

68 | 1960

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

E. Bailitis

Ruder mit versetztem Druckpunkt

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Ruder mit versetztem Druckpunkt

E. Bailitis, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1960

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

Ruder mit versetztem Druckpunkt

Aus dem Institut für Schiffbau der Universität Hamburg

Dr. E. Bailitis, Hamburg

1. Einführung

Der Schaft eines nicht balancierten Ruders liegt an der Profilverderrkante. Bei einem Balance-Ruder trachtet man danach, den Ruderschaft in die Nähe des Druckpunktes zu legen. Im Bereich kleiner Anstellwinkel wird die Lage des Druckpunktes von der Profilform, dem Seitenverhältnis, dem Strömungszustand, sowie von der Profildicke und von der Oberflächengüte beeinflusst. In gesunder Strömung und bei großem Seitenverhältnis liegt der Druckpunkt bei einfachen Profilen, z. B. einer dünnen Platte, etwa im vorderen Viertel der Profillänge. Bei größeren Anstellwinkeln verlagert er sich nach der Profilmitte, die er bei 90° erreicht. Die Schaftlage eines Balance-Ruders ist durch den Druckpunkt bei kleinen Anstellwinkeln im wesentlichen bestimmt.

In einer experimentellen Arbeit [3] wurde festgestellt, daß der Druckpunkt durch eine selbsttätige Absaugung beeinflusst werden kann. Untersucht wurde eine Platte mit dem Seitenverhältnis $\Lambda = 1$. Die Hinterkante der Platte war mit einem Absaugeschlitz versehen. An der Vorderkante befanden sich 4 Lochreihen. Die Platte war so gebaut, daß durch einen inneren Hohlraum auf der Saugseite eine Verbindung zwischen dem hinteren Absaugeschlitz und den vorderen Lochreihen bestand.

Es wurde festgestellt, daß bei Querkraftbeiwerten $c_Q > 0,1$ eine merkliche Druckpunktverlagerung nach der Mitte hin erfolgte. In gesunder Strömung und mit größeren Anstellwinkeln wurde erreicht, daß der Druckpunkt bis etwa 45 % der Plattenlänge von der Vorderkante weg verlegt wurde.

Diese Ergebnisse veranlaßten weitere Untersuchungen mit dem Ziel festzustellen, ob eine Druckpunktverlagerung auch bei kleinen Anstellwinkeln mit selbsttätiger Absaugung zu erreichen ist. In diesem Falle könnte man den Ruderschaft in eine größere Entfernung von der Vorderkante legen, als das bei den bisherigen Balance-Rudern möglich war, ohne die Unstabilitätserscheinungen, die bei einer Überbalance eintreten, hervorzurufen.

Der Gedanke, das Ruderblatt mit Öffnungen zu versehen, und dadurch einige Eigenschaften des Ruders günstiger zu beeinflussen, ist sehr alt. Die erste registrierte und beschriebene qualitative Ausführung ist vor etwa 100 Jahren gemacht worden [4]. Der erste festgehaltene Bericht scheint von Kapitän Symonds in einer Sitzungsdiskussion der Schiffbauer vorgetragen worden zu sein. Die chinesischen (malaiischen) Dschonken (Dschunken), ein in China besonders oft gebrauchtes Segelschiff, haben einen recht plumpen Rumpf und besitzen demnach ausgesprochen schlechte Steuereigenschaften. Aus praktischen Erfahrungen heraus sind diese Segelschiffe zwangsweise mit einem großen Ruder ausgerüstet. Um das Ruderlegen zu erleichtern, sind die Dschonkenbauer auf den Gedanken gekommen, das Ruderblatt mit Öffnungen zu versehen, die die Druckseite mit der Saugseite auf eine kürzere Entfernung verbinden. Das Ruderblatt einer Dschonke ähnelt teilweise fast einem Sieb. Über die Eigenschaften eines durchlöcherten Ruderblattes sind kaum Messungen veröffentlicht worden. Eine etwas ähnliche Anordnung findet man bei dem kürzlich bekanntgewordenen Mello-Ruder [5], [6]. Der Unter-

schied besteht nur in der Versetzung der Ein- und Ausströmöffnungen auf der Druck- und Saugseite des Ruders. Das Mello-Ruder ist mit Kanälen versehen, die die Druckseite mit der Saugseite des Profils verbinden. Die an dem Nasenteil einströmende Flüssigkeit gelangt durch den Kanal auf die gegenüberliegende Seite des Profils und strömt in der Nähe der Hinterkante wieder aus.

Einen gänzlich anderen Weg ist in der vorliegenden Arbeit verfolgt worden. Zwischen dem Nasenteil und der Hinterkante des Profils herrscht auf der Saugseite sowie auf der Druckseite eine Druckdifferenz. Verbindet man das Gebiet des höchsten Unterdrucks auf der Saugseite mit der Profilhinterkante, wie das in Bild 20 angedeutet ist, so ist eine zusätzliche Umströmung zu erwarten. Die Flüssigkeit wird an der Hinterkante abgesaugt, fließt durch den inneren Hohlraum zu der Öffnung an der Vorderkante und tritt wieder in das Strömungsfeld ein. Infolge der zusätzlichen Umströmung wird die steile Unterdruckflanke an der Profilnase als auch die Druckzunahme nach der Hinterkante abgeflacht, was zu einer Druckpunktverlagerung nach der Mitte hin führt. Um einen direkten Druckausgleich zwischen der Druck- und Saugseite des Profils zu vermeiden, ist entlang der Rudermitellinie eine Trennwand angebracht.

2. Profil

Für die Untersuchung stand ein Ruder mit dem Seitenverhältnis $\Lambda = 1$ zur Verfügung (Bild 1). Die Profilkordinaten sind in Tab. 1 wiedergegeben. Es ist ein nach dem gegenwärtigen Stand bestmöglichst entworfenes Ruderprofil aus dem Ruderprogramm des Instituts für Schiffbau. Nähere Angaben über Profilmarameter sind Tab. 1 und [2] zu entnehmen. Der Ruderschaft ist an dem stärksten Teil des Profils, der genau ein Viertel der Länge von der Nase entfernt liegt, angebracht worden. Das Ruder hat eine gerade Kontur am Profilende und eine stumpfe Hinterkante von 0,015 L. Das Modell des Ruders wurde aus etwa 1 mm starkem Blech angefertigt. Der innere Hohlraum ist entlang der Mittellinie mit einer starren Wand in zwei gleichgroße Hälften geteilt worden. Die Lage der Absaugöffnungen ist in Bild 1 aufgetragen.

3. Gang der Untersuchung

Die Vergleichsmessungen wurden am Modell, das keine Öffnungen oder sonstige Unebenheiten entlang der Mantelfläche enthält, gewonnen. Anschließend wurde an der Nase die erste Reihe der Absaugöffnungen geöffnet. Durch das Öffnen einer Lochreihe an der Hinterkante wurde die Absaugung in Betrieb genommen. Die Absaugung wurde erhöht durch das Öffnen weiterer Lochreihen an der Modellnase und an der Hinterkante. Insgesamt wurden vier Lochreihen an der Nase und der Hinterkante angebracht (Messung III). Die Ortskoordinaten der Lochreihen sind in Bild 1 und 1a eingetragen.

