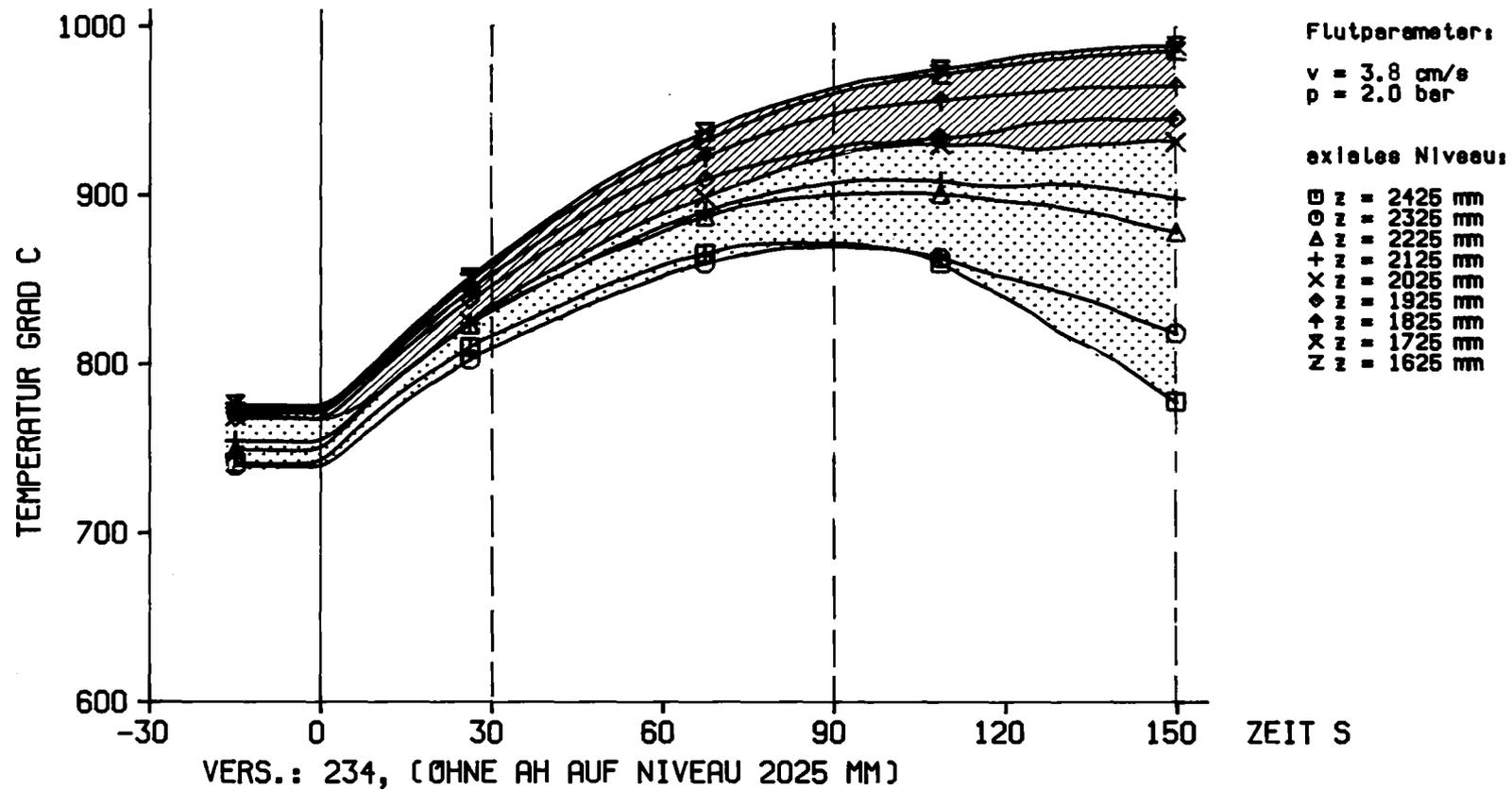


Abb.1 AUFBAU DES STABBÜNDELS



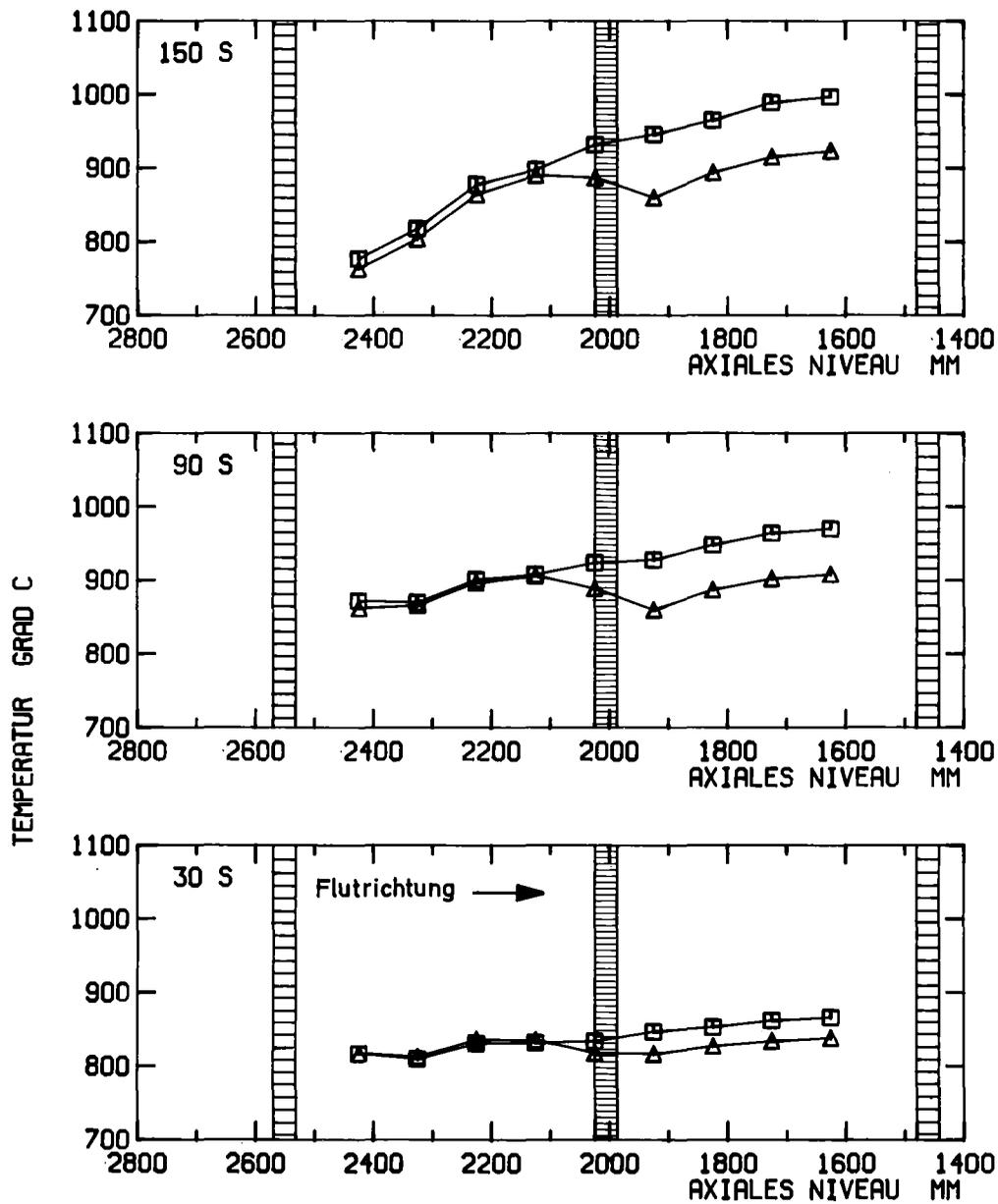
KfK  
IRB

Abb.2 ZEITLICHER VERLAUF DER TEMPERATUREN DES HÜLLRÖHRES



KIK  
IRB

Abb.3 ZEITLICHER VERLAUF DER TEMPERATUREN DES HÜLLRÖHRES

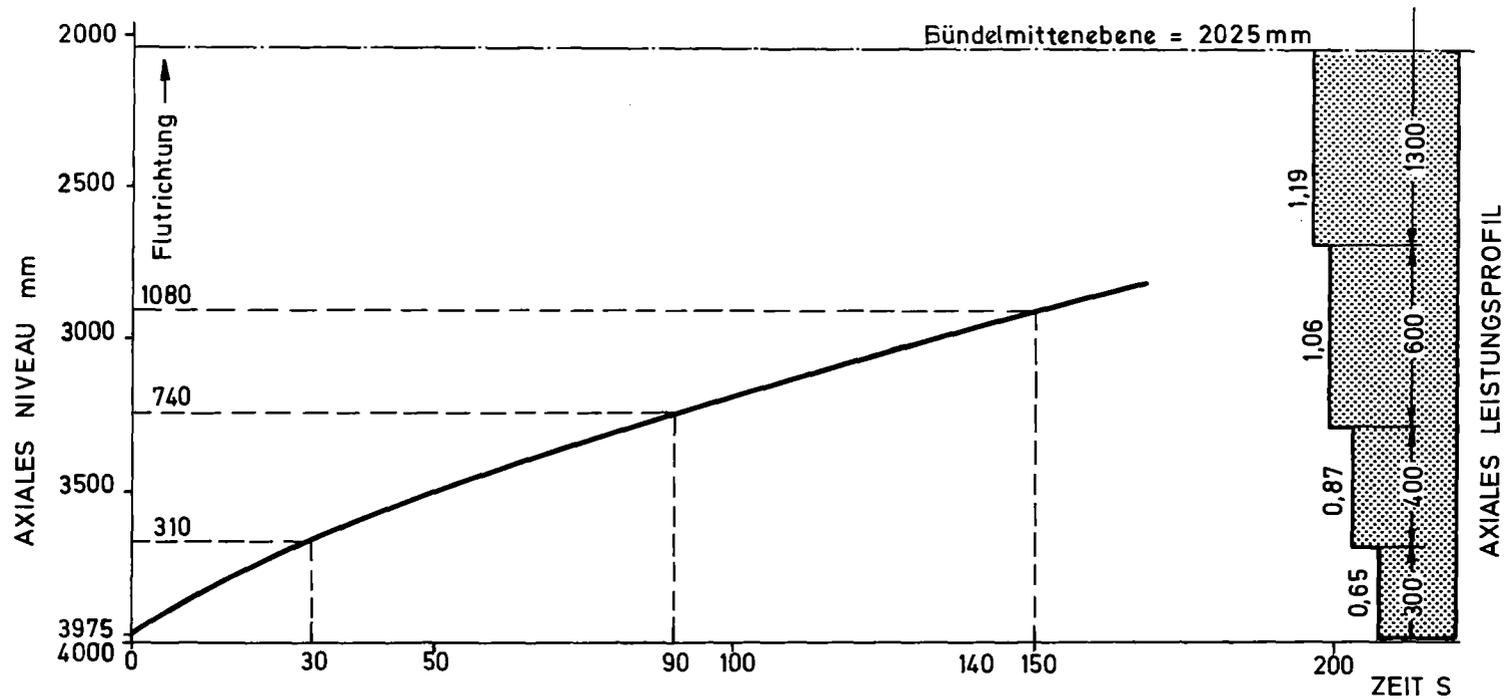


Flutparameter:  $v = 3.8 \text{ cm/s}$ ,  $p = 2.0 \text{ bar}$

△ Vers. 223, ( mit AH auf axialem Niveau 2025 mm)  
 □ Vers. 234, ( ohne AH auf axialem Niveau 2025 mm)

