Dritter Abschnitt.

Von den Windrädern.

Windräder. Die atmosphärische Luft kann entweder durch ihre Strömungen oder durch ihre Expansivkraft mechanische Arbeiten verrichten. Am gewöhnlichsten benutzt man aber die natürlichen Luftströmungen oder den Wind zur Verrichtung von mechanischer Arbeit, und zwar durch Anwendung von Rädern, welche einen Theil der lebendigen Kraft des gegen sie sich bewegenden Windes zu gute machen. Diese Räder heißen Windräder, die unterstützenden Gebäude sammt Rädern und allen übrigen Theilen werden Windmühlen genannt. Ein Windrad ist zwar eine Radwelle zur Aufnahme der Windkraft, wie ein Wasserrad eine Radwelle zur Aufnahme der Wasserkraft, doch weichen beide Räder deshalb wesentlich von einander ab, weil das eine einem nach allen Seiten hin unbegrenzten Luftstrome, das andere aber einem ganz oder wenigstens theilweise begrenzten Wasserstrome entgegengerichtet ist. Ein gewöhnliches Schaufelrad, dem unbegrenzten Windstrome entgegengerichtet, kann gar keine Umdrehung annehmen, weil der Wind die Schaufeln auf der einen Seite des Rades genau ebenso stark stößt, als die auf der anderen Seite, beide Stoßkräfte also einander aufheben. Um es zur Aufnahme der Windkraft geschickt zu machen, müßte der Windstoß nur einseitig auf das Rad wirken, und daher die andere Seite des Rades gegen den Wind geschützt, etwa von einem feststehenden Mantel umgeben werden. Dieser Mantel kann allerdings erspart werden, wenn man die Schaufeln beweglich macht, nämlich dieselben an Angeln so aufhängt, daß sie sich von selbst auf der einen Seite des Rades mit der breiten Fläche dem Windstrome entgegenstellen, auf der andern Seite aber durch Entgegenstellen mit der schmalen Seite sich dem Windstoße so viel wie möglich entziehen. Um solche Räder nicht nach der Windrichtung stellen zu müssen, giebt man denselben verticale Umdrehungsaxen, läßt dieselben also in §. 178.

Horizontalebenen umlaufen, weshalb man sie auch horizontale Windräder genannt hat.

Vortheilhafter als die Schaufelräder sind aber die sogenannten Flügelräder, d. i. Räder, deren Axen dem Wind- oder Wasserstrome entgegengerichtet sind, und deren nur in sehr kleiner Anzahl vorhandene Arme breite Flächen oder sogenannte Flügel tragen, welche zur Aufnahme der Windkraft dienen und deshalb dem Windstrome unter einem schiefen Winkel entgegengerichtet sind. Da die Richtung des Windes eine mehr oder weniger horizontale ist, so hat man natürlich auch das Flügelrad mit seiner Axe ungefähr horizontal zu legen, weshalb seine Umdrehungsebene eine nahezu verticale ist, und das Rad auch ein verticales Windrad genannt wird.

Anmerkung. Man hat auch horizontale Windräder mit hohlen Schaufeln angewendet und diese Panemoren genannt. Da der Windstoß gegen eine hohle Fläche größer ist als gegen eine erhabene, und diese Schaufeln dem Winde auf der einen Seite des Rades die hohle und auf der andern die erhabene Seite zuwenden, geht allerdings ein solches Rad ohne alle weiteren Hülfsmittel, wenn auch nur mit geschwächter Kraft, um.

§. 179. **Flügelräder.** Der Hauptvorzug der Flügelräder vor den Schaufelrädern besteht darin, daß dieselben bei gleicher Größe oder gleichem Gewichte und unter übrigens gleichen Verhältnissen mehr Arbeit verrichten als die letzteren Räder. Während bei einem Schaufelrade nur eine einseitige Wirkung stattfindet, und diese Wirkung im Ganzen nur der Projection der dem Windstrome ausgesetzten Schaufeln in der Ebene rechtwinkelig zur Windrichtung entspricht, findet bei den Flügelrädern eine ununterbrochene Wirkung auf jeden der Flügel statt. Wenn auch eine Flügelfläche des ersten Rades mit einer Schaufelfläche des andern einerlei Inhalt hat, und vielleicht auch der Wind bei dem schiefen Stoße gegen die Flügel des ersten Rades weniger vortheilhaft wirkt als bei dem Stoße gegen die Schaufeln des zweiten, so wird doch bei gleicher Windgeschwindigkeit das Flügelrad viel mehr mechanisches Arbeitsvermögen sammeln können als das Schaufelrad, da es dasselbe einem viel größern Windstrome entnimmt. Vielfache Erfahrungen haben auch wirklich darauf geführt, daß die Flügelräder unter übrigens gleichen Umständen mindestens viermal so viel leisten als die Schaufelräder, welche, wenn dies nicht der Fall wäre, wegen ihrer leichtern und sicherern Aufstellung und vorzüglich noch wegen ihrer geringen Axenreibung sich gewiß schon längst einen Platz in der praktischen Mechanik verschafft haben würden. Wir sprechen daher in der Folge auch nur von den Windmühlen mit Flügelrädern. Die nähere Einrichtung der Flügelräder ist folgende. Zunächst besteht ein solches Rad aus einer starken Welle, welche zwar meist aus Holz, viel zweckmäßiger aber aus Eisen hergestellt wird. Man giebt der Flügelwelle 5 bis 15 Grad Neigung gegen den Horizont, damit die

