

3.10 Kurzbericht zu Teilprojekt B 2

EINFLUSS STATIONÄRER UND PULSIERENDER STRAHLEN AUF DIE EROSION EINES SANDBETTES

1. Übersicht

Förderungszeitraum: 1970 - Mitte 1975
Berichtszeitraum: 1.1.75 - 31.12.76
Projektleiter: Prof. Dr. H. Kobus
Wiss. Mitarbeiter: Dr.-Ing. B. Westrich, wiss. Ass. (70 - 74)
Dipl.-Ing. P. Leister, wiss. Ass. (seit 1973)
Techn. Mitarbeiter: D. Danzeisen, Betriebsingenieur (seit 1971)
W. Fuchs, Techniker (1972)
H. Beran, Techniker (seit 1974)
R. Fink, Laborant (71 - 72)

Finanzielle Förderung:

Jahr	Personal- mittel	Sachmittel	Investitionen	Gesamt
1970 - 74	178.278,20	110.131,77	-	288.409,97
1975	24.231,87	3.507,67	-	27.739,54
1976	-	-	-	-
Summe	202.510,07	113.639,44	-	316.149,51

SFB-Berichte (siehe Kap. 4.1):
17, 54, 55, 56, 66, 85, 92

Veröffentlichungen 1975/76 (siehe Kap. 4.2):
80, 81, 84

Vorträge 1975/76 (siehe Kap. 4.9):
79, 85, 123

Dissertationen, Diplom- und Studienarbeiten (siehe Kap. 4.4):
37, 38

2. Problemstellung und Ziel

Erodierbare Sohlen, die Strahlströmungen ausgesetzt sind, können erhebliche Verformung, Auflockerung und Zerstörung erfahren. So können beispielsweise Schiffspropellerstrahlen Gewässersohlen in unerwünschtem Maße angreifen, andererseits ist die Erosionswirkung energiereicher Strahlen in der Naßbaggetechnik zur Auflockerung und Zerstörung feinkörniger Böden geradezu erwünscht. Zur Abschätzung und Beurteilung der Erosionswirkung von Strahlströmungen, welche in der Praxis periodische Geschwindigkeitsschwankungen aufweisen können, ist es unerlässlich, sowohl die Erosionswirkung als auch die Strömungsverhältnisse genau zu kennen. Deshalb wurde im Rahmen des Teilprojekts B 2 die Erosionswirkung eines auf ein gleichförmiges Sandbett auftreffenden tiefgetauchten Strahls im Wassermodell quantifiziert, und zudem wurde in einem Luftmodell das Strömungsfeld eines auf eine ebene, rauhe Wand auftreffenden Prallstrahls ohne und mit Pulsation experimentell untersucht. Die Ergebnisse sollen zur Klärung der Ursachen für die erhöhte Erosionswirkung pulsierender Strahlen dienen und gleichzeitig einen Beitrag zur Erforschung der Zusammenhänge zwischen periodischen und stochastischen Schwankungsbewegungen leisten.

Die Erosionsuntersuchungen im Wassermodell wurden in den Jahren 1970 bis 1974 durchgeführt. Im Berichtszeitraum wurden die Messungen der mittleren Geschwindigkeiten, Druck- und Schubspannungsverteilungen und der turbulenten Schwankungsgrößen am Luftmodell ausgeführt und zum Abschluß gebracht.

3. Ergebnisse der Erosionsversuche (Wassermodell)

Die Ergebnisse der Untersuchung am hydraulischen Modell beim kontinuierlichen Strahl sind im Tätigkeitsbericht A 16 und in [1] wiedergegeben. Es hat sich dabei herausgestellt, daß dem relativen Abstand der Strahldüse vom Sandbett entscheidende Bedeutung zukommt. Das Resultat der Untersuchung zeigt, daß es einen optimalen relativen Abstand gibt, bei dem maximale Erosion eintritt. Dies ist durch die Ausbildung unterschiedlicher Kolkformen und der damit verbundenen unterschiedlichen Erosions- bzw. Transportbedingungen im Kolk zu erklären.