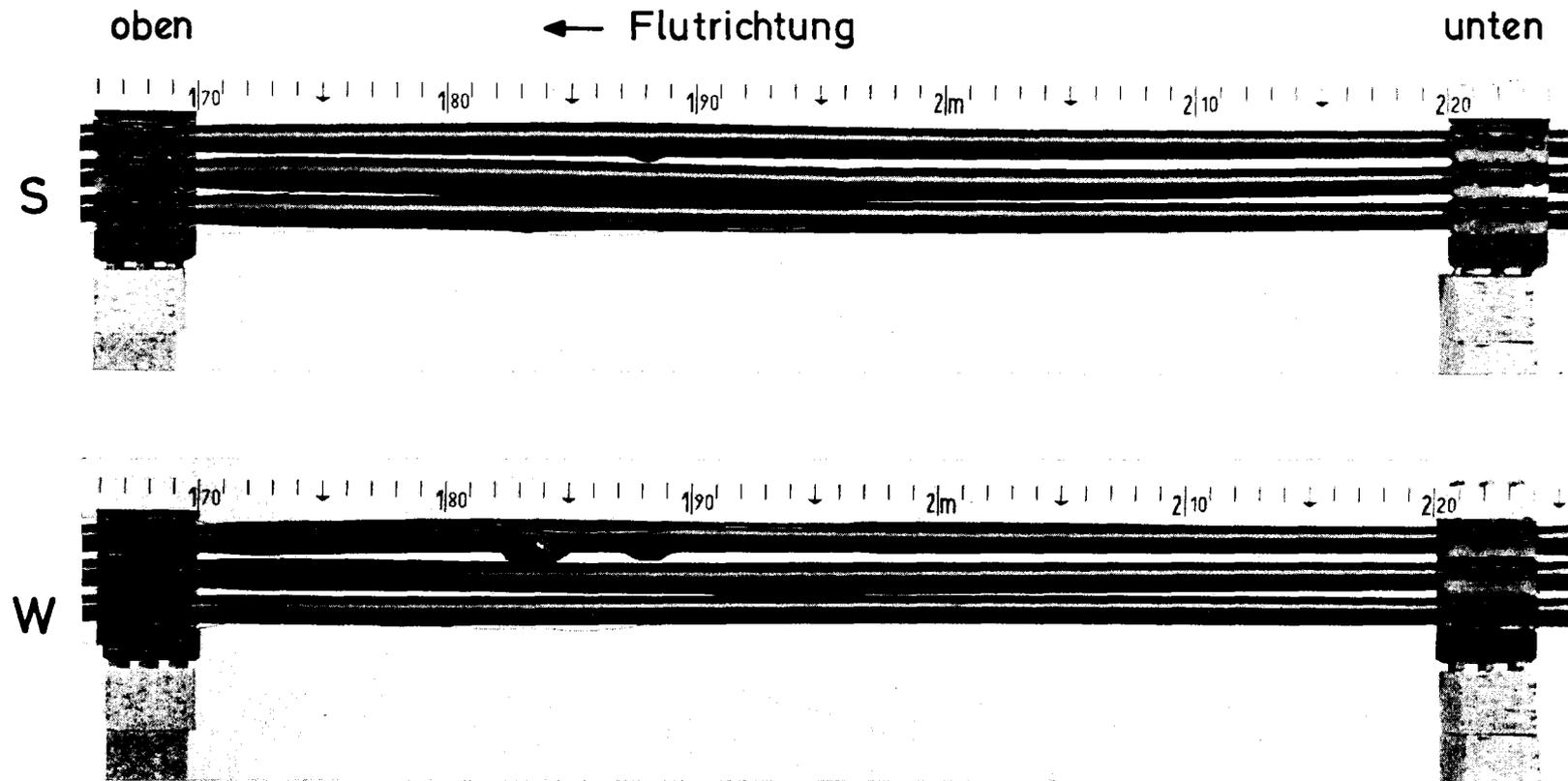


Abb.4 EINFLUSS DES ABSTANDHALTERS AUF DAS AXIALE TEMPERATURPROFIL



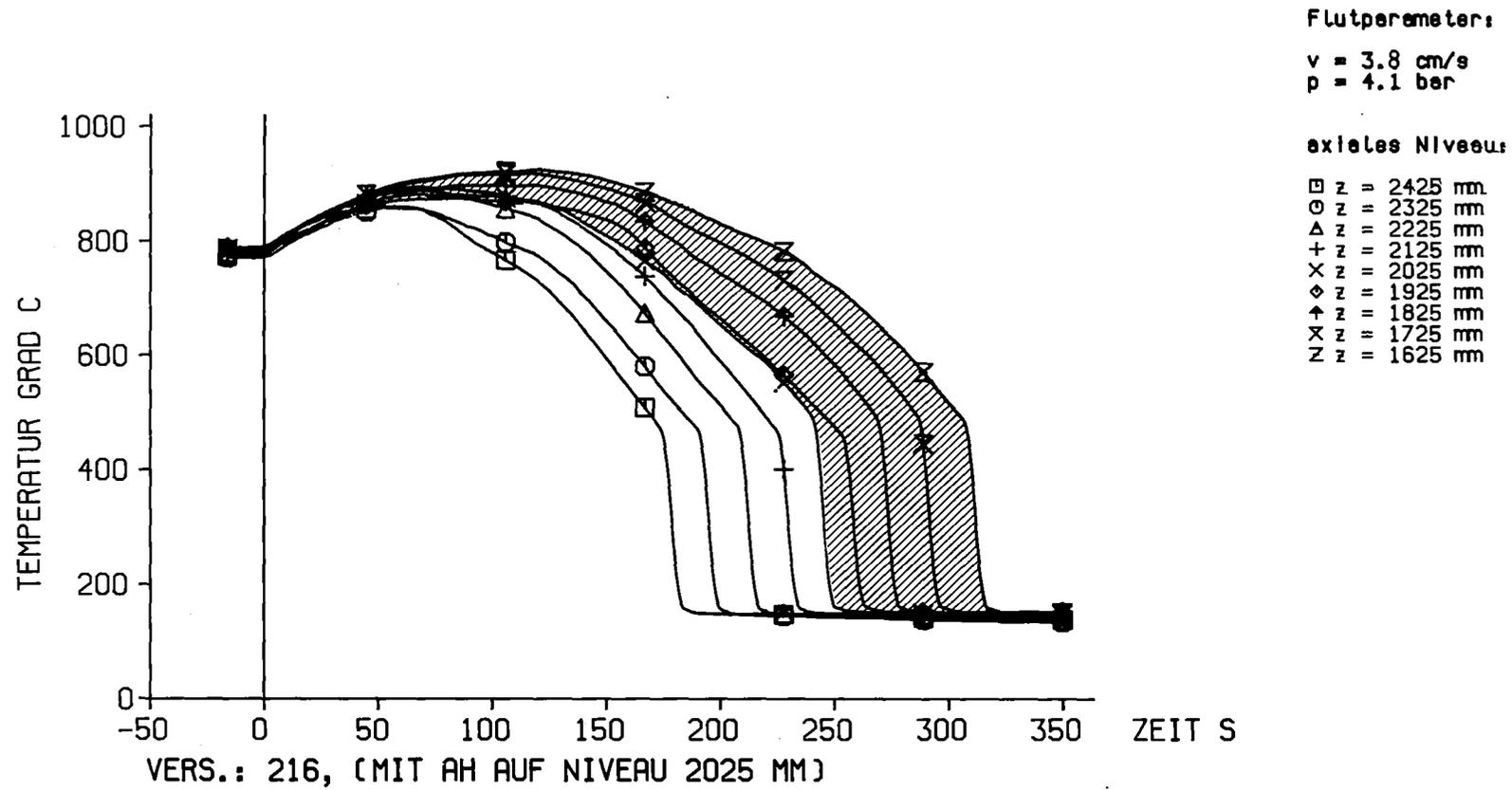
Versuch Nr. 223 und 234, Flutparameter  $v = 3,8 \text{ cm/s}$ ,  $p = 2,0 \text{ bar}$

Abb.5 Zeitpunkt der Wiederbenetzung als Funktion der axialen Meßposition



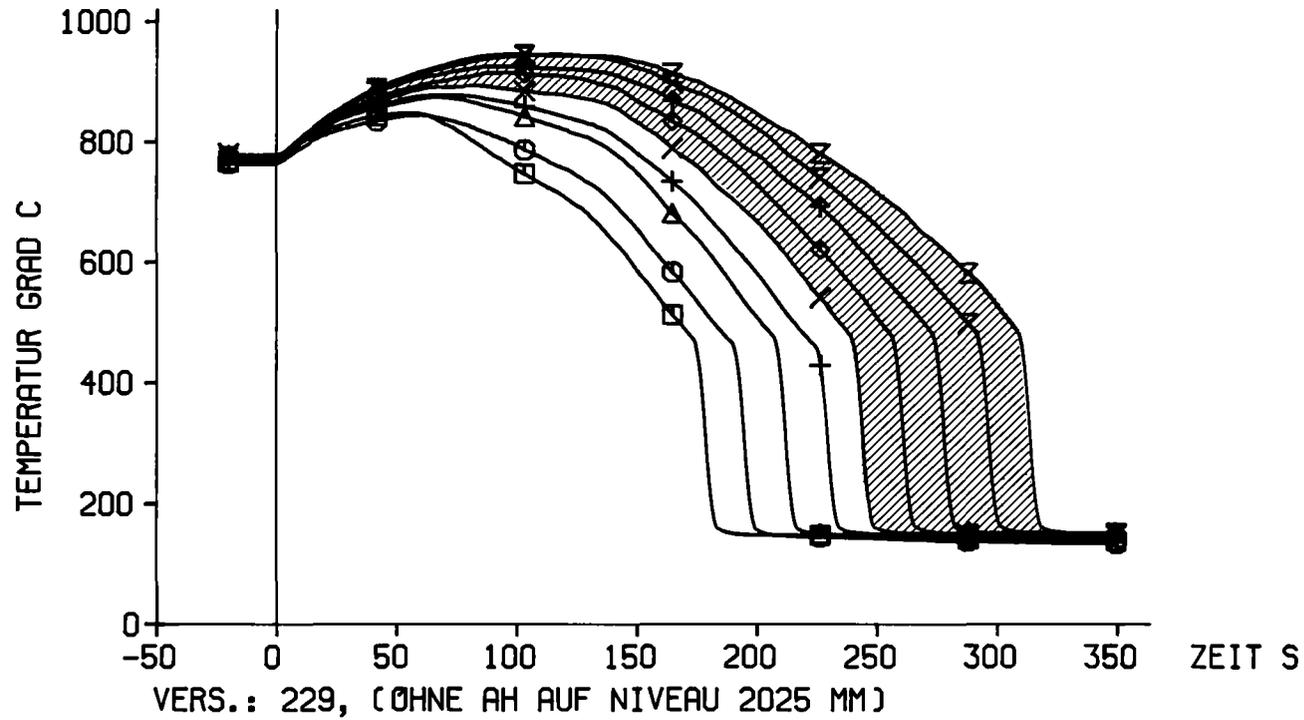
KfK

Abb.6 REBEKA 1 Mittelzone des verformten Stabbündels



KfK  
 TRB

Abb.7 ZEITLICHER VERLAUF DER TEMPERATUREN DES HÜLLRÖHRES



Flutparameter:

$v = 3.8 \text{ cm/s}$   
 $p = 4.1 \text{ bar}$

axiales Niveau:

□  $z = 2425 \text{ mm}$   
 ○  $z = 2325 \text{ mm}$   
 △  $z = 2225 \text{ mm}$   
 +  $z = 2125 \text{ mm}$   
 ×  $z = 2025 \text{ mm}$   
 ◇  $z = 1925 \text{ mm}$   
 ↑  $z = 1825 \text{ mm}$   
 X  $z = 1725 \text{ mm}$   
 Z  $z = 1625 \text{ mm}$