Die Hinterkante wurde so gebaut, daß wahlweise durch die Entfernung eines 6 mm breiten Streifens ein Schlitz geöffnet werden kann. Mit geöffnetem Schlitz ähnelt das Modell einer

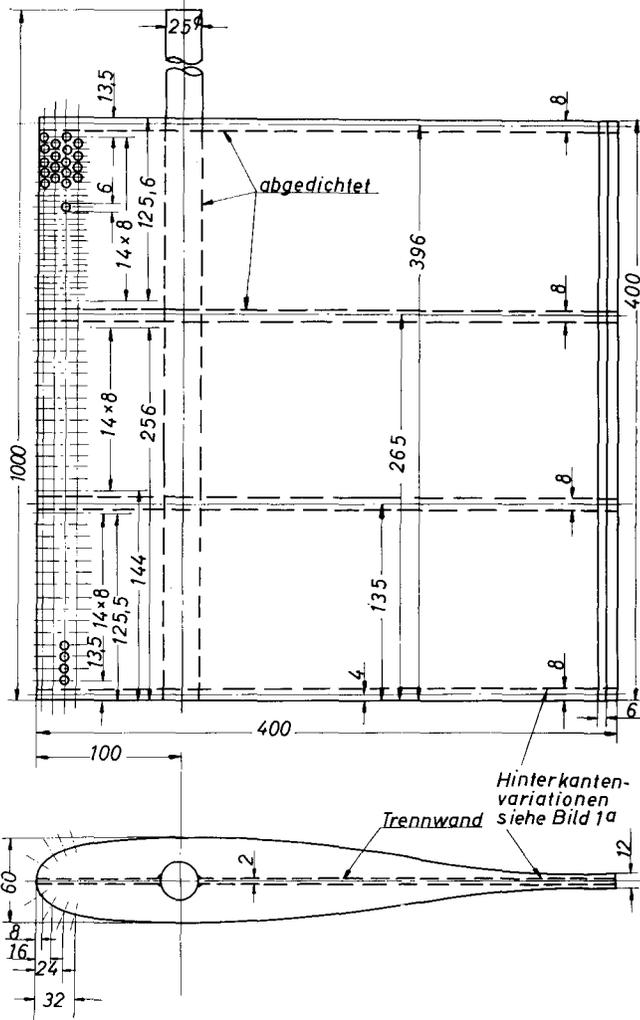


Bild 1 Ruderprofil Nr. 58

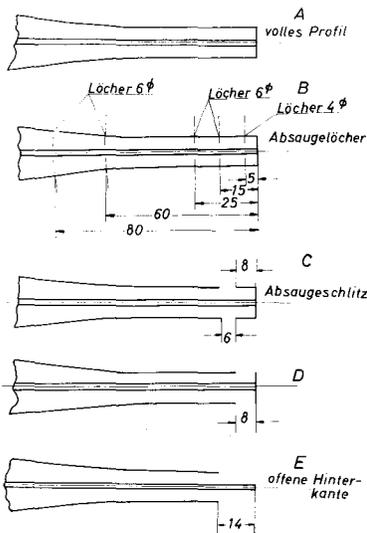


Bild 1a Variationen der untersuchten Hinterkantenformen

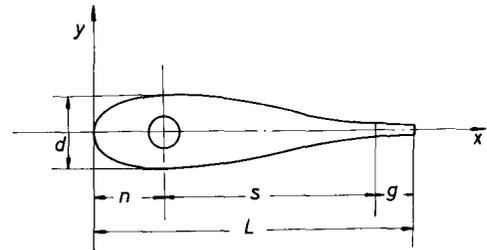
Ausführung mit Staukeil, dessen Höhe gleich der Dicke des stumpfen Teils der Hinterkante ist. Verschiedene Variationen der Absaugeöffnungen sind durchgeführt worden. Die Gesamtergebnisse werden in verkürzter Fassung wiedergegeben.

4. Meßergebnisse

Die Messungen wurden im Windkanal des Instituts [1] mit dem Rudermeßgerät [2] durchgeführt. Strahldurchmesser betrug 1 m. Die Meßwerte sind ohne Korrektur ermittelt. Es

Tabelle 1
Ruderaufmaße
Ruderprofil Nr. 58

x	y	x	y
0	0	38,00	7,08
0,50	1,93	51,00	5,99
1,25	3,07	64,00	4,45
2,50	4,08	77,00	2,47
5,00	5,28	83,50	1,78
10,00	6,53	88,70	1,51
15,00	7,12	90,00	1,50
20,00	7,42	100,00	1,50
25,00	7,50		



Parameter:

$$\frac{d}{L} = 0,15; \quad \frac{n}{L} = 0,25; \quad \frac{s}{L} = 0,65; \quad \frac{n}{s} = \frac{5}{13}; \quad \frac{g}{L} = 0,1$$

$$\omega_n = 2,07; \quad \frac{v_n}{\phi_n} = -1,11; \quad \frac{v_n}{\phi_n} = -\frac{4}{9}; \quad \theta_n = 0,3$$

$$\frac{\omega_s}{\phi_s} = 0; \quad \frac{v_s}{\phi_s} = 0; \quad \frac{v_s}{\phi_s} = \left(\frac{s}{n}\right)^2 - \frac{v_n}{\phi_n} = -3,02$$

$$\frac{\tau_s}{\phi_s} = 0,2; \quad \theta_s = \frac{1,5}{13}$$

wurden die Querkraft Q , der Widerstand W und das Moment $M_{0,25}$ bei verschiedenen Anstellwinkeln gemessen. Die Beiwerte sind nach Beziehung

$$c_Q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot F}; \quad c_W = \frac{W}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot F};$$

$$c_{M_{0,25}} = \frac{M_{0,25}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot F \cdot L}; \quad (1)$$

ermittelt worden, worin v die Windgeschwindigkeit, ρ die Dichte, F die Bezugsfläche und L die Profiltiefe bedeuten.

Messung I. Die c_Q , c_W und $c_{M_{0,25}}$ -Beiwerte ohne selbsttätige Absaugung mit geschlossenen Absaugeöffnungen wurden bei vier Windgeschwindigkeiten, $v_1 = 11,6$ m/s, $v_2 = 14,6$ m/s, $v_3 = 21,06$ m/s und $v_4 = 29,9$ m/s, bestimmt. Die charakteristischen Reynolds-Zahlen betragen $R_1 = 0,297 \cdot 10^6$, $R_2 = 0,387 \cdot 10^6$, $R_3 = 0,556 \cdot 10^6$, und $R_4 = 0,776 \cdot 10^6$.

Die Meßergebnisse sind in Tab. 2 wiedergegeben. Der auf die Profilnase und Profilmitte umgerechnete Momentenbeiwert

$$c_{M_0} \text{ bzw. } c_{M_{0,5}} = c_{M_{0,25}} \pm c_N \cdot 0,25, \quad (2)$$

der Beiwert der Normalkraft

$$c_N = c_Q \cdot \cos \alpha + c_W \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

sowie die Lage des Druckpunktes

$$\frac{e}{L} = \frac{c_{M_0}}{c_N} \quad (4)$$

sind in Spalte 5 bis 8 der Tab. 2 eingetragen. e bedeutet die Entfernung des Druckpunktes von der Profilnase und α der Anstellwinkel.

Die graphischen Darstellungen der Ergebnisse sind aus Bild 2 bis 5 zu entnehmen. Bei größeren Anstellwinkeln weicht der Beiwert der Querkraft bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten erheblich voneinander ab. Bei kleinen Reynolds-

sehen Zahlen erkennt man den ersten und zweiten Abreißpunkt der Strömung (Bild 2). Nach Überschreiten des ersten Abreißpunktes verlagert sich der Druckpunkt fast sprunghaft zu der Profilmitte hin, dies erkennt man deutlich in Bild 3 und 5. Die Polare ist in diesem Gebiet erheblich verzerrt (Bild 4).

