IX. *Optische Untersuchung der Luftstrahlen; von E. Mach und P. Salcher.*

(Aus den Sitzungsber. d. kais. Acad. d. Wiss. in Wien. Math.-naturw. Classe; Bd. 98. Abth. II vom 7. Nov. 1887; mitgetheilt von den Herren Verfassern.)

(Hierzu Taf. III Fig. 7–15.)

Bei Gelegenheit der Versuche über Projectile¹⁾ verfiel Salcher auf den Gedanken, den umgekehrten Fall der Luftströmung gegen einen feststehenden Körper ebenfalls experimentell zu untersuchen, um so zunächst die gewonnenen Resultate zu bestätigen. Die Möglichkeit, solche Versuche auszuführen, ergab sich durch das freundliche Entgegenkommen des Hrn. John Whitehead, der in der Torpedofabrik zu Fiume Raum und Material für die Experimente zur Verfügung stellte. Die Untersuchung gründete sich wieder auf die Schlierenmethode, nach welcher eine grosse Zahl von Versuchen ausgeführt und photographisch fixirt wurde.

Ogleich nun die Versuche, die mit in den Luftstrahl eingebrachten Körpern angestellt wurden, wegen des geringen Strahlquerschnittes nicht als vollständige Umkehrungen der Projectilversuche angesehen werden durften, und obgleich dieselben nur zeigten, dass der Strahl den entgegengestellten Cylindern und Platten ausweicht, sich an denselben theilt, sonst aber sein gewöhnliches Aussehen beibehält,²⁾ so war doch dieses letztere so merkwürdig, dass der Strahl an sich einer eingehenden Untersuchung werth erschien. Der Strahl zeigte sich als ein von verschiedenen geraden und krummen Linien (Schlieren) durchzogenes Gebilde, dessen Aussehen von der Form der Mündung und dem Druck im Luftbehälter abhängig war. In einem von Mach erstatteten vorläufigen

1) Photographische Fixirung der durch Projectile in der Luft eingeleiteten Vorgänge. Wien. Sitzungsber. 95. II. Abth. p. 764. 1887.

2) Wenn der Strahl genügenden Querschnitt hat, entsteht übrigens an den eingebrachten fixirten Körpern in der That ein Analogon der Kopfwelle.

Berichte¹⁾ wurden diese eigenthümlichen Gebilde als stationäre Schallwellen bezeichnet.

Da es sich zeigte, dass die von Salcher gewonnenen Versuchsergebnisse zu vor längerer Zeit von Mach angestellten Versuchen in einer gewissen Beziehung standen, und da ferner nicht alle wünschenswerthen Versuchsanordnungen in dem Fabrikraum in Fiume hergestellt werden konnten, so vereinigten wir uns abermals und E. Mach führte noch in Verbindung mit med. stud. Ludwig Mach, dem hierbei alle technischen Arbeiten zufielen, eine Reihe von Versuchen in Prag aus.²⁾

Als Luftbehälter diente bei Salcher's Versuchen ein Stahlkessel, wie derselbe schon bei den Versuchen von Salcher und Whitehead³⁾ benützt worden war. Mach verwendete die in Anm. 2 dieser Seite erwähnte Flasche.

Die verwendeten Mundstücke waren von der Form, welche Salcher und Whitehead in Fig. 2 ihrer Arbeit

1) Academ. Anz. Nr. 19. p. 221. 1887.

2) Wegen der Kleinheit der Flasche für die comprimirte Luft, von ungefähr 1 l Inhalt, die Mach zur Verfügung stand, war das Experimentiren etwas umständlich. Die Flasche entleerte sich in 3—5 Secunden, je nach der Grösse der Oeffnung, und musste wieder von neuem vollgepumpt werden, was ungefähr 10 Minuten Zeit kostete. Da ferner Druck und Ausströmungsgeschwindigkeit rasch abnahm, musste der zum Bilde gehörige Druck durch einen besonderen Kunstgriff gewonnen werden. Die Scala des Manometers wurde schwarz auf einen Spiegel copirt und die Copie an die Stelle der Originalscala gesetzt. Wurde nun vor dem Zifferblatt des Manometers eine grosse Sammellinse befestigt, ein Theil f' des Beobachtungsfunkens f so geführt und das Objectiv O eines photographischen Apparates so gestellt, dass f' und O conjugirte Brennpunkte des erwähnten dioptrisch-katoptrischen Systems waren, so fixirte sich das Zifferblatt mit der Zeigerstellung vorzüglich photographisch. Daneben wurde natürlich das Strahlbild von einem zweiten Apparat aufgenommen.