KfK  
IRB

Abb.8 ZEITLICHER VERLAUF DER TEMPERATUREN DES HÜLLRÖHRES

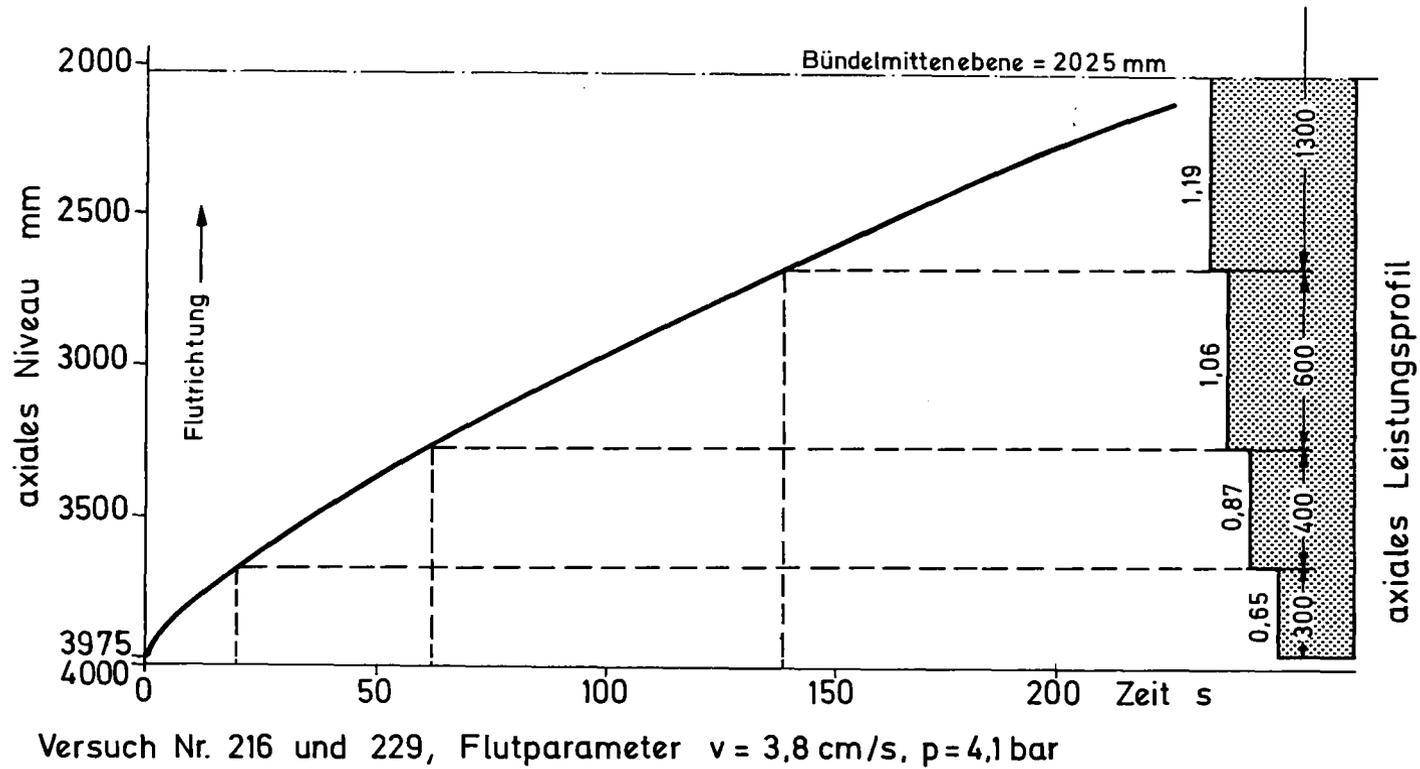
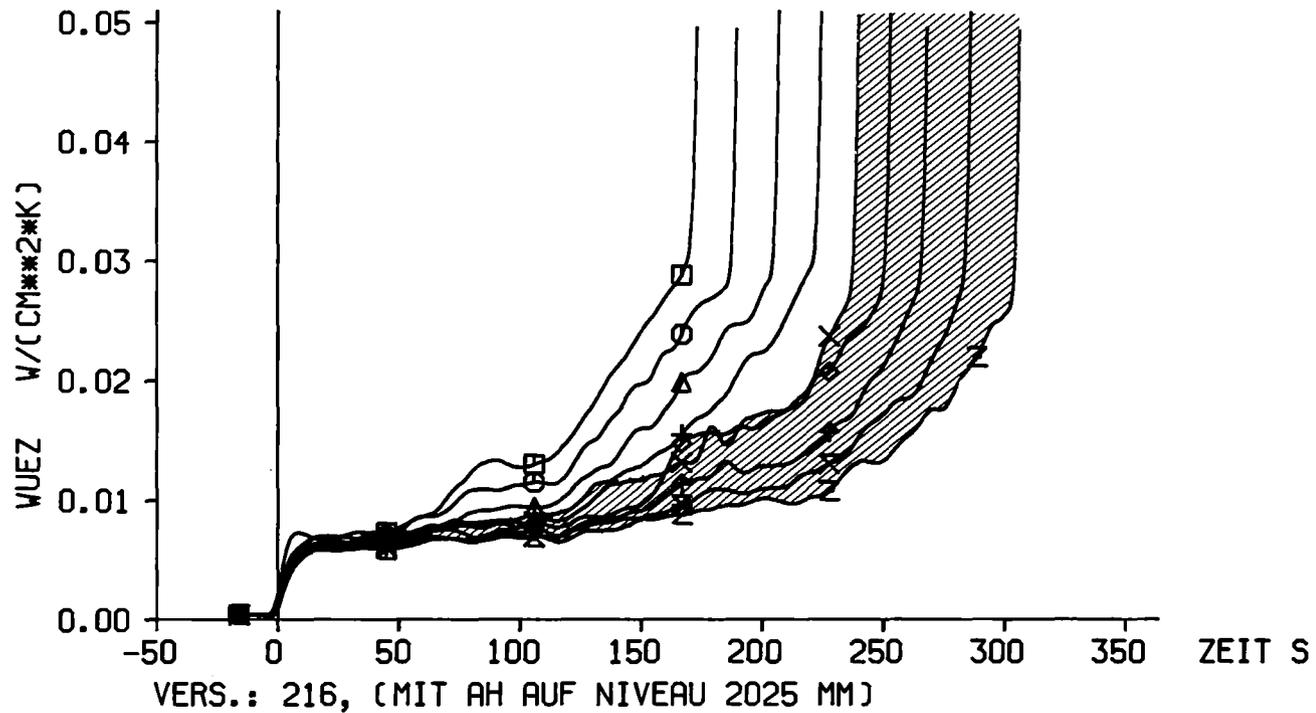


Abb. 9 Zeitpunkt der Wiederbenetzung als Funktion der axialen Meßposition



Flutparameter:

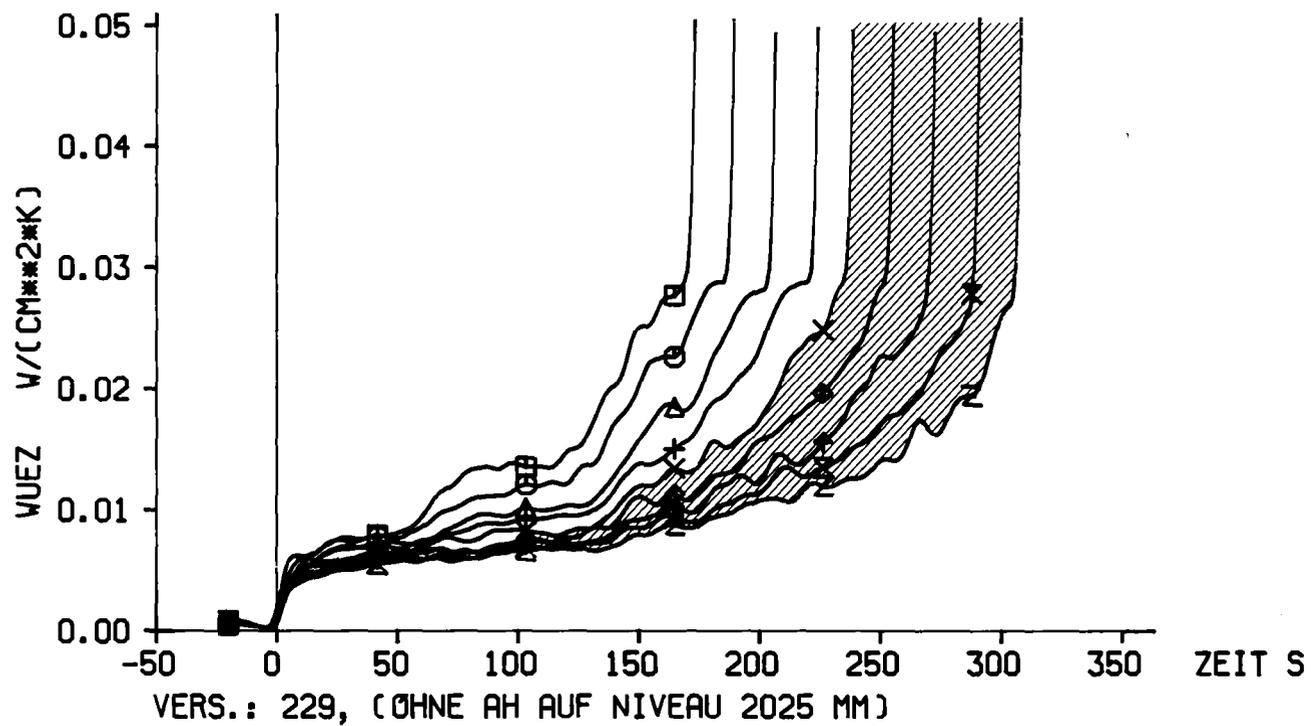
$v = 3.8 \text{ cm/s}$   
 $p = 4.1 \text{ bar}$

axiales Niveau:

□  $z = 2425 \text{ mm}$   
 ○  $z = 2325 \text{ mm}$   
 △  $z = 2225 \text{ mm}$   
 +  $z = 2125 \text{ mm}$   
 ×  $z = 2025 \text{ mm}$   
 ◇  $z = 1925 \text{ mm}$   
 ↑  $z = 1825 \text{ mm}$   
 ↓  $z = 1725 \text{ mm}$   
 z  $z = 1625 \text{ mm}$

KIK  
IRB

Abb.10 ZEITLICHER VERLAUF DER WÄRMEÜBERGANGSZAHLEN



Flutparameter:

$v = 3.8 \text{ cm/s}$   
 $p = 4.1 \text{ bar}$

axiales Niveau:

□ z = 2425 mm  
 ○ z = 2325 mm  
 △ z = 2225 mm  
 + z = 2125 mm  
 × z = 2025 mm  
 ◆ z = 1925 mm  
 † z = 1825 mm  
 × z = 1725 mm  
 z z = 1625 mm