Flügel unterhalb in der nöthigen Entfernung vom Gebäude umlaufen und das ganze Flügelrad sicherer in seinen Lagern ruhe. An dieser Welle ist zu unterscheiden der Kopf, der Hals, das Transmissionsrad und der Zapfen. Der Kopf ist diejenige Stelle, wo die Flügel aufsitzen, der Hals (Schlot) aber ist der unmittelbar hinter ihm liegende abgedrehte Theil der Welle, in welchem das ganze Rad vorzüglich unterstützt wird, das Transmissionsrad dient zur Fortpflanzung der Bewegung oder zur Verbindung des Flügelrades mit der Arbeitsmaschine, und endlich ist der Zapfen am hintern Ende der Welle zur vollständigen Unterstützung des Rades nöthig. Der Arbeitsverlust, welchen die Flügelwelle wegen der Reibung in ihrer Unterstützung erleidet, ist wegen des nicht unbedeutenden Gewichtes derselben und vorzüglich wegen ihrer großen Umdrehungsgeschwindigkeit beträchtlich, und deshalb ist es nöthig, alle Mittel anzuwenden, wodurch dieser Verlust herabgezogen wird. Aus diesem Grunde ist daher auch eine eiserne Flügelwelle viel zweckmäßiger als eine hölzerne, weil dieselbe einen ansehnlich schwächern Hals erhalten kann als eine hölzerne. Während die Stärke des Halses einer hölzernen Flügelwelle 0,5 bis 0,6 m beträgt, ist dieselbe bei eisernen Flügelwellen nur 0,15 bis 0,25 m. Ueberdies ist aber noch die Reibung an und für sich bei den Holzwellen größer als bei den Eisenwellen, weil man in der Regel den Hals derselben nicht mit einem eisernen Mantel, sondern nur mit einer Reihe von Eisenstäben umgiebt, die immer ein Abschaben im Lager hervorbringen.

Anmerkung. Ueber die horizontalen Windmühlen von Beatson u. s. w. sind vorzüglich englische Schriften, z. B. von Nicholson, Gregory u. s. w., nachzulesen. Siehe auch den Abschnitt über Windmühlen in Rühlmann's Allgemeiner Maschinenlehre Bd. I.

Windflügel. Die Windflügel bestehen aus den Windruthen, aus den Windsprossen oder Scheiden und aus der Bedeckung. Die Windruthen sind radial von dem Wellenkopfe auslaufende Arme von circa 10 m Länge, wovon jeder einen Flügel trägt. Die Anzahl dieser Arme ist, wie die Anzahl der Flügel, gewöhnlich vier, seltener fünf oder sechs. Nahe an der Welle sind diese Ruthen 0,30 m dick und 0,24 m breit, am äußersten Ende aber haben sie nur 0,15 m Dicke und 0,12 m Breite. Ihre Befestigungsweise ist sehr verschieden; ist die Welle von Holz, so steckt man zwei Ruthen rechtwinkelig durch den Wellenkopf und bildet dadurch vier Flügelarme. Auch befestigt man wohl die Arme durch Schrauben auf eine den Wellenkopf bildende Rosette, ähnlich wie die Arme eines Wasserrades, zumal wenn die Welle von Gußeisen ist. Die Sprossen oder Scheiden sind hölzerne Querarme, welche durch die Ruthe hindurchgesteckt werden, die zu diesem Zwecke in Abständen von 0,4 bis 0,5 m durchlocht wird. Je nachdem die §. 180.

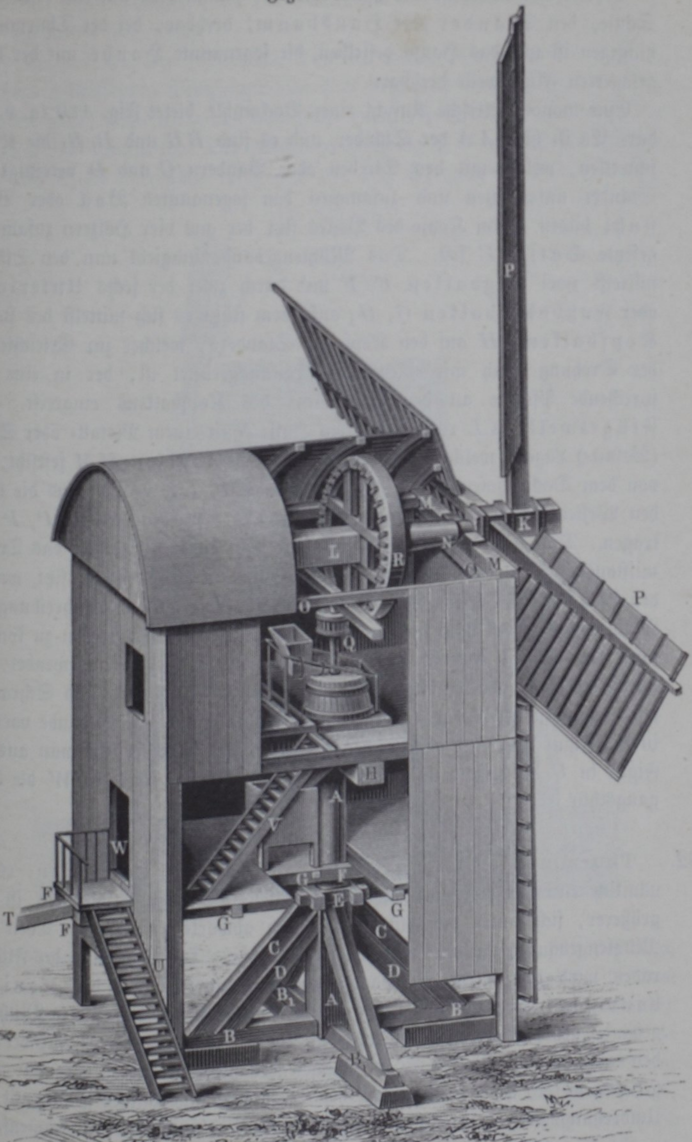
Flügel eine rechteckige oder trapezförmige Gestalt erhalten sollen, sind die sämmtlichen Sprossen von gleicher oder, nach der Welle zu, von abnehmender Länge. Die innerste Sprosse steht $1/_7$ bis $1/_6$ der Armlänge vom Wellenmittel ab, und ihre Länge ist ungefähr diesem Abstande gleich, der äußersten Sprosse giebt man aber $1/_5$ oder gar $1/_4$ der Armlänge zur eigenen Länge. Bei den meisten Windmühlen gehen die Windruthen nicht mitten durch die Flügel, sondern sie theilen dieselben so, daß der nach dem Winde zu gerichtete Theil nur ein bis zwei Fünftel der ganzen Flügelbreite ausmacht. Deshalb ragen auch die Sprossen auf der ersten Seite viel weniger aus der Ruthe hervor als auf der andern. Den schmalern Theil des Flügels bedeckt man gewöhnlich durch das Windbrett, auf den breitern Theil hingegen kommen die sogenannten Windthüren oder eine Bedeckung von Segeltuch zu liegen.