Tabelle 2

Meßwerte des Ausgangsprofils

Re = 0,775 · 10⁶

α°	C_W	C_Q	$-C_{M0,25}$	$C_{M0,5}$	$-C_{M0}$	C_n	$\frac{e}{l}$
0	0,027	0	0	0	0	0	
5	0,044	0,147	-0,004	0,042	0,033	0,150	0,220
10	0,066	0,311	-0,006	0,085	0,073	0,317	0,244
15	0,115	0,483	0,000	0,126	0,126	0,505	0,250
20	0,180	0,655	+0,015	0,154	0,186	0,676	0,275
25	0,242	0,839	0,033	0,183	0,249	0,862	0,289
30	0,353	1,050	0,068	0,205	0,335	1,080	0,310
35	0,488	1,240	0,099	0,223	0,421	1,290	0,326
40	0,784	1,000	0,227	0,090	0,544	1,270	0,430
45	0,742	0,839	0,215	0,065	0,495	1,120	0,443

Re = 0,556 · 10⁶

α°	C_W	C_Q	$-C_{M0,25}$	$C_{M0,5}$	$-C_{M0}$	C_n	$\frac{e}{l}$
0							
5	0,030	0,153	-0,002	0,040	0,037	0,155	0,24
10	0,051	0,299	-0,002	0,077	0,073	0,300	0,24
15	0,097	0,465	+0,002	0,116	0,119	0,473	0,25
20	0,165	0,634	0,015	0,148	0,178	0,651	0,27
25	0,236	0,806	0,034	0,173	0,241	0,830	0,29
30	0,364	0,993	0,064	0,196	0,324	1,040	0,31
35	0,574	0,943	0,186	0,089	0,461	1,100	0,42
40	0,691	1,010	0,214	0,090	0,578	1,220	0,43
45	0,674	0,846	0,197	0,073	0,467	1,080	0,43

Re = 0,387 · 10⁶

α°	C_W	C_Q	$-C_{M0,25}$	$C_{M0,5}$	$-C_{M0}$	C_n	$\frac{e}{l}$
0							
5		0,155	-0,003	0,042	0,036	0,155	0,22
10	0,050	0,303	-0,006	0,083	0,071	0,307	0,23
15	0,076	0,458	0,000	0,116	0,116	0,462	0,25
20	0,139	0,620	+0,014	0,143	0,171	0,630	0,27
25	0,230	0,800	0,034	0,171	0,239	0,822	0,29
30	0,404	0,820	0,140	0,088	0,368	0,912	0,40
35	0,509	0,903	0,174	0,083	0,431	1,030	0,42
40	0,634	0,976	0,215	0,070	0,500	1,140	0,44
45	0,619	0,776	0,183	0,064	0,430	0,986	0,44

Re = 0,297 · 10⁶

α°	C_W	C_Q	$-C_{M0,25}$	$C_{M0,5}$	$-C_{M0}$	C_n	$\frac{e}{l}$
0							
5		0,143	-0,006				
10	0,020	0,270	-0,006	0,073	0,061	0,270	0,22
15	0,047	0,410	0,000	0,102	0,102	0,410	0,25
20	0,119	0,582	+0,012	0,134	0,158	0,584	0,27
25	0,250	0,640	0,116	0,055	0,287	0,686	0,42
30	0,359	0,755	0,145	0,059	0,349	0,831	0,42
35	0,487	0,846	0,174	0,068	0,416	0,970	0,43
40	0,597	0,870	0,192	0,069	0,453	1,050	0,43
45	0,550	0,743	0,180	0,049	0,409	0,914	0,45

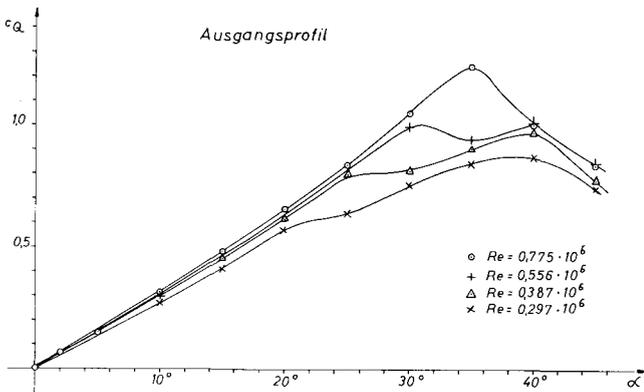


Bild 2 Querkraftbeiwert als Funktion der Anstellwinkel des Ruderprofils

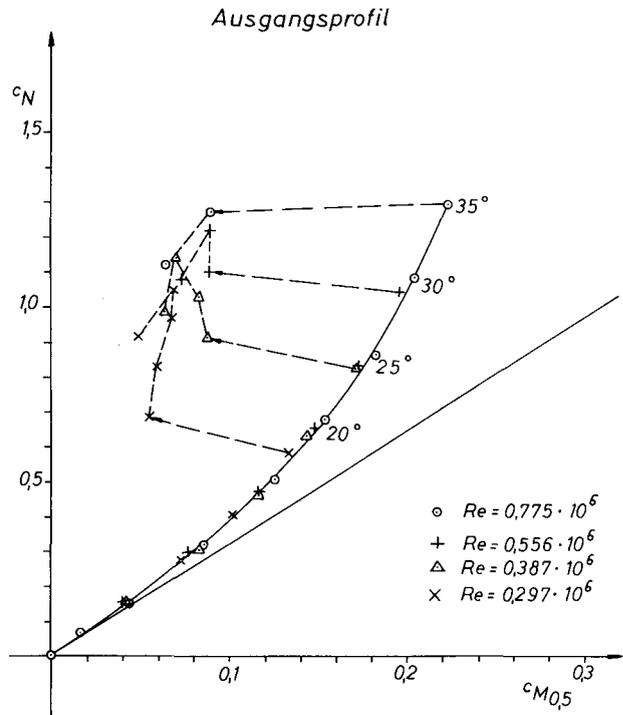


Bild 3 Beiwertskurve der Normalkraft und des auf die Mitte bezogenen Momentes. Die sprunghafte Verlagerung des Druckpunktes ist deutlich zu erkennen

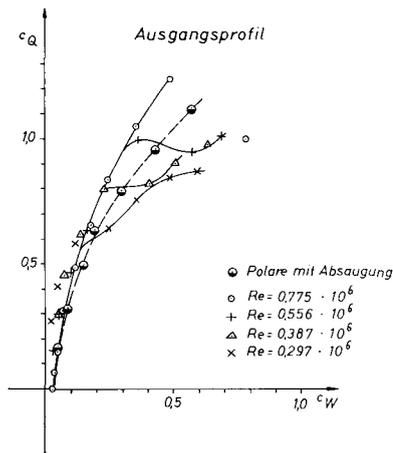


Bild 4 Polare des Vergleichsprofils. Die Verzerrung der Polare stimmt überein mit der Druckpunktverlagerung

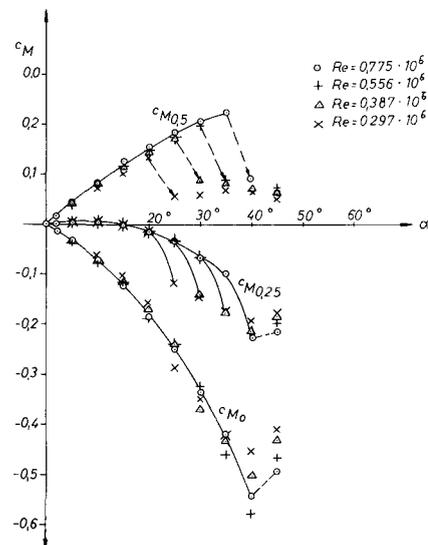


Bild 5 Momentenkurve des Ausgangsprofils

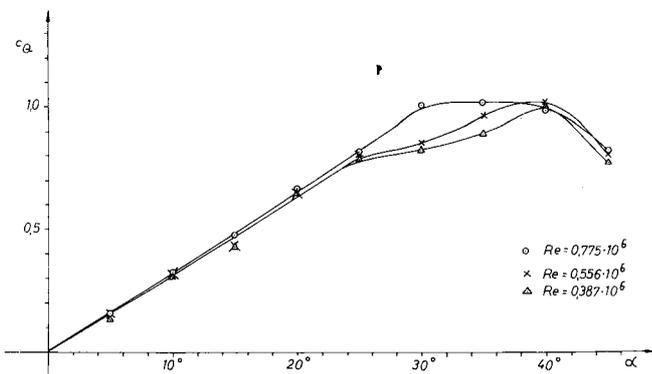


Bild 6 Antriebsbeiwerte bei geöffneten Absaugeöffnungen an der Rudernase. Die Öffnungen an der Hinterkante sind geschlossen