KIK  
 TRB

Abb. 11 ZEITLICHER VERLAUF DER WÄRMEÜBERGANGSZAHLEN

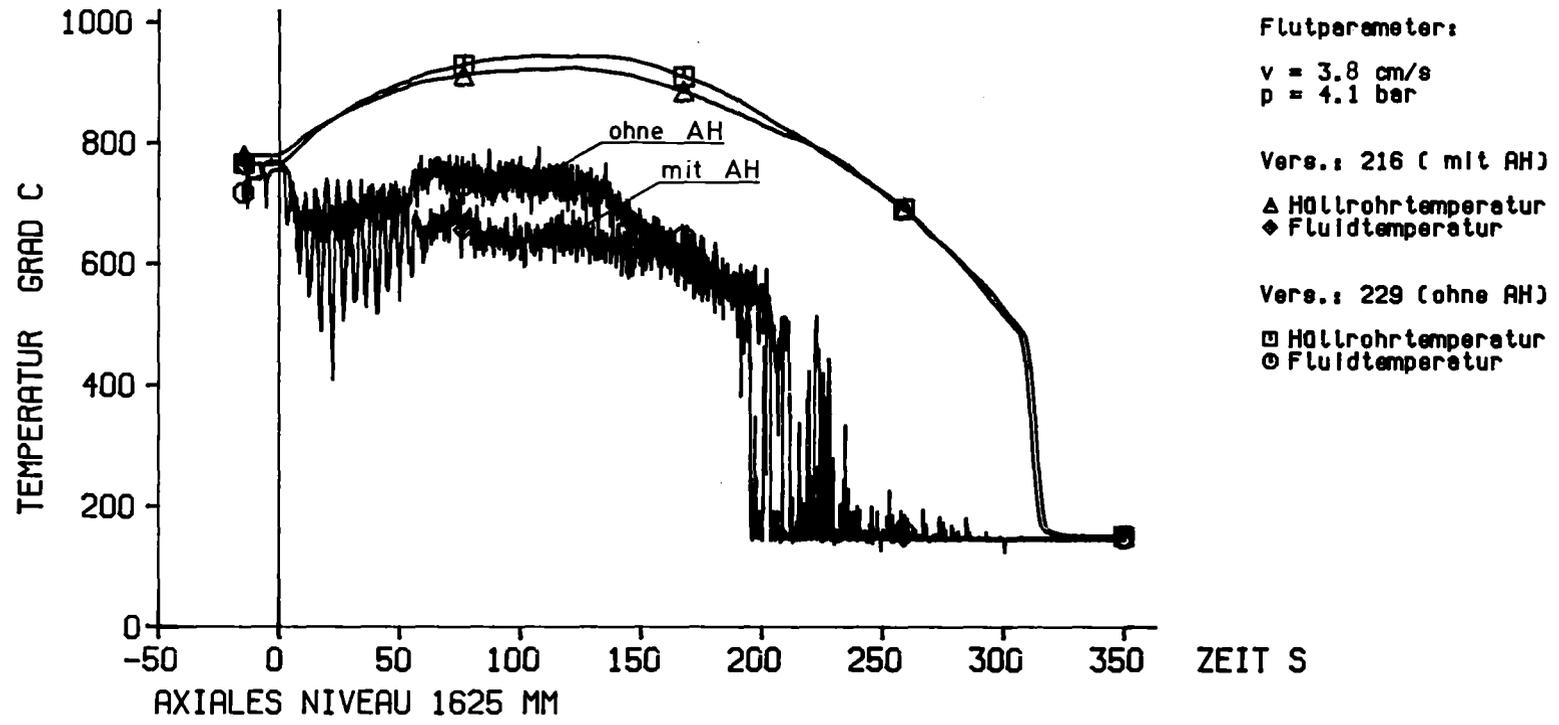


Abb. 12 VERGLEICH VON HÜLLROHR- UND FLUIDTEMPERATUREN