Die Untersuchung des Einflusses eines pulsierenden Strahles auf ein erodibles

Sandbett ist Gegenstand des Fortschrittsberichts SFB80/ET/17. Eine Pulsation des Strahles kann sich sehr unterschiedlich auf den Erosionsvorgang auswirken. Es gibt bestimmte Parameterkombinationen, bei denen die Erosionswirkung bei Pulsation diejenige bei kontinuierlichen Strahlen weit übertrifft. Die verstärkte Erosionswirkung wird in erster Linie auf die Abnahme der mittleren Achsgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Verbreiterung des Profils im Freistrahlsbereich zurückgeführt und erst in zweiter Linie auf eine Erhöhung der Turbulenz, welche eine Verminderung der Sinkgeschwindigkeit der erodierten und im Transport befindlichen Partikel bewirken könnte. Die Abflächung der Geschwindigkeitsprofile bei pulsierenden Strahlen führt zu einer besseren Relation zwischen Erosions- und Transportkapazität des umgelenkten Strahls, da eine Vergrößerung der direkten Strahlengriffsfläche im Kolkzentrum und ein flacherer Auswurfswinkel des erodierten Materials mit damit verbundenen günstigeren Transportbedingungen erreicht wird. Schlüssige Aussagen über die Ursachen der erhöhten Erosionswirkung oder quantitative Angaben über das Zusammenwirken der pulsationsbedingten Erosions- und Transportmechanismen können jedoch aus diesen Untersuchungen nicht gewonnen werden. Deshalb war es erforderlich, das komplexe Strömungsfeld eines pulsierenden Prallstrahls in einem Luftmodell quantitativ zu erfassen.

4. Untersuchungsmethoden und Arbeitsprogramm

Die Beschreibung der Strömungsvorgänge in pulsierenden Strahlen erfordert die Messung der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten im Strömungsfeld, des zeitlich gemittelten Sohl drucks und der Sohl schubspannung sowie die Erfassung der momentanen Schwankungsgrößen und ihrer Korrelationen. Diese Messungen wurden in einem Luftmodell durchgeführt, in dem eine Prallströmung gegen eine ebene, rauhe Wand untersucht wurde (Bild 1). Dies entspricht der Anfangsphase des Erosionsvorgangs (Kolkzeit $T = 0$ bzw. klein). Hierdurch ergibt sich eine besonders einfache Art von Prallströmung, für die eine Reihe von Untersuchungen aus der Literatur bekannt sind. Die zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten wurden mit Hitzdrähten und Pitotrohren gemessen, für die Messung von Sohl druck und Sohl schubspannung wurde eine modifizierte Prestonsonde eingesetzt [/T/54, /ET/55], [3]. Die Leistungsfähigkeit dieser Sonde wurde durch Messungen der Sohl schubspannung kontinuierlicher Prallstrahlen mit Prallwänden

unterschiedlicher Rauigkeiten nachgewiesen /ET/66 . Über die Strömungsmessungen an pulsierenden Prallstrahlen wird in 5 ausführlich berichtet.

5. Ergebnisse

Die Messung der Verteilung der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten bestätigte für den Freistrahلبereich die Existenz von Ähnlichkeitsprofilen auch für den pulsierenden Strahl (Bild 2). Auch im Wandstrahlbereich ließ sich diese Ähnlichkeit nachweisen (Bild 3). Bei Sohlabständen der Düse, die größer als die Länge der Kernzone sind, sinkt der Sohldruck mit zunehmender Frequenz im Staupunkt unter den Wert des kontinuierlichen Vergleichsstrahls gleichen mittleren Impulsflusses und gleichen Düsenabstandes, das Druckfeld ist jedoch vergleichsweise breiter (Bild 4). Die Sohlschubspannungen sind im Umlenkbereich für alle untersuchten Frequenz- und Amplitudenparametervariationen

