©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Die Struktur des Windes

(1. Mitteilung)

Von

Wilhelm Schmidt

korr. Mitglied d. Akad. d. Wiss.

(Mit 9 Textfiguren)

(Vorgelegt in der Sitzung am 7. März 1929)

Inhaltsangabe.

Um die gleichzeitige Windgeschwindigkeit an einer Reihe benachbarter Punkte zu erhalten, wurde zunächst eine neue Beobachtungsmethode ausgearbeitet, bei welcher leichte sich rasch richtig einstellende Druckplatten, die in größerer Anzahl nebeneinander angebracht sind, kinematographisch aufgenommen werden (I).

Verschiedene Beobachtungsreihen wurden auf diese Art gewonnen. Schon die erste, über Grasland, zeigte, daß die ungeordnete, turbulente Bewegung der Luft im Freien entgegen der wohl herrschenden Ansicht höchstens sehr selten eigentliche Wirbel aufweist (II, 1). Sie kommen überhaupt nicht vor bei jenen Luftströmungen, die abends und nachts unter dem Einfluß von örtlichen Temperaturunterschieden im Gelände entstehen; man könnte diese beinahe als schlichte, laminare, bezeichnen (II, 2).

Die späteren Aufnahmen betrafen im wesentlichen die räumliche und zeitliche Verteilung der Augenblicksgeschwindigkeiten an möglichst vielen Punkten einer quer zum Wind gestellten Front. So wurde der Einfluß der Unterlage am Ostufer des Neusiedler Sees untersucht: Luftströmungen, die über Wasser herankamen, »Seewind«, haben auch in jedem Augenblick eine mehr der mittleren angenäherte wagrechte Schichtung, während die über festem Boden herwehenden Landwinde auch sehr starke seitliche Unterschiede aufweisen (II, 3). Bestätigt wird das an Aufnahmen am Flugfeld Aspern: an zwei Stellen, die nur einige Meter voneinander abstanden, verhielten sich die Geschwindigkeiten mitunter wie 1 4 (II, 4). Besonders aufschlußreich waren die Aufnahmen über sehr stark verschieden rauhem Boden: Stoppelfeld gegenüber Rübenacker; doch traten selbst über diesem, so sehr die Luftströmung in den untersten Schichten gestört war, keine eigentlichen Wirbel auf (II, 5). Es konnte deutlich unterschieden werden zwischen den vom Boden aus angeregten Störungen (der turbulenten Grenzschicht der

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Theorie) und jenen, die offenbar in der Strömung selbst entstehend, von oben herabkommen (II, 6).

Aus dem Beobachtungsstoff läßt sich das Gesetz der Zunahme der Windgeschwindigkeit über dem Boden ableiten: alle Fälle, auch recht kurze Beobachtungsreihen, ordnen sich gut einer Potenzformel ein, doch hat der Exponent nie den theoretisch verlangten Wert $^1/_7$, sondern recht verschiedene, immer wesentlich größere, bis über $^1/_3$ ansteigend (II, 7).

Die neue Beobachtungsmethode hat sich durchaus für die Aufdeckung des Feinbaues des Windes bewährt. Weitere Versuche sollen diese Kenntnis vertiefen und sich insbesondere gegenüber den jetzt noch ziemlich beschränkten Ausdehnungen der Versuche (größte Front 10×10 *m*) auf größeren Bereich erstrecken (III).

I. Die neue Beobachtungsmethode.

Die Strömung der Luft im Freien ist in den allermeisten Fällen nicht als schlichte, laminare, sondern als ungeordnete, turbulente zu bezeichnen. Mit dieser Erkenntnis sind sofort die Schwierigkeiten bezeichnet, die einer einfachen Definition und Messung der Windgeschwindigkeit entgegenstehen, umgekehrt muß aber ein eingehendes Studium wesentliche Aufschlüsse liefern. Nicht allein in dem Gebiete der reinen Meteorologie, wo mit der Strömungsform, insbesondere den Querströmungen, auch der seitliche Massentransport, der Austausch, gegeben ist, mit allen seinen Folgerungen der scheinbaren Reibung, dem Transport von Wasserdampf, Wärme, Kohlensäure usw. von der Erdoberfläche weg — nein, auch in Fragen der allgemeinen Aero- und Hydrodynamik sind neue Aufschlüsse oder auch Fragestellungen zu erwarten. Beobachtungen bei Versuchen im Freien stehen zwar insofern denen im Versuchsraum ungünstig gegenüber, als sie die gegebenen Bedingungen annehmen müssen, sie nicht nach Belieben abändern können; anderseits aber sind die Abmessungen gleich um eine ganze Reihe von Größenordnungen hinaufgesetzt; was im Einzelversuch in Millimetern und Bruchteilen davon sich abspielt, findet sich im Freien vielleicht in Abständen von Metern, ist viel genauer und klarer zu studieren; man befindet sich da innerhalb der Strömung selbst. Endlich darf nicht der rein praktische Vorteil vergessen werden, den eine gute Kenntnis des Strömungszustandes bietet, nicht bloß in der oben angedeuteten Richtung über den Austausch, sondern auch für alle Belange, die mit einer Ausnutzung der Windkraft (Windmühlen, Segelschiffahrt) zu tun haben oder mit einer Benutzung der Luft als Transportmedium, also bei Luftschiffen und Flugzeugen.

Wie in so ziemlich allen Fällen lassen sich die Fragen auch hier nur schrittweise lösen. Die Richtung, die eingeschlagen wird, hängt natürlich auch von den möglichen Mitteln ab, man wird sich

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

von Anfang an nur auf eine Teilfrage beschränken können. Hier wurde zunächst das Studium der Schwankungen der Windgeschwindigkeit in der Strömungsrichtung in den Vordergrund gestellt, also das, was man etwa als »Böigkeit« bezeichnete beziehungsweise definierte. Vorversuche waren bei der allgemeinen Bedeutung des Problems in größerer Zahl vorhanden, ohne daß sie immer gerade wesentlichen Aufschluß gebracht hätten. Man wird da vor allem auf die Bemühungen der Engländer hinweisen, auf die Arbeiten von Barkow und Robitzsch, vor allem aber in bezug auf die Feinstruktur auf die Arbeiten von Magnan und Idrac, die vornehmlich vom Problem des Vogelfluges aus auf diese Fragen hingeführt wurden.

Man darf sich allerdings nicht der Erkenntnis verschließen, daß so gut wie alle in der meteorologischen Praxis gebrauchten Apparate ungeeignet sind, die wahre Windstruktur anzugeben, ja auch die sogenannten »Böenschreiber«, meist nur reine Kopien des Pressure-tube-Anemometers von W. H. Dines, genügen bei sachgemäßer Ausführung bloß bis zu Schwankungen von 20 bis 30 Sekunden Dauer herab; besonders feine Meßinstrumente, wie die von den beiden Letztgenannten gebrauchten, sind so umfangreich, daß sie eine Registrierung nur an einem, vielleicht an zwei Punkten gleichzeitig erlauben. Ganz wesentlich Neues ließe sich aber nur erwarten, wenn man die Bewegungsvorgänge gleichzeitig an einer Reihe von Punkten erfaßte, die etwa über- oder nebeneinander angeordnet wären.

Sollte an vielen Punkten gemessen werden, so brauchte man viele aufnehmende Teile; sie mußten also möglichst einfach sein. Eine absolute Gleichzeitigkeit der Ablesungen ließ sich dann schon leichter erreichen, wenn man zu Augenblicksphotographien, also für eine Reihe kleiner Zeitintervalle zu Laufbildaufnahmen (Kinoaufnahmen) griff. Für unsere Versuche verwandten wir als aufnehmenden Teil eine leichte Druckplatte, im Modell I*a* bestehend aus einem Reifen von 20 *cm* Durchmesser aus dünnem (2 *mm*) Messingdraht, siehe Fig. 1, der an zwei ebenso dicken gegeneinander versteiften Drähten so an einer kurzen wagrechten Achse befestigt war, daß sich von dieser bis zur Mitte des Kreises ein Abstand von 50 *cm* ergab. Die Achse wurde in ein einfaches Lager eingesprengt, so daß der Reif winkelrecht zu seiner Ebene pendelnd schwingen konnte. Dieser Reif war nun mit einem sehr feinen gleichmäßigen Tüllgewebe überzogen, das genug Widerstand bot, um eine volle Druckwirkung hervorzubringen, das aber einen merklichen Teil der Strömung noch durchließ. Das hatte den Vorteil, daß sich hinter der Platte keines der bekannten Wirbelsysteme mit dem periodischen Ablösen von Einzelwirbeln und demzufolge Flattern der Platten schon bei schwacher Strömung bilden konnte, dann den weiteren einer ausreichenden Dämpfung, endlich den eines sehr geringen Gewichtes. Die erste hier besprochene Ausführungsform wog 11 *g*; sie war zum Teil mit »Brautschleier«

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

überzogen (I *a*), in der späteren Ausführung (I *b*) mit feinem Seidentüll; die zweite, für stärkere Winde bestimmte, mit dickem Ring (3 *mm* Eisendraht, doppelt überspannt) wog 45 *g*.

Stellt man eine solche Druckplatte richtig ein, mit der Ebene winkelrecht zur Luftströmung, so gibt ihr Ausschlag die Windgeschwindigkeit. Die Eichung erfolgte empirisch; zunächst wurde in einem 20 *m* langen Raum ein Draht wagrecht gespannt, dem entlang durch einen Elektromotor ein kleines Wägelchen mit jeweils konstanter willkürlich einstellbarer Geschwindigkeit hin- und hergezogen wurde. An dieses Wägelchen waren die zu untersuchenden Platten einzeln gehängt; sie wurden in der Mitte der

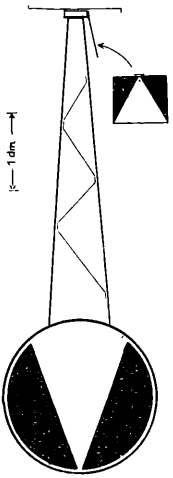

Fig. 1. Winddruckplatten; der Reif ist mit Seidengaze überzogen, die zum leichteren Erkennen bis auf den weiß gelassenen Ausschnitt geschwärzt wird. Daneben die zur Kennzeichnung der Achse verwendete Markierscheibe von der Seite gesehen.

Bahn von der Seite her beobachtet, d. h. deren Winkel mit der Senkrechten gemessen. Da man dieselbe Platte mit der gleichen Geschwindigkeit immer wieder vorbeiwandern lassen konnte, war die Genauigkeit entsprechend zu steigern. So wurden alle Platten geprüft und ergaben eine sehr gute Übereinstimmung innerhalb jeder gleich ausgestatteten Serie. Man konnte also immer eine einheitliche Eichkurve zugrundelegen; die einzelnen Abweichungen blieben unterhalb der Meßgenauigkeit. Die Auswertung war dadurch sehr erleichtert.

Neben dieser Einzelprüfung wurde noch eine Nachprüfung der zwei Haupttypen im Windkanal der Aerodynamischen Versuchsanstalt in Göttingen vorgenommen, die unsere Ergebnisse bestätigte; eine dritte Art der Eichung, mit Hilfe eines großen Ventilators, erstreckte sich vornehmlich auf die höheren Wind-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

geschwindigkeiten, allerdings mit geringerer Zuverlässigkeit. Fig. 2 gibt die erhaltenen, auch der Auswertung zugrundegelegten Kurven für die beiden Typen I*a*, I*b* und II; daneben ist noch die Eichung einer sonst gleich I*a* ausgestatteten, aber mit dünnem Papier überzogenen Druckplatte angegeben. Für sie verläuft die Kurve steiler, d. h. die Ausschläge wachsen in bestimmtem Bereich rascher an; sie geht aber bald in ein flacheres Stück über; bei solchen Windgeschwindigkeiten trat aber schon sehr starkes Flattern auf. In dem Unterschied zeigt sich recht deutlich der Vorzug der durchlässigen Bespannung: mit vollen Platten wäre bei weitem nicht die gleichmäßige Eichung und eine ruhige Einstellung erzielbar gewesen,

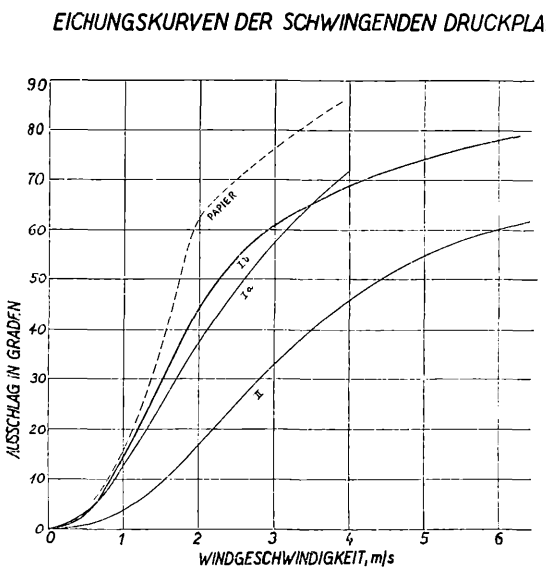

Fig. 2. Eichkurven der Winddruckplatten. I*a* und I*b* leichtes, II schweres Modell; gestrichelt die Eichkurve einer mit Papier überzogenen Platte.

wie wir sie bei unseren Versuchen durchaus hatten. Erst bei sehr großer Luftbewegung, die bei unseren Versuchen im Freien nicht mehr vorkam, trat auch bei unseren Platten Flattern auf. In Göttingen wurde die Untersuchung auch auf verschiedene Stellung der Plattenfläche gegen den Wind ausgedehnt; sie zeigte, daß Abweichungen der Richtung von der normalen bis etwa 20° die Ergebnisse nicht wesentlich fälschen (Fehler innerhalb 10%).