Man macht die Windflügel eben, windschief oder hohl, jedenfalls geben die wenig ausgehöhlten windschiefen Flügel die größte Leistung, was noch weiter unten näher auseinandergesetzt werden wird. Bei den ebenen Windflügeln haben sämmtliche Windsprossen einen und denselben Neigungswinkel von 12^0 bis 18^0 gegen die Umdrehungsebene, sind aber die Flügel windschief, so weichen die inneren Sprossen ungefähr 24^0 und die äußeren 6^0 von dieser Ebene ab, und es bilden die Neigungswinkel der zwischenliegenden Sprossen einen Uebergang zwischen den letzten beiden Winkeln. Um den Windflügeln eine hohle Form zu geben, hat man krumme Windruthen und Scheiden anzuwenden. Obwohl dadurch nach den Regeln des Stoßes an Arbeit gewonnen wird, so wendet man diese Construction wegen der schwierigern Ausführung fast gar nicht mehr an. Zur vollständigen Unterstützung der Flügeldecke sind die äußeren Enden der Scheiden noch durch die sogenannten Saumlatten mit einander verbunden und, zumal wenn die Decke aus Leinwand besteht, überdies noch Zwischenlatten eingesetzt, so daß das ganze Flügelgerippe aus Feldern von ungefähr 0,2 qm Inhalt besteht. Die Holzbedeckung wird durch vier Thüren gebildet, welche aus dünnen Holzbrettchen zusammengesetzt sind und durch Riegel auf dem Flügelgerippe festgehalten werden, die Segeltuchdecke hingegen wird durch Schlingen und Haken mit dem Flügelgerippe verbunden.

§. 181. **Bockmühlen.** Da die Richtung des Windes eine veränderliche und die Axe des Rades in diese zu stellen ist, so muß das Rad beweglich aufgestellt und zwar um eine verticale Axe drehbar sein. Nach der Art und Weise, wie diese Drehung verwirklicht wird, hat man folgende zwei Classen von Windmühlen.

1. Die deutsche oder Bockmühle, und 2. die holländische oder Thurmmühle.

Fig. 410.



Bei der Bockmühle ist das ganze Gebäude sammt Rad um eine feststehende Säule, den **Ständer** oder **Hausbaum**, drehbar, bei der Thurmmühle hingegen ist nur das Haupt desselben, die sogenannte **Haube** mit der darin gelagerten Flügelwelle drehbar.

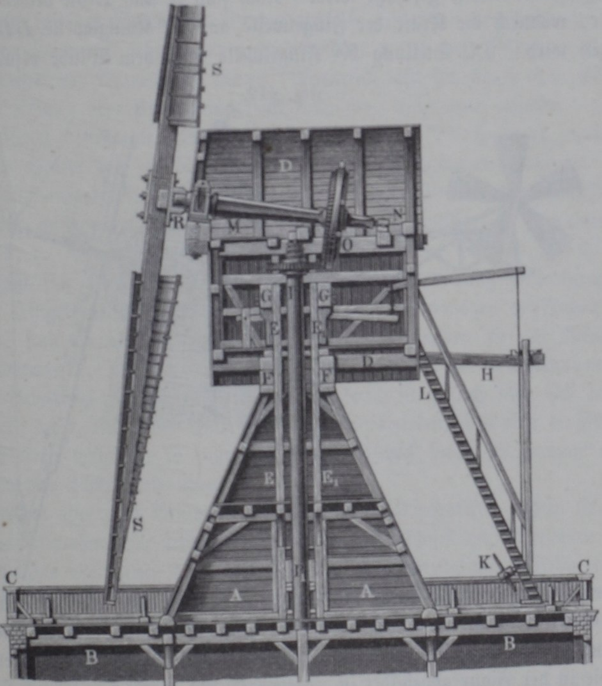
Eine monodimetrische Ansicht einer Bockmühle bietet Fig. 410 (a. v. S.) dar. Es ist hier AA der Ständer, und es sind BB und $B_1 B_1$ die Kreuzschwellen, welche mit den Streben oder Bändern C und D vereinigt den Ständer unterstützen und zusammen den sogenannten **Bock** oder **Bockstuhl** bilden. Am Kopfe des Bockes sitzt der aus vier Hölzern zusammengesetzte **Sattel** E fest. Das Mühlengebäude umgiebt nun den Ständer mittelst zwei **Fugbalken** F, F und durch zwei der sechs **Unterlags-** oder **Fußbodenbalken** G, G; außerdem stützt es sich mittelst des starken **Kopfbalkens** H auf den Kopf des Ständers, welcher zur Erleichterung der Drehung noch mit einem **Stifte** ausgerüstet ist, der in eine entsprechende Pfanne an der Unterfläche des Kopfbalkens eingreift. Die **Flügelwelle** KL ruht mit ihrem Halse N in einem Metall- oder Stein- (Basalt-) Lager, welches auf dem großen **Wellbalken** MM festsitzt, der von dem Dachrahmen OO getragen wird. KP, KP u. s. w. sind die durch den Wellenkopf gesteckten Windruthen, welche vier ebene Flügel $P, P\ldots$ tragen. Die Figur stellt eine Mahlmühle vor; daher greift hier das Transmissionsrad R in ein Getriebe Q ein, das auf dem Mühleisen festsitzt, welches den **Läufer** oder obern Mühlstein S trägt. Die weitere Beschreibung des Mahlzeuges gehört nicht hierher. Um das ganze Gebäude drehen zu können, wird der **Stert** oder **Sterz** T, d. i. ein langer Hebel, angewendet, der zwischen den Fugbalken liegt, mit diesen durch Querhölzer und Schrauben fest verbunden ist, übrigens aber 6 bis 10 m lang aus dem Gebäude vorragt, in der Figur aber nur abgebrochen gezeichnet ist. Noch ersieht man aus der Figur in U die äußere und in V die innere Treppe, sowie in W die Eingangsthür.