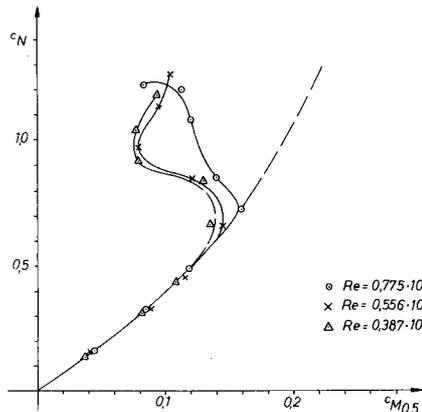


Bild 7 Beiwertskurve der Normalkraft und des auf die Mitte bezogenen Moments. Die Absaugeöffnungen an der Nase sind geöffnet. Die Hinterkante ist noch geschlossen. Die gestrichelt aufgetragene Kurve gibt die Meßwerte des Ausgangsprofils bei $Re = 0,776 \cdot 10^6$ wieder

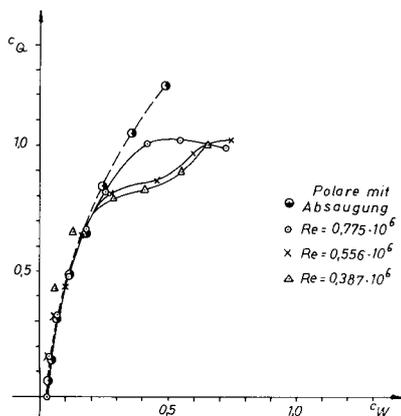


Bild 8 Polare bei geöffneten Absaugeöffnungen an der Rudernase

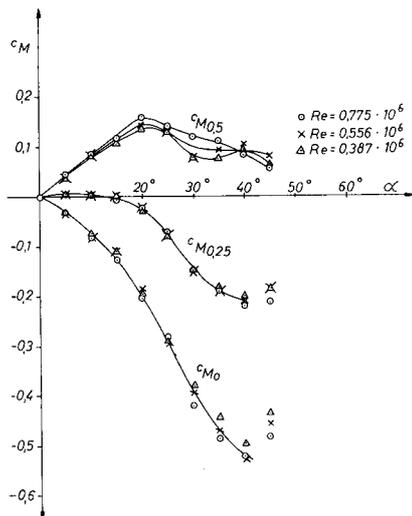


Bild 9 Momentenbeiwerte bei geöffneten Öffnungen an der Profilnase. Die Hinterkante ist geschlossen

Tabelle 3

Meßwerte ohne Absaugung mit geöffneten Absaugeöffnungen an der Vorderkante

$Re = 0,77 \cdot 10^6$

α°	C_W	C_Q	$-C_{M_{0,25}}$	$C_{M_{0,5}}$	$-C_{M_0}$	C_{11}	$\frac{e}{l}$
0	0,027	0	0	0	0	0	
5	0,034	0,158	-0,004	0,044	0,036	0,160	0,22
10	0,065	0,322	-0,003	0,085	0,079	0,328	0,24
15	0,112	0,479	+0,004	0,119	0,127	0,491	0,26
20	0,181	0,660	0,022	0,159	0,203	0,724	0,28
25	0,251	0,819	0,072	0,140	0,284	0,849	0,33
30	0,414	1,010	0,150	0,120	0,420	1,080	0,39
35	0,541	1,020	0,187	0,113	0,487	1,200	0,40
40	0,726	0,988	0,220	0,083	0,523	1,220	0,43
45	0,697	0,825	0,213	0,057	0,483	1,080	0,44

$Re = 0,56 \cdot 10^6$

α°	C_W	C_Q	$-C_{M_{0,25}}$	$C_{M_{0,5}}$	$-C_{M_0}$	C_{11}	$\frac{e}{l}$
0		0					
5	0,030	0,155	-0,002	0,041	0,037	0,158	0,23
10	0,061	0,318	-0,003	0,084	0,078	0,324	0,24
15	0,098	0,438	-0,003	0,115	0,109	0,449	0,24
20	0,165	0,643	+0,023	0,145	0,187	0,659	0,28
25	0,276	0,807	0,080	0,131	0,291	0,847	0,34
30	0,455	0,856	0,154	0,078	0,396	0,968	0,41
35	0,595	0,967	0,187	0,095	0,470	1,130	0,41
40	0,742	1,020	0,211	0,104	0,526	1,260	0,42
45	0,710	0,807	0,187	0,083	0,457	1,080	0,42

$Re = 0,39 \cdot 10^6$

α°	C_W	C_Q	$-C_{M_{0,25}}$	$C_{M_{0,5}}$	$-C_{M_0}$	C_{11}	$\frac{e}{l}$
0		0					
5	0,138	-0,003	0,037	0,031	0,138	0,22	
10	0,025	0,313	-0,003	0,081	0,075	0,313	0,24
15	0,059	0,431	0,000	0,108	0,108	0,431	0,25
20	0,129	0,657	+0,031	0,135	0,197	0,663	0,30
25	0,286	0,788	0,079	0,130	0,288	0,835	0,34
30	0,408	0,823	0,150	0,079	0,379	0,916	0,41
35	0,550	0,890	0,183	0,077	0,443	1,040	0,42
40	0,653	1,000	0,201	0,094	0,496	1,180	0,41
45	0,613	0,788	0,185	0,063	0,433	0,990	0,44

Messung II. Die erste Reihe der Absaugeöffnungen an der Modellnase wurde geöffnet. Die Hinterkante blieb geschlossen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die graphischen Darstellungen sind in Bild 6, 7, 8 und 9 wiedergegeben. Der Einfluß der Windgeschwindigkeit bzw. der Reynold'schen Zahl auf die Beiwerte ist noch deutlich zu erkennen. Es ist jedoch ein erheblicher Ausgleich der Beiwerte, besonders bei kleineren Windgeschwindigkeiten, zu merken.

Bei einem kleineren Beiwert der Normalkraft (Bild 7) ist keine Änderung an der Momentkurve im Vergleich zum Ausgangsprofil zu merken. Bei einem größeren Beiwert erfolgt eine krasse Verlagerung des Druckpunktes zur Mitte hin. Je kleiner die Geschwindigkeit, desto steiler erfolgt die Versetzung des Druckpunktes. Eine entsprechende Unstetigkeit ist auch der Polare (Bild 8) zu entnehmen. Die Verästelung der Moment-Anstellwinkel-Kurve ist noch deutlich zu erkennen (Bild 9).

Messung III. An der Nase und der Hinterkante des Modells wurden sämtliche Absaugeöffnungen geöffnet. Der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Beiwerte ist kaum vorhanden (Tabelle 4). Die Polare verläuft stetig bis zum endgültigen Abreißen der Strömung (Bild 12). Bei kleinen Anstellwinkeln bzw. kleinem Beiwert der Normalkraft liegt der Druckpunkt in einer Entfernung von der Profilnase, die etwa $0,34 \cdot L$ beträgt (Bild 11). Anschließend erfolgt eine Verlagerung auf etwa $0,44 \cdot L$. In dieser Lage verbleibt der Druckpunkt bis die Strömung abreißt, was bei einem Anstellwinkel zwischen 40° und 45° erfolgt.