$$0 \leq Sr \leq 0.09 ; \quad 0 \leq \alpha \leq 70 \%$$

kleiner als im kontinuierlichen Vergleichsstrahl, nähern sich jedoch mit zunehmender radialer Entfernung vom Staupunkt den Werten des kontinuierlichen Strahls (Bild 4). Sowohl für den Sohldruck als auch für die Sohlschubspannungen ist der Einfluß der Pulsationsamplitude relativ gering. Dieses im Hinblick auf die Erosionswirkung überraschende Ergebnis wurde bestätigt durch Analogiemessungen des Stoffübergangs, bei denen die Prallplatte durch eine sublimationsfähige Naphthalinplatte ersetzt wurde: Der Stoffübergang ist im Umlenkbereich auch niedriger als im kontinuierlichen Vergleichsstrahl, erreicht aber bei größeren Staupunktsentfernungen die Werte des kontinuierlichen Strahls. Numerisch läßt sich für Sohldruck und Sohlschubspannung folgender funktionaler Zusammenhang mit den relevanten Einflußgrößen angeben (Definitionen siehe Bild 1):

$$\frac{\bar{p}_{w \text{ puls}}}{\bar{p}_{w \text{ kont}}} = 1 - 60.3 \cdot Sr^{1.53} \exp(-1.68 \cdot 10^{-3} \left(\frac{r}{H}\right)^2 \cdot Sr)$$

$$\frac{\bar{\tau}_{o \text{ puls}}}{\bar{\tau}_{o \text{ kont}}} = 1 - 3.57 Sr^{0.418} \cdot 0.15 \cdot \exp(-7.46 r/H) \cdot f(Re_D)$$

mit $f(Re_D) = 0.709 Re_D^{0.61 \cdot 10^{-6} \cdot Re_D + 0.047}$

Die Messungen der momentanen Schwankungsbewegungen und ihre Korrelationen zeigen, daß es lediglich im Freistrahlsbereich (Bild 5) und in der freien Scherzone zu Wechselwirkungen zwischen den periodischen und den stochastischen Schwankungsbewegungen kommen kann, weil nur in diesen Strömungsgebieten Wirbel auftreten, deren Frequenz der Pulsationsfrequenz entspricht. Ein Großteil der periodischen Schwankungsbewegungen ist auch zu Beginn des Wandstrahlbereichs vorhanden. Innerhalb der wandnahen Grenzschicht werden die stochastischen Schwankungsbewegungen nicht durch die Pulsation beeinflusst, so daß der Anteil der periodischen Schwankungsintensitäten auf der Wandstrahlachse nur langsam mit steigender Staupunktsentfernung abnimmt (Bild 6). Diese periodischen Schwankungsbewegungen sind darüber hinaus bis in unmittelbare Wandnähe über den ganzen Umfang miteinander korreliert 4 (Bild 7). Dieses Ergebnis ist im Hinblick auf die Erosionswirkung und die Transportfähigkeit des Prallstrahls bezüglich suspendierter Partikel von besonderer Bedeutung.

6. Schlußfolgerungen

Mit den gewonnenen Erkenntnissen über das Verhalten der zeitlich gemittelten Größen an der Sohle und der momentanen Schwankungsbewegungen des Strömungsfeldes kann die verstärkte Erosionswirkung pulsierender Strahlen für kurze Erosionszeiten (solange der Strahl im ganzen Strömungsgebiet noch nicht abgelöst ist) physikalisch plausibel erklärt werden.