§. 182. **Thurmmühlen.** Es giebt zwei Arten von **Thurmmühlen**; es ist nämlich entweder nur der die Flügelwelle einschließende, oder es ist ein größerer, sich unter die Flügelwelle nach abwärts erstreckender Theil des Mühlengebäudes um eine verticale Axe drehbar. Die Bewegung des Flügelrades wird hier durch ein Paar Zahnräder zunächst auf den **Königsbaum**, d. i. eine starke stehende Welle, welche durch das ganze Mühlengebäude geht, übertragen. Damit hierbei der Eingriff der Zahnräder bei den verschiedenen Stellungen des Flügelrades nicht verändert oder gar aufgehoben werde, ist es nöthig, daß die Axe des Königsbaumes genau mit der Umdrehungsaxe des beweglichen Theiles vom Mühlengebäude zusammenfalle.

In Fig. 411 ist ein Durchschnitt von einer Thurmmühle der zweiten Art abgebildet, welche zwischen einer Bockmühle und einer Thurmmühle der ersten Art fast mitten inne steht.

Es ist hier AA der feststehende Thurm, welcher über dem die Arbeitsmaschine enthaltenden Mühlengebäude BB steht und von der Gallerie CC umgeben wird, sowie DD das bewegliche Haupt der Mühle, das durch den Holzring FF unmittelbar und durch den Holzring GG mittelst der Säulen EE und E_1E_1 unterstützt wird und nur eine Drehung um diese gleichsam

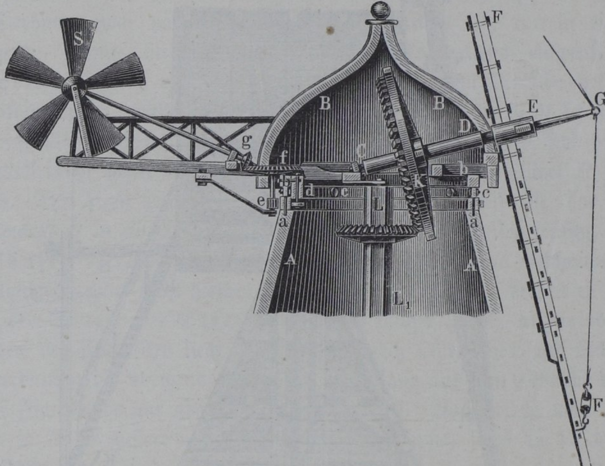
Fig. 411.



den Ständer ersetzenden Säulen zuläßt. Die Drehung selbst läßt sich durch den Kreuzhaspel K bewirken, der an der Treppe KL sitzt, welche mit dem beweglichen Gebäude DD und besonders mit dem Sterze H fest verbunden ist. Die Flügelwelle MN ist von Gußeisen und ruht bei M und N in mit Kanonenmetall ausgefütterten gußeisernen Lagern, O und P sind eiserne Zahnräder, wodurch die Umdrehung der Flügelwelle auf die Königswelle PP_1 übertragen wird. Die Windflügel RS, RS... sind windschief und durch Schrauben und ein eisernes Kreuz mit dem Muff R verbunden, der einerseits ein zweites Kreuz, andererseits aber eine ausgebohrte Höhlung hat, welche über den abgedrehten Wellenkopf gesteckt und darauf festgekeilt wird.

Der obere Theil einer Thurmmühle der ersten Art ist in Fig. 412 abgebildet; AA ist der Obertheil des feststehenden, aus Holz oder Steinen aufgeführten und pyramidal geformten Thurmes, BB ist ferner die bewegliche Haube, CDE ist die Flügelwelle, sowie EF eine aus zwei Theilen zusammengesetzte Windruthe, welche durch Seile wie FG mittelst eines auf dem Wellenkopfe aufsitzenden Mönchs EG gegen das Biegen oder Abbrechen durch den Windstoß geschützt wird. Noch sind K und L die beiden Zahnräder, wodurch die Kraft der Flügelwelle auf die Königswelle LL_1 übertragen wird. Die Stellung der Flügelwelle nach dem Winde erfolgt hier

Fig. 412.



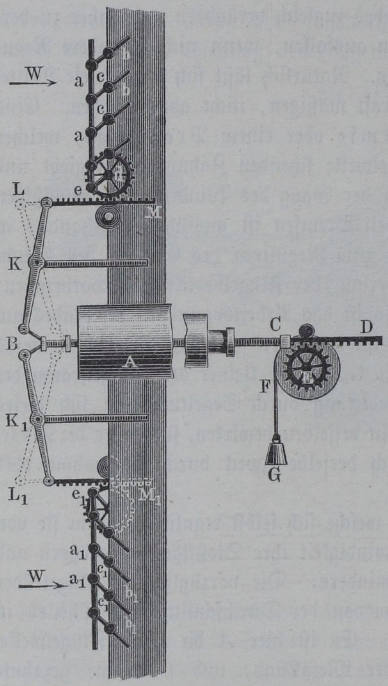
in der Regel ebenfalls durch den Sterz oder durch eine Kurbel mit Rad und Getriebe, kann aber auch durch eine große Windfahne, deren Ebene in die der Wellenaxe fällt, noch besser endlich durch ein besonderes Steuerrad S, wie in der Figur abgebildet ist, hervorgebracht werden. Damit sich die Haube leicht drehen lasse, wird dieselbe nach der Art von Drehscheiben (s. Thl. III, 2) auf Rollen $c, c, c\ldots$ gestellt, welche mit einander durch zwei Reifen verbunden sind und zwischen Kränzen oder Ringen aa und bb laufen, wovon der eine oder Rollring oben auf dem Thurme und der andere oder Laufring unten an der Haube festsitzt. Um endlich das Abheben der Haube zu verhindern, wird innen an b noch ein Kranz d (Ansatzring) angeschraubt, welcher zur Erleichterung der Bewegung ebenfalls mit Rollen, die an der Innenfläche von aa herumlaufen, ausgerüstet werden kann.

