慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	Eine Untersuchung über den Spaltströmungsverlauf in einem Turbinenschaufelgitter
Sub Title	
Author	小茂鳥, 和生(Komotori, Kazunari)
Publisher	慶応義塾大学藤原記念工学部
Publication year	1967
Jtitle	Proceedings of the Fujihara Memorial Faculty of Engineering Keio University (慶応義塾大学藤原記念工学部研究報告). Vol.20, No.78 (1967.) ,p.79(23)- 91(35)
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO50001004-00200078-0023

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

Eine Untersuchung über den Spaltströmungsverlauf in einem Turbinenschaufelgitter

(Received November 11, 1967)

Kazunari KOMOTORI*

I. Einleitung

Die Untersuchungen über Strömung in Turbinengittern sind durch H. Schlichting[1] und andere Forscher[2)3)4)11)] theoretisch und experimentell bereits weitgehend durchgeführt worden. Von K. Leist und W. Dettmering[5] sind ausführliche Messungen über die statische Druckverteilung an statischen und rotierenden Turbinenschaufelgittern und über die Geschwindigkeitsverteilung dahinter ausgeführt worden. Dazu sind eine einfach und direkte Versuchsmethode die Beobachtung der Strömung selbst. Diese Methode ist für Wasserströmungen weitgehend druchgefürt worden.[7] Bei Luftströmungen mit langsamer Geschwindigkeit sind auch zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden, wobei der Rauch als Strömungsspurzeichner gebraucht worden ist. Für die Luftströmung mit höherer Geschwindigkit ist die Schlierenmethode weit verbreitet, die sehr brauchbare Ergebnisse liefert. Diese Methode auf die dreidimensionale Strömung, z. B. auf die Strömung in dem rotierenden Turbinenschaufelgitter anzuwenden, ist sehr schwierig. Solche räumlichen Versuche wurden von H. Z. Herzig[8] mit Rauch durchgeführt. Über die Sekundärströmung wurden damit interessante Ergebnisse gefunden, doch haben diese noch keine allgemeine Gültigkeit.

Der erste Zweck dieser Arbeit ist die Beobachtung der dreidimensionalen Strömung in dem rotierenden Turbinengitter, um die Strömungsvorgänge im Schaufelspalt darzustellen. Hier wird aber nur ein Vorbereitungsversuch dafür beschrieben. Die hier beschriebene Versuchsmethode soll auch auf die rotierenden Turbinengitter angewandt werden.

II. Die Versuchsapparatur und die Versuchsanordnung

(1) Strömungsspurzeichner :

An einem Strömungsspurzeichner sind folgende Bedingungen zu stellen :

a) er bringt die Gitterströmung nicht in Unordnung,

b) er hat eine gute Reflexion,

c) er zeigt die genaue Luftströmung.

*小茂鳥和生 Professor, Faculty of Engineering, Keio University.

Rauch, Al-Pulver und Blütenstaub des Bärlapps sind gewöhnlich gebraucht worden. Hier wird das Aluminium-Pulver gebraucht, da es eine gute Reflexion hat. Eine Schwierigkeit in diesem Fall ist das schwerere spezifische Gewicht, d. h. die Bewegung des Al-Pulvers wird durch den Trägheitseffekt nicht gerade die genaue Luftströmung zeigen. Aber disser Effekt wird infolge der Viskosität der Luft verkleinert. Deshalb ist Al-Pulver für das genaue Aufzeigen der vielgestaltigen Strömung, die z. B. starke Wirbel mit sich bringt, nicht genügend, es gilt aber für die qualitative Zeichnung der Strömung. Diese Methode ist demnach als ein Unterstützungsmittel sehr brauchbar, wenn eine quantitative Messung schon dargestellt worden ist. Als ein anderer Strömungsspurzeichner soll das Glimmerpulver empfohlen werden. Es ist etwas leichter als Aluminium und hat auch die sehr gute Reflexion.

(2) Al-Pulverspritzdüse :

Für die Mischung des Al-Pulvers in der Luftströmung ist eine besondere hergestellte Düse gebraucht worden. Sie wird in Bild. 1 gezeigt. Ein Teil der Düse *A* bildet einen Ejektor, so daß das Al-Pulver durch die von *E* gelaufene Luftströmung

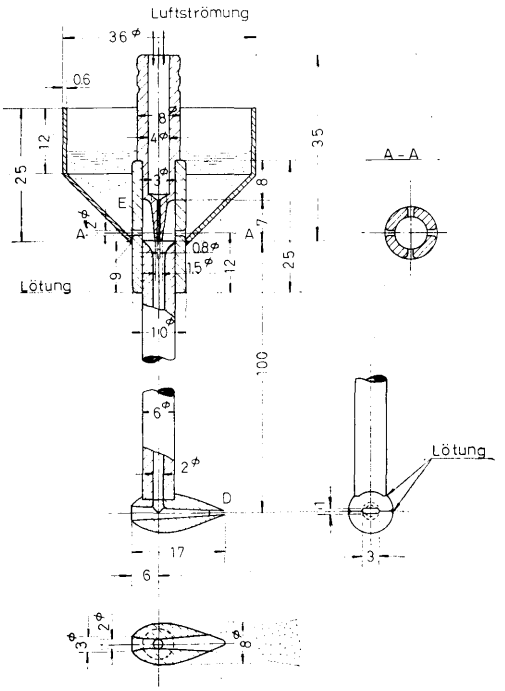


Bild. 1. Al-Pulverspritzdüse.

angesaugt wird und durch die Düse D in die Luftströmung in dem Kanal beigemischt wird. Die Düse hat eine flache Öffnung, um eine fächerförmige Al-Strömung zu bilden.