Würde man die Sohlschubspannung als alleinige Ursache des Erosionsprozesses ansehen, dann hätte ihre pulsationsbedingte Verminderung zwangsläufig eine verminderte Erosionsrate zur Folge. Der Erosionsprozeß ist jedoch in erster Linie im Zusammenwirken der stark korrelierten, momentanen periodischen Schwankungsbewegungen und den zwangsläufig vorhandenen Druckpulsationen im Umlenkgebiet einerseits und dem zeitlich gemittelten Druckfeld und der im Sedimentkörper induzierten Sickergeschwindigkeit [2] andererseits zu sehen. Die periodischen Druckschwankungen können nicht tief in das Gebiet der Sickerströmung unterhalb der ersten Kornschicht dringen, da die viskose Strömung im Sedimentkörper jede plötzliche Bewegung stark dämpft; die Druckspitzen können daher zum größten Teil in momentane radiale Geschwindigkeit umgewandelt werden und erhöhen damit momentan die Sohlschubspannung am

Einzelkorn. Die gegenüber dem kontinuierlichen Strahl reduzierten zeitlich gemittelten Druckwerte im Umlenkbereich tragen dazu bei, daß im pulsierenden Strahl ein erheblicher Teil der Energie in radiale kinetische und Energie umgewandelt werden kann, die zum Transport beiträgt. Somit ergänzen sich zeitlich gemitteltes Druckfeld und momentane Druckspitzen im gleichen Sinn dahingehend, daß die Kräfte, die ein Einzelkorn in seiner Ruhelage halten, im pulsierenden Strahl sich gegenüber denen im kontinuierlichen Strahl vermindern. Die stark korrelierten radialen Schwankungsbewegungen führen dazu, daß am Einzelkorn momentan größere Kräfte angreifen als im kontinuierlichen Strahl und zum gerichteten Bewegungsbeginn in radialer Richtung beitragen. Die zeitlich gemittelte Sohlschubspannung reicht als Schleppspannung im Zusammenwirken mit den durch die periodischen Schwankungsbewegungen angefachten Makrowirbeln aus, um das vergrößerte Angebot an erodiertem Material wegtransportieren zu können und somit die Erosionsrate zu erhöhen.

7. Literaturhinweise

- 1 Westrich, B.; Kobus, H.: "Erosion of a Uniform Sandbed by Continuous and Pulsating Jets". IAHR 1973, Istanbul.
- 2 Westrich, B.: "Influence of Seepage Flow and Velocity Pulsation in Jet Erosion". Euromech 48, Kopenhagen 1974.
- 3 Leister, P.: "Simultaneous Measurements of Wall Shear Stress and Relative Roughness of a Wall by Double Piped Preston Tube". Euromech 61, 1975, Liverpool.
- 4 Leister, P.: "Experimental Investigation on the Turbulence Structure of an Impinging Pulsating Jet". Symposium on Turbulent Shear Flows, Pennsylvania, 1977.
- 5 Leister, P.: "Impuls- und Stofftransport in pulsierenden Prallstrahlen". Dissertation 1977, Karlsruhe.