Bei Anwendung eines Steuerrades ist die Außenfläche des Rollringes aa von einem gezahnten Kranze umgeben, in welchen ein Getriebe oder kleines Zahnrad e eingreift, das mittelst der Zahnrädchen f und g durch das Steuerrad umgedreht wird und dadurch eine Drehung der Haube bewirkt, sobald die Windrichtung aus der Umdrehungsebene von S herausgetreten ist.

Kraftregulirung. Der Wind ist nicht allein in seiner Richtung, §. 183.
sondern auch in seiner Geschwindigkeit oder Intensität veränderlich; wäre nun aber die angehängte Last eines Windrades constant, so würde sich ihre Bewegung mit der Stärke des Windes zugleich verändern und daher zu verschiedenen Zeiten oft sehr verschieden ausfallen, wenn nicht besondere Regulirungsmittel zur Anwendung kämen. Natürlich läßt sich durch diese Mittel nur die Wind- oder Umdrehungskraft mäßigen, nicht aber erhöhen. Eins dieser Mittel besteht in einer Bremse oder einem Preßringe, welcher die obere Hälfte des auf der Flügelwelle sitzenden Zahnrades umgiebt und auf dieselbe aufgedrückt wird, wenn der Gang des Windrades zu ermäßigen oder ganz aufzuheben ist. Von den Bremsen ist ausführlich gehandelt in Thl. III, 1. Ein anderes Mittel zum Reguliren des Ganges der Windräder läßt sich aber durch Veränderung der Flügelbedeckung hervorbringen; sind die Flügel vollständig bedeckt, so ist das Arbeitsvermögen des Rades am größten, sind sie aber nur theilweise bekleidet, so haben sie ein kleineres Arbeitsvermögen, und zwar um so kleiner, je kleiner der Flächenraum der ganzen Bedeckung ist. Bei der Bedeckung durch Segeltuch läßt sich dieses Reguliren durch Auf- oder Abwickeln desselben bewirken, sind aber die Flügel durch Thüren bekleidet, so läßt sich derselbe Zweck durch Wegnahme oder Auflegen von Thüren erreichen.

Man hat aber auch Windräder, welche sich selbst reguliren, indem sie von selbst bei Abnahme der Windgeschwindigkeit ihre Stoßfläche vergrößern und bei Zunahme von jener diese vermindern. Die vorzüglichsten Flügelräder dieser Art sind die von Cubit, wovon der Durchschnitt eines Theiles in Fig. 413 (a. f. S.) abgebildet ist. Es ist hier A die hohle Flügelwelle, BC ein durch sie hindurchgehender Metallstab, und CD eine gezahnte Stange, welche in C durch ein Gewinde so mit BC verbunden ist, daß CD nur an der Bewegung in der Axenrichtung, nicht aber an der Drehung um die Axe von BC Theil nimmt. Die gezahnte Stange greift in das Zahnrad E und dieses sitzt mit der Rolle F, um deren Umfang eine Schnur liegt, die durch das Gewicht G gespannt wird, auf einer Axe. Die Flügelbedeckung besteht aus lauter dünnen Holz- oder Blechklappen bc, b_1c_1 u. s. w., welche durch die Arme ac, a_1c_1 u. s. w. um die Axen c, c_1 u. s. w. gedreht werden können. Diese Arme sind durch Stangen ae, a_1e_1 u. s. w. mit einander und zugleich durch Arme de, d_1e_1 mit Zahnrädchen d, d_1 verbunden, so daß durch Drehung der letzteren das Oeffnen und Verschließen oder überhaupt jede Klappenstellung zu ermöglichen ist. Endlich sind noch Hebel BL, BL_1 angebracht, welche sich um die Axen K, K_1 drehen lassen, und auf der einen Seite mit der Stange BC, auf der andern aber mit Zahnstangen LM, L_1M_1, deren Zähne zwischen die Zähne der Rädchen d, d_1 greifen, in Verbindung stehen. Aus der Zeichnung ist nun leicht zu ersehen, wie der Wind W die Klappen zu öffnen, das Gewicht G aber dieselben mittelst der Stange BC, der Hebel BL, BL_1 u. s. w. zu schließen sucht, und wie auf diese Weise dem Windstoße gegen die Klappen durch das Gewicht G das Gleichgewicht gehalten wird. Wenn sich nun auch die Windgeschwindigkeit ändert, so wird deshalb diese Stoßkraft nicht verändert, sondern nur die Klappenstellung und dadurch auch nur die Stoßfläche eine andere.

Fig. 413.