Eine weitere Untersuchung hatte sich mit der Trägheit der Platten zu befassen; war diese groß, d. h. dauerte es lange, bis bei Änderungen der Geschwindigkeit der richtige Wert erreicht wurde, so war die Anordnung kaum für Wiedergabe der Augenblickswerte zu brauchen. Die Prüfung erfolgte derart, daß die Platten in ruhiger Luft (ungünstigster Fall) aus ihrer Ruhelage heraus-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

gebracht, dann losgelassen wurden, so daß sie zurückschwangen. Der zeitliche Verlauf dieser Schwingungen wurde auf berußter Trommel aufgezeichnet. Sie erwiesen sich als sehr günstig gedämpft mit einem Dämpfungsverhältnis zwischen 1 3 und 1 : 4, was zusammen mit der geringen Schwingungsdauer (kurze Pendellänge) ergab, daß bei einer plötzlichen Änderung der Windgeschwindigkeit der neue Wert schon nach 0·14 Sekunden auf 26%, nach 0·31 Sekunden auf 19%, nach 0·91 Sekunden bis auf weniger als 5% richtig wiedergegeben wurde, eine für unsere Zwecke weitaus genügende Einstellungsgeschwindigkeit. Diese Versuche wurden in strömender Luft angestellt; in ruhiger ist das Ergebnis ungünstiger, weil die Trägheit — nicht etwa der Platte, sondern der mitbewegten Luft — den Gleichgewichtszustand überschreiten ließ. Es ist übrigens bisher noch nicht gelungen, ein gleich günstiges Ergebnis bei irgendwelchen anderen Konstruktionen, die vornehmlich den Meßbereich nach der Seite der größten Geschwindigkeiten hätten ausdehnen sollen, zu erreichen. Schon die schwereren Platten, Type II, waren etwas ungünstiger und eine Herabsetzung der Ausschläge (Erweiterung des Meßbereiches) durch ganz dünnes Gewebe setzte die Dämpfung sofort so weit herab, daß man von den auftretenden Schwingungen eine merkliche Störung der Beobachtungen befürchten mußte. Immerhin läßt sich vielleicht für eine andere mehr summarische Art der Untersuchung die Verwendung längerer Pendelplatten, die dann leichter zu dämpfen sind, noch empfehlen. Übrigens hätten sich irgendwelche Störungen auch in den Diagrammen sofort zeigen müssen, in ihnen ist aber, z. B. von Schwingungen o. ä, überhaupt nichts zu bemerken.

Zur Befestigung der Achsenlager verwendeten wir zwei verschiedene Methoden: waren, etwa zur Bestimmung der gleichzeitigen Geschwindigkeit innerhalb einer Senkrechten, an einem feststehenden Pfahl wagrechte Arme vorgesehen (Versuche bei Floridsdorf), so konnte das Lager in diese eingesteckt und verschraubt werden; für die Aufnahme der Geschwindigkeiten in einem ganzen Querschnitt aber (die meisten anderen Versuche) wurden zwei seitliche Pfähle oder Masten miteinander durch Schnüre oder Drähte verbunden, an denen dann die Achsenlager mittels eines umgewickelten Stückes Stahldrahtes an beliebiger Stelle gehalten wurden. Zu leichterem Erkennen in den Bildern, gleichgültig ob es sich um helleren oder dunkleren Hintergrund handelte, wurden die Bespannungen der Scheiben bis auf ein nach unten spitz zulaufendes Mittelstück geschwärzt, ebenso war eine ähnliche Markierscheibe seitlich des Achsenlagers angebracht, wodurch auch dieses deutlich einzumessen war.

Strenge Gleichzeitigkeit der aus den nebeneinanderhängenden Platten abzulesenden Augenblickswerte wurde durch Photographieren mittels eines Kinamo-Apparates (Zeiß-Ikon, Brennweite 40 *mm*, dazu Teleobjektiv, für breite Fronten besser, mit 180 *mm* Brennweite) erzielt. Fast nie benützten wir die volle Kinogeschwindigkeit

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

von 16 Bildern in der Sekunde, es genügten, mit dem »Vierertrieb« leicht zu erreichen, 5 bis 7 Bilder meist vollkommen. In einer Reihe von Fällen wurden mit dem »Einsertrieb« Aufnahmen im Abstand ganzer Sekunden gemacht. Das Federwerk, das einen selbsttätigen Ablauf bewirkt, wurde erst später mit einer Zusatzhemmung versehen. Es hat den Vorteil, die Aufmerksamkeit des Aufnehmenden für andere Beobachtungen freizulassen, und der Nachteil, daß die Ablaufdauer verhältnismäßig kurz ist, wird kaum stören; liefern doch schon 15 bis 20 Sekunden jedesmal Stoff genug und erfordern schon langwierige Auswertung.

Um ein deutliches Bild zu erhalten, wurden die Platten nicht genau von der Kante, sondern schräg von hinten oder besser schräg von vorne aufgenommen; die Stellung des Apparates gegenüber der Front mußte dabei genau ausgemessen werden, um die aus der Perspektivwirkung hervorgehenden Korrekturen zu ermöglichen. In der Regel wurde vom Negativfilm ein Positiv hergestellt, dieses vermittels eines kleinen Kinoprojektionsapparates von oben her Bild für Bild auf der wagrechten Tischplatte entworfen, und zwar in einer Größe von etwa 30×40 *cm*. Die bei diesem kleinen Format erzielbare größere Lichtstärke erlaubte ein sehr genaues Ausmessen, das durch einen Auftragtransporteur sehr erleichtert wurde. So wurde in jedem Bild der scheinbare Neigungswinkel jeder Platte ermittelt, aus diesem der wahre errechnet, der dann auf Grund der Eichkurve den Wert der Geschwindigkeit lieferte. Man wird verstehen, welch großen Aufwand an Zeit und Arbeit eine solche Auswertung eines Streifens, sei es auch nur von 200 Bildern (z. B. 30 Sekunden) erforderte. Er wurde allerdings ganz wesentlich, auf den zehnten Teil der Zeit, abgekürzt, als die Verwendung eines besonderen Rechenschiebers es ermöglichte, daß zwei zusammen arbeiteten, von denen der eine die Winkel maß und dem anderen diktierte, der mit dem Schieber sofort die wirklichen Windgeschwindigkeiten ermittelte und sie gleich in die für die Isotachendarstellung vorbereiteten Blätter eintrug.

Die so erzielbare Genauigkeit war ziemlich groß. Die Winkelmessung selbst, vorgenommen mit einem der in der Geodäsie verwendeten Regeltransporteure, brauchte keinen Fehler über $0{\cdot}1°$ aufzuweisen, die Zwischenrechnung war auch überflüssig genau, so daß die Einzelwerte bis auf einige Zentimeter sicher waren. Die zu Kontrollzwecken öfter gemachten Nachmessungen bestätigten dies.

Mit einem solchen Zahlenmaterial an und für sich wäre aber kaum viel anzufangen gewesen: ganz wesentlich blieb das Auffinden von Darstellungsformen, die eine ganze Versuchsreihe in dem zeitlichen Ablauf und der räumlichen Verteilung zu überblicken gestatteten. Davon werden im folgenden einige Beispiele gegeben; aus leichtverständlichen Gründen nur Auschnitte aus dem ganzen Material, das eigentlich voll eingesehen werden müßte, wollte man aus ihm die richtigen Vorstellungen gewinnen.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

II. Beobachtungen und Ergebnisse.

1. Senkrechter Schnitt über Grasland (Floridsdorf).

Die fünf ersten Versuchsreihen wurden im Überschwemmungsgebiet am nördlichen Ufer der Donau in Wien-Floridsdorf durchgeführt. An einem 4·5 *m* hohen Mast waren von halbem zu halbem Meter Höhe wagrecht dünne Tragarme abwechselnd nach der einen und anderen Seite hin, im ganzen winkelrecht gegen den Wind, angebracht und an ihnen waren in der eben besprochenen Weise die Achslager befestigt. Streng genommen, bezogen sich also die Ergebnisse nicht auf einen einzigen senkrechten Schnitt, sondern auf zwei etwa 1·2 *m* voneinander abstehende. Nach unseren späteren Ergebnissen, insbesondere den Versuchen in Aspern, mochte man da schon mit einigen Unterschieden der Windgeschwindigkeiten zu rechnen haben, wenn auch durch sie das Bild nicht vollkommen gestört werden konnte.

Die umfangreichste der dort gewonnenen Bilderreihen, vom 6. Mai 1927, ist bereits an anderer Stelle veröffentlicht, auf die hier Bezug genommen wird.[1] Der Tag war schön, etwas windig. Die Reihe wurde am frühen Vormittag aufgenommen, da sicher keine Bodeninversion mehr vorhanden war, aber dafür auch die Überwärmung des Bodens noch nicht merklich wirken konnte, das um so weniger, als der Boden mit etwa 20 *cm* hohem Gras bedeckt war. Bei der herrschenden Windrichtung, Nordwest, wehte der Wind etwa 5 *km* über ebenem ganz gleichem Boden her, so daß er sicher bereits eine dem Dauerzustand entsprechende Struktur aufwies.

Die erwähnte Darstellung war in der Weise aus den ursprünglichen Ablesungen gewonnen, daß in einem Koordinatensystem mit der Zeit als Abszisse, der Höhe als Ordinate, die an jeder Platte gemessenen Werte an der entsprechenden Stelle eingetragen wurden. Zwischen ihnen wurde dann in bekannter Weise (Annahme stetiger Verteilung) interpoliert, damit Isolinien gezogen, also Isoplethen, uneigentliche Isotachen. Es ist das dieselbe Art der Darstellung, die in gleicher Weise im Ausschnitt aus der Reihe von Aspern (Fig. 5) und in etwas anderer Darstellungsart für die langen Reihen von Hommelsheim (Fig. 6 und 7) benützt wurde. Man erhielt so ein Bild, das ganz wesentlich von jenem abweicht, das man sich ziemlich allgemein von der turbulenten Bewegung gemacht hatte. Von einer Seite war diese geradezu definiert worden dadurch, daß das ganze Medium erfüllt sei von Wirbeln, ja es gibt Abhandlungen, in denen auf theoretischem Wege genau ausgerechnet ist, welchen Abstand diese Wirbel mit wagrechter Achse voneinander haben

[1] Wilhelm Schmidt, Neue Ergebnisse über die Struktur des Windes, Zeitschrift für Geophysik, *4*, Heft 7 u. 8, p. 376 (1928).

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

müssen, je nachdem sie in Reihen übereinander oder schachbrettartig versetzt angeordnet sind.[1]

Hält man dieser Vorstellung das Bild gegenüber, das ein Wirbel mit wagrechter Achse in unserer Darstellungsart aufweisen müßte (vgl. hier die späteren Ausführungen gelegentlich der Versuche in Hommelsheim), so findet man nur sehr wenige Stellen in der Floridsdorfer Reihe, die das Vorhandensein eines solchen Wirbels als möglich erscheinen lassen: 4 Stellen in den ganzen 35 Sekunden. Bei dem kleinen Bereich, den diese Wirbel haben müßten (die wenigsten reichen wesentlich über 1 *m* Höhenerstreckung hinaus), wäre es aber nicht ausgeschlossen, ja es wird sogar, an den späteren Beobachtungen gemessen, wahrscheinlich, daß sie durch das alternierende Zusammenlegen aus zwei mehr als 1 *m* voneinander abstehenden Schnitten vorgetäuscht wurden. Davon, daß der ganze Raum von Wirbeln erfüllt sei, ist keine Rede, es sei denn, man bezeichne schon einen Geschwindigkeitsunterschied als Wirbel.

Schon in dieser ersten Aufnahme zeigten sich aber einige Eigentümlichkeiten, die auch später immer wieder bestätigt wurden. Kaum zu irgendeinem Augenblick sieht man eine stetige Zunahme der Geschwindigkeit gegen größere Höhen zu, fast immer treten Extreme in Zwischenschichten auf und halten sich mitunter überraschend lange. Allerdings mochte dies in dem besprochenen Fall mit beeinflußt gewesen sein durch die nicht vollständige Einheitlichkeit des Schnittes, doch zeigen glatte Profile durchaus ähnliches Verhalten.

Ferner traten in der Beobachtungsreihe in größeren Zeitabständen Zu- und Abnahmen der Windgeschwindigkeit in den meisten Höhenstufen gleichzeitig auf, ohne daß man von vornherein sagen könnte, woher derartige Änderungen kommen; auf Grund der Versuche im hydrodynamischen Laboratorium hat man anzunehmen, daß die Turbulenz unmittelbar in der Strömung selbst auftritt, sobald die Bedingungen hiefür günstig sind; ein anderer Teil des ungeordneten Charakters nimmt aber seinen Ursprung von den Störungen, die an den Begrenzungsflächen durch Wandrauhigkeit usw. hervorgerufen werden. Verfolgt man in unserer Reihe, in welcher Höhe sekundäre Maxima auftreten, so findet man bereits, daß in dieser Schicht bis 4 *m* die Störung einmal von oben her, ein andermal vom Boden aus eindringt. Viel klarer wird dasselbe Ergebnis aus den Versuchen über verschiedenem Untergrund in Hommelsheim. Wir haben also — nicht etwa in einer Erstreckung von Millimetern, sondern von Metern — die »turbulente Grenzschicht« der Theorie und es ist wesentlich leichter, bei den Strömungen im Freien in ihren Aufbau einzudringen.

---

[1] Vgl. etwa: Friedmann, Über atmosphärische Wirbel und die Turbulenz des Windes. Beitr. Phys. freie Atmosph., *11*, p. 154;
P. Polibaronow, Zur Frage über die Turbulenz des Windes, ebenda p. 181 (1924).

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Die anderen Reihen von Floridsdorf unterschieden sich von der besprochenen im wesentlichen dadurch, daß die Zeitintervalle zwischen den aufeinanderfolgenden Bildern größer gewählt wurden, um zu entscheiden, welche Bildfolgen gerade noch brauchbar sind, um die ganzen Zwischenstufen einer Veränderung aufzuzeigen. Wenn nun mit der Geschwindigkeit, die in der eben besprochenen Reihe angewandt worden war, das ist der Hälfte der gewöhnlichen Kinogeschwindigkeit, ein stetiger geschmeidiger Übergang erzielt werden konnte, so war die Darstellung offenbar bereits wesentlich unruhiger und wies Lücken auf bei etwa der halben Geschwindigkeit, d. h. dem doppelten Zeitintervall. Sekundenwerte endlich ließen sich nicht mehr zu plausiblen Isoliniendarstellungen, wie die oben besprochene, verwenden. Das gibt einen wesentlichen Anhaltspunkt für alle zukünftigen Untersuchungen, mögen sie auch mit ganz anderen Instrumenten angestellt werden: haben diese eine solche Trägheit, daß ihre Eigenperiode in der Größenordnung einer Sekunde liegt, so schleifen sie sicher wesentliche Einzelheiten ab. Anderseits haben sich unsere Anordnungen, die schwingenden Druckplatten, jedenfalls sehr gut bewährt: ihre Eigenschwingung kommt gar nicht zum Ausdruck, denn sonst müßte man ja periodische Schwingungen in der Darstellung ohne weiteres erkennen, was keineswegs der Fall ist.

Die Beobachtungsreihen wurden auch in der Richtung ausgewertet, die den Hydrodynamikern nach dem jetzigen Stand der Theorie den deutlichsten Aufschluß liefern wird: nach der Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe über dem Boden. Die Ergebnisse darin sollen aber zugleich mit den aus anderen Beobachtungsreihen, insbesondere Aufnahmen ganzer Fronten, zugleich besprochen werden (s. Abschnitt II, 6).