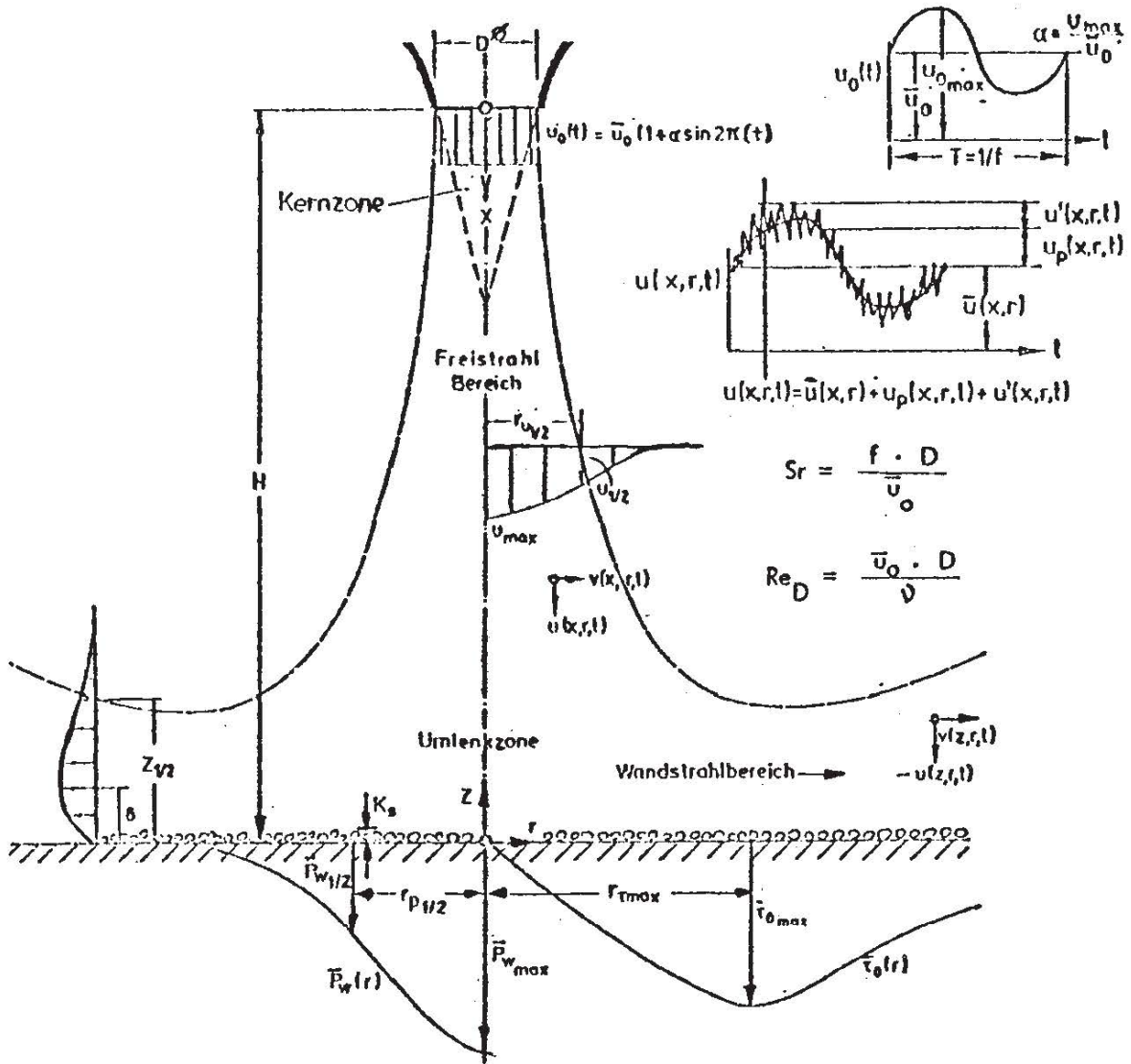


Bild 1

Pfallstrahl

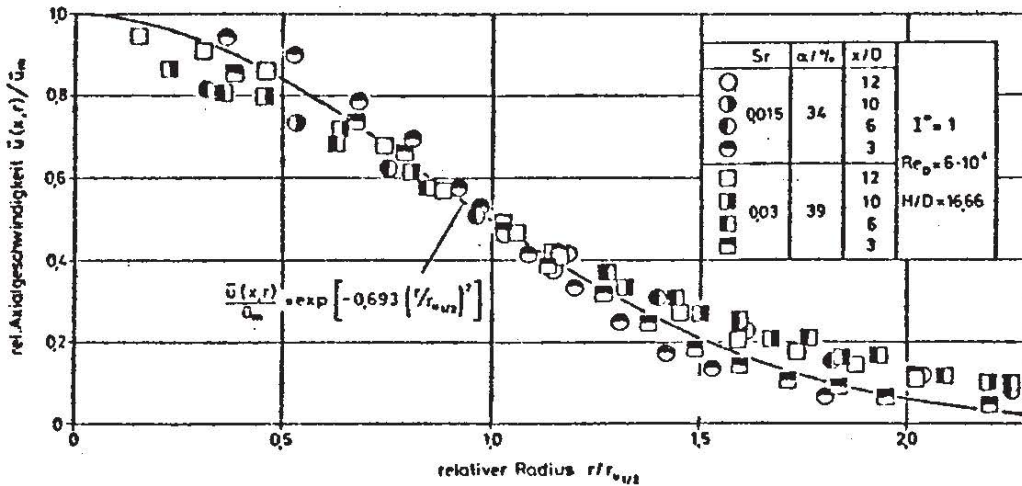


Bild 2 Zeitlich gemittelte Axialgeschwindigkeit im Freistrahlsbereich als Funktion des Radius (Ähnlichkeitskoordinaten)