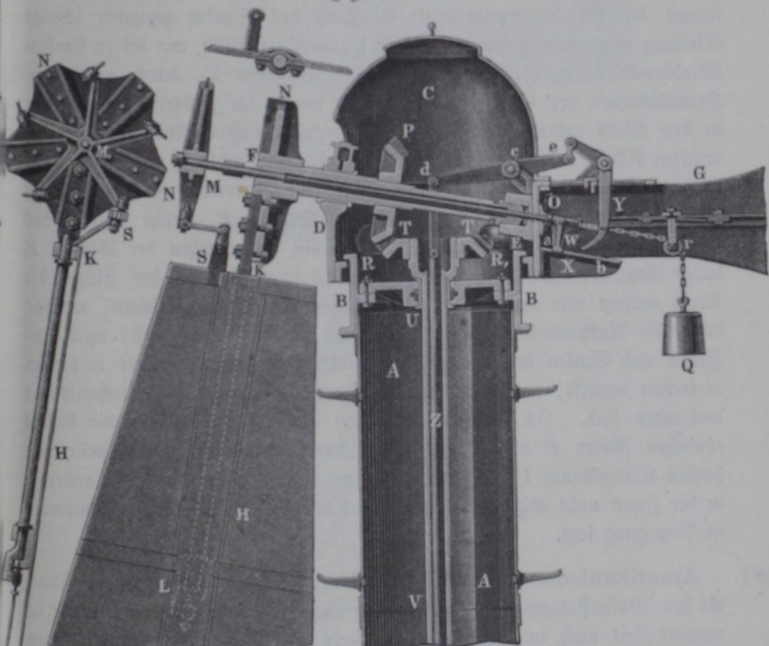
Anmerkung. Bei einer Bedeckung mit Segeltuch läßt sich, nach Bywater, derselbe Zweck erreichen, wenn dasselbe durch zwei Rollen ausgespannt wird, die durch Zahnräder in Umdrehung gesetzt werden, wenn die Windgeschwindigkeit sich ändert. Ausführlich beschrieben sind die Apparate in Barlow's Treatise on the Manufactures and Machinery etc. etc. Eine neue Windradconstruction ist auch in der Zeitschrift „Der Ingenieur", Bd. II, beschrieben.

In mehrfacher Hinsicht eigenthümlich sind die vom Herrn Maschinendirector Kirchweger construirten Windräder auf mehreren Wasserstationen der hannoverschen Eisenbahnen*). Die eigenthümlichen Einrichtungen eines solchen Windrades sind aus dem verticalen Durchschnitt Fig. 414 zu ersehen. Der circa 0,55 m weite, aus Eisenblech zusammengesetzte Thurm AA ragt aus dem Dache des aus Backsteinen aufgeführten Maschinengebäudes hervor und endigt in einem gußeisernen Kopfe BB, auf welchem die Haube C

*) S. die Abhandlung von Prüsmann in der Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins für Hannover, 1862.

mittelst 4 Rollen R, R_1 aufruht. Die Haube trägt die Lager D und E der Windradwelle EF und greift mit ihrem cylindrischen Fußstücke über den obern Rand des Kopfes BB weg, damit sie nicht durch den Windstoß abgehoben werden könne. Der mit der Haube fest verbundene (nur zum Theil sichtbare) Steuerflügel G dient dazu, um durch Drehung der Haube das Windrad FH dem Winde entgegenzurichten. Das Windrad besteht aus fünf um radiale Arme,

Fig. 414.



wie KL, drehbaren Blechflügeln KH. Diese Arme sind auf eine gußeiserne Rosette NN geschraubt, welche auf dem Kopfe der Windradwelle festsitzt.

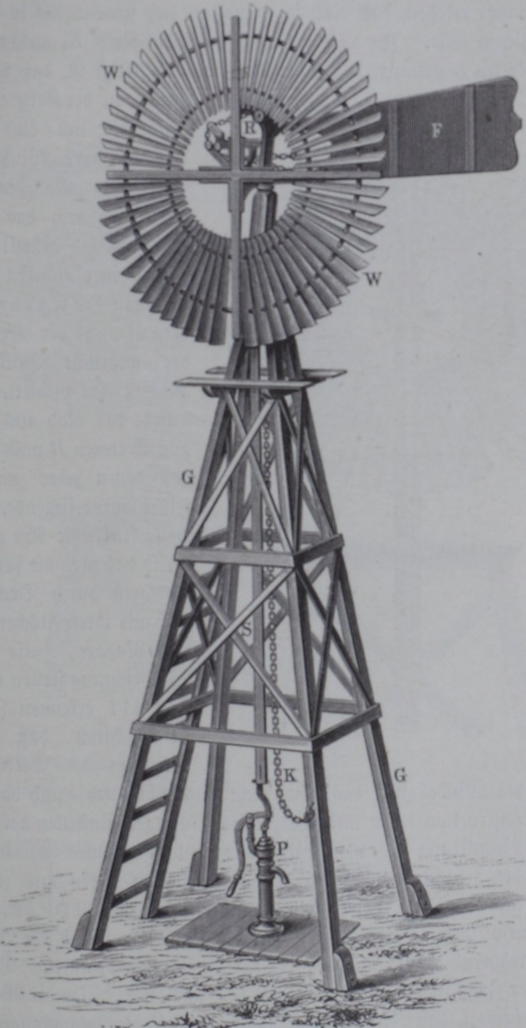
Um den Gang des Rades zu reguliren oder den Flügeln die dem Kraftbedürfnisse entsprechende Stellung gegen den Wind zu geben, ist folgende Einrichtung getroffen. Durch die hohle Ruthenwelle geht die Stahlstange MO hindurch, deren vorderes Ende einen fünfarmigen Stern M trägt, während an das hintere Ende die Hülse O geschoben ist, welche durch das Gewicht Q mittelst einer Kette einer steten Zugkraft ausgesetzt ist. Die Arme des Sternes M sind durch kurze Gelenkschienen mit den an den Flügeln angebrachten Armen S derart verbunden, daß durch ein Einwärtsschieben des Sternes die Flügel sich flach, d. h. in die Umdrehungsebene des Rades stellen, während ein Auswärtsschieben der Stange *MO* die Flügel senkrecht zur Umdrehungsebene des Rades stellt. Die zwischen zwei Bundringen der Stange *MO* auf dieser lose steckende Hülse *O* wird durch einen auf der festen Schiene *b* gleitenden Arm *a* verhindert, an der Drehung der Ruthenwelle Theil zu nehmen. Ferner wird der Einwärtsbewegung der Stange *MO* unter dem Einflusse des Gewichtes *Q* eine Grenze durch den Winkelhebel *Y* gesetzt, gegen dessen längern Arm die Hülse *O* anstößt, wenn die Flügel die für die vortheilhafte Wirkung des Windes geeignete schräge Stellung angenommen haben. Es ist hiernach ersichtlich, wie bei zu starkem Winddrucke durch eine Drehung des Winkelhebels *Y*, durch welche ein Herausschieben der Stange *OM* bewirkt wird, die Flügelflächen schärfer in den Wind gedreht werden, so daß hierdurch eine Verkleinerung der gedrückten Fläche und damit eine Regulirung der Windkraft und beziehungsweise ein gänzliches Anhalten der Maschine erreicht wird. Zu einer solchen Bewegung des Winkelhebels *Y* dient die Stange *Z*, welche mittelst des Hebels *dce* derart auf *Y* einwirkt, daß ein Niederziehen der Stange *Z* durch Auswärtsschieben von *OM* und schärfere Stellung der Flügel die Kraft mäßigt und umgekehrt. Bei den gedachten Wasserstationen, wo das durch die Ruthenwelle bewegte Pumpwerk ein Reservoir speist, wird das Heben und Senken der Stange *Z* selbstthätig durch Schwimmer in diesem Reservoir bewirkt, welche mit der Stange *Z* durch einen Hebelmechanismus verbunden sind. In Fig. 414 sind von dem Triebwerke nur die beiden conischen Räder *P* und *T* dargestellt, durch welche die Ruthenwelle den hohlen Königsbaum *UV* umtreibt, dessen unteres Ende durch ein anderes, in der Figur nicht abgebildetes Räderwerk das daselbst befindliche Pumpwerk in Bewegung setzt.