Als Kopf des Schlierenapparates verwendete Mach, da ein genügend grosses Objectiv von hinreichend kurzer Brennweite nicht vorhanden war, einen sphärischen Glassilberspiegel von 16 cm Oeffnung von K. Fritsch in Wien. Zur Vermeidung von Doppelbildern der Schliere musste man sich allerdings darauf beschränken, nur ungefähr die Hälfte der Oeffnung auszunützen.

3) Salcher u. Whitehead, Wien. Sitzungsber. 98. Abth. II. p. 267. 1889.

Ann. d. Phys. u. Chem. N. F. XLl.

dargestellt haben. Es wurden runde Oeffnungen von 1,2 mm bis 5,1 mm Durchmesser, eine quadratische Oeffnung von 2 mm und eine rechteckige von 1×10 mm angewendet. Salcher verwendete Drucke bis zu 60, Mach bis zu 70 Atmosphären. Bei $\frac{1}{2}$ bis 1 Atmosphäre waren die Schlieren kaum merklich.

Zur Beobachtung wurde dieselbe Aufstellung benützt, wie bei den Projectilen.¹⁾ Mach beobachtete auch den von einer sehr kleinen hellen Lichtquelle (Sonnenlicht oder elektrischem Licht) auf einen Schirm geworfenen Schatten des Strahles (Dwořak's Verfahren), und Salcher betrachtete den Strahl zeitweilig direct, indem er durch den Strahl gegen einen zu demselben parallelen Fensterrand blickte.

Als Lichtquelle dienten Flaschenfunken, das Magnesiumblitzlicht und bei Mach's Versuchen, wenn die Dauer des Funkens vergrößert werden sollte, auch das Licht einer Geissler'schen Röhre (N), durch welche die Entladung zweier grosser Flaschen (7000 cm Capacität) geleitet wurde, die ausserdem noch die secundäre Spule eines Stöhrer'schen Funkeninductors passirte.

Die Erscheinungen am Strahl sind so complicirt, dass wir uns hier zunächst nur mit der Erklärung der auffallendsten Vorkommnisse beschäftigen können und die vollständige Interpretation der Strahlbilder einer späteren Zeit überlassen müssen.

Die Strömung ist nicht vollständig stationär, was sich schon aus dem mächtigen Sausen des Strahles ergibt. Wählt man eine Beleuchtung von kurzer Dauer, z. B. Flaschenfunken, so sieht man ohne weiteres die von der Oeffnung ausgehenden Schallwellen, welche dem Sausen entsprechen. Man sieht ferner die ganze Oberfläche des Strahles mit Wirbeln bedeckt, welche den Strahl im Verlauf allmählich vollständig aufzehren und schliesslich zu einer pilzförmigen Masse durch den Luftwiderstand zusammengedrückt werden. Innerhalb des Strahles, in der Wirbelhülle, bemerkt man noch Andeutungen von Zickzacklinien, die von der stationären Strömung im Strahl herrühren und welche namentlich

1) Vgl. die sub 1 citirte Arbeit.

bei stärkerer Blendung vor dem Kopf des Schlierenapparates deutlicher hervortreten. Im allgemeinen ist bei Funkenbeleuchtung das Dauerbild durch das Momentbild überdeckt. Vergrössert man allmählich die Dauer der Beleuchtung, so wird das Momentbild wegen der raschen Bewegung der Wirbel und Schallwellen verwischt und der stationäre Theil des Strahles tritt deutlich hervor. Am besten zeigte sich der letztere bei Anwendung der erwähnten Geissler'schen Röhre, deren Licht auch einen sehr guten photographischen Effect gab.