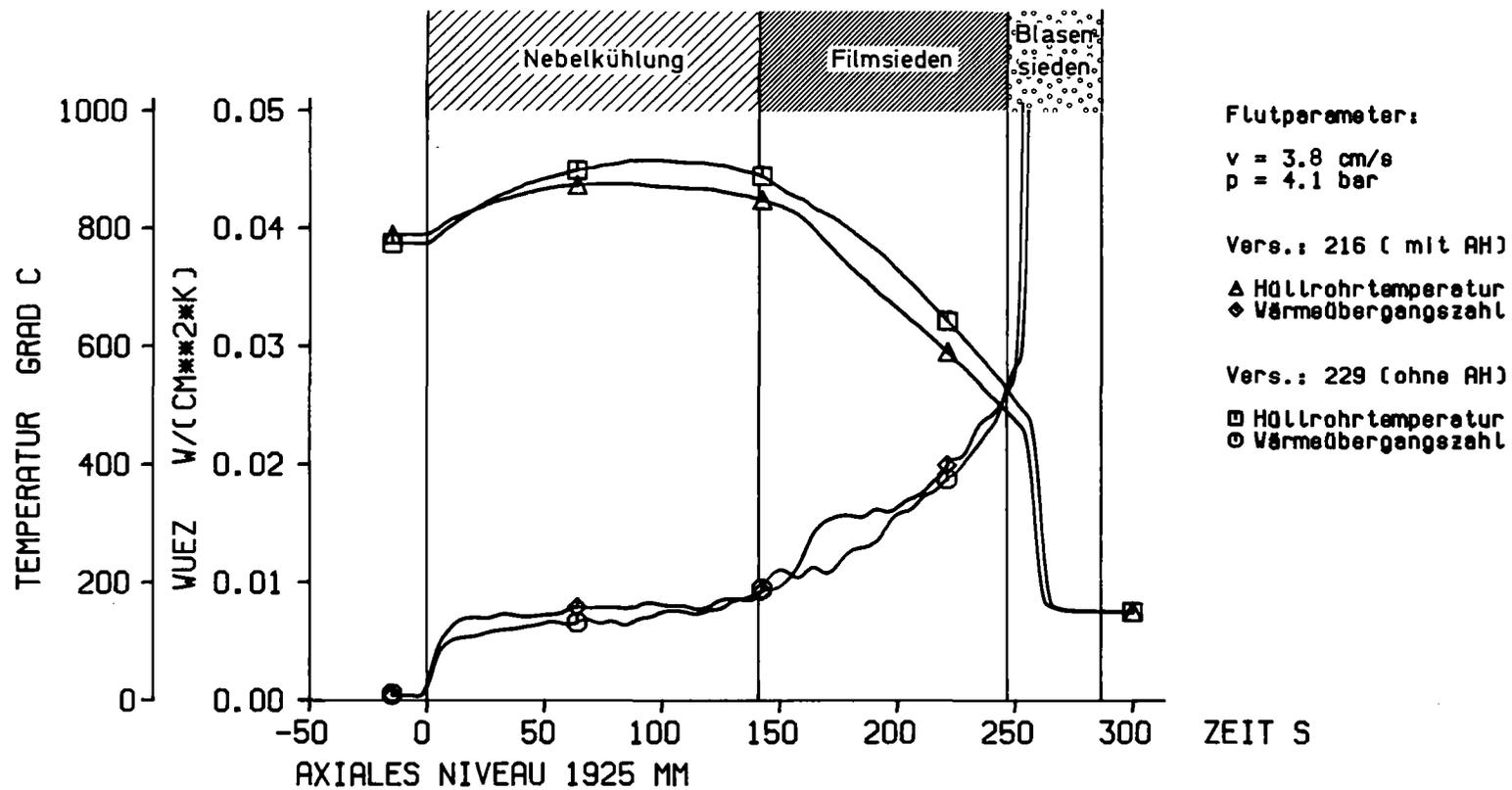
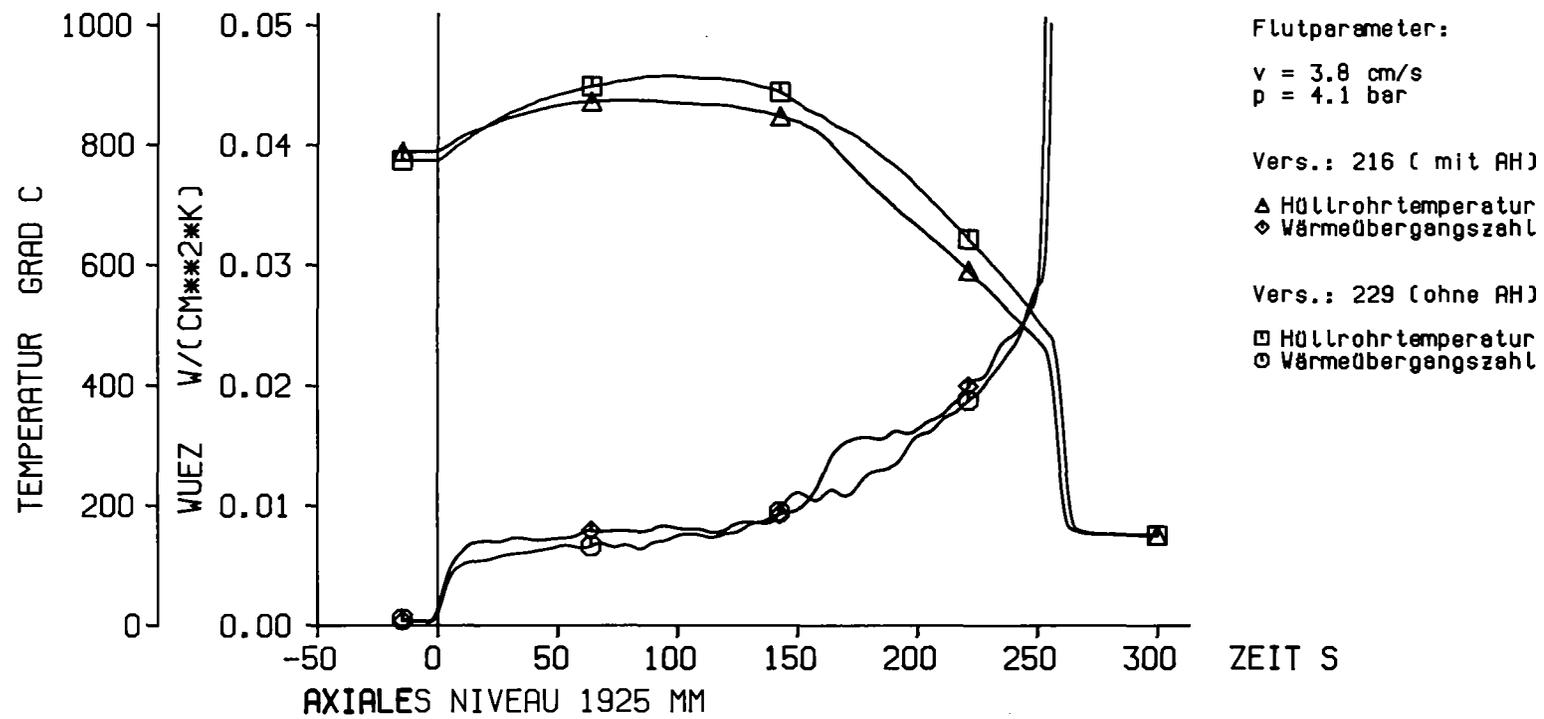
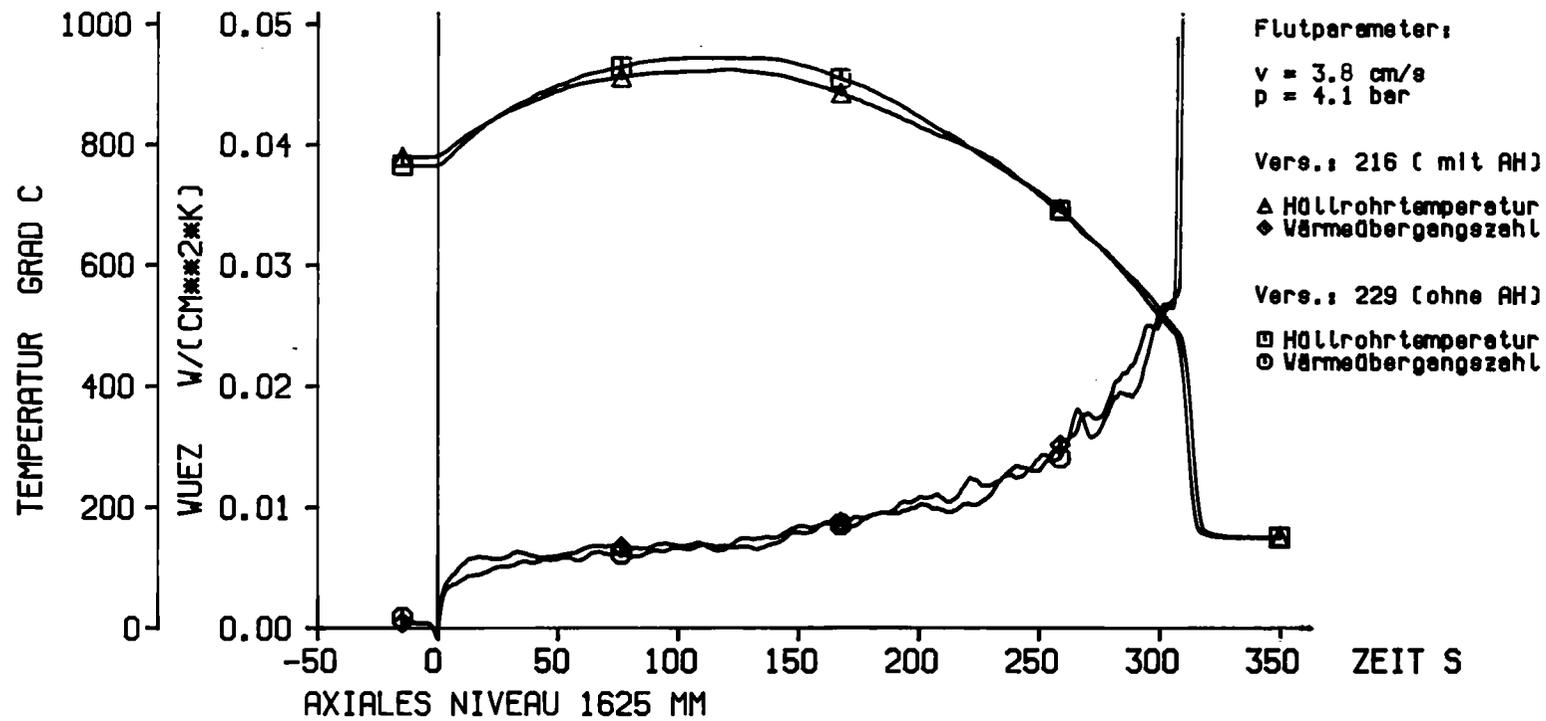