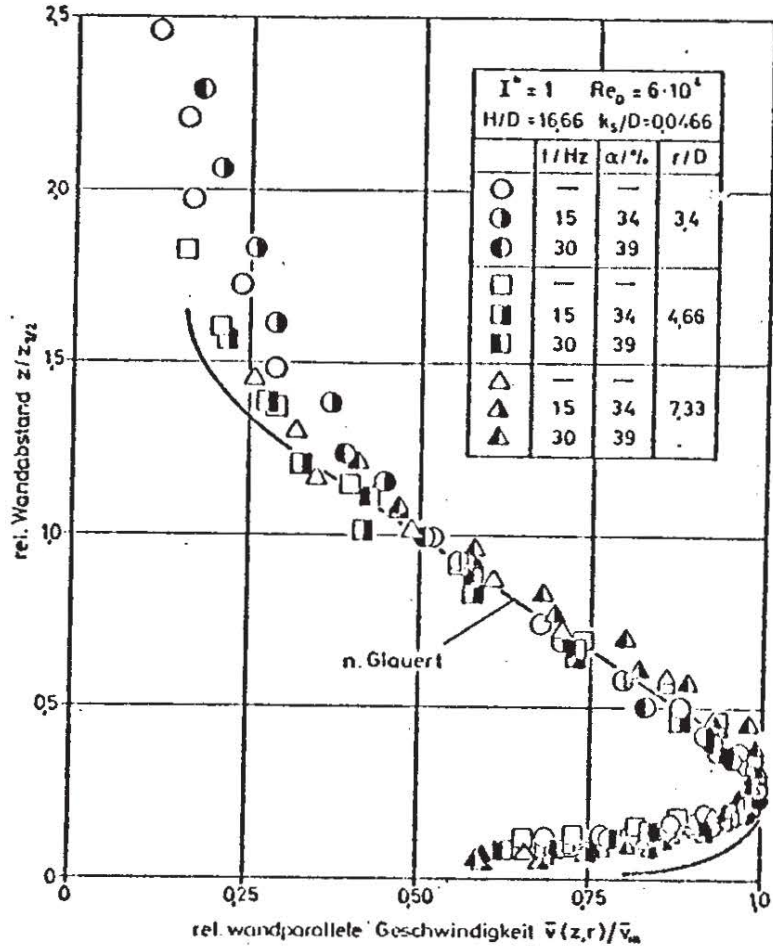


Bild 3 Verlauf der zeitlich gemittelten wandparallelen Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Wandabstand (mit u. ohne Pulsation) $H/D=16,66$