Zuerst ist ein vorbereitendes Experiment durchgeführt worden, um die Wirkung dieser Düse zu untersuchen. Bild. 2 zeigt eine Skizze der Al-Strömung, die durch diese Düse in die Luftströmung mit der Geschwindigkeit 6 m/s eingespritzt wird. Die Al-Strömung verbreitet sich zuerst mit einem Winkel und dann erreicht sie schließlich eine konstante Breite. Der verbreiterte Winkel ist 6~7° zu der senkrechten Ebene und 20° auf der Horinzontalebene und er nimmt mit der zunehmenden Strömungsgeschwindigkeit ab. Die Düse wird 10 cm vor dem Turbinenschaufelgitter gestellt, deshalb hat die Al beigemischte Strömung am Schaufelgitter etwa 5 mm Dicke zu der senkrechten Ebene und 30 mmBreite auf der Horizontalebene. Es wird eine noch dünnere Breite zu der senkrechten Ebene erwartet, doch ist das im allgemeinen benutztbar.

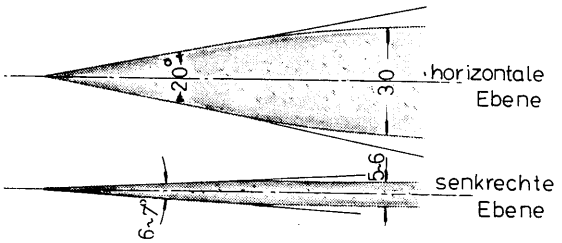


Bild. 2. Skizze der Al-Strömung (Luftgeschwindichkeit 6 m/s).

(3) Das statische Turbinengitter:

Die Anordnung der Versuchsapparatur wird in den Bildern 3 und 4 gezeigt. Die vom Verdichter zugeführte Luft strömt durch das Turbinenschaufelgitter; vor dem Gitter werden die Strömungsgeschwindigkeit w_0 von dem kleinen Pitot-Rohr, der statische Druck P_0 und die Temperatur T_0 von einem gewöhnlichen Thermometer gemessen. Die Oberen und Seitenwand des Kanals ist durchsichtbar. Das Al-Pulver wird vor dem Gitter von der oben beschriebenen Düse in die Luftströmung beigemischt. Diese Düse ist senkrecht bewegbar, deshalb kann man die Strömung über die Höhe der Schaufel beobachten. Von der anderer Seite wird auf das Al-Pulver Licht geworfen. Die zentrale Schaufel wird aus Plexiglas gemacht, so daß Al-Pulver vor dem Gitter auch beleuchtet werden kann. Als Lichtquelle ist ein Blitzlicht für die Belichtungszeit über 1/3000 s und ein Stroboskop für noch kürzere gebraucht worden. Das Stroboskop ist aber mit der Kamera nicht synchronisiert und lieferte deshalb keine guten Ergebnisse. Die nachbeschriebenen Ergebnisse folgten aus der Benutzung mit dem Blitzlicht.

Die benutzte Turbinenschaufel und der Gitterkanal sind dieselben, die Leist und Dettmering gebraucht haben,[5)6)] so daß die beiden Ergebnisse direkt vergleichbar weden. Die Hauptmessungen des gebrauchten Turbinenschaufelgitters sind wie folgt.

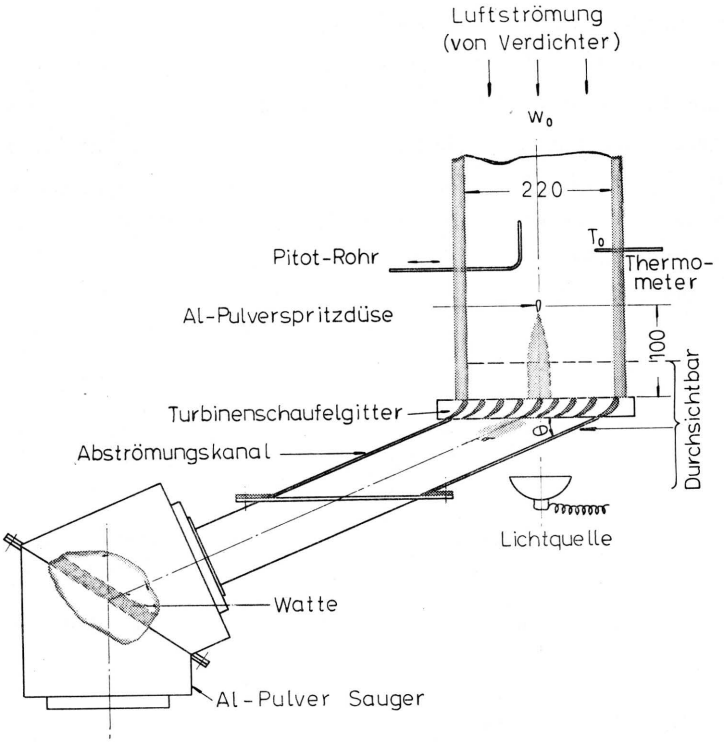


Bild. 3. Übersicht der Versuchsapparatur.