Abb.13 VERGLEICH VON HÜLLRÖHRTEMPERATUREN UND WÄRMEÜBERGANGSZAHLEN



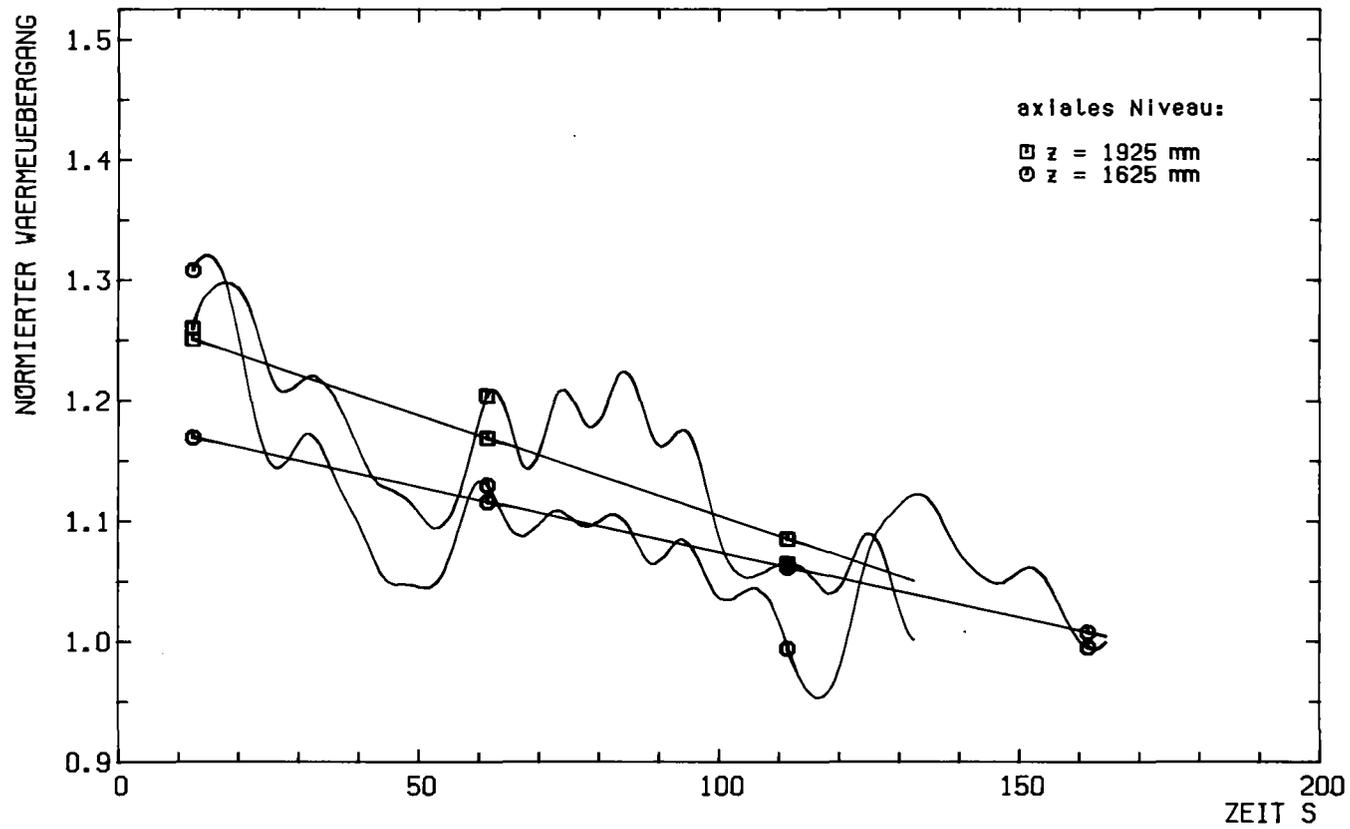
KIK TRB

Abb.14 VERGLEICH VON HÜLLROHRTEMPERATUREN UND WÄRMEÜBERGANGSZAHLEN



KIK TRB

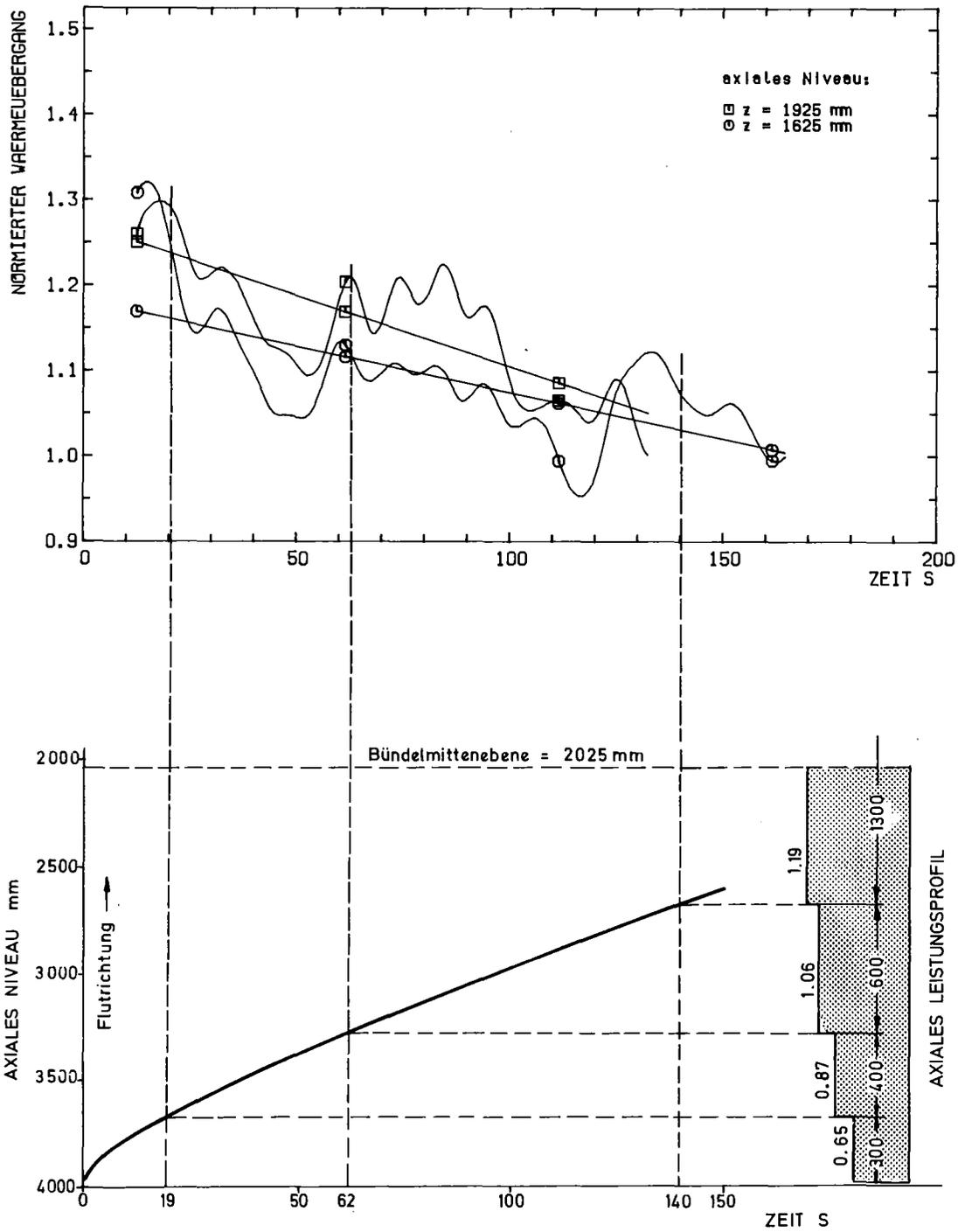
Abb.15 VERGLEICH VON HÜLLROHRTEMPERATUREN UND WÄRMEÜBERGANGSZAHLEN



Flutparameter:  $v = 3.8 \text{ cm/s}$ ,  $p = 4.1 \text{ bar}$

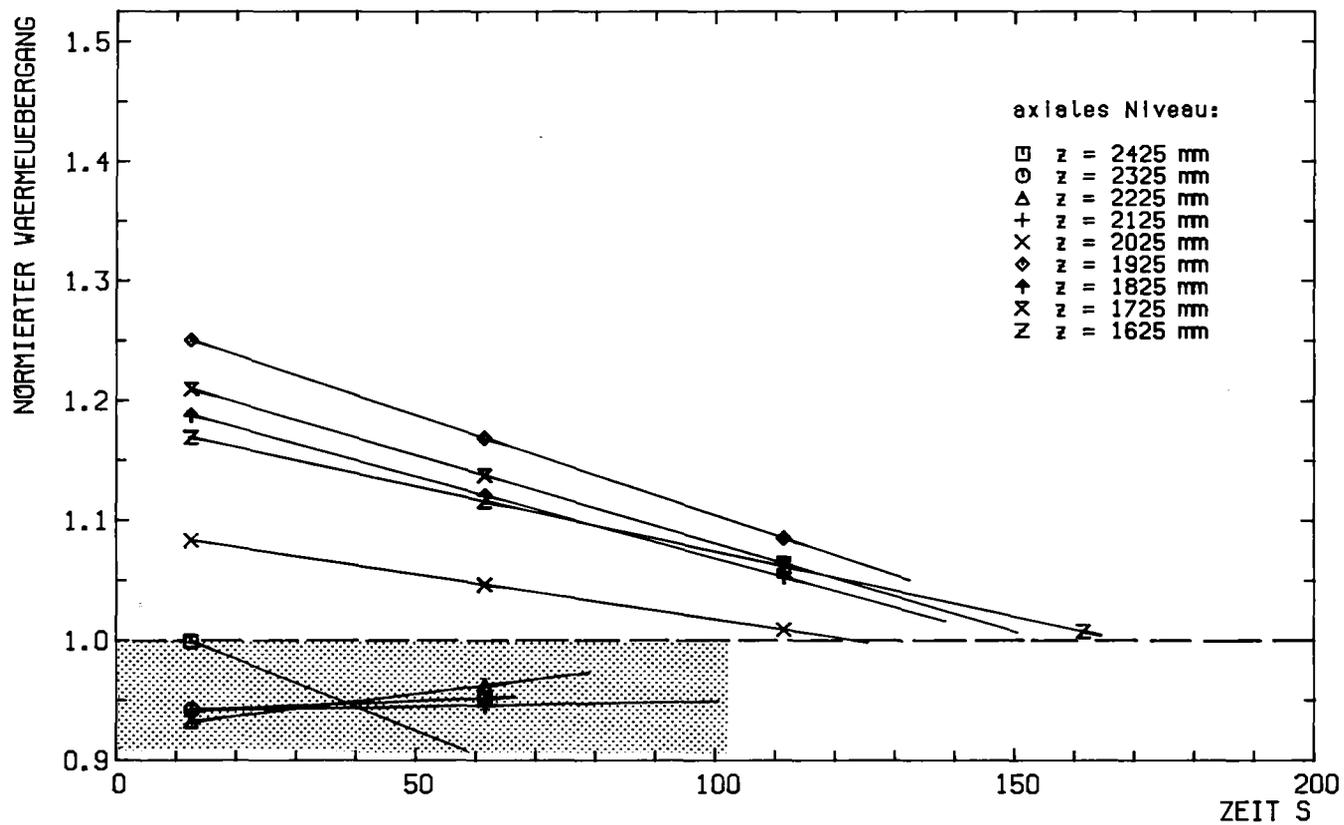


Abb.16 NORMIERTER WÄRMEÜBERGANG MIT AUSGLEICHGERADE



Versuch Nr. 216 und 229, Flutparameter  $v = 3.8 \text{ cm/s}$ ,  $p = 4,1 \text{ bar}$