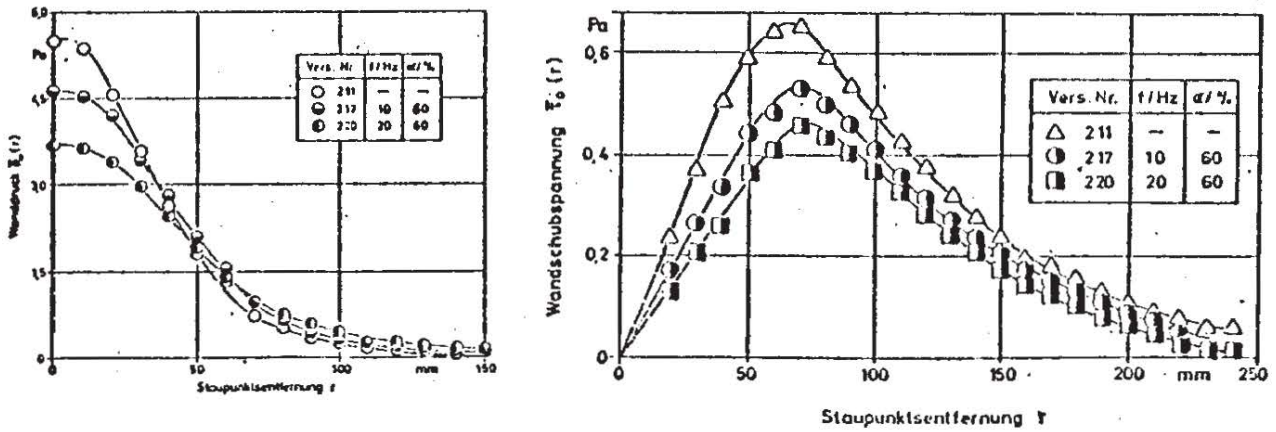


Bild 4 Einfluß der Pulsationsfrequenz auf den Verlauf des Wanddruckes und der Wandschubspannung

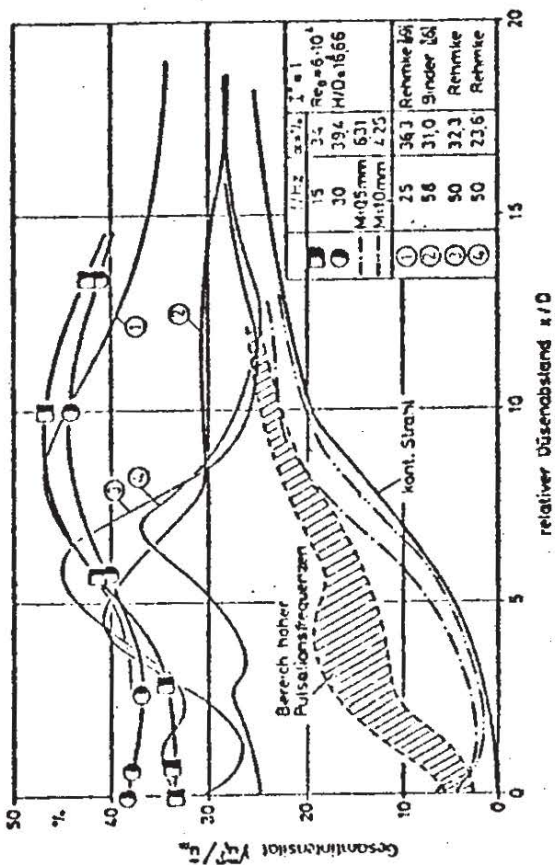


Bild 5 Anfachung der Gesamtintensitäten der axialen Schwingungskomponente längs der Strahlachse (Freistrahlerbereich)