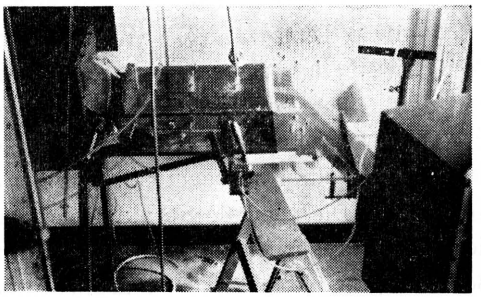


Bild. 4. Photographie der Versuchsapparatur.

Tabelle 1.

Öffnug des Gitterkanals			42×220 [mm²]
gebrauchte Strömungsgeschwindigkeit			max. 30 m/s
Schaufelhöhe	h	mm	42 oder $(42-\varepsilon)$
Schaufelbreite	b	mm	26, 2
Konstruktionswinkel	α_0	°	90
Konstruktionswinkel	α_1	°	20, 5
Schaufelwinkel	β_s	°	48
Sehnenlänge	l	mm	35, 5
Schaufelzahl	z		9
Schaufelteilung	S_0	mm	27, 5
Verhältnis zwischen S_0 und l	S_0/l		0, 775
Spaltweite	ε	mm	$0 \sim 3, 0$
relative Spaltweite	ε/h		$0 \sim 0, 072$

Das Profil der Turbinenschaufel wird im Bild 5 gezeigt.

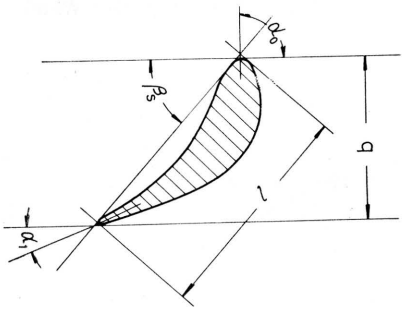


Bild. 5. (*a*) Schaufelprofil.

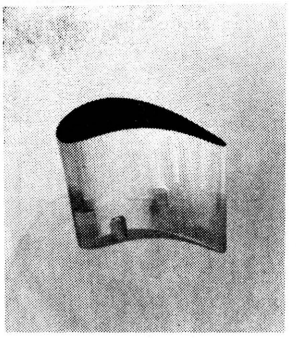


Bild. 5. (*b*) Photographie einer Schaufel.

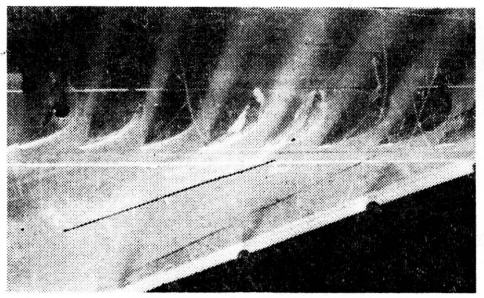
Die Abströmung nach dem Gitter soll in die freie Luft erfolgen. Für die Aufsaugung des Al-Pulver mußte ein Kanal und ein Al-Pulver-Sauger zum Gitter geschafft werden. Der Winkel dieses Kanals ist durch das Meßergebnis des durchschnittlichen Abströmungswinkels mit 20° festgelegt worden. Der Sog und das Durchsatzvermögen des Al-Pulver-Saugers war bei der großen Strömungsgeschwindigkeit nicht ausreichend; dazu war der Widerstand, der durch die Watte entstand, zu groß. Für weitere Versuche empfehle ich deshalb einen Cyclon-Absauger zu verwenden.

Von dieser Apparatur werden die augenblicklichen Erscheinungen der durch das Turbinengitter fließenden Luftströmung photografiert. Die Versuche wurden für verschiedene Varianten durchgeführt; bei dem Schaufelgitter mit Spalt, (Spaltweite $=0,5 \sim 3,0$) ohne Spalt und bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten (~ 26 m/s).