2. Besonders ruhige Strömungen (Lunz, Gumpoldskirchen).

Versuche mit ähnlicher Anordnung einer Reihe von Druckplatten in verschiedener Höhe wurden auch am Lunzer Untersee[1] gemacht: der Mast auf einem verankerten Floß befestigt, aufgenommen von dem Landungssteg der Biologischen Station aus, also am östlichen Ende. Es sollte so die Windstruktur unter ganz anderen Bedingungen der Oberfläche, über einer freien Wasserfläche, aufgenommen werden. Allerdings war da nicht an volle Bilderreihen wie die früheren zu denken, stellte sich doch das Floß unter den ständig wechselnden Luftströmungen immer anders ein, so daß nicht an eine wirkliche Auswertung gedacht werden konnte. So wurden nur Stichproben, Bilder in Sekundenfolge, angefertigt.

Schon diese boten aber ein bemerkenswertes Ergebnis: jener schwache Luftzug, der sich dort zum Teil durch die gebirgige Umgebung, zum Teil vielleicht durch den anders temperierten See am Nachmittag und besonders gegen Abend hin einstellt, hat einen vollkommen anderen, viel ruhigeren Charakter, ja man könnte seine

[1] Im niederösterreichischen Alpenland, 100 *km* westsüdwestlich Wien, engem Tal liegend.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Strömungsform geradezu als »laminare« ansprechen, soweit solche im Freien überhaupt möglich ist. Überraschend ruhig standen in ihm die Winddruckplatten; es waren ganz seichte Schichten, in denen sich die Strömung hielt, offenbar stetig sich verlagernde Luftmassen, die infolge der eintretenden Temperatur ins Fließen kamen. Ein Beispiel dafür vom 18. Mai 1927, 17 Uhr, nach Regen, bei ruhiger Ostströmung, als Mittel aus 6 Sekunden:

1	1·5	2	3	4 *m* über der Seeoberfläche
105	92	87	91	95 *cm*/sek.

Noch eine andere Beobachtung fiel auf: dem Gefühl machte sich die Strömung fast gar nicht bemerkbar, trotzdem die Winddruckplatten sowie ein ausgesetztes Handanemometer nicht gerade verschwindende Geschwindigkeiten anzeigten. Für unser Empfinden ist also die Turbulenz ein wesentliches Kennzeichen der Luftbewegung, wir beurteilen deren Stärke unwillkürlich nach jener und nicht nach irgendwelcher mechanischer oder anderen Wirkung, die man noch der mittleren Windgeschwindigkeit zuschreiben könnte. Vielleicht spielt dabei gerade der größere Wärmeentzug in der turbulenten Strömung eine Rolle.

Bei ganz anderer Gelegenheit, aber wohl ähnlichen physikalischen Bedingungen traten ebensolche Strömungen auf: gelegentlich einer großangelegten, im Mai 1928 durchgeführten Untersuchung über die Wirkung des Räucherns gegen die Frühjahrsfröste waren bei Gumpoldskirchen südlich Wien, am Ostabhang des Wienerwaldes, Winddruckplatten unserer Bauart zur Anzeige der ganz schwachen, für den Ausfall der Gegenmaßregeln aber entscheidenden Luftströmungen verwendet worden. Da ein Photographieren während der Nacht nicht durchführbar war, wurden sie einfach vom Boden aus abgelesen. Auch da zeigten sich in scharfen Ausstrahlungsnächten bereits am späten Abend ganz schwache Luftversetzungen, z. B. einmal über 7 *m* Höhe Windstille, darunter ruhige Strömung von maximal 130 *cm*/sek. Diese, einen flachen Hang herabkommenden Strömungen drängten sich wegen ihrer geringen Turbulenz dem Gefühl nur ganz wenig auf. Hier war allerdings die stabile Temperaturschichtung bei der oberflächlichen Abkühlung durch Ausstrahlung (unten am Boden —0·79° C., darüber —0·16 und +0·37 in 0·5, beziehungsweise 1·5 *m* Höhe) die maßgebende Ursache für das Zustandekommen dieser ruhigen Strömung. Physikalisch laminar war sie jedenfalls noch lange nicht und bei Tag wird man sie kaum je erwarten dürfen.

3. Gegensatz zwischen See- und Landwind (Podersdorf).

Die Frage der Wirkung der Unterlage, die gerade in den untersten Luftschichten eine ausschlaggebende Bedeutung besitzt, mußte am leichtesten der Lösung näher gebracht werden können durch Versuche, die, an ein und derselben Stelle ausgeführt, zu verschiedenen Zeiten Luftmassen von verschiedenem Boden her vor

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

sich hatten. Wir gingen zu dem Zweck nach Podersdorf am Ostufer des Neusiedlersees. Die häufigsten Winde sind da die aus Westen und Osten; jene überschreiten den See seiner ganzen Breite nach, mindestens 10 *km,* diese kommen über ein ebenes flaches Vorland, einen Teil der oberungarischen Tiefebene, heran. Zur Aufstellung dienten hier zwei 4 *m* hohe Maste, gegenseitiger Abstand 11 *m*; sie standen gerade am flach einfallenden Ufer. Schnüre waren in je 1 *m* Abstand wagrecht zwischen ihnen gespannt, daran gleichmäßig verteilt 20 unserer Winddruckplatten angebracht. 9 Tage hindurch wurden die Zeiten abgewartet, da der Wind gerade winkelrecht gegen die Aufstellung blies, und zu den günstigen Zeiten eine Aufnahmereihe gemacht. Diesmal nicht in Siebentel, sondern in ganzen Sekunden Zeitabstand zwischen den einzelnen Bildern. Zwei der deutlichsten Reihen (Seewind am 2. November 1927, 15 Uhr, größtenteils bedeckt, Landwind am 30. Oktober 1927, 13 Uhr, bei wolkenlosem Himmel) gibt Fig. 3 wieder; für jede Sekunde sind da in dem Querschnitt Isotachen gezeichnet, in der Reihe links für Seewind, rechts für Landwind. Der Unterschied springt in die Augen. Kommt der Wind über die weite, wegen ihrer geringen Tiefe trotz des Windes wenig bewegte Wasserfläche her, so zeigt er ausgesprochen wagrechte Schichtung; allerdings nicht in jedem Augenblick derart, daß die größeren Windgeschwindigkeiten auch an der höchsten Reihe sich finden. Öfter, wie Sekunde 2 und 11, gibt es bestimmte Höhen mit ausgesprochenem Maximum, darüber also einem örtlichen Minimum. Dennoch gehen die Veränderungen so stetig und ruhig vor sich, daß offenbar Sekundenintervalle als ausreichend angesehen werden müssen, um alles Wesentliche, auch isolierte kleinere Störungen, zu erhalten.

Anders bei Landwind: da kommen im Querschnitt starke Unterschiede der Geschwindigkeit vor und insbesondere ist von einer wagrechten Schichtung fast gar nichts mehr zu sehen; die Gegensätze zwischen rechts und links sind oft größer als die zwischen oben und unten (siehe Sekunde 1, 13, 14), nach starker Luftbewegung setzt mitunter rasch Flaute ein, wie der Übergang zu Sekunde 5 zeigt; inselartig treten Gebiete größerer Geschwindigkeit auf (1, 8 bis 14). In diesem Fall ist es allerdings nicht ausgeschlossen, daß vielleicht die Weingärten des Ortes, die von der Luftströmung zum Teil noch überweht werden mußten (Abstand von der Beobachtungsstelle etwa 300 *m*), den Charakter des Windes einigermaßen gegenüber dem von weiter vollkommen ungestörter Ebene kommenden geändert haben. Viel dürfte es kaum sein, denn die Struktur des Windes unterscheidet sich in diesem Falle nicht wesentlich von jener, die sonst über Land gefunden wurde; siehe etwa die im folgenden besprochenen Versuche von Aspern oder Hommelsheim.

So deutlich der Unterschied zwischen Landwind (dazu auch die Beobachtungen in Floridsdorf gerechnet) und Seewind in den Figuren erscheint, so ist es doch nicht leicht, dafür einen zahlenmäßigen Ausdruck zu gewinnen. Aus der Floridsdorfer Reihe geht

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

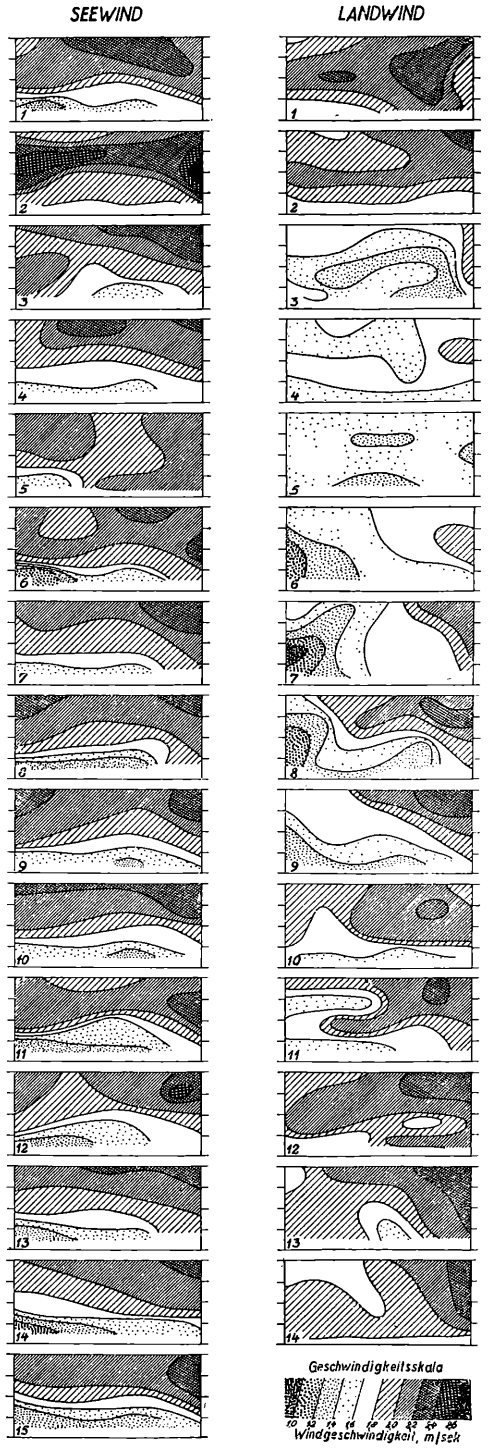

Fig. 3. Geschwindigkeitsverteilung (Isotachen) in einer Front von 4 *m* Höhe und 10 *m* Breite bei Seewind (links) und Landwind (rechts), Podersdorf. Die Einzelbilder folgen in Sekundenintervallen aufeinander; die Teilung an den Seiten in Meter.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

allerdings die Abnahme der Streuung mit zunehmender Höhe sehr deutlich hervor:

Höhe	0·8	1·3	1·8	2·3	2·8	3·3
Streuung	5·00	4·30	3·74	3·63	3·50	3·55

Die Podersdorfer Reihen haben zu wenig Einzelwerte, um mit Sicherheit genügend ausgeglichene Zahlen zu liefern; es wurden deshalb je alle Platten der beiden oberen und beiden unteren Plattenreihen zu Mitteln vereinigt, also nicht bloß deren zeitliche, sondern auch die räumliche Streuung gerechnet. Die Zahlen sind: Landwind unten (Mittel 1·2 *m* Höhe) 2·78, oben (Mittel 2·2 *m* Höhe) 2·87, also fast kein Unterschied; Seewind unten 2·23, oben 1·56, also wieder eine bezeichnende Abnahme, wie man das wohl als normal ansehen darf. Vielleicht ist das abweichende Ergebnis bei Landwind doch der gleichzeitigen räumlichen Mittelbildung zuzuschreiben.

Eine viel wichtigere, aber kaum so leicht mit einem rein statistischen Verfahren lösbare Frage ist die nach dem Vorhandensein etwaiger mehr oder weniger regelmäßiger Perioden, innerhalb deren die Windgeschwindigkeit auf- und abschwankt. Ein Versuch zu entscheiden, welche Dauern etwa in Betracht kommen können, wurde in folgender Art gemacht: es wurden die Änderungen der Windgeschwindigkeit für die in 0·8 *m* Höhe befindliche Platte des Floridsdorfer Versuches bestimmt, und zwar zunächst mit dem Intervall der Bildfolge (fast genau $^1/_7$ Sekunde), dann mit dem doppelten usf. mit folgendem Ergebnis:

Tabelle I.

Intervalle, *n* ..	1	2	3	4	5	10	20	40	80	Bilder
	0·14	0·27	0·41	0·55	0·69	1·37	2·74	5·48	10·96	Sekunden
Streuung, *s*	2·59	3·54	3·89	4·55	4·86	5·35	6·90	7·86	7·36	
$\sqrt{n}$	2·59	2·50	2·25	2·27	2·17	1·69	1·54	1·24	0·82	

Mit zunehmendem Intervall wird also die Streuung der Änderung immer größer, was darauf hinzuweisen scheint, als müsse man Wechsel von wesentlich mehr als 5 Sekunden Dauer als die ausschlaggebenden ansehen. Nun hat man aber die Reihe der Streuungen mit jener zu vergleichen, die aus einer rein zufälligen Verteilung hervorgehen müßte. Bei einer solchen würde einem *n*-mal so langen Zeitintervall das $\sqrt{n}$-fache an Streuungswerten zu erwarten sein. Man kann also eine Reduktion vornehmen, indem man durch $\sqrt{n}$ dividiert und das gibt die letzte Zeile: merklich gleich bleibt der Wert bis etwa 0·5 Sekunden, fällt dann entschieden und stetig ab. In der betrachteten Schicht sind es also die kürzesten Schwankungen, die für das Strömungsbild entscheiden. Wie sich das auf die einzelnen Längen verteilt, kann allerdings aus den Zahlen nicht abgelesen werden, dazu müßte man andere Methoden, am besten vielleicht gleich bei der Aufnahme, anwenden.

So wenig Bilder die Podersdorfer Reihe enthält, so wurde doch auch dafür eine ähnliche Untersuchung durchgeführt: was sonst an

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Feinheiten verlorenging, mochte immerhin durch die große Anzahl von Platten ersetzt werden. Die Ergebnisse:

Streuung, wie oben auf gleiches Intervall, 1 Sekunde, reduziert.

Tabelle II.