**Abb.17 Einfluß des axialen Leistungsprofils auf den normierten Wärmeübergang**



Flutparameter:  $v = 3.8 \text{ cm/s}$ ,  $p = 4.1 \text{ bar}$

Abb.18 NORMIERTER WÄRMEÜBERGANG AN VERSCHIEDENEN AXIALEN NIVEAUS

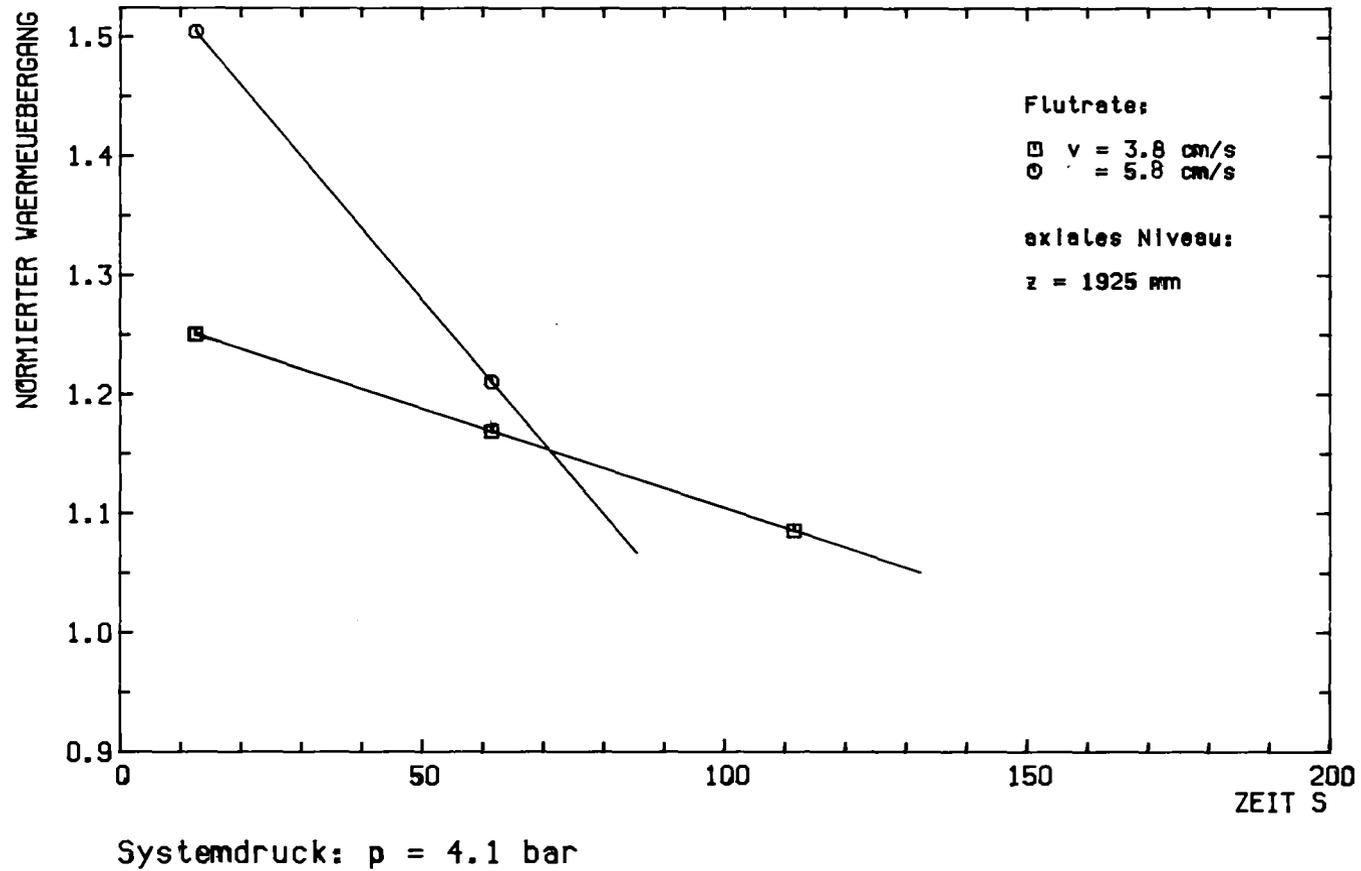


Abb.19 EINFLUSS DER FLUTRATE AUF DEN NORMIERTEN WÄRMEÜBERGANG

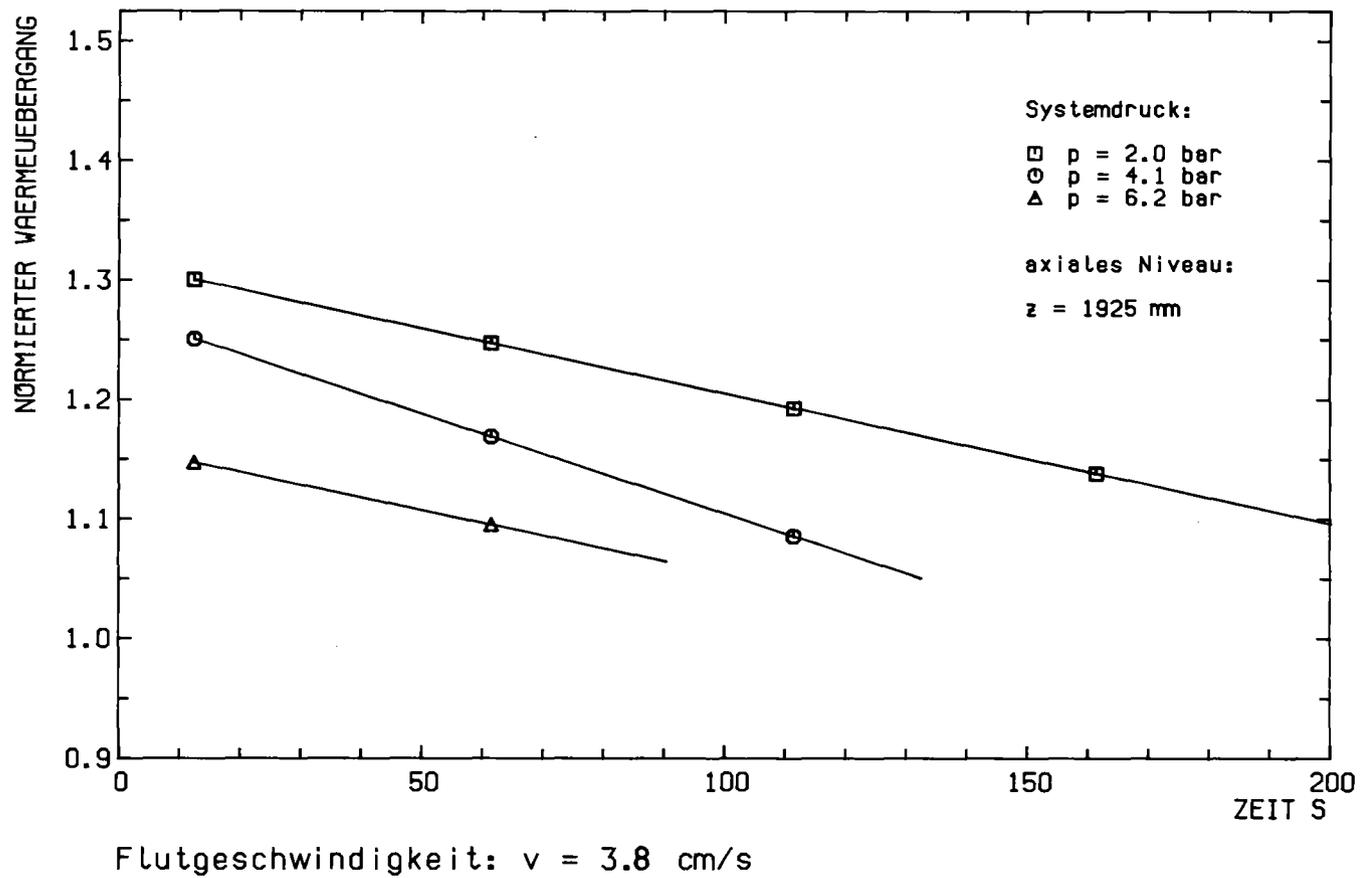


Abb.20 EINFLUSS DES SYSTEMDRUCKS AUF DEN NORMIERTEN WÄRMEÜBERGANG