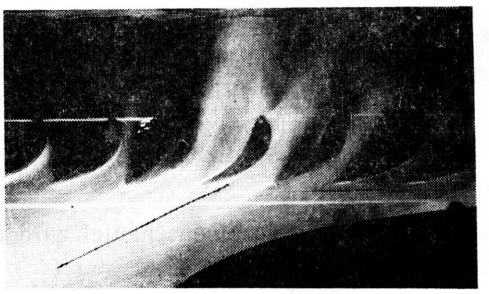
III. Die experimentellen Ergebnisse

Aus der erhaltenen Photografie der Strömung und dem direkten Anschauen kann folgende Aussage über die Strömung in dem Turbinenschaufelgitter gemacht werden. Die hier beschriebenen Versuche sind nur die Vorbereitungsversuche und noch nicht genug, so daß die Ergebnisse wenige allgemeine Gültigkeit haben. Trotzdem werden einige interessante Beobachtungen hier dargestellt.

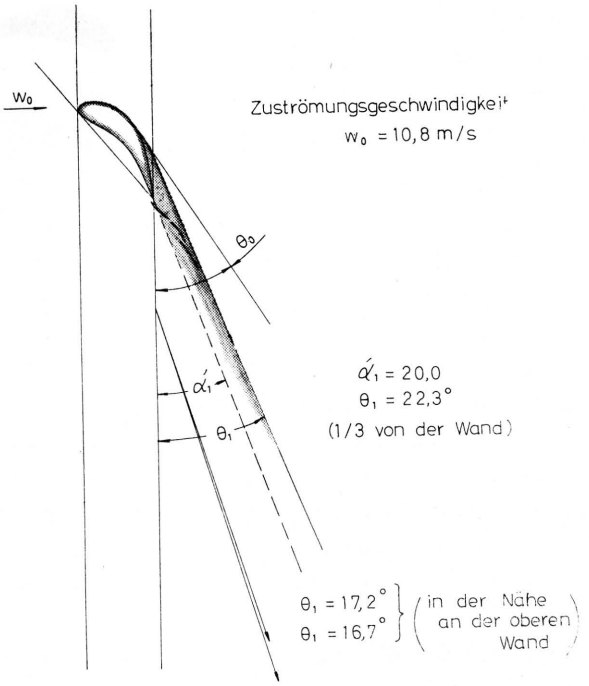
(1) Der Überblick über die Strömung in dem Schaufelgitter ohne Spalt:



(*a*) in der Nähe an der oberen Wand



(*b*) 1/3 Tiefe von der Wand



(*c*) Erklärungsbild

Bild. 6. Strömungsbild im Schaufelgitter (ohne Spalt).

Bild 6 (*a*) zeigt die Strömung in dem Schaufelgitter ohne Spalt in der Nähe an der oberen Wand des Kanals und Bild 6 (*b*) 1/3 Tiefe von der Wand entfernt. Bild 6 (*c*) ist das Erklärungsbild dazu. Die Strömung ist stetig und es gibt keine Unordnung. Sie schält sich an der Oberseite der Schaufel ungefähr 1/3 von der Hinterkante ab, aber ist nicht stark. Der Abströmungswinkel in der Nähe an der oberen Wand ist im Bild 6 (*a*) 17° und ist 3° kleiner im Vergleich mit dem durchschnittlichen Abströmungswinkel. Nach Bild 6 (*b*) ist dieser Winkel in der Umgegend der Schaufelmitte etwas größer und 22°. Auf diesen Winkel hat der Abströmkanal einen Einfluß, d. h., wenn die Abströmung in freie Luft ausläuft, wird diese Veränderung des Abströmungswinkels ziemlich größer sein.

Es ist bereits dargestellt worden, daß die Veränderung der Abströmungsrichtung sich aus der Sekundärströmung im Schaufelgitter ergibt. Die Sekundärströmung entsteht infolge der Ungleichförmigkeit der Geschwindigkeit längs der Scshaufelhöhe bei der Umlenkung der Strömung im Gitter.[2] Unter der Voraussetzung, daß die Ungleichheit der Zuströmungsgeschwindigkeit die Existenz eines "*volticity*" in der Zuströmung ergibt, kann die Veränderung des Abströmungswinkels annährend berechnet werden. Von dieser Vorstellung hat Gomi[9] eine folgende Gleichung, die den Abströmungswinkel bei den Turbinenschaufelgitter mit der halbinfiniten Schaufelhöhe angibt, angeführt:

$$\tan\alpha_2=\tan\alpha_{2i}-\frac{2}{\pi\cos^2\alpha_1}\frac{V_{1i}}{V_1}\left\{\tan^{-1}e^{\frac{\pi}{a}(y+\delta^*)}-\tan^{-1}e^{\frac{\pi}{a}(y-\delta^*)}\right\}$$
$$\times\left\{\sin\alpha_1\cos\alpha_1+\sin\alpha_{2i}\cos\alpha_{2i}+\frac{4(\tan\alpha_{2i}-\tan\alpha_1)}{4+(\tan\alpha_{2i}-\tan\alpha_1)^2}\right.$$
$$\left.+(\tan\alpha_1+\tan\alpha_{2i})\left[\frac{4}{4+(\tan\alpha_{2i}-\tan\alpha_1)^2\cos^2\alpha_1}+1\right]\left[\frac{V_{1i}}{V_1}-1\right]\right\} \qquad (1)$$

Die in der *Gl* (1) verwendeten Zeichen sind im Bild 7 gezeigt. Bild 8 zeigt die Veränderung des Abströmungswinkel, die mit dem bei meinem Versuche gebrauchten Werte aus *Gl* (1) berechnet wurde. Hierbei wird die Geschwindigkeitsverteilung der Zuströmung wie Bild 8 (*b*) vorausgesetzt. Die experimentellen Punkte sind nur zwei, aber sie stimmen im wesentlichen mit der berechneten Kurve überein, daher kann diese Veränderung des Abströmungswinkels aus dieser Theorie bewiesen werden.