Intervall .	1	2	3	7	Sekunden
Landwind unten	2·54	2·31	1·81	1·68	
oben	2·80	2·19	2·21	1·49	
Seewind unten	1·88	1·50	1·15	0·88	
oben.	2·45	1·41	0·95	0·71	

Sowohl beim Landwind wie beim Seewind bemerkt man für die kürzesten Intervalle oben größere Streuung als unten, einfach ein Zeichen der heftigeren Luftbewegung; hätte man durch die mittlere Windgeschwindigkeit dividiert, so wäre der Unterschied verschwunden. Sonst aber tritt auch hier wieder sehr deutlich in allen Reihen die Abnahme der Werte mit zunehmendem Intervall hervor, d. h. auch da geben durchaus die kurzen Schwankungen für die Erscheinung den Ausschlag. Allerdings keine befriedigende eigentliche Analyse, die auf die verschiedenen noch vorhandenen Schwankungen zurückführen würde.

Noch eine weitere Untersuchung hat vielleicht einige Bedeutung: die Bestimmung der räumlichen Verschiedenheit der Windgeschwindigkeiten.

Es kommen da sehr verschiedene Werte vor; bezeichnend ist aber, daß man mit Unterschieden von 0·5 *m*/sek. in der Windgeschwindigkeit schon in dem Abstand zweier Platten, d. h. in 1 *m*, nicht zu selten rechnen muß. Ein Ergebnis, das nicht etwa durch die eventuellen Eigenbewegungen der ausschwingenden Platten vorgetäuscht sein kann, denn dem steht einmal das Resultat der Prüfung der Platten entgegen, dann aber auch der Umstand, daß solche starke Gefälle der Windgeschwindigkeit nicht etwa vereinzelt auftreten, sondern in der Regel das Maximum in einer Reihe stetiger Unterschiede darstellen. Ein noch stärkerer Beweis ist in dem später gebrachten Ergebnis des in Aspern über ein mehr als doppelt so großes Feld sich erstreckenden Versuches zu sehen, das auch in den ganzen Mechanismus einiges Licht bringt.

Um einen Zahlenwert zu bekommen, kann man die Streuung der Geschwindigkeitsunterschiede benachbarter Platten rechnen und erhält so:

Landwind unten	2·08,	oben	2·17,
Seewind unten...	2·12,	oben	1·73.

Daß Landwind oben, Seewind unten etwas größere räumliche Verschiedenheiten aufweist, scheint doch ein wesentlicher Gegensatz zu sein.

Dividiert man durch die mittleren Windgeschwindigkeiten der betreffenden Höhen, so ergeben sich die Zahlen:

Landwind unten	1·22,	oben	1·17,
Seewind unten.	1·22,	oben	0·82,

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

worin der gleichmäßigere Charakter der über das Wasser herankommenden Strömung in der Höhe noch mehr betont wird.

4. Aufnahmen in breiter Front (Aspern).

Hatten die bisherigen Versuche bereits ein deutliches Bild der verworrenen Struktur des Windes gegeben, das jedenfalls ganz anders aussieht als man es sich bisher gedacht, so mußten die weiteren danach streben, die Aufnahmen womöglich in höhere Schichten hinauf auszudehnen oder den Einfluß verschiedener Bodenbeschaffenheit festzulegen. Jenes gelang im Sommer 1928 auf dem Flugfeld Aspern bei Wien, wo für die Versuche seitens des Heeresministeriums Teleskopmaste, wie sie für die drahtlose Telegraphie Verwendung finden, zur Verfügung gestellt wurden. So gelang es, einen Querschnitt von beinahe 10×10 *m* zu studieren, der mit 25 Druckplatten besetzt war. Ihr Abstand (2 *m*) war natürlich so weit, daß die kleinsten Störungen entgehen mußten, dafür traten aber die großen Züge um so klarer hervor. Es wäre sonst ja mit vielfach größerer Schwierigkeit verbunden gewesen, die Stellung jeder einzelnen Platte genau zu erkennen, beziehungsweise der richtigen Markiertafel des Aufhängepunktes zuzuweisen, ganz abgesehen von dem Anwachsen der dann kaum zu bewältigenden Auswertungsarbeit. Der Platz war im allgemeinen günstig; bei den Aufnahmen wurde darauf gesehen, daß der Wind über das Feld her zum Beobachtungsstand kam, der überdies so weit von den Gebäuden weg vorgeschoben wurde, daß jener im wesentlichen weite Strecken über freies Feld (die Umgebung Ackerland) herwehte. Die beste aus den 17 hier gewonnenen Reihen, vom 24. Juli, 12, 14 Uhr, sonnig, sehr heiß (über 30° C), Nordwestwind, umfaßt 300 Aufnahmen, die zunächst in genau der gleichen Weise dargestellt wurden wie die Reihen von Podersdorf (eigentliche Augenblicksisotachen). Aus diesen wurde dann eine Darstellung gewonnen, ähnlich der für Floridsdorf gewählten: Zeit als Abszisse, Höhe als Ordinate, und zwar wurden, um die gleichzeitigen Verhältnisse besser festzuhalten, zwei Schnitte in 4 *m* Abstand nebeneinander senkrecht gelegt, einer in der Mitte der Höhe wagrecht.

Da schon aus rein technischen Gründen eine Wiedergabe der ganzen Reihe untunlich ist, sind hier nur Ausschnitte abgebildet. Die Einzelbilder liegen je $^1/_7$ Sekunde auseinander; in Fig. 4 werden immer drei gegeben in einem (nach den Ordnungsnummern genauer zu entnehmenden) Zwischenraum von je etwa einer Sekunde. Zu Beginn der ganzen Aufnahme herrschte etwas schwächere Luftbewegung, am Schluß heftigere, allerdings nicht etwa in einem stetigen Übergang, sondern unter stärkerem Wechsel. Fig. 4*a* gibt den Zustand bei einer Flaute wieder: durchaus keine regelmäßige Zunahme der Windgeschwindigkeit nach oben, vielmehr in dem ersten Teilbild (34) das Geschwindigkeitsmaximum links in mittlerer Höhe, rechts knapp über dem Boden. Eine Sekunde später (Bild 41)

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

tritt die besondere Erniedrigung links von der Mitte knapp am Boden sehr deutlich hervor, das Minimum erstreckt sich von da aufsteigend in die

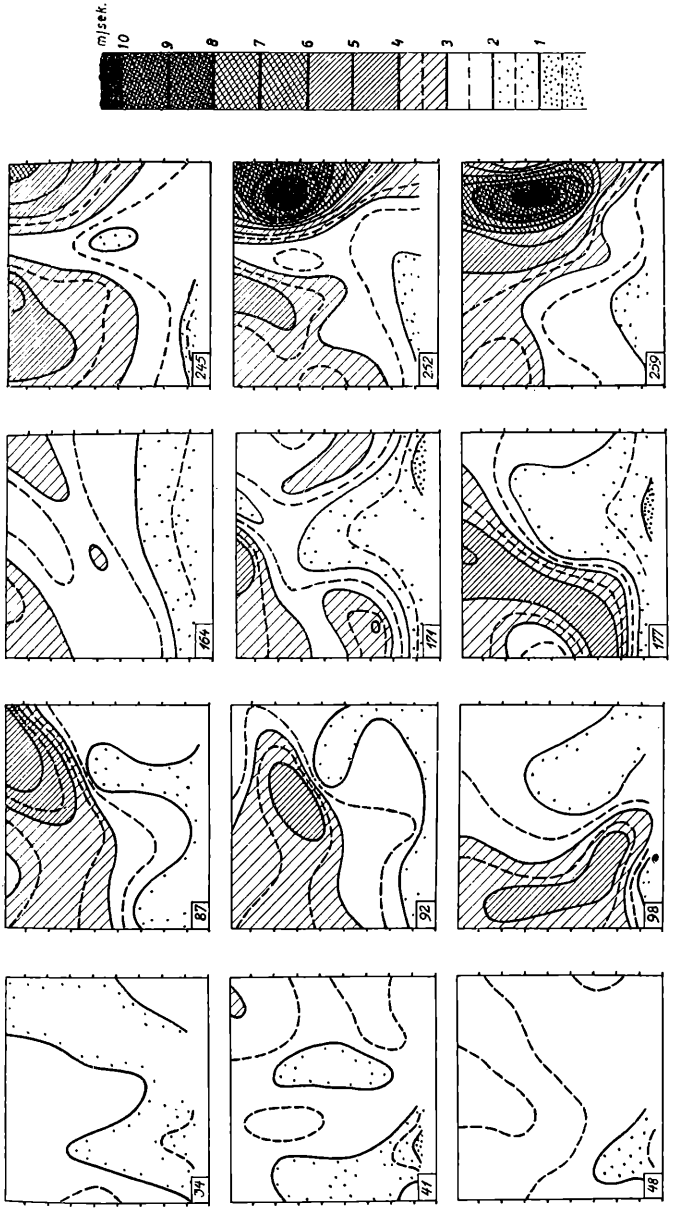

Fig. 4. Geschwindigkeitsverteilung in einer Front von $10 \times 10\,m$ in Aspern; Einzelbilder aus der Reihe, Zeitintervall innerhalb jeder Teilfolge angenähert eine Sekunde. Teilung an den Seiten in Meter. Rechts Geschwindigkeitsskala.

Höhe, größte Geschwindigkeit in der rechten oberen Ecke. Auch da ergibt sich also eine ausgesprochene Gliederung nach senkrechten Säulen. Bild 48 wieder ist fast vollkommen ausgeglichen und ausdruckslos.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Lebhafteren Wind bringt die zweite Folge Fig. 4b: in Bild 87 eine wagrechte Schicht größerer Geschwindigkeit, die sich rechts etwas in die Höhe zieht, in 92 ist diese schon weiter herabgerückt, in 98 endlich hat sich die schnell bewegte Zone in der linken Hälfte aufrechtgestellt; ihr steht rechts ein ähnlich geformtes Gebiet geringer Geschwindigkeit gegenüber.

Dieses spätere Sichaufrichten der Blätter rascher bewegter Luft scheint eine allgemeine, im Vorgang der Strömung selbst begründete Erscheinung zu sein; wir treffen sie z. B. wieder in der nächsten Folge Fig. 4*c*: 164 noch wagrechte, allerdings nicht regelmäßige Schichtung, in 177 bereits aufgerichtet. In der letzten Folge Fig. 4*d* endlich sieht man das Eindringen sehr rasch bewegter Luft: in 245 scheint sie noch nicht auf, in 252 hat sie aber schon die eine Seite des Querschnittes voll eingenommen, ihr steht ein Bereich geringer Bewegung im senkrechten Mittelstreifen gegenüber; in 259 ist das Gebiet größter Geschwindigkeit wieder in die Höhe gestreckt.

Wenn man sich in vielen Fällen vorzustellen hat, daß die Blätter rascher bewegter Luft an ihrem Vorderrand offenbar eine mehr wagrechte Erstreckung haben, während sie sich in ihrem rückwärtigen Teil mehr aufrecht stellen, dann müssen sich da die wagrechten Unterschiede in der gleichen Höhe sehr verschärfen. Tatsächlich werden sie zuweilen so groß, daß man bei Aufzeichnungen des zeitlichen Verlaufes, die nur einige Meter voneinander gewonnen wurden, kaum einen gemeinsamen Zug entdeckt. Eine recht charakteristische Stelle derselben Beobachtungsreihe, die das überraschend ausgeprägt zeigt, ist in Fig. 5 wiedergegeben, allerdings nicht in den Einzelbildern, sondern in einer Darstellungsform, die ganz analog ist derjenigen, die für die Versuche in Floridsdorf verwendet wurde: aus der Reihe der Einzelbilder wurden Schnitte abgeleitet, und zwar zwei Vertikalschnitte, die im ersten und zweiten Drittel der ganzen untersuchten Fläche gelegt wurden, in einem gegenseitigen Abstand von 4 *m*, ferner ein Horizontalschnitt in 4·5 *m* Höhe. Das Zeitmaß ist an den Sekundenstrichen am unteren Rand abzulesen, die Striche an den beiden Seiten geben Abstände in Meter; hier ist auch die gegenseitige Lage der drei Schnitte an den Pfeilen abzulesen.

Betrachten wir etwa den ersten Vertikalschnitt *V*1: im allgemeinen anfangs nicht allzuviel Verschiedenheit, das Maximum der Geschwindigkeit von mehr als 2·5 *m* in einer mittleren Höhe von etwa 4 bis 7 *m* über dem Boden zu finden. Von Sekunde 26 an tritt in diesem Schnitt oben ein Gebiet größerer Geschwindigkeit auf, das in der 29. und 30. Sekunde mit Geschwindigkeiten von mehr als 4 *m*/sek. bis zu 4 *m* Höhe herabreicht. Vielleicht ist es bedeutsam, daß gleichzeitig mit dem ersten Erscheinen rascher bewegter Luft in 10 *m* Höhe auch die langsamer bewegte am Boden Mächtigkeit gewinnt, daß sich also die Gegensätze unmittelbar verschärfen.

Daß aber der gleichzeitig nur 4 *m* seitlich davon gewonnene Vertikalschnitt *V*2 das in der Abbildung wiedergegebene so wesent-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

lich verschiedene Bild zeigt, würde man kaum von vornherein für möglich halten. Schon von Anfang an haben wir hier ausgesprochene

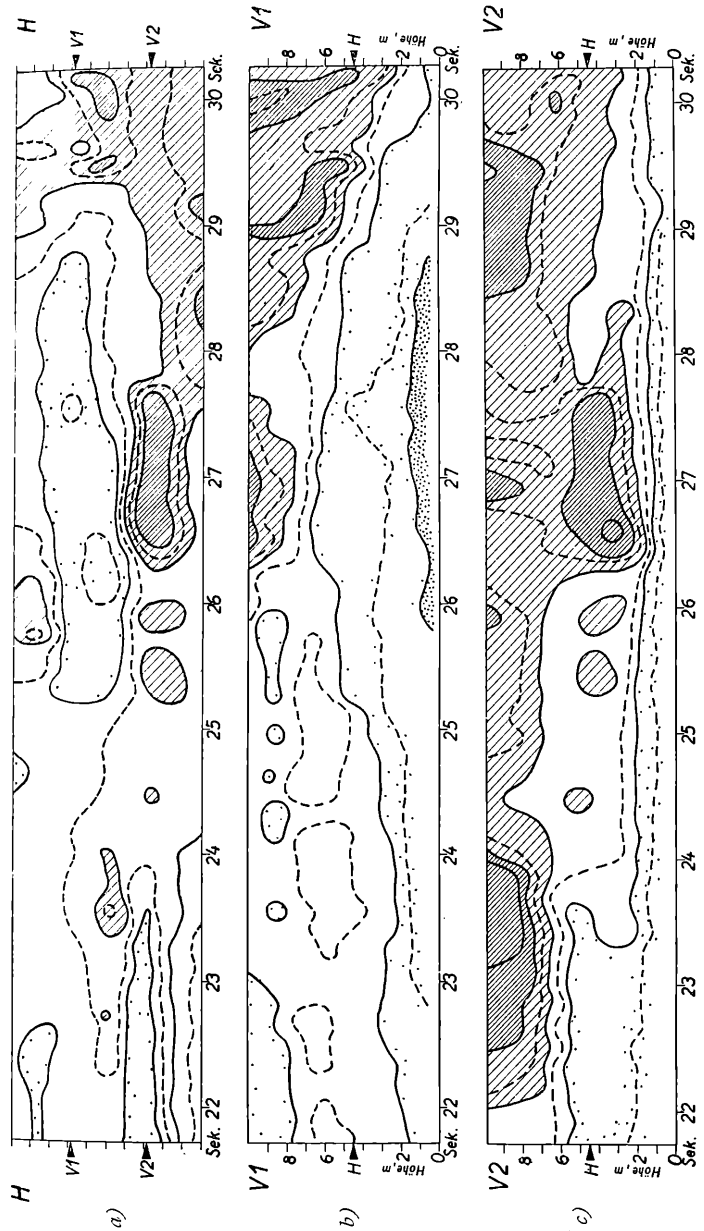

Fig. 5. Geschwindigkeitsisoplethen (uncigentliche Isotachen). Nach Aufnahmen in Aspern. Zeit als Abszisse (am unteren Rand sind die Sekunden angegeben), Höhe, beziehungsweise Breite als Ordinate. *a)* Horizontalschnitt *H* durch die Front in 4·5 *m* Höhe; *b)* und *c)* Vertikalschnitte *V1* und *V2* in 4 *m* Abstand voneinander. Die Lage der Schnitte zueinander ist den Pfeilspitzen an den Seiten zu entnehmen. Geschwindigkeitsskala wie in Fig. 4.