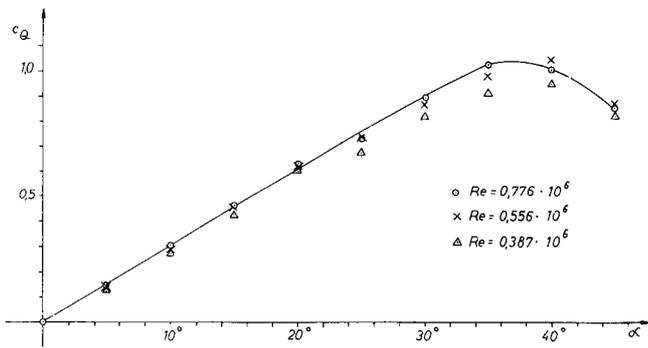


Bild 10 Auftriebsbeiwerte mit Absaugung. An der Nase sind vier Lochreihen geöffnet. Die Hinterkante entspricht dem Modellzustand Bild 1a B

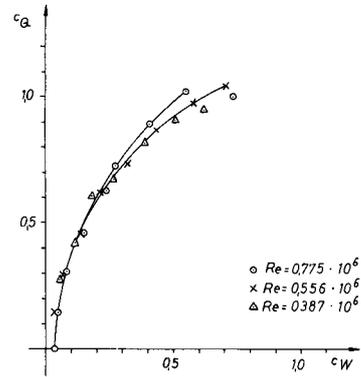


Bild 12 Polare mit Absaugung. Modellzustand wie in Bild 10

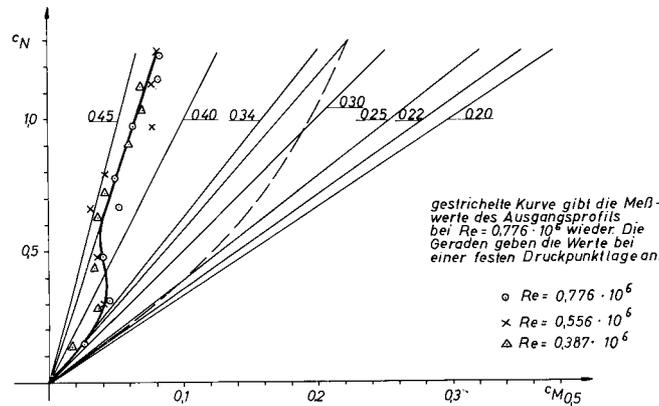


Bild 11 Beiwertkurve der Normalkraft c_N und des auf die Mitte bezogenen Momentes $c_{M_{0,5}}$ mit Absaugung. Modellzustand wie in Bild 10

Messung IV. Statt der vier Lochreihen der Absaugung ist an der Hinterkante ein etwa 6 mm breiter Schlitz angebracht worden. Die Modellanase ist wie bei der Messung III geblieben. Der maximale Querkraftbeiwert wird bei einem Anstellwinkel von etwa 35° erreicht. $c_{Q_{\max}} = 1,12$ liegt etwas höher als bei Messung III $c_{Q_{\max}} = 1,04$. Die Meßwerte sind in Tabelle 5 zusammengestellt. In Bild 14, 15, 16 und 17 sind die Meßwerte graphisch wiedergegeben.

5. Beeinflussung der Rudereigenschaften durch die zusätzliche Umströmung der Saug- und Druckseite des Profils

Unter gewissen Umständen ist es möglich, die Ablösung der Grenzschicht und die damit verbundene Wirbelbildung hinter einem umströmten Körper zu vermindern. Es gelingt, die Ablösung durch eine geeignete Formgebung zu verzögern.

Tabelle 4

Meßwerte mit selbsttätiger Absaugung
Modellzustand 6

Re = 0,77 · 10 ⁶							
α°	C_W	C_Q	$-C_{M_{0,25}}$	$C_{M_{0,5}}$	$-C_{M_0}$	C_n	$\frac{e}{l}$
0	0,032	0	0	0,026	0,047	0	0
5	0,047	0,147	0,009	0,045	0,111	0,149	0,31
10	0,082	0,304	0,033	0,041	0,198	0,313	0,35
15	0,149	0,460	0,078	0,052	0,282	0,669	0,42
20	0,234	0,625	0,115	0,049	0,337	0,773	0,43
25	0,277	0,725	0,144	0,063	0,423	0,972	0,43
30	0,405	0,890	0,182	0,082	0,494	1,150	0,43
35	0,550	1,020	0,206	0,083	0,537	1,240	0,43
40	0,735	1,000	0,227	0,061	0,489	1,100	0,44
45	0,710	0,843	0,214				

Re = 0,56 · 10 ⁶							
α°	C_W	C_Q	$-C_{M_{0,25}}$	$C_{M_{0,5}}$	$-C_{M_0}$	C_n	$\frac{e}{l}$
0	0,030	0	0	0,024	0,050	0	0
5	0,033	0,146	0,013	0,041	0,109	0,300	0,36
10	0,067	0,293	0,034	0,036	0,190	0,473	0,40
15	0,135	0,455	0,082	0,032	0,294	0,653	0,45
20	0,209	0,620	0,131	0,043	0,349	0,787	0,44
25	0,321	0,731	0,153	0,078	0,406	0,969	0,42
30	0,438	0,864	0,164	0,077	0,487	1,130	0,43
35	0,578	0,975	0,205	0,082	0,542	1,250	0,43
40	0,708	1,040	0,230	0,072	0,482	1,110	0,43
45	0,708	0,864	0,205				

Re = 0,39 · 10 ⁶							
α°	C_W	C_Q	$-C_{M_{0,25}}$	$C_{M_{0,5}}$	$-C_{M_0}$	C_n	$\frac{e}{l}$
0	0	0	0	0,017	0,057	0	0
5	0,056	0,276	0,034	0,036	0,104	0,282	0,37
10	0,113	0,425	0,075	0,034	0,164	0,439	0,38
15	0,182	0,605	0,119	0,036	0,276	0,629	0,44
20	0,265	0,674	0,139	0,042	0,320	0,722	0,44
25	0,391	0,815	0,166	0,059	0,391	0,901	0,43
30	0,508	0,907	0,187	0,070	0,444	1,030	0,43
35	0,620	0,945	0,211	0,069	0,491	1,120	0,44
40	0,610	0,815	0,197	0,055	0,449	1,010	0,44
45							

Tabelle 5

Meßwerte mit Absaugung. Die Hinterkante des Profils ist mit einem Schlitz versehen; Bild 1a D.