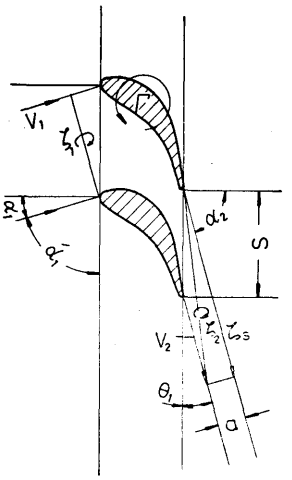
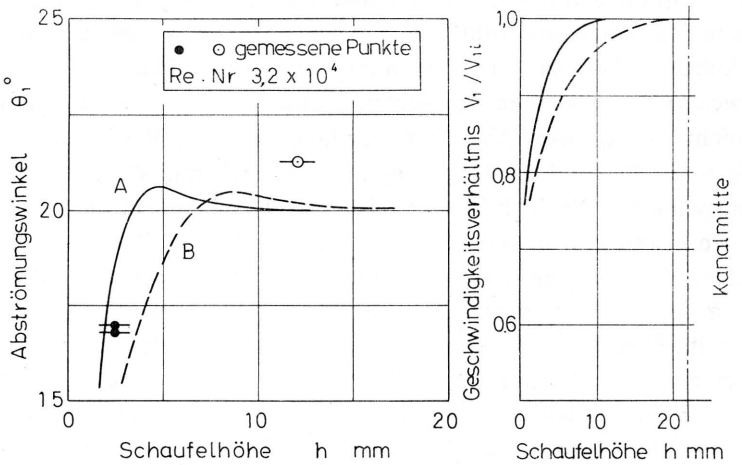


Bild. 7. Zeichen in der Gleichung (1).

Mit der Veränderung des Abströmungswinkels infolge der Sekundärströmung ist ein sehr interessantes und nötiges Problem zu klären. Besonders soll der Einfluß der Abschälung der Strömung berücksichtigt werden. Es wird dadurch gelöst werden, daß die Zirkulation der Schaufel kompensiert wird.

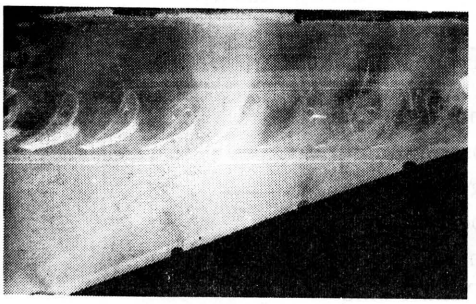


(*a*) Abströmungswinkel (*b*) vorausgesetzte Geschwindigkeitsverteilung.

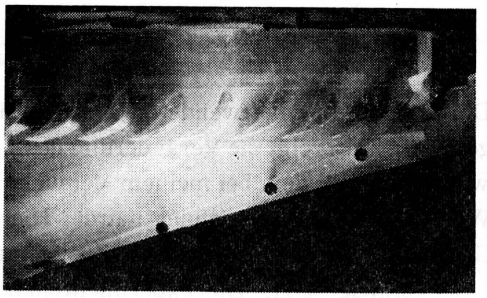
Bild. 8. Abströmungswinkel (ohne Spalt).

(2) Die Strömung in dem Schaufelgitter mit Spalt:

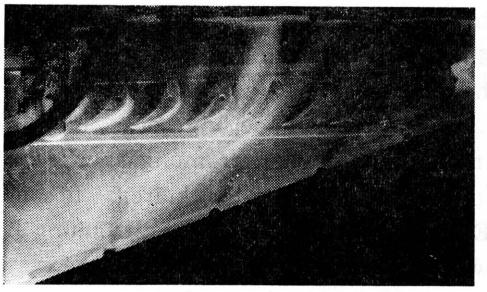
Das Strömungsbild im Schaufelgitter mit 0,5～2,0mm Spalt wird in den Bildern 9(*a*), (*b*), und (*c*) und ihr Erklärungsbild in Bild 10 gezeigt. Die durch den Spalt geflossene Strömung läuft unter einem Winkel von dem Gitter weg und sie wendet sich, so daß sie mit einer Spur $P \rightarrow Q \rightarrow R \rightarrow S$, die in Bild 10 gezeigt wird, weiterläuft.