Zunahme mit der Höhe, oben Geschwindigkeiten wesentlich über 5 *m*/sek., wo der andere Schnitt unter 2 *m*/sek. hatte. Das geht durch Sekunden so fort, bis nach 26 ein Windmaximum von mehr als

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

5 *m*/sek. in etwa 3 bis 5 *m* Höhe auftritt, wo der Schnitt *V* 1 kaum ober 1·5 *m*/sek. zeigt. Erst ab Sekunde 28, als dieses Zwischenmaximum sich verloren, gehen die beiden Schnitte annähernd gleich.

Den Eindruck, daß hier die wagrechten Unterschiede entgegen dem, was man von vornherein annehmen würde, stärker sind als die in der Senkrechten, stützt auch der Horizontalschnitt *H*, der allerdings nicht jener Höhe entstammt, die die größten Gegensätze zeigt. Schmale Streifen geringerer Geschwindigkeit halten sich zwischen solchen größerer, ohne daß ein gegenseitiger Ausgleich auffällig würde. Die schneller bewegte Masse, die dem Schnitt *V* 2 ab Sekunde 26 sein besonderes Gepräge gibt, erweist sich hier als ein schmaler, steilgestellter Körper, ja man könnte in Analogie zu den Ausführungen gelegentlich der Floridsdorfer Reihe (vgl. auch unten Hommelsheim) an seinem Beginn etwas sehen, das als Anzeichen eines Wirbels mit senkrechter Achse gedeutet werden könnte. Allerdings nicht als ganz reiner, denn die entscheidenden Geschwindigkeitsunterschiede sind etwa eine Sekunde vorher schon angedeutet, was bei eigentlichen Wirbeln nicht wohl der Fall sein könnte.

Anderseits scheint das Hereinschießen dieser schneller bewegten Luftmasse auch nach den Schnitten *VI* und *V* 2 von einem Zurückdrängen der umgebenden Massen, einer Verschärfung der Geschwindigkeitsunterschiede begleitet zu sein, was zum Teil einen Wirbelcharakter hervorruft, allerdings kaum mit einer irgendwie gestreckten Achse. Auf keinen Fall aber, weder hier noch in den folgenden Sekunden, kann davon die Rede sein, daß Wirbelbildungen irgendwie das Bild beherrschen oder gar als das Wesentliche der ungeordneten Bewegung angesehen werden können.

Aufmerksam werde noch gemacht auf die isolierten Durchstoßpunkte größerer Geschwindigkeit in Sekunde 29, die es klarmachen, daß die in *V* 1 von oben herein auftretenden Zungen eine seitlich recht begrenzte, schlauchartige Form aufweisen. Es ist das eben auch wieder der Beginn lebhafterer Bewegung, die später, in den folgenden Sekunden, sich mehr verbreitert.

Für die Beobachtung und Registrierung der Windgeschwindigkeit an einem einzigen Punkt — und das ist ja das allgemein geübte Verfahren — ergibt sich die Folge, wie wenig man die Ergebnisse verallgemeinern, auch für die Umgebung als gültig ansehen darf, insbesondere nicht, was die Maxima der Windgeschwindigkeit anlangt, selbst wenn der allgemeine Charakter der Windströmung derselbe sein sollte. Das Ergebnis wird gestützt durch die anderen Auswertungen derselben und der übrigen Beobachtungsreihen. Im Augenblick kann man noch nicht einmal sagen, wie sich die Unterschiede in größeren Höhen verringern werden, was man ja dort jedenfalls als Tatsache anzunehmen hat. Der Einfluß der Unterlage, insbesondere im Gegensatz zu der glatten, von ausgedehnten Wasserflächen gebildeten, trat ja schon in den Registrierungen von Podersdorf hervor: Im »Seewind« mit ausgesprochen

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

wagrechter Lagerung sind die horizontalen Unterschiede viel kleiner. Es wäre nicht ausgeschlossen, gerade in diesen wagrechten Unterschieden ein deutliches Charakteristikum der Strömungsart zu sehen. Einige Bedeutung kommt vielleicht den Angaben der größten Geschwindigkeitsunterschiede zu, die zwischen zwei im Abstand von 2 *m* nebeneinander befindlichen Platten auftraten:

in 1·1	2·8	4·8	6·6	8·6 *m* Höhe
8·5	6·9	7·6	7	6·9 *m*/sek.

Es hat den Anschein, als wären die stärksten Unterschiede ganz unten zu erwarten.

Einen Vorteil hat allerdings die relative Unabhängigkeit selbst benachbarter Stromlinien: bei einer räumlichen Aufnahme, wie sie unseren Versuchen zugrunde lag, kann für rein statistische Zwecke das Material nicht bloß dadurch vergrößert werden, daß man die Dauer einer Aufnahme möglichst verlängert, sondern ebensogut durch Zusammenlegen der gleichzeitig nebeneinander gewonnenen Werte. Dadurch war es möglich, daß z. B. die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe schon aus kurzdauernden Aufnahmen mit einer Ausgeglichenheit hervorging, die verblüffen muß; vergleiche Abschnitt II, 6.

5. Rauhigkeit der Unterlage, Stoppel- und Rübenfeld (Hommelsheim).

Aus einer Gegend, die noch ebener, noch weniger durch Baumwuchs und andere Hindernisse gestört war als das Marchfeld, stammen die Versuche aus Hommelsheim. Sie wurden dort mehr nebenbei angestellt, im Verfolg einer Reihe, die die Erprobung der Wirksamkeit von Feldbegasung mit Kohlensäure zum Zwecke hatte. Hommelsheim liegt südöstlich von Düren im Rheinland auf einer weithin ebenen Platte, in die einzelne Wasserläufe ihre flachen Täler eingeschnitten haben. Die einzelnen Ortschaften sind weit auseinander gelegen, Wald kommt im weiten Umkreis nicht vor, im ganzen also ein Gebiet, in dem man lebhafte, kaum gestörte Luftbewegung von einem ziemlich definiertem Zustand erwarten darf.

Die hier vorgenommenen Untersuchungen hatten im wesentlichen eine Aufklärung über die Verhältnisse in den untersten Luftschichten zum Ziele, insbesondere in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung. Die Aufstellung der Platten erfolgte in einem Querschnitt von 2 *m* Höhe und rund 4 *m* Breite, die Platten wurden so nahe aneinander gerückt als es überhaupt ohne größere Störung des Strömungsverlaufes möglich erschien. Sie hatten einen Abstand von 50 *cm* in der Senkrechten, von 60 *cm* in der Wagrechten. Von der größeren hier gewonnenen Anzahl von Reihen seien als Beleg wieder zwei herausgesucht, die die Verhältnisse sehr gut wiedergeben. Die eine wurde erhalten über einem vollkommen ebenen Stoppelfeld nach Weizen, auf dem auch die einzelnen Stoppeln der Luftströmung kaum ein Hindernis bieten konnten; die andere

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

über einem Rübenfeld, das einen ziemlich gleichförmigen dichten Blätterbestand aufwies, dessen obere Grenze etwa 40 bis 50 *cm* über dem Boden lag. Bei dieser Reihe wurde die Höhe von dem Oberrand des Blätterbestandes an gemessen. Wenn einzelne Unkräuter darüber hervorstanden, so wurden sie, wenigstens in der Richtung, von welcher der Wind herkam, entfernt. Die Strecke, die die Luft in diesem Fall über gleichförmigen Rübenbestand heranwehte, war jedenfalls mehr als 200 *m*, also sicher genügend, um annähernd gleichförmigen Zustand in dem geringen untersuchten Höhenbereich herbeizuführen; das mußte um so mehr der Fall sein, als die Luftbewegung selbst nicht besonders heftig war, die Massen also um so länger über diesem Untergrund verweilten. Über Stoppeln hatte die Strömung schon deshalb sicher ihren Gleichgewichtszustand, weil die ganze Umgebung ebenfalls in Stoppeln lag.

Aufnahme und Auswertung erfolgte hier ebenso wie in den früheren Fällen. Wir geben hier keine Probe der Einzelbilder, deren Aussehen sich in allen wesentlichen Zügen genügend mit den früher besprochenen Zeithöhen deckt, sondern nur wieder Schnitte: je einen Vertikal- und einen Horizontalschnitt aus jeder Reihe, und zwar eine Stelle, die den Unterschied zwischen ihnen besonders deutlich zeigt (Fig. 6 und 7).[1] Es wurde dabei eine neue Art der Darstellung gewählt, die sich schon deshalb empfiehlt, weil es sich weniger um die Absolutwerte der Geschwindigkeit, als vielmehr um deren Gefälle handelt: es sind in dem Diagramm ebenso wie früher Isolinien gezeichnet worden, aber mit viel engeren Stufen, von 25 zu 25 *cm*/sek.; der Raum zwischen diesen Isolinien wurde abwechselnd geschwärzt und weiß gelassen. Geschwärzt z. B. zwischen 0 und 0·25, weiß zwischen 0·25 und 0·5 *m*/sek. usw. Breite Streifen zeigen also geringes Gefälle an, knapp aneinanderliegende starke räumliche Unterschiede.

Fig. 6 gibt zunächst die zwei Vertikalschnitte zum Vergleich. Es sind jedesmal 12 bis 15 Sekunden herausgeschnitten; der Maßstab ist zwar entsprechend der geringen Höhe größer gewählt worden als bei den früheren ähnlichen Darstellungen, das Verhältnis zwischen Höhen- und Zeitmaßstab wurde aber beibehalten, von kleiner Ungleichförmigkeit abgesehen, die durch verschiedene Ablaufgeschwindigkeit des Kinamo hervorgebracht wurde. In die Augen springt sofort der erhebliche Unterschied: über Stoppeln im wesentlichen eine normale Schichtung über dem Boden, eine gleichförmige ruhige Strömung mit geringen zeitlichen Änderungen der Geschwindigkeit. Über Rübe aber ganz gewaltige Störungen gerade in der bodennahen Schicht; diese ersichtlich von der Unterlage ausgehenden Einflüsse werden sosehr wirksam, daß sogar ab Sekunde 5·6 in einiger Höhe über dem Boden beginnend, ab Sekunde 7·8 wieder und viel stärker negative Geschwindigkeiten

[1] Am Schluß des Aufsatzes eingeheftet.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

auftreten. Gerade weil diese sich nicht knapp am Boden zuerst einstellen, sondern in einigem Abstand davon, darf man sie nicht auf eine lokale Unregelmäßigkeit zurückführen — sie sind sicher ein Ausfluß der allgemeinen Strömung, die nur durch das Vorhandensein der besonderen starken Bremsung am Boden anders beeinflußt wird. Hier können wir gut nachsehen, ob eigentliche Wirbel, etwa wagrechter Achse, auftreten, was ja bei vorhandenen starken Geschwindigkeitsunterschieden recht gut der Fall sein könnte. Das Bild, das ein solcher Wirbel in unserer Streifendarstellung bieten müßte, ist in Fig. 8 wiedergegeben: man unterscheidet, wenn der Mittelpunkt etwa mit der allgemeinen Strömung mitwandert und um ihn in einem bestimmten Bereich eigentliche Wirbelströmung herrscht, in weiterer Umgebung wirbelfreie Strömung, zwei deutlich hervortretende Kerne: einen oben, den anderen unten, dazwischen ein sehr starkes Gefälle (dichtgedrängte schmale Streifen); nach außen strahlen die Streifen sich verbreiternd auseinander. Von

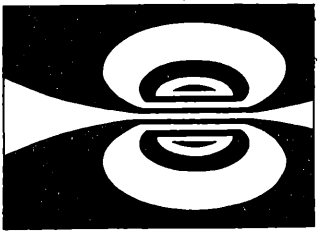

Fig. 8. Bild eigentlichen Wirbels der Isoplethendarstellung der Fig. 6 und 7.

einer solchen Verteilung sehen wir in unseren Diagrammen nichts, es sei denn, man wollte die an die an zweiter Stelle erwähnte negative Geschwindigkeit mit einem solchen Wirbel in Zusammenhang bringen; nur wäre das nicht ganz leicht, denn es fehlt offensichtlich der obere zweite Kern: wenn überhaupt ein Wirbel besteht, wäre das höchstens ein solcher, bei dem bloß eine Sogströmung hervorgerufen wurde, ohne daß in der Hauptströmung — als solche müßten wir die obere auffassen — irgend eine Beschleunigung örtlich erkennbar wäre. Ist schon an dem einen Schnitt diese Deutung zweifelhaft, so wird sie durch die Betrachtung der räumlichen Verteilung auch in seitlicher Richtung ziemlich unwahrscheinlich. Um alle anderen Fälle steht es aber noch schlechter. Wenn Wirbel in einer Bewegung, wie die hier studierte, vorkommen, so sind sie offenbar nur recht seltene Gäste, haben jedenfalls keinen ausschlaggebenden Einfluß auf die Ausbildung der Strömungsform selbst.