Der Querschnitt eines Strahles, welcher aus einer runden Oeffnung tritt, wächst im Verlauf des Strahles zunächst sehr rasch und bleibt dann fast constant, sodass der fernere Theil des Strahles im Ganzen den Eindruck eines Cylinders macht. Sieht man genauer zu und rechnet die Wirbel mit, welche sich an der Oberfläche des Strahles bilden, so nimmt der Querschnitt bis zur pilzförmigen Ausbreitung allmählich zu, hingegen ab, wenn man den stationären von Zickzacklinien durchzogenen Theil ins Auge fasst. Man ist also berechtigt, zu sagen, dass der ruhige Theil des Strahles durch den wirbelnden aufgezehrt wird.

Die Querschnittsvergrößerung des Strahles beim Austritt aus der Oeffnung lehrt, dass der Druck in der Oeffnung noch beträchtlich grösser ist, als der äussere Luftdruck. Nach dem Austritt muss aber der Druck im Strahl sehr nahe dem Luftdruck entsprechen. Da die Ausdehnungsarbeit der ausströmenden Luft auf Kosten des eigenen Wärmeinhaltes stattfindet, ist die Temperatur im Strahl eine sehr niedere (nach Schätzung von Mach auf Grund von Versuchen mit einem Thermoelement bis 100° C. unter jener der Umgebung). Der Strahl ist infolge dessen dichter als die umgebende Luft, was sich auch aus dem Schlierenbild bei zur Axe des Strahles parallelem Blendungsrande ergibt.

Die Zickzacklinien, welche den Strahl durchziehend von dem Oeffnungsrande ausgehen, sind conische, der Kopfwelle des Projectils analoge Verdichtungswellen.¹⁾ Durch Com-

1) Vgl. Mach, l. c. p. 1303. Anm. 2.

bination der Schallgeschwindigkeit mit der Stromgeschwindigkeit nehmen dieselben eine feste Lage an, weshalb wir sie stationäre Wellen nennen. Wenn α der Winkel einer solchen Linie (Seite der Kegelfläche) mit der Axe des Strahles, v die Schallgeschwindigkeit, w die Strahlgeschwindigkeit ist, so besteht wie bei der Kopfwelle des Projectils die Gleichung $v/w = \sin \alpha$. Man entnimmt aus den Bildern, dass die Stromgeschwindigkeit im Anfange des Strahles bei hohem Drucke ein Vielfaches der Schallgeschwindigkeit ist, und dass die erstere im Verlaufe des Strahles allmählich abnimmt.

Die Knickungen der Wellencontouren an der Strahlengrenze sind als Reflexionen zu deuten. Da der Strahl dichter ist als die umgebende Luft, wären solche Reflexionen nicht eben auffallend, wenn nicht zwei Umstände doch Bedenken erregen würden. Man sieht erstens keine Fortsetzung der Wellen in das umgebende Medium, und die Reflexion findet ohne Umkehrung der Verdichtung in eine Verdünnung statt, also so, als ob die Oberfläche des Strahles eine feste Röhre wäre. Dass man die Wellen nicht weit in das umgebende Medium verfolgen kann, wäre erklärlich, da die Wellen nicht mehr stationär sein können, wo die Stromgeschwindigkeit kleiner wird als die Wellengeschwindigkeit. Dass aber die Wellenfortsetzung gar nicht zu sehen ist, erfordert eine besondere Erklärung. Als totale Reflexion lässt sich der Vorgang nicht auffassen, einmal, weil die Incidenzwinkel zu klein sind, und dann, weil hierbei die Reflexion nicht wie an einer starren Wand stattfinden könnte.

Nimmt man an, dass die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Strahl und der denselben unmittelbar einschliessenden Luft sehr gross ist, so werden alle diese Eigenthümlichkeiten verständlich. Denken wir uns ein Medium *A*, der Einfachheit wegen ruhend, ferner ein zweites Medium *B*, welches sich gegen das erstere mit grosser Geschwindigkeit längs der gemeinsamen Grenzfläche verschiebt und versuchen wir unsere in *A* befindliche Hand über die Grenzfläche nach *B* zu bewegen, so wird dieselbe sofort niedergelegt. So kann auch die zur Grenzfläche senkrechte Excursionscomponente in das Medium *B* nicht eindringen, welches sich also analog einer festen Wand verhält. Es würde nicht besonders

schwierig sein, diese Bemerkung analytisch auszudrücken. Vielleicht ist es nicht überflüssig, zu bemerken, dass ein Luftstrahl von hoher Geschwindigkeit sich wirklich wie ein starrer Körper anfühlt, auch dem entgegengehaltenen Finger wie ein Stäbchen erscheint und wie ein solches einen sichtbaren Eindruck an demselben hervorbringt.