Re = 0,77 · 10 ⁶								
α°	C_W	C_Q	$-C_{M_{0,25}}$	$C_{M_{0,5}}$	$-C_{M_0}$	C_n	$\frac{e}{l}$	
0	0,031	0	0	0	0	0	0	
5	0,048	0,165	0,012	0,030	0,054	0,169	0,32	
10	0,082	0,320	0,033	0,049	0,115	0,329	0,35	
15	0,149	0,493	0,082	0,046	0,210	0,512	0,41	
20	0,192	0,635	0,144	0,022	0,310	0,663	0,47	
25	0,294	0,795	0,183	0,028	0,394	0,844	0,46	
30	0,431	0,957	0,215	0,045	0,475	1,040	0,45	
35	0,572	1,120	0,244	0,068	0,556	1,250	0,45	
40	0,792	1,100	0,272	0,069	0,609	1,350	0,45	
45	0,846	1,09	0,280	0,062	0,622	1,370	0,45	

Re = 0,56 · 10 ⁶								
α°	C_W	C_Q	$-C_{M_{0,25}}$	$C_{M_{0,5}}$	$-C_{M_0}$	C_n	$\frac{e}{l}$	
0	0,034	0	0	0	0	0	0	
5	0,034	0,146	0,012	0,025	0,049	0,147	0,33	
10	0,067	0,302	0,033	0,044	0,113	0,309	0,37	
15	0,134	0,472	0,082	0,040	0,204	0,490	0,42	
20	0,219	0,650	0,138	0,035	0,284	0,685	0,41	
25	0,403	0,792	0,169	0,053	0,391	0,887	0,44	
30	0,471	0,950	0,197	0,048	0,462	1,060	0,44	
35	0,640	1,070	0,230	0,080	0,540	1,240	0,44	
40	0,776	1,120	0,255	0,082	0,592	1,350	0,44	
45	0,810	0,975	0,248	0,067	0,563	1,260	0,44	

Re = 0,39 · 10 ⁶								
α°	C_W	C_Q	$-C_{M_{0,25}}$	$C_{M_{0,5}}$	$-C_{M_0}$	C_n	$\frac{e}{l}$	
0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0,142	0,142	0,017	0,018	0,052	0,142	0,36	
10	0,048	0,303	0,037	0,040	0,114	0,306	0,37	
15	0,119	0,460	0,068	0,050	0,186	0,475	0,39	
20	0,196	0,640	0,143	0,025	0,311	0,674	0,46	
25	0,300	0,743	0,170	0,032	0,372	0,807	0,46	
30	0,430	0,910	0,186	0,063	0,435	0,999	0,44	
35	0,552	1,010	0,221	0,067	0,509	1,150	0,44	
40	0,719	1,080	0,245	0,080	0,570	1,300	0,44	
45	0,685	0,945	0,235	0,053	0,523	1,150	0,45	

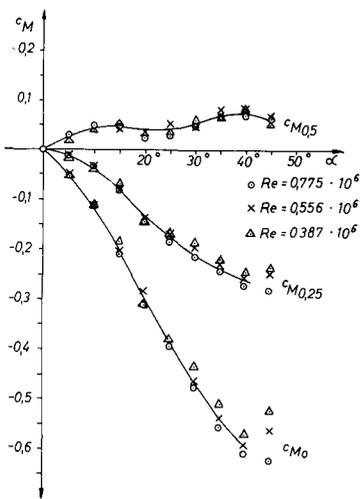


Bild 13
Momentenbeiwertkurve
mit Absaugung.
Modellzustand
wie in Bild 10

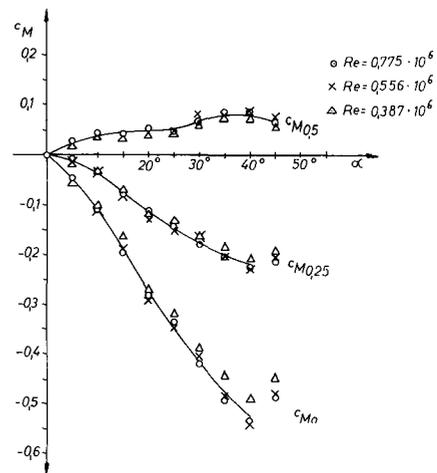


Bild 17 Momentenbeiwerte. Modellzustand wie in Bild 14

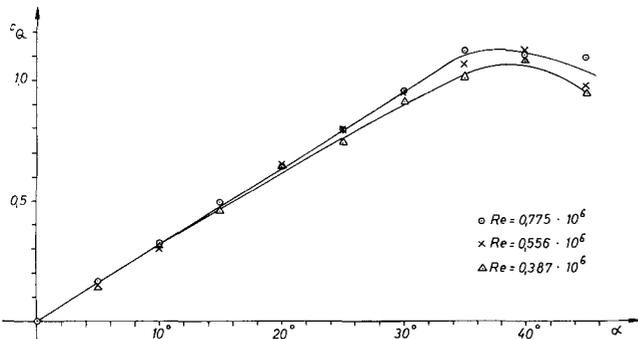


Bild 14 Auftriebsbeiwerte des Profils mit Absaugung. An der Nase sind vier Lochreihen geöffnet. Die Hinterkante entspricht dem Zustand Bild 1a D

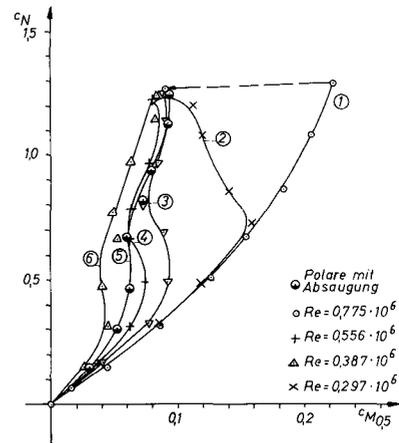


Bild 18 Zusammenstellung der auf die Mitte bezogenen Momentenbeiwerte bei verschiedenen Modellzuständen.

Kurve (1) = Ausgangsprofil; Kurve 2 = Eine Lochreihe an der Profilnase geöffnet, Hinterkante geschlossen; Kurve (3), (4), (5), (6) = Hinterkante entspricht Ausführung in Bild 1a B; Bei (3) sind an der Profilnase eine, bei (4) zwei, bei (5) drei und bei (6) vier Lochreihen geöffnet

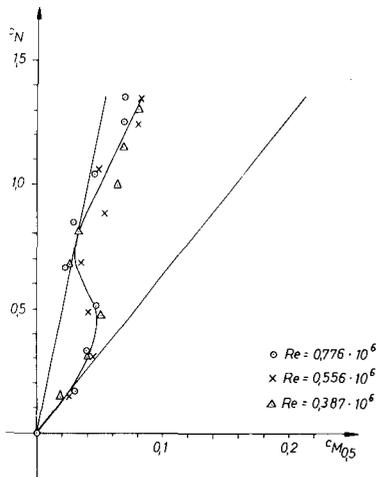


Bild 15 Beiwertkurve der Normalkraft und des auf die Mitte bezogenen Momentes mit Absaugung. Die Geraden geben die Werte einer festen Druckpunktlage an. Modellzustand wie in Bild 14

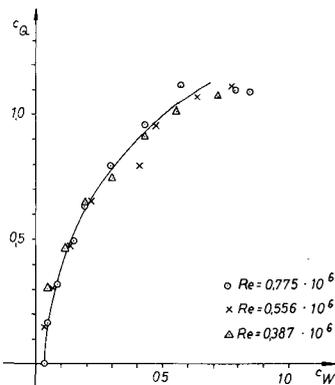


Bild 16
Die Polare mit
Absaugung.
Modellzustand
wie in Bild 14

Auch bei Rotationskörpern, wie Zylinder oder Kugel, kann man die Ablösung einigermaßen durch eine Fremdabsaugung herabsetzen. Dieser Kunstgriff ist zuerst von L. Prandtl angegeben worden [7], [8]. Experimentelle Untersuchungen sind von J. Ackeret [9] durchgeführt worden. Geraume Zeit später ist das Problem wieder von B. Regenscheit aufgegriffen worden. B. Regenscheit hat als erster erkannt, daß zur Förderung der Absaugluft Flügelstellen tieferen Druckes, z. B. Flügel Nase, Flügelenden oder sonstige Widerstandsstellen des Flugzeuges wie Motorgondel, Kühler usw., benutzt werden können, wenn man den Absaugeschlitz mit diesen Stellen verbindet [10], [11], [12].