§. 184. **Amerikanische Windräder.** Die in Amerika vielfach, insbesondere bei den Wasserstationen der Eisenbahnen angewandten Windräder, welche in neuerer Zeit auch in Deutschland häufiger zu Zwecken der Wasserhebung Verbreitung gefunden haben, unterscheiden sich von den bisher besprochenen wesentlich dadurch, daß die dem Winddrucke ausgesetzte Fläche nicht aus einzelnen Flügeln besteht, sondern eine ringförmige Scheibe bildet, deren äußerer Durchmesser etwa dreimal so groß ist wie der innere. Die ganze Fläche dieses Rades *W* ist nach Fig. 415 *) mit schräg gestellten Brettchen nach Art der Jalousien besetzt, und die Axe dieses Rades auf einem Laufringe gelagert, welcher mittelst Walzen oder Kugeln leicht drehbar auf einem Rollringe ruht, der durch das hohe hölzerne Bockgestell *G* getragen wird. Eine kräftige Windfahne *F* bewirkt die selbstthätige Einstellung des Rades

*) S. den österreichischen Bericht über die Weltausstellung in Philadelphia von Dr. E. Perels, welchem die Figuren 415 bis 418 entnommen sind.

nach der Windrichtung. Die Welle des Rades ist zwischen den beiden Lagern mit einer Kurbelkröpfung versehen, deren Zapfen durch die Schubstange *S*

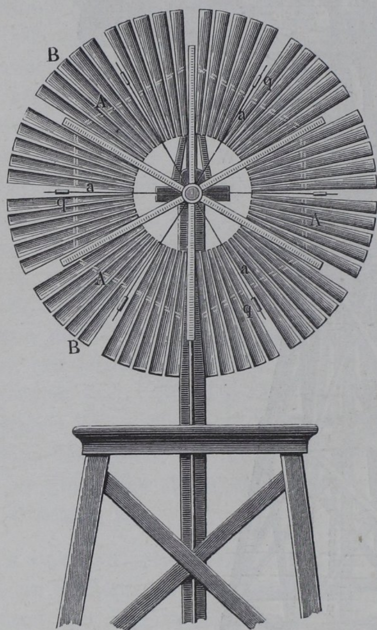
Fig. 415.



den Kolben der Pumpe *P* bewegt. Der Durchmesser dieser Räder wird je nach der zu verrichtenden Arbeit zwischen 2,5 und 12 m gewählt, wofür die Leistungen zwischen $^1/_2$ und 18 Pferdekraft angegeben werden.

Um die Bewegung dieses Rades gänzlich aufzuheben, kann die Windfahne *F* dazu benutzt werden, das Rad so zu stellen, daß seine Ebene in die Windrichtung hinein fällt. Zu diesem Zwecke dient die Kette *K*, welche, oberhalb über die Rollen *R* geführt, so an der Windfahne befestigt ist, daß durch einen unten an der Kette ausgeübten Zug die um eine verticale Axe drehbare Windfahne parallel zur Radebene gestellt wird, wodurch das Windrad in den Wind gestellt wird.

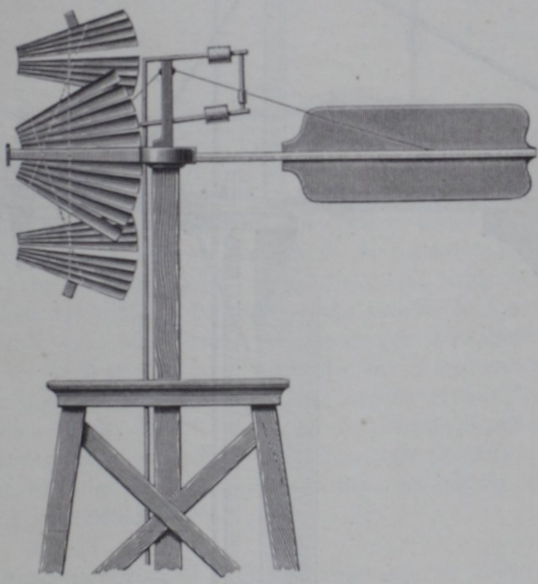
Fig. 416.