Was die Vertikalschnitte erkennen ließen, ist noch deutlicher und überzeugender an den beiden Horizontalschnitten in 0·25 *m* über dem Boden abzulesen, die Fig. 7*a* und *b* wiedergibt. Die

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Darstellung wieder ganz analog, vielleicht nur etwas schwerer lesbar, weil nun nicht mehr, wie im vorhergehenden Fall, im allgemeinen eine einseitige Änderung vorausgesetzt werden darf. Wir sehen da, wie tatsächlich in der für das Stoppelfeld geltenden Figur die Streifen breiter werden, ein Zeichen für eine gleichförmigere Geschwindigkeit. Es lecken gewissermaßen von oben her Massen mit größerer Geschwindigkeit, von unten her solche mit kleinerer zeitweise durch, aber eben nur in schmäleren Strichen, nicht in breiten Fronten. Man sieht auch etwas von dem Hin- und Herschwenken des Windes, uns so geläufig aus allen Fällen, in denen die Strömungen ganz am Boden sichtbar werden: am schönsten vielleicht, wenn ganz leichter Schnee über den Boden hinweggefegt wird.

Ganz anders ist der Verlauf über Rüben. Manchmal treten da auch breitere Streifen auf, z. B. am Anfang, der bei Flaute einen ähnlichen Anblick bietet, wie die Abbildung über Stoppeln bei lebhafterem Wind; dann aber treten in der Wagrechten ganz erhebliche Unterschiede auf, Gegensätze, die von gleichem Betrag sind, wie die größeren in der Senkrechten. Das Überraschende sind die schmalen Zungen geringer Geschwindigkeit, die sich zwischen den breiteren, größeren einnisten, offenbar den kleineren Richtungsänderungen des Windes folgend, wenn nicht sie bedingend. Der Unterschied zwischen den Stellen größter und geringster Windgeschwindigkeit ist recht erheblich: beinahe möchte man an den Unterschied der barometrischen Hoch- und Tiefdruckgebiete erinnern, den die synoptische Meteorologie in den Wetterkarten studiert hat; auch da sind die Maxima breit und flach, die Minima engumgrenzt, schmal und tief eingeschnitten. Ich möchte aber ausdrücklich den Gegensatz nur als einen formalen, die allgemeine Gestalt der Linien bezeichnenden anführen: mit irgend einer Wirbelwirkung haben wir es (das geht wohl aus dem assymetrischen Charakter der nebeneinanderliegenden + und — an und für sich hervor) noch viel weniger zu tun, als es der Vertikalschnitt vielleicht als wahrscheinlich hätte erscheinen lassen. Wir haben also da eine erhebliche, nur durch die Unterlage bedingte Beeinflussung. Wenn auch der Charakter einer ungeordneten Bewegung sehr stark ausgesprochen ist, so können wir doch kaum weiter in den eigentlichen Mechanismus ihrer Auslösung am Boden eindringen, wenn wir keine anderen Mittel anwenden. Auf anderem Wege läßt sich aber wesentlicher Aufschluß gewinnen, wenn man nämlich zusieht, was mit solchen engbegrenzten Störungen geschieht, wenn sie sich, wie es ja der Fall sein muß, in die höheren Schichten hinauf fortpflanzen. Gehen wir wieder von den beiden Vertikalschnitten aus: in einer ziemlich geringen Höhe bereits — man braucht nicht einmal an den oberen Rand der Darstellung, d. i. 1·5 *m* über dem Boden, zu gehen — schneidet eine wagrechte Linie die Streifen über Rübe in viel längeren Stücken als über Stoppel, dort ist also die Strömung wesentlich ruhiger, gleichmäßiger als hier. Und ebenso

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

deutlich folgt dies aus den für 1·25 *m* Höhe angelegten Horizontalschnitten Fig. 7*c* und *d*: der über Rübe ist wesentlich ruhiger, hat eher eine Ähnlichkeit mit dem Horizontalschnitt in 0·25 *m* über Stoppel, während der 1·25 *m*-Schnitt über Stoppel ebenso, wie es der tiefe Schnitt über Rübe zeigte, engbegrenzte Nester mit stärkeren Geschwindigkeitsunterschieden aufweist, unter denen aber — im Gegensatz zu früher — eben die Maxima schärfer ausgeprägt erscheinen. Schließlich braucht das aber nicht verwunderlich zu sein: schon der Vertikalschnitt läßt uns erkennen, daß die Störungen hier von oben hereindringen, wo die Luft ja schneller bewegt ist, während im anderen Fall, bei der Bremsung vom Boden her, die störenden Luftmassen verzögernd wirken mußten.

Wir haben also aus diesen Darstellungen den Eindruck, daß die eintretenden Luftmassen, die durch ihre Störung die ungeordnete Bewegung erst hervorrufen, geschoßartig eindringen, die anders bewegten Luftmassen verdrängend. Wie weit dabei in der Umgebung eines solchen eindringenden Kopfes ausgleichende, vielleicht sogar rückfließende Bewegung ausgelöst wird, ist vorläufig kaum zu übersehen; das geht aber sowohl aus dem Vertikalschnitt wie auch aus den Horizontalschnitten hervor, daß wir in keinem Fall von eigentlichen Wirbeln sprechen können.

6. Wirbel und turbulente Grenzschicht.

Dieses letzte Ergebnis mag vielleicht im Hinblick darauf etwas sonderbar erscheinen, daß wir es ja bei den Versuchen im Laboratorium, die am bequemsten und genauesten beobachtet werden können, immer mit Wirbeln zu tun haben: an der Oberfläche des strömenden Wassers, an der Begrenzung, einer Wand treten immer Rotationsbewegungen vereinzelt oder in Reihen auf, so daß die Turbulenz beinahe selbstverständlich bereits mit der Vorstellung des Auftretens von Wirbeln verknüpft ist. Daß man natürlich eine Wirbelform immer erhalten kann, wenn man einen Geschwindigkeitsunterschied in der Strömung hat und diesen von einem mehr oder weniger mit der Strömung mitwandernden Standpunkt aus betrachtet, ist selbstverständlich; ein derartiges Gebilde hat aber noch nicht die Eigenschaften, z. B. die Stabilität, die wir von einem eigentlichen, etwa dem leichtest zu beobachtenden stationären Wirbel aus anzunehmen gewohnt sind. Und die Wirbel, denen wir in der freien Luft vielleicht begegnen, scheinen eben nur von dieser ausdruckslosen Art zu sein, vielleicht ausgenommen wieder diejenigen, die wir an der Grenze selbst antreffen, in den kleinen Windhosen, die Staub von der Straße her aufwirbeln usw. Wenn wir uns aber vergegenwärtigen, unter welchen Umständen wir in der Regel solche Windhosen beobachtet haben (von thermisch bedingten hier abgesehen), so werden wir fast immer seitliche Hindernisse für die Strömung, Häuser, Bäume usw. in der Nähe gehabt haben. Und daß sich durch Ablösung Wirbel bilden, ist ja aus der Strömungslehre bekannt.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Worin kann aber da der Unterschied gegenüber dem anderen Fall liegen? Man wird sich wohl mit der Vorstellung helfen müssen, daß ein in der freien Strömung entstehender Wirbel doch bald aufgefüllt wird, wenn er frei endigt — das kann recht gut der Fall sein, wenn es auch der klassischen Theorie widerspricht — daß er auch seine Intensität sehr bald verliert, wenn er ringförmig ausgebildet ist — das zeigen uns z. B. die Rauchringe, die beim »Hagelschießen« eine so große Rolle spielten. Nur dann, wenn sein Ende an einer Grenzfläche liegt, ist er vor dem Ausfüllen durch Einströmen gesichert, nur dann wird er einige Dauer haben. Und diesem Umstand ist es zuzuschreiben, daß wir gerade die Wirbel als erste Erscheinung beobachten, wenn wir eine Strömung im Laboratorium oder im begrenzten Flußbett betrachten, denn da sind wir ja immer an einer Begrenzung, an der Oberfläche.

Im Innern der strömenden Flüssigkeit dürfen wir nur bedeutend weniger eigentliche Wirbel annehmen, das zeigen uns eben die Beobachtungen im Freien. Wir haben den sonst viel schwieriger annäherbaren Fall einer nur einseitig begrenzten, seitlich und oben ziemlich freien Strömung vor uns, die den Charakter der Turbulenz doch, und zwar sehr ausgeprägt, aufweist.

Vielleicht kann man eine Bestätigung dieser Ansicht darin sehen, daß sich auch die eindringenden störenden Luftmassen größerer Geschwindigkeit, die z. B. in den Aufzeichnungen von Aspern deutlich in einem wesentlichen Teil ihrer Ausbildung erkannt werden konnten und besprochen wurden, anfangs in der Regel eine mehr wagrechte, später aber in die senkrechte übergehende Erstreckung hatten.

Der wirbelähnliche Charakter, der in dem Geschwindigkeitsunterschied begründet ist, konnte sich eben viel länger dann halten, wenn die Ausfüllung durch die größere Neigung gegen den Boden herabgemindert war.

Die Versuche in Hommelsheim scheinen übrigens in sehr glücklicher Weise jene Bedingungen getroffen zu haben, die uns einen wesentlichen Einblick in die zwei Arten der Erregung der Turbulenz gewähren: einmal die spontane Entstehung im Innern der Strömung selbst, natürlich auch unter dem Einfluß von Geschwindigkeitsunterschieden, letzten Endes also wieder der Bremsung an der Grenzfläche; anderseits die Erregung besonderer Störungen durch die Rauhigkeit der Unterlage. Diese Trennung ist ja auch in der theoretischen Hydrodynamik vorgesehen. Wie aus unserem Fall hervorgeht, werden diese, nach Zeit und Erstreckung viel kürzer begrenzten Störungen mit zunehmender Höhe recht rasch aufgezehrt: sie haben offenbar in etwa $1 \cdot 5\,m$ bereits den größten Teil ihrer Energie verloren, sie sind wesentlich kurzlebiger als die langsameren Störungen, wie sie etwa über Stoppelfeld aus der Höhe herabtauchen. Trotzdem wäre es aber allem Anschein nach verfehlt, die Wirksamkeit der kurzen Bodenstörungen mit dieser Höhe zu begrenzen. Es ist ja auffallend, wie ungestört die Strömung darüber

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

verläuft und da liegt es nahe, gerade dieses auch mit den kleinen Bodenstörungen zusammenzubringen. Vielleicht setzt folgende Analogie die Verhältnisse ins Klare: Wenn man eine turbulente Strömung besänftigen will, so kann man das, allerdings etwas unökonomisch, dadurch tun, daß man ein Netz, ein Gitter, in ihren Weg einschaltet. Dieses Gitter erzeugt eine Reihe kleiner Störungen, es bedingt dadurch eine Zerteilung, einen Zerfall der größeren Unregelmäßigkeiten, die dann ziemlich rasch abklingen. Und Entsprechendes mag auch hier stattfinden: die kleinen vom Boden ausgehenden Störungen bedingen ein rascheres Aufzehren der Energie der langsameren Schwankungen aus der Höhe, es kommt in einer Zwischenschicht zu einer verhältnismäßig ruhigen Strömung, wie man sie ohne das Hindernis am Boden erst viel weiter unten treffen würde. Allerdings wird man etwas vorsichtig sein müssen mit der Übertragung auf andere Dimensionen. Im vorgegebenen Fall wird man eine Rauhigkeitszahl von der Größenordnung von Dezimetern anzunehmen haben, die Oberfläche war eben außerordentlich gleichförmig; es wird schwer sein, eine ähnliche Gleichförmigkeit mit wesentlich größerer Rauhigkeit über entsprechend weiteren Flächen wiederzufinden, etwa einem ganz einheitlichen Wald. Wenn die Analogie wirklich durchführbar ist, müßte über diesem — und das ist ja den Fliegern bekannt — zunächst eine sehr gestörte Schicht angetroffen werden, darüber wäre aber, wenn einmal die unausbleibliche Randstörung abgeflaut ist, eine Zone zu erwarten, die ruhiger ist als sie ohne jene Bodenbedeckung wäre. Wenn die Übertragung erlaubt ist, würde man sie bei nicht allzu heftiger Luftbewegung in einigen hundert Metern suchen, sofern nicht die Beeinflussung der Temperatur durch den stark transpirierenden Wald neue Störungen hervorruft.

Alle diese Bemerkungen sind hier im wesentlichen an zwei Beobachtungsreihen angeschlossen; ähnliche Verhältnisse zeigen aber auch die anderen hier nicht wiedergegebenen Hommelsheimer Aufnahmen, so daß man damit ein allgemeines Verhalten sichergestellt ansehen kann. Allerdings fehlt vorläufig noch die Erweiterung auf große Windgeschwindigkeiten, die während unserer Versuche eben nicht aufgetreten waren. Vielleicht wird man dafür auch die ganze Versuchseinrichtung etwas abändern müssen, sie den stärkeren Winden so anpassen, daß auch sie mit der erforderlichen Genauigkeit beobachtet werden können.

7. Verteilung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe.

Wenn nun die Rauhigkeit der Begrenzung eine so entscheidende Rolle in die Ausbildung der »turbulenten Grenzschicht« spielt, wie dies aus unseren Aufnahmen hervorgeht, so wird ein Einfluß auf die Art der Zunahme der Geschwindigkeit mit der Höhe nicht von der Hand zu weisen sein. Die Theorie hat zwar für den einfachsten Fall ein Gesetz wahrscheinlich gemacht, dahingehend, daß die

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Worin kann aber da der Unterschied gegenüber dem anderen Fall liegen? Man wird sich wohl mit der Vorstellung helfen müssen, daß ein in der freien Strömung entstehender Wirbel doch bald aufgefüllt wird, wenn er frei endigt — das kann recht gut der Fall sein, wenn es auch der klassischen Theorie widerspricht — daß er auch seine Intensität sehr bald verliert, wenn er ringförmig ausgebildet ist — das zeigen uns z. B. die Rauchringe, die beim »Hagelschießen« eine so große Rolle spielten. Nur dann, wenn sein Ende an einer Grenzfläche liegt, ist er vor dem Ausfüllen durch Einströmen gesichert, nur dann wird er einige Dauer haben. Und diesem Umstand ist es zuzuschreiben, daß wir gerade die Wirbel als erste Erscheinung beobachten, wenn wir eine Strömung im Laboratorium oder im begrenzten Flußbett betrachten, denn da sind wir ja immer an einer Begrenzung, an der Oberfläche.

Im Innern der strömenden Flüssigkeit dürfen wir nur bedeutend weniger eigentliche Wirbel annehmen, das zeigen uns eben die Beobachtungen im Freien. Wir haben den sonst viel schwieriger annäherbaren Fall einer nur einseitig begrenzten, seitlich und oben ziemlich freien Strömung vor uns, die den Charakter der Turbulenz doch, und zwar sehr ausgeprägt, aufweist.