(*a*) Spaltweite : $\varepsilon = 0.5$ mm

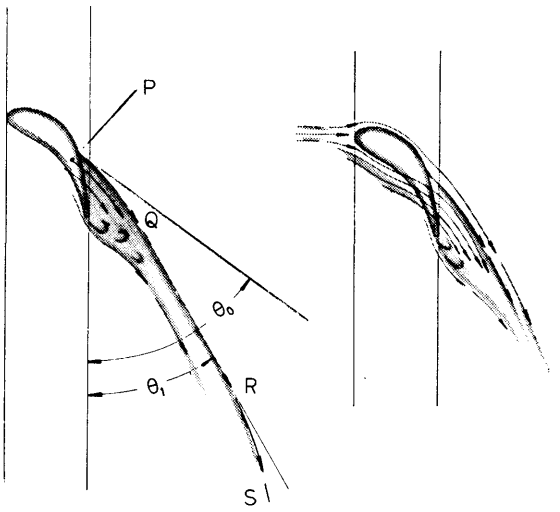


(*b*) Spaltweite : $\varepsilon = 1.0$mm



(*c*) Spaltweite : $\varepsilon = 2.0$ mm

Bild. 9. Photographien der Spaltströmung (mit Spalt): (Zuströmungsgeschwindigkeit $w_0 = 9.9$ m/s).



(*a*) (*b*)
Spaltweite $\varepsilon = 1.0$ mm
Zuströmungsgeschwindigkeit
$w_0 = 10.8$ m/s.

Bild. 10. Erklärungsbild der den Spalt durchgelaufende Strömung.

Die Erklärung, daß die Abströmung einer Spur $P \to Q \to R \to S$ folgt, ist wie folgt: Die druch den Spalt durchgelaufene Strömung läuft mit einem großen Winkel θ_0 von dem Gitter aus. Dieser Winkel wird wenig von dem Profil der Schaufel beeinflußt sein. Die Einwirkung der Spaltweite auf θ_0 ist groß. Die Abströmung dicht hinter der Schaufel wird durch die Hauptgitterströmung geleitet und der Strömungswinkel verringert sich bis θ_1 $(P \to Q)$. Dieser Zustand dauert ziemlich lang $(Q \to R)$ und nachher nimmt dieser Winkel weiter ab $(R \to S)$. Es ist selbstverständlich, daß die letzte Veränderung von einem Einfluß des Abströmungskanals herrührt. Deshalb soll der in Bild 10 gezeigte Winkel θ_1 als der eigentliche Abströmwinkel angenommen werden.

Die Beziehung zwischen dieser Strömungsrichtung θ_1 unb der Zuströmungsgeschwindigkeit w_0 oder der Spaltweite ε werden in den Bildern 11 und 12 gezeigt. Der Winkel θ_1 nimmt mit der zunehmenden Geschwindigkeit und der zunehmenden Spaltweite zu. Dieses zunehmende Verhältnis des Abströmungswinkels wächst sehr steil mit der zunehmenden Strömungsgeschwindigkeit, besonders bei großer Spaltweite. Aber bei kleinen Spaltweiten ist dieser Effekt nicht so groß. In Bild 11 ist das zunehmende Verhältnis des Winkels θ_1 für die größere Spaltweite $(\varepsilon > 0{,}5)$ geradlinig mit zunehmender Spaltweite, aber für die kleine Spaltweite $(0 < \varepsilon < 0{,}5)$ ist dieses sehr steil. Es wird auch beobachtet, daß die den Spalt durchlaufende Strömung bei größerem Spalt und bei der größeren Strömungsgeschwindigkeit unbeständig ist und der Abströmungswinkel (θ_0 und θ_1) schwankt.

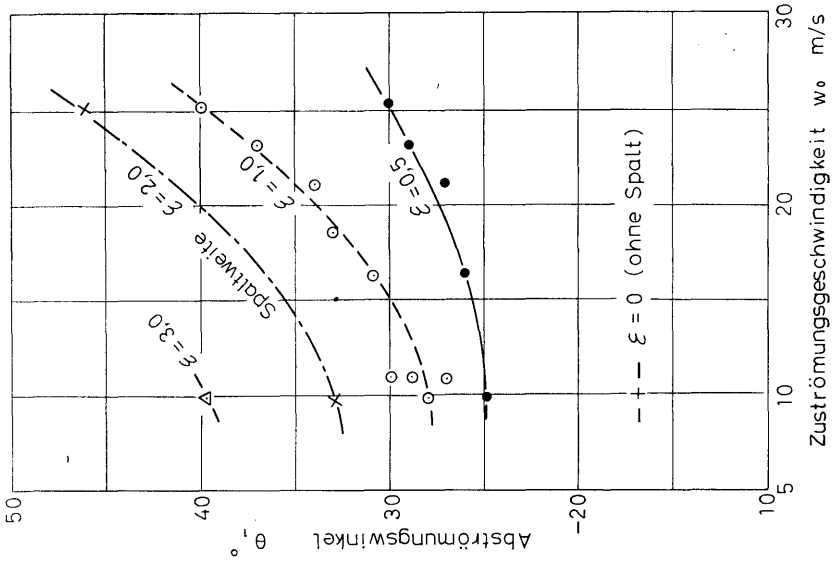


Bild. 11. Abströmungswinkel (mit Spalt)