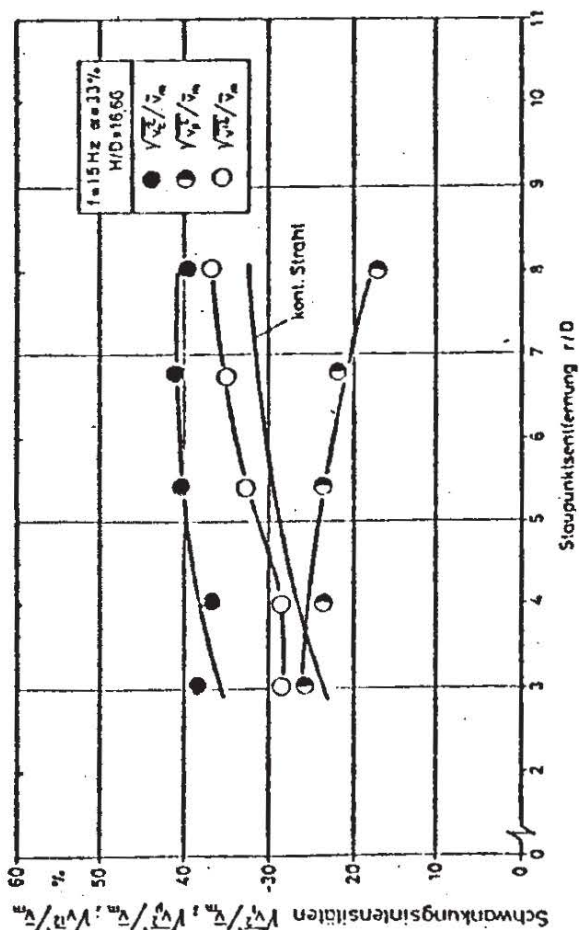


Bild 6 Verlauf von Gesamt-, periodischer und stochastischer Intensität der axialen Schwankungsbewegung entlang der Wandstrahlachse bei $H/D=15.66$

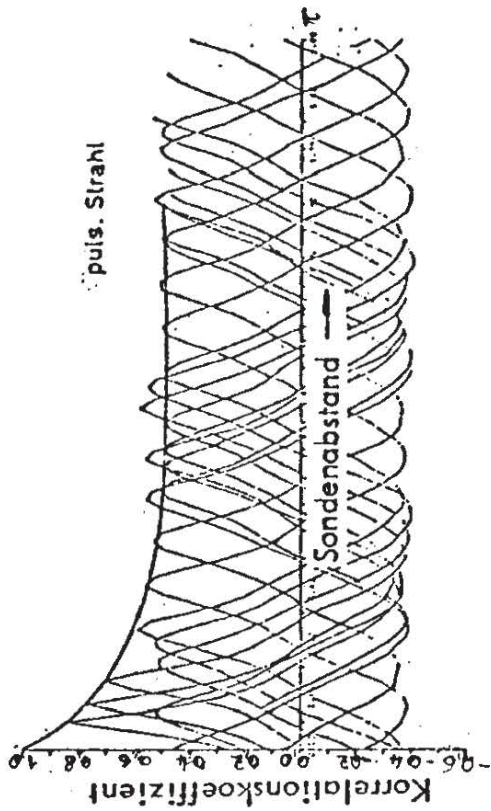
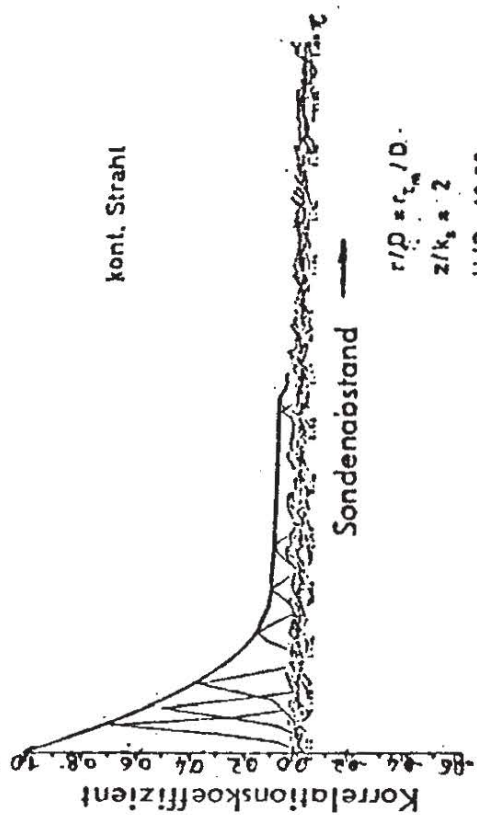


Bild 7 Zweipunkt-Korrelation in Umfangsrichtung