Vielleicht kann man eine Bestätigung dieser Ansicht darin sehen, daß sich auch die eindringenden störenden Luftmassen größerer Geschwindigkeit, die z. B. in den Aufzeichnungen von Aspern deutlich in einem wesentlichen Teil ihrer Ausbildung erkannt werden konnten und besprochen wurden, anfangs in der Regel eine mehr wagrechte, später aber in die senkrechte übergehende Erstreckung hatten.

Der wirbelähnliche Charakter, der in dem Geschwindigkeitsunterschied begründet ist, konnte sich eben viel länger dann halten, wenn die Ausfüllung durch die größere Neigung gegen den Boden herabgemindert war.

Die Versuche in Hommelsheim scheinen übrigens in sehr glücklicher Weise jene Bedingungen getroffen zu haben, die uns einen wesentlichen Einblick in die zwei Arten der Erregung der Turbulenz gewähren: einmal die spontane Entstehung im Innern der Strömung selbst, natürlich auch unter dem Einfluß von Geschwindigkeitsunterschieden, letzten Endes also wieder der Bremsung an der Grenzfläche; anderseits die Erregung besonderer Störungen durch die Rauhigkeit der Unterlage. Diese Trennung ist ja auch in der theoretischen Hydrodynamik vorgesehen. Wie aus unserem Fall hervorgeht, werden diese, nach Zeit und Erstreckung viel kürzer begrenzten Störungen mit zunehmender Höhe recht rasch aufgezehrt: sie haben offenbar in etwa $1 \cdot 5\,m$ bereits den größten Teil ihrer Energie verloren, sie sind wesentlich kurzlebiger als die langsameren Störungen, wie sie etwa über Stoppelfeld aus der Höhe herabtauchen. Trotzdem wäre es aber allem Anschein nach verfehlt, die Wirksamkeit der kurzen Bodenstörungen mit dieser Höhe zu begrenzen. Es ist ja auffallend, wie ungestört die Strömung darüber

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

verläuft und da liegt es nahe, gerade dieses auch mit den kleinen Bodenstörungen zusammenzubringen. Vielleicht setzt folgende Analogie die Verhältnisse ins Klare: Wenn man eine turbulente Strömung besänftigen will, so kann man das, allerdings etwas unökonomisch, dadurch tun, daß man ein Netz, ein Gitter, in ihren Weg einschaltet. Dieses Gitter erzeugt eine Reihe kleiner Störungen, es bedingt dadurch eine Zerteilung, einen Zerfall der größeren Unregelmäßigkeiten, die dann ziemlich rasch abklingen. Und Entsprechendes mag auch hier stattfinden: die kleinen vom Boden ausgehenden Störungen bedingen ein rascheres Aufzehren der Energie der langsameren Schwankungen aus der Höhe, es kommt in einer Zwischenschicht zu einer verhältnismäßig ruhigen Strömung, wie man sie ohne das Hindernis am Boden erst viel weiter unten treffen würde. Allerdings wird man etwas vorsichtig sein müssen mit der Übertragung auf andere Dimensionen. Im vorgegebenen Fall wird man eine Rauhigkeitszahl von der Größenordnung von Dezimetern anzunehmen haben, die Oberfläche war eben außerordentlich gleichförmig; es wird schwer sein, eine ähnliche Gleichförmigkeit mit wesentlich größerer Rauhigkeit über entsprechend weiteren Flächen wiederzufinden, etwa einem ganz einheitlichen Wald. Wenn die Analogie wirklich durchführbar ist, müßte über diesem — und das ist ja den Fliegern bekannt — zunächst eine sehr gestörte Schicht angetroffen werden, darüber wäre aber, wenn einmal die unausbleibliche Randstörung abgeflaut ist, eine Zone zu erwarten, die ruhiger ist als sie ohne jene Bodenbedeckung wäre. Wenn die Übertragung erlaubt ist, würde man sie bei nicht allzu heftiger Luftbewegung in einigen hundert Metern suchen, sofern nicht die Beeinflussung der Temperatur durch den stark transpirierenden Wald neue Störungen hervorruft.

Alle diese Bemerkungen sind hier im wesentlichen an zwei Beobachtungsreihen angeschlossen; ähnliche Verhältnisse zeigen aber auch die anderen hier nicht wiedergegebenen Hommelsheimer Aufnahmen, so daß man damit ein allgemeines Verhalten sichergestellt ansehen kann. Allerdings fehlt vorläufig noch die Erweiterung auf große Windgeschwindigkeiten, die während unserer Versuche eben nicht aufgetreten waren. Vielleicht wird man dafür auch die ganze Versuchseinrichtung etwas abändern müssen, sie den stärkeren Winden so anpassen, daß auch sie mit der erforderlichen Genauigkeit beobachtet werden können.

7. Verteilung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe.

Wenn nun die Rauhigkeit der Begrenzung eine so entscheidende Rolle in die Ausbildung der »turbulenten Grenzschicht« spielt, wie dies aus unseren Aufnahmen hervorgeht, so wird ein Einfluß auf die Art der Zunahme der Geschwindigkeit mit der Höhe nicht von der Hand zu weisen sein. Die Theorie hat zwar für den einfachsten Fall ein Gesetz wahrscheinlich gemacht, dahingehend, daß die

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Strömungsgeschwindigkeit v_z im Abstand z von der Wand gegeben ist durch einen Ausdruck:

$$v_z = v_1 . z^{1/7},$$

wo v_1 die Geschwindigkeit im Abstand 1 ist. Diese Beziehung wurde sehr gut erfüllt bei Laboratoriumsversuchen in glatten Rohren, etwas weniger bei solchen mit rauhen Wandungen; sie erwies sich bei der Strömung im Freien sehr gut erfüllt, wenn man die Beobachtungen, die in Schottland von Stevenson vorgenommen waren, zugrunde legte; etwas weniger gut entsprachen schon die Ergebnisse, die Hellmann in der Nähe von Potsdam erzielt hatte.[1] Es war von vornherein nicht abzusehen, ob dieser Unterschied nicht vielleicht doch in der Art der Versuchsanordnung oder der Zusammenfassung zu Mittelwerten begründet sein konnte, oder aber durch einen wesentlichen Unterschied der Art der Strömung, im besonderen mit dem Gegensatz von Meeresnähe gegenüber dem Binnenland. Wir können nun unsere Ergebnisse daraufhin untersuchen, wobei uns die festgestellte ziemliche Unabhängigkeit der Windschwankungen selbst an recht benachbarten Stellen wesentlich umfangreicheres Material gewährleistet: wenn z. B. eine Aufnahme in breiterer Front gemacht wurde, so liefert ein Zusammenlegen der Werte aller Platten derselben Höhe bereits ein Mittel, wie es durch eine entsprechend längere Ausdehnung der Beobachtungen gewonnen hätte werden können. Und dieser Vorteil einer Ersparnis an Zeit ist bei der immerhin recht umständlichen Auswertung sehr erwünscht.

Wir bilden also für eine Anzahl unserer Beobachtungsreihen die mittleren Windgeschwindigkeiten für die einzelnen Höhen. Um sofort einen Überblick über das Gesetz ihrer Höhenzunahme zu erhalten, tragen wir diese Werte in ein Koordinatensystem ein, und zwar den Logarithmus der Windgeschwindigkeit als Abszisse, den der Höhe als Ordinate. Ein Gesetz von der Gestalt $v_z = v_1 . z^{1/n}$ wird dann durch eine Gerade wiedergegeben, deren Richtungstangente den Wert n besitzt.

Fig. 9 kam auf solche Weise zustande. Eingetragen ist die Reihe von Floridsdorf; die von Aspern in zwei Teile geteilt, der eine, Bild 0 bis 200, mit geringerer, der andere, Bild 200 bis 289, mit größerer Geschwindigkeit; ferner die beiden Reihen von Hommelsheim, über Rüben- und Stoppelfeld. Die Punkte jeder Reihe für sich liegen recht gut in einer Geraden und wenn z. B. die zwei obersten Punkte der Schlußreihe Floridsdorf dies weniger gut tun, so braucht das mit Rücksicht auf die besonders starke Verschiedenheit in der Wagrechten, die dabei eintrat — man vergleiche die Einzelbilder 245, 252, 259, die in Fig. 4 *d* wiedergegeben sind —, weniger zu verwundern als das Gegenteil. Wir sehen also, daß das Potenzgesetz in jedem einzelnen Fall erfüllt ist. Die Neigungen der Geraden sind aber verschieden: keine einzige erreicht jene Steilheit, die für einen Exponenten $1/n = 1/7$ erforderlich wäre (man vergleiche mit den

[1] Vgl. W. Schmidt, Massenaustausch usw. Hamburg 1925, p. 86 f.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

entsprechend bezeichneten Graden des Strahlenbüschels in der linken oberen Ecke der Figur), alle bleiben wesentlich darunter. Wir entnehmen, da eine genauere Rechnung, etwa nach der Methode der kleinsten Quadrate, keinen Sinn hätte, einfach der Zeichnung folgende Werte

Floridsdorf, Reihe 4, $n = 5 \cdot 3$, der höchste Wert unter allen hier auftretenden; damit stimmen auch die anderen dortigen Reihen, so kurz sie sein mochten, überein, allerdings mit einigermaßen größerer Streuung.

Aspern, Zeit geringerer Windgeschwindigkeit, $n = 4 \cdot 6$, Zeit größerer Windgeschwindigkeit, $n = 3 \cdot 6$; dieser Unterschied ist aus-

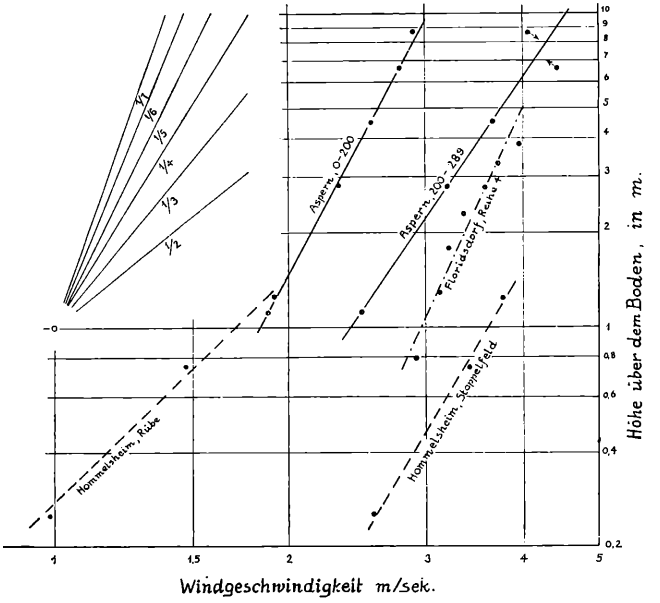

Fig. 9. Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe nach den einzelnen Beobachtungsreihen. Logarithmische Skalen, das Strahlenbüschel links oben gibt die Neigungen jener Geraden an, die das reine Potenzgesetz für die verschiedenen Exponenten darstellen würden.

gesprochen genug, darf aber nicht mit voller Sicherheit in der Richtung verallgemeinert werden, als ob stärkere Strömung immer zu geringeren n-Werten führen müßte. Es wäre vielmehr ganz gut denkbar, daß das eigentlich Unterscheidende nicht etwa die Windgeschwindigkeit selbst ist, sondern ihre zeitliche Zunahme oder Abnahme, denn diese müssen sich in der Windstruktur doch auch äußern.

Hommelsheim, über Rübe $n = 2 \cdot 4$, über Stoppeln $n = 4 \cdot 2$, dort also einen überraschend niedrigen Zahlenwert, der wohl bei keiner anderen Untersuchung je vorgekommen sein dürfte, hier einen hohen, trotzdem hier der Wind stärker wehte (vgl. Aspern 200

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Strömungsgeschwindigkeit v_z im Abstand z von der Wand gegeben ist durch einen Ausdruck:

$$v_z = v_1 . z^{1/7},$$

wo v_1 die Geschwindigkeit im Abstand 1 ist. Diese Beziehung wurde sehr gut erfüllt bei Laboratoriumsversuchen in glatten Rohren, etwas weniger bei solchen mit rauhen Wandungen; sie erwies sich bei der Strömung im Freien sehr gut erfüllt, wenn man die Beobachtungen, die in Schottland von Stevenson vorgenommen waren, zugrunde legte; etwas weniger gut entsprachen schon die Ergebnisse, die Hellmann in der Nähe von Potsdam erzielt hatte.[1] Es war von vornherein nicht abzusehen, ob dieser Unterschied nicht vielleicht doch in der Art der Versuchsanordnung oder der Zusammenfassung zu Mittelwerten begründet sein konnte, oder aber durch einen wesentlichen Unterschied der Art der Strömung, im besonderen mit dem Gegensatz von Meeresnähe gegenüber dem Binnenland. Wir können nun unsere Ergebnisse daraufhin untersuchen, wobei uns die festgestellte ziemliche Unabhängigkeit der Windschwankungen selbst an recht benachbarten Stellen wesentlich umfangreicheres Material gewährleistet: wenn z. B. eine Aufnahme in breiterer Front gemacht wurde, so liefert ein Zusammenlegen der Werte aller Platten derselben Höhe bereits ein Mittel, wie es durch eine entsprechend längere Ausdehnung der Beobachtungen gewonnen hätte werden können. Und dieser Vorteil einer Ersparnis an Zeit ist bei der immerhin recht umständlichen Auswertung sehr erwünscht.

Wir bilden also für eine Anzahl unserer Beobachtungsreihen die mittleren Windgeschwindigkeiten für die einzelnen Höhen. Um sofort einen Überblick über das Gesetz ihrer Höhenzunahme zu erhalten, tragen wir diese Werte in ein Koordinatensystem ein, und zwar den Logarithmus der Windgeschwindigkeit als Abszisse, den der Höhe als Ordinate. Ein Gesetz von der Gestalt $v_z = v_1 . z^{1/n}$ wird dann durch eine Gerade wiedergegeben, deren Richtungstangente den Wert n besitzt.