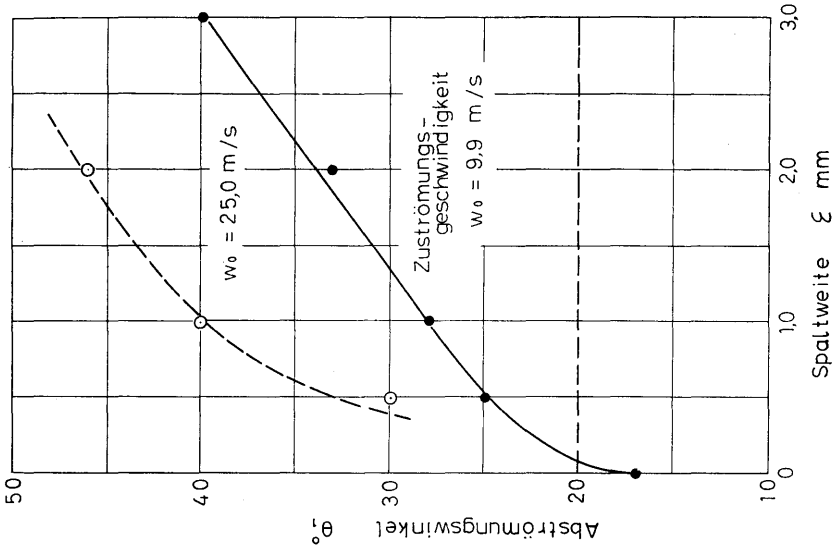


Bild. 12. Abströmungswinkel (mit Spalt)

Trotz dieser Veränderung des Abströmungwinkels liegt der Anfang der Abschälung immer 1/3 vor der Hinterkante der Schaufel fest.

Der obenbeschriebene Strömungswinkel ist auf der Photografie und an der oberen Wand haftenden Al-Spur gemessen worden. Deshalb ist die Messungsgenauigkeit nicht so groß, aber die oben beschriebene Beobachtung wird zweifellos deutlich.

Die Hauptströmung scheint durch diese Spaltströmung beeinflußt zu werden. Der Abströmungswinkel nimmt zu, so daß die Abschälung auch größer wird, als bei der normalen Strömung ohne Spalt.

Die Bilder 13 (*a*) und (*b*) zeigen eine Seitenansicht der den Spalt durchlaufende Strömung. Die Hauptströmung wird durch die Spaltströmung herabgeweht und die Wirbel entstehen an der Schaufeloberkante. Die Existenz dieser Wirbel wird auch durch ein Experiment von S. P. Hutton, in dem als Strömungsspurzeichner Rauch gebraucht wurde, dargestellt. Der Effekt der Wirbel verursacht die Abschälung der Hauptströmung an 1/3 vor der Hinterkante und wächst plötzlich.

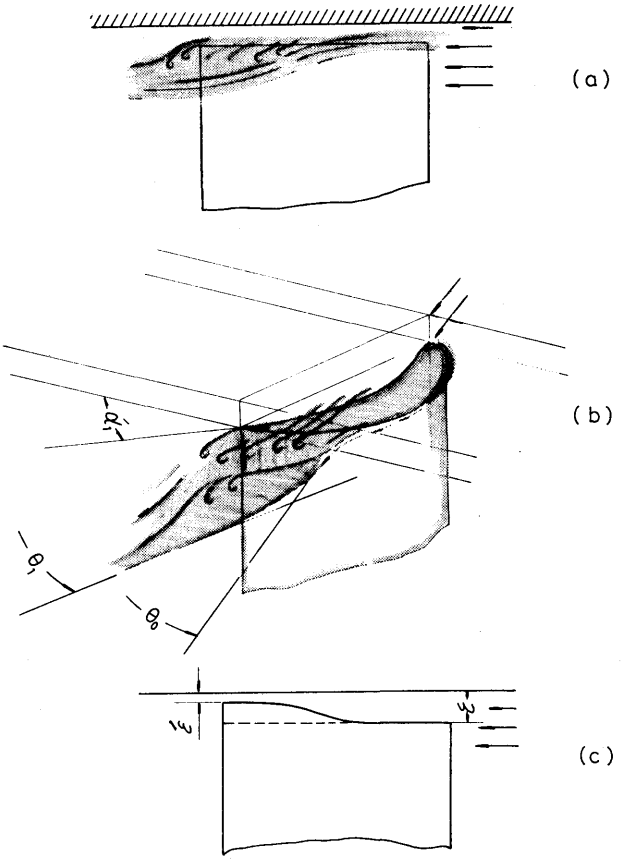
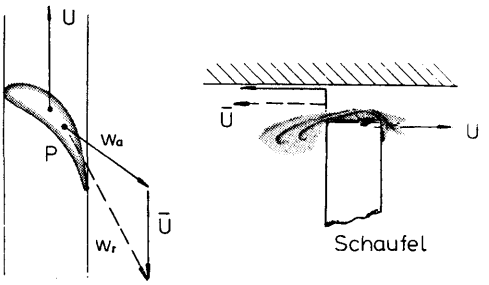


Bild. 13. Seitenansicht der Spaltströmung.