In einer experimentellen Arbeit von Regenscheit wurde der durch den Randwirbel verursachte Unterdruck am Flügelende zur Absaugung benutzt. Zur Förderung der Absaugeluft wurden am Flügelende Randkappen angebracht. Es wurde experimentell geprüft, ob durch die Absaugung der Auftrieb eines symmetrischen Profils verändert werden kann. Die offene Hinterkante des Profils ist durch eine Zunge in zwei gleiche Hälften geteilt worden (Bild 19). Zur Erzielung eines variablen Auftriebs wird die Absaugung durch die eine oder andere Schlitzhälfte vorgenommen. Die Stärke der Absaugung läßt sich durch die Schließklappe nach Belieben einstellen.

Eines der praktischen Ziele war, das Steuermoment eines Ruders durch eine einstellbare Absaugung bei einem festen Anstellwinkel zu verändern.

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob durch eine zusätzliche Umströmung, die Rudereigenschaften, besonders die Lage des Druckpunktes, entscheidend zu beeinflussen sind. Auf der Saugseite besteht ein Druckunterschied zwischen der Nase und der Hinterkante. An der Nase herrscht ein Unterdruck im Vergleich zu der Profilhinterkante. Bei geöffneten Absaugeöffnungen entsteht eine zusätzliche Umströmung (Bild 20). Es ist zu erwarten, daß durch die entstehende Umströmung die steile Unterdruckspitze an der Profilnase sowie auch die Druckzunahme nach der Hinterkante zu wesentlich abgeflacht wird.

Tabelle 6

Meßwerte bei unterschiedlichen Modellzuständen

Re = 0,77 · 10⁶

α°	Modellzustand 3						$\frac{e}{l}$
	C _W	C _Q	-C _{M0,25}	C _{M0,5}	-C _{M0}	C _n	
0	0,030	0				0	
5	0,040	0,165	0,002	0,040	0,043	0,167	0,26
10	0,070	0,320	0,004	0,077	0,085	0,324	0,26
15	0,140	0,470	0,031	0,092	0,154	0,490	0,31
20	0,234	0,644	0,083	0,088	0,254	0,685	0,37
25	0,286	0,745	0,127	0,072	0,326	0,795	0,41
30	0,415	0,875	0,157	0,084	0,398	0,964	0,41
35	0,550	1,010	0,194	0,091	0,479	1,140	0,42
40	0,745	1,010	0,225	0,087	0,537	1,250	0,43
45	0,745	0,843	0,207	0,073	0,487	1,120	0,43

α°	Modellzustand 4						$\frac{e}{l}$
	C _W	C _Q	-C _{M0,25}	C _{M0,5}	-C _{M0}	C _n	
0		0					
5	0,040	0,164	0,005	0,036	0,046	0,166	0,28
10	0,082	0,304	0,016	0,062	0,094	0,313	0,30
15	0,149	0,470	0,049	0,074	0,172	0,492	0,35
20	0,238	0,617	0,103	0,062	0,268	0,661	0,40
25	0,277	0,734	0,132	0,063	0,327	0,781	0,42
30	0,414	0,882	0,165	0,077	0,407	0,967	0,42
35	0,550	1,010	0,198	0,086	0,482	1,140	0,42
40	0,720	1,010	0,227	0,081	0,531	1,230	0,43

α°	Modellzustand 5						$\frac{e}{l}$
	C _W	C _Q	-C _{M0,25}	C _{M0,5}	-C _{M0}	C _n	
0	0,040	0					
5	0,047	0,147	0,007	0,030	0,045	0,150	0,30
10	0,090	0,298	0,025	0,051	0,101	0,305	0,33
15	0,204	0,443	0,058	0,062	0,178	0,479	0,37
20	0,242	0,615	0,107	0,060	0,274	0,671	0,41
25	0,285	0,770	0,132	0,072	0,336	0,818	0,41
30	0,395	0,860	0,157	0,079	0,396	0,942	0,41
35	0,542	1,000	0,190	0,092	0,472	1,130	0,42
40	0,740	1,010	0,219	0,093	0,531	1,250	0,42
45	0,719	0,860	0,206	0,074	0,486	1,120	0,43

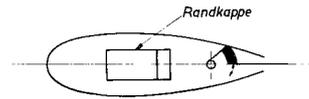
Auf der Druckseite des Profils herrscht an dem Nasenteil ein Überdruck. Durch die Öffnungen kann ebenfalls eine zusätzliche Umströmung auf der Druckseite entstehen. Da die Umströmung auf der Saug- und Druckseite entlang der Oberfläche mit der Zirkulationsströmung übereinstimmt, ist nach diesem Verfahren kaum mit einem wesentlichen Auftriebsverlust zu rechnen. Durch die Absaugung der Grenzschicht wird die Wirbelbildung und Ablösung der Strömung vermindert. Der Profilwiderstand, wie Regenscheid das nachgewiesen hat, nimmt bei der selbsttätigen Absaugung, besonders bei hohen Auftriebszahlen, merklich ab.

Durch die Umströmung wird eine Flüssigkeitsmenge um das Profil in Bewegung gehalten. Ist die Energie, die diese Bewegung aufrecht erhält, kleiner als die Energie, die zur Bildung der Ablösungswirbel aufgewendet wird, so wird erwartungsgemäß der Profilwiderstand kleiner als der Widerstand ohne Umströmung.

Als Folge des Druckausgleichs durch die zusätzliche Umströmung dürfte zu erwarten sein, daß der Druckpunkt zu

der Profilmittte hin versetzt wird. Den durchgeführten Messungen kann man entnehmen, daß dies tatsächlich der Fall ist.

In Bild 18 ist der Momentenbeiwert c_{M0,5} als Funktion des Beiwertes der Normalkraft c_N nochmals aufgetragen. Alle Kurven sind bei einer Reynolds'schen Zahl aufgenommen worden. Die Randkurve (1) gibt die Momentenbeiwerte c_{M0,5} des Vergleichsprofils wieder. Die Kurve (2) zeigt den Beiwertsverlauf mit geöffneten Absaugeöffnungen an der Nase ohne



Absaugeruder von B. Regenscheid

Bild 19 Absaugeruder von B. Regenscheid



Die durch den Druckunterschied bewirkte Umströmung stimmt mit der Zirkulation überein.

Bild 20 Die durch den Druckunterschied bewirkte Umströmung stimmt mit der Zirkulation überein

Umströmung. Nach Einsetzen der Umströmung (3) erkennt man die Verlagerung des Druckpunktes auch bei kleinem c_N. Durch Öffnen weiterer Lochreihen ist die Umströmung ständig erhöht worden (4), (5) bis schließlich sämtliche Lochreihen geöffnet waren (6).