Fig. 9 kam auf solche Weise zustande. Eingetragen ist die Reihe von Floridsdorf; die von Aspern in zwei Teile geteilt, der eine, Bild 0 bis 200, mit geringerer, der andere, Bild 200 bis 289, mit größerer Geschwindigkeit; ferner die beiden Reihen von Hommelsheim, über Rüben- und Stoppelfeld. Die Punkte jeder Reihe für sich liegen recht gut in einer Geraden und wenn z. B. die zwei obersten Punkte der Schlußreihe Floridsdorf dies weniger gut tun, so braucht das mit Rücksicht auf die besonders starke Verschiedenheit in der Wagrechten, die dabei eintrat — man vergleiche die Einzelbilder 245, 252, 259, die in Fig. 4 *d* wiedergegeben sind —, weniger zu verwundern als das Gegenteil. Wir sehen also, daß das Potenzgesetz in jedem einzelnen Fall erfüllt ist. Die Neigungen der Geraden sind aber verschieden: keine einzige erreicht jene Steilheit, die für einen Exponenten $1/n = 1/7$ erforderlich wäre (man vergleiche mit den

[1] Vgl. W. Schmidt, Massenaustausch usw. Hamburg 1925, p. 86 f.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

entsprechend bezeichneten Graden des Strahlenbüschels in der linken oberen Ecke der Figur), alle bleiben wesentlich darunter. Wir entnehmen, da eine genauere Rechnung, etwa nach der Methode der kleinsten Quadrate, keinen Sinn hätte, einfach der Zeichnung folgende Werte:

Floridsdorf, Reihe 4, $n = 5 \cdot 3$, der höchste Wert unter allen hier auftretenden; damit stimmen auch die anderen dortigen Reihen, so kurz sie sein mochten, überein, allerdings mit einigermaßen größerer Streuung.

Aspern, Zeit geringerer Windgeschwindigkeit, $n = 4 \cdot 6$, Zeit größerer Windgeschwindigkeit, $n = 3 \cdot 6$; dieser Unterschied ist aus-

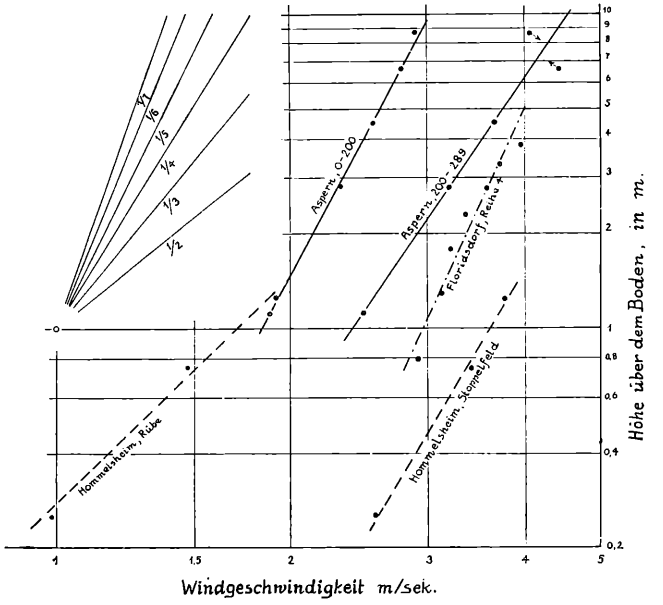

Fig. 9. Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe nach den einzelnen Beobachtungsreihen. Logarithmische Skalen, das Strahlenbüschel links oben gibt die Neigungen jener Geraden an, die das reine Potenzgesetz für die verschiedenen Exponenten darstellen würden.

gesprochen genug, darf aber nicht mit voller Sicherheit in der Richtung verallgemeinert werden, als ob stärkere Strömung immer zu geringeren n-Werten führen müßte. Es wäre vielmehr ganz gut denkbar, daß das eigentlich Unterscheidende nicht etwa die Windgeschwindigkeit selbst ist, sondern ihre zeitliche Zunahme oder Abnahme, denn diese müssen sich in der Windstruktur doch auch äußern.

Hommelsheim, über Rübe $n = 2 \cdot 4$, über Stoppeln $n = 4 \cdot 2$, dort also einen überraschend niedrigen Zahlenwert, der wohl bei keiner anderen Untersuchung je vorgekommen sein dürfte, hier einen hohen, trotzdem hier der Wind stärker wehte (vgl. Aspern 200

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

bis 289). Die Werte können kaum die Vermutung stützen, daß die verschiedenen Temperaturverhältnisse diesen gewaltigen Unterschied erklären konnten, wenn man auch zugeben wird, daß ein solcher in geringerem Ausmaße besteht.

Gerade diese Ergebnisse sind von ausschlaggebender Bedeutung: an und für sich schon wegen ihrer Beziehung zur Theorie der Turbulenz, insbesondere zur Entscheidung, welche Rolle der Wandreibung zukommt; dann aber auch deshalb, weil mit einem anderen Gesetz der Windzunahme unmittelbar auch ein anderes Gesetz der Zunahme des Turbulenzkoeffizienten, der Größe des Austausches A, wie ich sie allgemeiner genannt habe, verbunden ist. Diese Größe vertritt in allen hieher gehörigen Beziehungen den Koeffizienten der inneren Reibung bei laminarer Strömung, sie gibt mit dem senkrechten Geschwindigkeitsgefälle multipliziert den Betrag der Scherkraft, die von den rascher bewegten oberen Schichten auf die unteren ausgeübt wird. Im Gegensatz zum Fall innerer Reibung ist diese Beizahl keine Konstante, sondern nach Ort und Zeit verschieden. Hat man annähernd gleichförmige ausgeglichene Strömung, wie wir sie bei unseren Versuchen als erste Annahme zugrundelegen werden, so wird sich eine Abhängigkeit von der Höhe, eine Zunahme mit dieser ergeben. Sie würde sich für den rein theoretischen Fall, genügend genau auch für die Beobachtungen in England, der Formel einfügen:

$$A_z = A_1 . z^{6/7},$$

wenn der Index sich auf die Höhe bezieht. Die Zunahme würde also an jeder Stelle etwas langsamer erfolgen, als es bei einer reinen Proportionalität mit der Höhe der Fall wäre. Dadurch, daß n aber wesentlich kleinere Werte annimmt, muß auch das Gesetz der Zunahme des Austausches, allgemein:

$$A_z = A_1 . z^{(n-1)/n},$$

ein merklich anderes werden. Nur einige Werte in leicht verständlicher Zusammenstellung in Tafel III.

Tabelle III.

Werte des Austausches in verschiedenen Höhen über dem Boden bei verschiedenen Gesetzen der Windzunahme. Austausch in 1 m Höhe = 1 gesetzt.

	bei n =		
Höhe	7	5	3
$^1/_4$ m.....	0·305	0·33	0·40
1 m..	1	1	1
4 m..	3·28	3·03	2·52
16 m.....	10·78	9·19	6·35

Nun ist aber der Austausch in den untersten Schichten für eine Reihe von Erscheinungen aus anderen Gebieten von ausschlag-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

gebender Bedeutung. Genannt sei hier vielleicht der Umsatz von Wärme, die seitens der Sonne dem Boden zustrahlt, durch nächtliche Ausstrahlung ihm entzogen wird; der Umsatz von Wasserdampf und damit die Intensität der Transpiration der Pflanzen; der Umsatz an Kohlensäure und beliebigen anderen Bestandteilen der freien Luft; die Tragfähigkeit der Luft bei Schneetreiben, Sandtreiben usw. Um bloß die Wirkung auf die letztere zu erwähnen, so wird sie bei kleinerem n noch merklich enger beschränkt sein; der Austausch in einer bestimmten Vergleichshöhe muß von vornherein größere Beträge besitzen, wenn der gleiche Transport an suspendierter Substanz eintreten soll, wie in dem früher als ziemlich allgemein gültig angenommenen Normalfall.

III. Schlußbemerkungen.

Die hier auseinandergesetzten Ergebnisse zeigen nun schon den Weg für weitere Forschung: in erster Linie sind natürlich Aufnahmen der Feinstruktur in ihrer zeitlichen und räumlichen Veränderung, hauptsächlich aber in ihrer Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen, vor allem des Bodens, dann aber auch, was bisher bei der geringen Zahl der Einzelaufnahmen nicht berücksichtigt werden konnte, der Temperaturschichtung (verschiedene Stabilität) notwendig. Man wird die Versuche schrittweise in größere Höhen hinauf ausdehnen, ferner neben der verschiedenen Rauhigkeit des Bodens die Wirkung bestimmter, zunächst einfach definierter Hindernisse untersuchen. Man wird auch die Veränderung in der Richtung der Luftbewegung verfolgen müssen.

Anderseits läßt sich ein dieser Art zuwachsender Stoff nicht mehr besprechen, darstellen oder mitteilen, man wird zu einer Art statistischer Arbeit schreiten. Eine solche ist schließlich auch die Angabe der Windzunahme mit der Höhe, die allerdings nicht bloß als formale Angabe zu werten ist, sondern sicherlich bereits etwas von der Regelmäßigkeit der ungeordneten Bewegung enthüllt. Sonst würden wir ja nicht schon aus ganz kurzen Reihen die überraschend gute Übereinstimmung mit einer einfachen Beziehung erhalten haben. Schwerer zu erfassen, aber doch noch erreichbar, dürfte eine Angabe sein, wie sich die Schwankungen des Windes auf die verschiedenen Periodendauern verteilen. Gerade da muß sich auch eine ausgesprochene Gesetzmäßigkeit ergeben, die vielleicht das eigentliche Wesen der besonderen Strömungsart erkennen ließe.

Versuche derart sind in dem Augenblick des Abschlusses dieser Arbeit nach verschiedenen Richtungen hin bereits in Angriff genommen worden. Auch sie werden noch nicht eine endgültige Lösung bringen können, sondern nur ebenso wie die hier auseinandergesetzten Versuche erste Schritte in ein neues, kaum bekanntes Gebiet sein. Bevor ein allseitiges, umfangreiches Beobachtungsmaterial gesammelt vorliegt, wird man noch etwas vorsichtig sein müssen in

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

bezug auf eine Verallgemeinerung der gewonnenen Ergebnisse. Immerhin folgten schon aus den wenigen ausführlich untersuchten Reihen ganz wesentliche Anregungen für die Theorie. Gegenüber dieser und den Laboratoriumsuntersuchungen, auf die sie sich gründet, haben die Beobachtungen im Freien den ganz außerordentlichen Vorteil der größeren Abmessungen, die es uns gestatten, mit Bequemlichkeit differenzierte Untersuchungen in der augenblicklich das meiste Interesse beanspruchenden Grenzschicht auszustellen.

Wenn schon die ersten Versuche in der neuen Richtung zu wichtigen Ergebnissen führen konnten, so ist ein wesentlicher Teil des Verdienstes den Stellen zu danken, die durch ihre Unterstützung und Hilfe eine so umfangreiche Aufgabe erst ermöglichten. Als erste ist dankend zu nennen die Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft in Berlin, die in Erkenntnis der Wichtigkeit einer Erforschung der Turbulenz in der freien Luft diese in den Kreis ihrer Gemeinschaftsarbeiten der »großen Aufgaben«, Strömungsforschung in der Atmosphäre, aufnahm und in jeder Weise, durch Beistellung von Apparaten, Bestreitung der nicht unbeträchtlichen Kosten für Transport, Aushilfe usw. förderte. Danken muß ich insbesondere Herrn Dr. Paul Lehmann, der — als Stipendiat der Notgemeinschaft — den überwiegenden Teil seiner Zeit den hier angeschnittenen Aufgaben widmete; er machte den größten Teil der Aufnahmen und fast die ganze Auswertung. Bei einigen Versuchen wurde er durch Herrn O. Raab unterstützt, bei den Aufnahmen in Hommelsheim waren mir die Herren Dr. P. H. Brodersen und Becker aus Bonn behilflich. Für die Ermöglichung der Aufnahmen bin ich verbunden dem Bundesministerium für Handel und Gewerbe, Industrie und Bauten, beziehungsweise der diesem unterstehenden Leitung des Flugplatzes Aspern, dem Bundesministerium für Heereswesen für die Beistellung von Teleskopmasten; ferner in bezug auf die Versuche in Lunz dem Leiter der dortigen Biologischen Station, Prof. Ruttner, in Hommelsheim der F. Riedel G. m. b. H. in Essen, die ihre Anlagen mitbenützen ließ, vor allem aber Herrn Gutsbesitzer E. Schnitzler in Hommelsheim, der es an keiner Unterstützung bei unseren Arbeiten fehlen ließ.

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

bezug auf eine Verallgemeinerung der gewonnenen Ergebnisse. Immerhin folgten schon aus den wenigen ausführlich untersuchten Reihen ganz wesentliche Anregungen für die Theorie. Gegenüber dieser und den Laboratoriumsuntersuchungen, auf die sie sich gründet, haben die Beobachtungen im Freien den ganz außerordentlichen Vorteil der größeren Abmessungen, die es uns gestatten, mit Bequemlichkeit differenzierte Untersuchungen in der augenblicklich das meiste Interesse beanspruchenden Grenzschicht auszustellen.

Wenn schon die ersten Versuche in der neuen Richtung zu wichtigen Ergebnissen führen konnten, so ist ein wesentlicher Teil des Verdienstes den Stellen zu danken, die durch ihre Unterstützung und Hilfe eine so umfangreiche Aufgabe erst ermöglichten. Als erste ist dankend zu nennen die Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft in Berlin, die in Erkenntnis der Wichtigkeit einer Erforschung der Turbulenz in der freien Luft diese in den Kreis ihrer Gemeinschaftsarbeiten der »großen Aufgaben«, Strömungsforschung in der Atmosphäre, aufnahm und in jeder Weise, durch Beistellung von Apparaten, Bestreitung der nicht unbeträchtlichen Kosten für Transport, Aushilfe usw. förderte. Danken muß ich insbesondere Herrn Dr. Paul Lehmann, der — als Stipendiat der Notgemeinschaft — den überwiegenden Teil seiner Zeit den hier angeschnittenen Aufgaben widmete; er machte den größten Teil der Aufnahmen und fast die ganze Auswertung. Bei einigen Versuchen wurde er durch Herrn O. Raab unterstützt, bei den Aufnahmen in Hommelsheim waren mir die Herren Dr. P. H. Brodersen und Becker aus Bonn behilflich. Für die Ermöglichung der Aufnahmen bin ich verbunden dem Bundesministerium für Handel und Gewerbe, Industrie und Bauten, beziehungsweise der diesem unterstehenden Leitung des Flugplatzes Aspern, dem Bundesministerium für Heereswesen für die Beistellung von Teleskopmasten; ferner in bezug auf die Versuche in Lunz dem Leiter der dortigen Biologischen Station, Prof. Ruttner, in Hommelsheim der F. Riedel G. m. b. H. in Essen, die ihre Anlagen mitbenützen ließ, vor allem aber Herrn Gutsbesitzer E. Schnitzler in Hommelsheim, der es an keiner Unterstützung bei unseren Arbeiten fehlen ließ.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse

Jahr/Year: 1929

Band/Volume: 138_2a

Autor(en)/Author(s): Schmidt Wilhelm F.

Artikel/Article: Die Struktur des Windes. 85-116