Dieser Effekt der Spaltströmung macht sich nur an dem Hinterteil des Schaufelprofils bemerkbar, d. h., es zeigt sich, daß die den Spalt durchlaufende Strömung im vorderen Teil des Spaltes wenig und im Hinterteil um so größer ist. Die oben beschriebene Herabwehung der Hauptströmung und das Vorkommen des Wirbels hindern die Wirkung der Schaufel am Kopf und haben auf die Schaufelfähigkeit einen schlechten Einfluß. Für die Abwehr dieses Einflusses ist die kleine Spaltweite selbstverständlich besser, aber es ist konstruktiv sehr schwierig den Spalt in der Praxis unter 0,5 mm zu bringen. Deshalb wird als nächstbeste Maßregel empfohlen, daß in der praktischen Gestaltung der Turbinenschaufel die Spaltweite nicht gleich in alle Teile der Schaufeloberkante, sondern nach hinten etwas enger gemacht werden soll wie in Bild 13 (*c*) gezeigt wird, so daß die Herabsetzung der Spaltströmung nach der Schaufelhinterkante und die Wirbel auch verschwinden wird und die Hauptströmung nach dem Schaufelkopf verbessert werden und dann der Spaltverlust abnehmen wird.

Die Veränderung der Abströmungsrichtung und das Verabwehen der Haupströmung haben auf die Leistungsfähigkeit des Schaufelgitters zweifellos den schlechtesten Einfluß. Aber diese Erscheinung scheint auf den rotierenden Turbinengittern etwas anderes zu sein. Hierfür soll die den Spalt durchlaufende Strömung im rotierenden Schaufelgitter betrachtet werden. In Bild 14 (*a*) zeigt w_a die absolute Geschwindigkeit der Durchströmung an einem Punkt P im Spalt. Wenn die Schaufel sich mit einer Peripheriegeschwindigkeit U umdreht, ist die relative Geschwindigkeitsverteilung in dem Spalt, sowie in Bild 14 (*b*) gezeigt wird. Wenn die durchschnittlich relative tangentiale Geschwindigkeit $\bar{U}$ auftritt, wird die relative Geschwindigkeitskomponente am Punkt P mit w_r dargestellt. Die Effekte der Veränderung des Abströmungswinkels erscheinen deshalb kleiner und die Herabwehung der Hauptströmung wird auch abnehmen, so daß diesbezüglich das rotierende Gitter dem statischen Gitter überlegen ist. Im rotierenden Gitter gibt es aber noch andere große Probleme, z. B. der Einfluß des Winkels und der Zentrifugalkraft zu der Strömung.



(*a*) (*b*)

Bild. 14. Spaltströmung im rotierenden Schaufelgitter.

IV. Schlußwort

Diese Ergebnisse sind nur ein Beispiel für ein Schaufelgitter und sie haben nur wenige allgemeine Bedeutung. Aus dem hier dargestellten Ergebnis, z. B. der Veränderung der Abströmungsrichtung, dem Betragen der Durchströmung in dem Spalt usw. wird man aber manches Wertvolle als Beitrag zur weiteren Untersuchung gebrauchen können.

Die systematischen Untersuchungen nach dieser Methode sollen zusammen mit der direkten Messung der Spaltströmung für den Aufschluß über den Spaltverlust der Turbinenschaufelgitter gebraucht werden, so daß fruchtreiche Resultate erwartet werden.

Dem Selige Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Leist im Institut für Turbomaschinen der Technischen Hochschule Aachen, Deutschland bin ich zu Dank verpflichtet. Ebenso möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Dettmering, Herrn Dr.-Ing A. Hartman und anderen Herren im Institut für Turbomaschinen meinen herzlichsten Dank aussprechen; sie haben mir bei der Durchführung dieser Versuche ihre Sorge angedeihen lassen.

Literatur

1. Schlichting, H.: VDI-Berichte Bd. 3, s. 7/19, 1955
2. Gersten, K.: Forsch. Ing.-Wes., Bd. 23, s. 96/101, 1957
3. Gersten, K.: Abhandlung der Braunschweiger Wissenschaftlichen Gesellschaft; Bd. VII, s. 93/99, 1955
4. Ikui, T.: J. of Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 62, No. 485, s. 909/918, 1959
5. Dettmering, W.: Jahrbuch 1957 der WGL, s. 88/101
6. Leist, K., u. Dettmering, W.: DVL-Berich Nr. 56, 1958
7. Yamamasu: J. of JSME, Vol. 56, No. 414, s 564/570, 1953
8. Herzig, H. Z., u. Hausen, A. G.: ASME Trans. Vol. 79, s. 249, 1957
9. Gomi, M.: JSME Trans. Vol. 25, No. 153 s. 362/368, 1959
10. Smith: WADC T. R., 1955
11. Petermann, H.: VDI-Zeitschrift Bd. 101, No. 11, s. 430/432, 1959