In Bild 11 ist der Verlauf von c_{M0,5} mit Absaugung bei drei Windgeschwindigkeiten aufgetragen. Zum besseren Vergleich sind die Meßwerte des Ausgangsprofils nochmals wiedergegeben. Der Momentenverlauf mit Absaugung ist bei allen Windgeschwindigkeiten etwa gleich. Die leicht ausgezogenen Geraden geben die Beiwerte von c_N und c_{M0,5} bei einer festen Lage des Druckpunktes

$$\frac{e}{L} = 0,5 - \frac{c_{M0,5}}{c_N} \quad (5)$$

wieder. Bezeichnet man die Lage des Ruderschafts mit $a = \frac{l}{L}$, wobei l die Entfernung von der Profilnase bis zur

Schaftachse bedeuten, so ist der zugehörige Momentenbeiwert durch die Beziehung

$$c_{M_a} = c_{M0,5} + c_N (a - 0,5) \quad (6)$$

gegeben. Zum Vergleich wurden die Momentenbeiwerte in der Nähe der Ablösung der Strömung mit und ohne Absaugung gegenübergestellt. Bei kleinem c_N soll sich der Ruderschaft in beiden Fällen im Druckpunkt befinden. Ohne Absaugung ist a = 0,22, mit Absaugung a = 0,34. Aus (6) ergibt sich, daß ohne Absaugung

$$c_{M0,22} = c_{M0,5} - 0,28 \cdot c_N$$

und mit Absaugung

$$c_{M0,34} = c_{M0,5} - 0,16 \cdot c_N$$

beträgt. In der Nähe der Ablösung der Strömung ist c_N etwa 1,15. Bei diesem c_N-Betrag entnimmt man aus Bild 11 die Werte für c_{M0,5} ohne Absaugung 0,22 und mit Absaugung 0,082. Setzt man die Werte ein, so findet man, daß

$$c_{M0,22} = -0,130 \text{ und } c_{M0,34} = -0,115$$

betragen. Nach Ablösung der Strömung verbleibt der Druckpunkt mit Absaugung etwa in der gleichen Lage. Ohne Ab-

saugung erfolgt dagegen eine sprunghafte Verlagerung zur Mitte hin. Vergleicht man die Momentenbeiwerte nach der Ablösung, so ergibt sich für Ruder ohne Absaugung $c_{M0,22} \approx -0,260$ und mit Absaugung $c_{M0,34} \approx -0,140$.

Bei Queranströmung, wie das etwa beim Seegang der Fall ist, beträgt c_N etwa 1,2. Da der Druckpunkt etwa in der Profilmitte liegt, kann man $c_{M0,5} = 0$ setzen. Für die genannten Momentenbeiwerte findet man den Betrag $c_{M0,22} \approx -0,336$ und $c_{M0,34} \approx -0,192$. In Bild 21 sind die Momentenbeiwerte

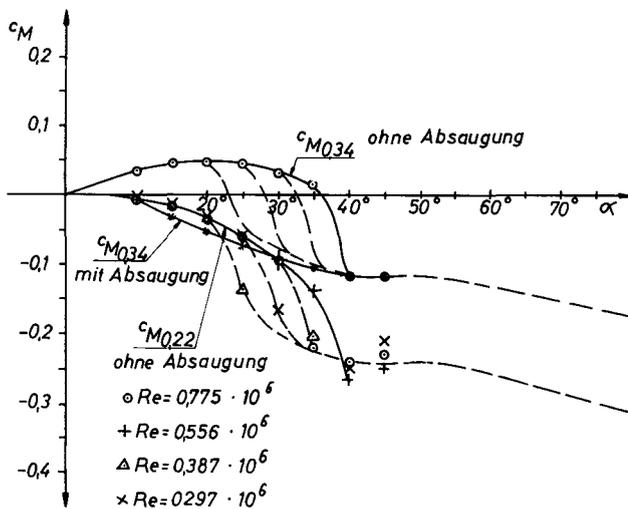


Bild 21 Zum Vergleich sind die Momentenbeiwerte des Ruders als Funktion der Anstellwinkel bei der Schaftlage von $\frac{a}{L} = 0,34$ und $\frac{a}{L} = 0,22$ mit und ohne Absaugung gegenübergestellt. Der gestrichelt aufgetragene Teil der Kurve gibt den Momentenverlauf bei kleinen Reynoldsen Zahlen ohne Absaugung wieder

mit und ohne Absaugung bei einer Schaftlage von $\frac{a}{L} = 0,22$

und $\frac{a}{L} = 0,34$ aufgetragen. Die Beeinflussung der Momenten-

werte durch die selbsttätige Absaugung ist deutlich zu erkennen. In dem Anstellwinkelbereich $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ sind die Momentenbeiwerte bei der Schaftlage $a/L = 0,34$ mit der Absaugung etwas größer als bei der Schaftlage $a/L = 0,22$ ohne Absaugung. Bei einem Anstellwinkel von ca. 40° und eben erwähnter Schaftlage ist der Momentenbeiwert mit Absaugung etwa halb so groß, wie der ohne Absaugung.

6. Zusammenfassung

Es wurden Vergleichsmessungen an einem Profilruder mit dem Seitenverhältnis $\Lambda = 1$ mit und ohne Absaugung durchgeführt. Die an der Hinterkante abgesaugte Luft gelangte durch die Öffnung an der Vorderkante wieder in das Strömungsfeld, so daß eine Flüssigkeitsmenge in einem Profilbereich zusätzlich in Bewegung gehalten wurde. Die Reynolds-

sche Zahl betrug $0,29 \cdot 10^6$ bis $0,78 \cdot 10^6$. Es wurde gezeigt, daß durch die selbsttätige Absaugung der Druckpunkt im ganzen Anstellwinkelbereich stark nach der Mitte hin verlegt wird. Ohne Absaugung war eine sprunghafte Verlagerung des Druckpunkts, die bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten unterschiedlich ausfiel, zu verzeichnen. Mit der Absaugung war, bei einer steigenden Windgeschwindigkeit, kaum eine Abweichung im Druckpunktverlauf vorhanden.

Bei größeren Windgeschwindigkeiten ist der Profilwiderstand ohne Absaugung kleiner als der mit Absaugung. Bei kleineren Reynolds-Zahlen trat ohne Absaugung ein Strömungsumschlag auf, bevor die Ablösung erfolgte. In diesem Bereich ist die Polare des Profils mit Absaugung besser als ohne Absaugung.

Der maximale Auftriebsbeiwert wurde durch die Absaugung nur geringfügig verringert. Den Meßergebnissen kann man entnehmen, daß durch die selbsttätige Absaugung die Ruder-eigenschaften entscheidend beeinflußt werden, was für die zukünftige Ruderkonstruktion von Bedeutung sein könnte.

Die Arbeit wurde im Institut für Schiffbau der Universität Hamburg mit Unterstützung des Bundesverkehrsministeriums durchgeführt. Prof. Dr.-Ing. G. Weinblum danke ich für die entgegengebrachte Unterstützung und für die Diskussionen, die während der Arbeit geführt wurden. Dipl.-Ing. H. Thieme möchte ich an dieser Stelle für die geführten Diskussionen meinen Dank aussprechen. Herrn H. Böhme und Ing. H. Thiemann habe ich für die Durchführung der Messungen zu danken.

(Eingegangen am 2. März 1960)

Schrifttum

- [1] K. Wieg h a r d t: Der Windkanal des Instituts für Schiffbau der Universität Hamburg. Schiff und Hafen 1955, S. 81.
- [2] H. Thieme: HSVA-Bericht.
- [3] E. Baillitis: Beeinflussung des Rudermomentes durch selbsttätige Zusatzzirkulation. IFS-Bericht Nr. 58, 1958.
- [4] N. Barnaby: On the Steering of Ships. TINA 4, 1863, Seite 56.
- [5] C. Boie: Die Schiffstechnik im Jahre 1959. „Hansa“ 97, 1960, S. 26.
- [6] Das Mello-Ruder. „Hansa“ 96, 1959, S. 2396.
- [7] L. Prandtl: Über Wirbelablösung und deren Verhinderung. AVG III, 1935, S. 6.
- [8] C. Schaefer: Einführung in die theoretische Physik. I. Teil, 1950, S. 969.
- [9] J. Ackeret: Grenzschichtabsaugung. VDI 70, 1926, S. 1153.
- [10] B. Regenscheit: Versuche über eine neue strömungstechnische Steuerung. UM 3104, FB 1673.
- [11] B. Regenscheit: Versuche an einem Flügel mit einer Klappe geringer Tiefe und selbsttätiger Absaugung. UM 3053.
- [12] B. Regenscheit: Versuche zur Verringerung des Tragflügelwiderstandes durch selbsttätige Absaugung. FB 1673.