Um die Geschwindigkeitsverhältnisse in der den Strahl umgebenden Luft zu untersuchen, erregte Mach hart an dem Strahl eine Funkenwelle und liess die Momentbeleuchtung eintreten, nachdem die Welle ungefähr 2 cm Radius gewonnen hatte. Die Welle zeigt sich dann birnförmig einseitig in der Stromrichtung ausgezogen, sodass der dünnere Theil der Birne den Strahl eng umschliesst. Man kann aus dem Bilde schliessen, dass die Wirkung der Luftreibung in abnehmender Stärke sich weit über den Strahl hinaus erstreckt und dass die Luftgeschwindigkeit hart an dem Strahl ungefähr der Schallgeschwindigkeit entspricht. Die Differenz zwischen der Stromgeschwindigkeit des Strahles und jener der umgebenden Luft ist also wirklich noch sehr bedeutend und kann ein Vielfaches der Schallgeschwindigkeit sein. Bemerkenswerth ist, dass man die Funkenwelle nicht in den Strahl hinein verfolgen kann, wodurch die dargelegte Auffassung wesentlich gestützt wird.

Eigenthümliche Linien zeigen sich in der Erweiterung des Strahles beim Austritt, welche Erweiterung von Salcher als *Lyra* bezeichnet wird. Dass die Linien daselbst stark gekrümmt sind, wird durch die daselbst rasch variirende Geschwindigkeit der Luft senkrecht zur Strahlaxe wohl verständlich. Ueber-
 raschend ist es aber, dass man daselbst statt einfacher Durchschnitte dieser Linien wie in *a* Formen wie in *b* erhält. Uebrigens kann man auch in den ferneren Theilen des Strahles, in welchen die Linien sich unter stumpfen Winkeln durchschneiden, anstatt der Form *c* die Form *d* beobachten. Ohne alle Einzelheiten hier schon erklären zu wollen, sieht Mach in diesen Vorkommnissen ähnliche Vorgänge, wie diejenigen,

welche er vor Jahren an Schallwellen von grosser Excursion (Funkenwellen) beobachtet hat.¹⁾

Wir geben uns der Hoffnung hin, dass nach und nach alle an den Luftstrahlen beobachtbaren Einzelheiten sich als vollständig erklärbar erweisen werden.

1) Vgl. Mach, Wien. Ber. 77. p. 819. 1878 und Mach u. Gruss, Wien. Ber. 78. p. 467. 1878. E. u. L. Mach. Wien. Ber. 98. IIa. Abth. p. 1333. 1889.

Erklärung der Tafel.

Alle Strahlen gehen im Bilde von links nach rechts, in Wirklichkeit umgekehrt durch das Gesichtsfeld. Die Bilder der Tafel sind der Conformität wegen nach den Prager Versuchen hergestellt. Hierbei bedeutet: O_1 eine runde Oeffnung von 4,5 mm Durchmesser, O_2 eine Spalte 1 mm breit, 10 mm hoch, A den Atmosphärendruck, Br Blendung rechts, Bl Blendung links, Bu Blendung unten horizontal.

Fig. 7. O_1 , $A = 43$, Br — Fig. 8. O_1 , $A = 37$, Br —

Fig. 9. Strahl mit der Funkenwelle O_1 , $A = 45$, Bl —

Fig. 10. O_1 , $A = 43$, Bl — Fig. 11. O_1 , $A = 33$, Bl

Fig. 12. O_1 , $A = 36$, Bu

Fig. 13. O_1 , $A = 37,2$, Br — Fig. 14. O_2 , $A = 38$, Bl

Fig. 15. O_2 , $A = 37$, Br .

Die Figuren 7–9 sind durch Beleuchtung mit einfachen Flaschenfunken, 10–15 bei Anwendung der Geissler'schen Röhre (Stickstoff) gewonnen.

1

2

7

8

9

3

4

10

11

12

5

6

13

14

15

E. Mach und L. Mach, Fig. 1-6. E. Mach und Salcher, Fig. 7-15.