Bei einer anderen Construction von Halladay wird die Regulirung der Kraft sowie der gänzliche Stillstand in anderer Art bewirkt. Hierbei besteht das Rad aus sechs bis acht Sectoren *B* nach Fig. 416, von denen jeder um eine in seiner Ebene liegende, zur Radwelle senkrechte Axe *A* drehbar ist, so daß man die sämmtlichen Sectoren durch Drehung um 90° mit ihren Flächen parallel zur Radaxe, also in die Windrichtung stellen kann, wie Fig. 417 erkennen läßt. Es ist ersichtlich, daß in dieser Stellung der Sectoren eine Wirkung des Windes auf das Rad nicht ausgeübt wird, und daß die angegebene Construction durch mehr oder minder schräges Einstellen der Sectoren auch eine Regulirung des vom Winde ausgeübten Druckes gestattet. Die Art, wie die gedachte Einstellung der Sectoren von unten aus jeder Zeit, auch während des Betriebes, geschehen kann, ist aus Fig. 418 (S. 644) zu erkennen, in welcher *C* die Radwelle, *R* den Rollring und *F* die Windfahne vorstellt, während *L* die Schubstange für die Pumpe bedeutet. Durch den Zug an der Zugstange *Z* wird der Hebel *HJ* und durch diesen der Winkelhebel *GON* so bewegt, daß der gabelförmige Hebel *ON* die Schubstangen *T* verschiebt, von welchen je eine mit einem der Sectoren so verbunden ist, daß ihre

Verschiebung eine Drehung dieses Sectors zur Folge hat. Um die Regulirung selbstthätig zu bewirken, hat man jedem Sector ein auf einem Arme a verschiebbares kleines Gewicht q, Fig. 416, gegeben, welches bei einer übermäßigen Umdrehungsgeschwindigkeit des Rades in Folge der Centrifugalkraft ebenfalls eine Drehung des Sectors bewirkt. Auch ist bei diesen Rädern, wenn ihre Pumpen das Wasser in Reservoire speisen, die Vorrichtung getroffen,

Fig. 417.

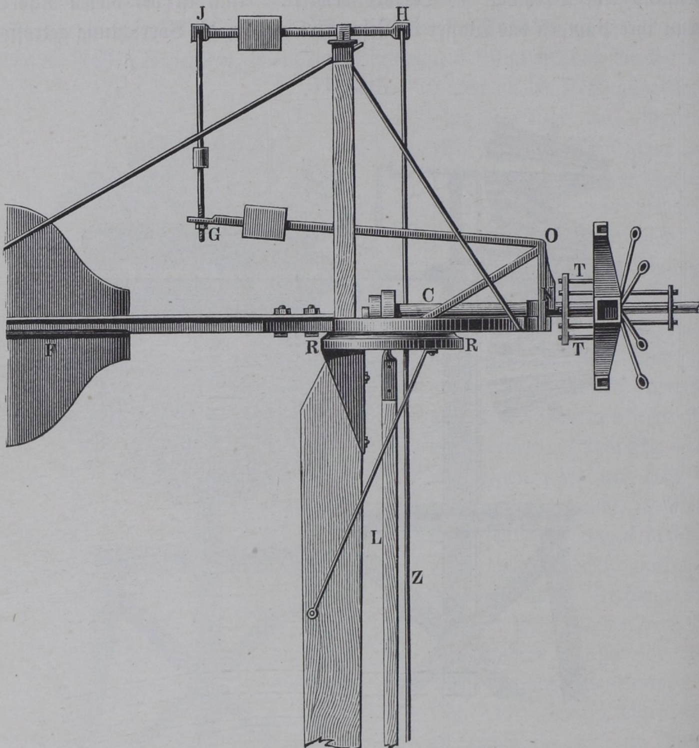


daß bei erlangter Füllung des Reservoirs durch einen Schwimmer eine Umdrehung der Sectoren und damit der Stillstand des Rades veranlaßt wird.

Windrichtung. Der Wind, dessen Entstehung jedenfalls einer Ungleichheit in der Expansivkraft oder Dichtigkeit der Luft beigemessen werden muß (s. die Formeln in Thl. I), ist verschieden in Hinsicht auf Richtung und in Hinsicht auf Stärke oder Geschwindigkeit. In Bezug auf die Richtung unterscheidet man die acht Winde N, NO, O, SO, S, SW, W, NW, d. i. Nord, Nordost, Ost, Südost, Süd, Südwest, West und Nordwest, indem man sie nach denjenigen Weltgegenden benennt, aus denen sie wehen. Zur genaueren Bezeichnung der Windrichtung bedient man sich auch einer §. 185.

Eintheilung des Horizontes in 16 gleiche Theile, oder, nach dem Bergmann, in 24 Stunden, am genauesten aber der Eintheilung in Grade. Im Laufe eines Jahres kommen alle diese Windrichtungen vor, jedoch manche von ihnen

Fig. 418.



auf längere, manche auf kürzere Zeit. Für das mittlere und südliche Deutschland ist nach Coffin die mittlere Dauer der einzelnen Winde folgende:

N	NNO	NO	ONO	O	OSO	SO	SSO	S	SSW
23,5	2,9	35,1	3,1	41,7	3,9	30,1	2,5	23,9	3,0

SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Windstille
63,3	3,2	77,1	4,2	42,8	0,4	0,9

Tage im Jahre.

Nach den Zusammenstellungen von Kämtz wehen z. B. unter 1000 Tagen die in folgender Tabelle aufgezeichneten Winde:

Länder	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
Deutschland . . .	84	98	119	87	97	186	198	131
England	82	111	99	81	111	225	171	120
Frankreich	126	140	84	76	117	192	155	110

Man ersieht hieraus, daß in den angeführten drei Ländern die Südwestwinde die vorherrschenden sind. Die Uebergänge dieser Windrichtungen in einander folgen meist nur in der Richtung S, SW, W u. s. w., selten findet die entgegengesetzte Winddrehung S, SO, O u. s. w. statt, wenigstens besteht diese meist nur in einem Zurückspringen um kleinere Winkel.

Die Windrichtung bestimmt man durch die sogenannte Wind- oder Wetterfahne. Dieses höchst einfache Instrument besteht in einer um eine verticale Axe drehbaren Blechfahne, welche natürlich durch den Windstoß gedreht wird, wenn die Richtung des Windes von ihrer Ebene abweicht, deshalb also durch ihre Richtung die Richtung des Windes bezeichnet. Um ihre Beweglichkeit zu erhöhen, muß man die Reibung an ihrer Axe möglichst herabzuziehen suchen, weshalb man denn auch durch Hinzufügung eines Gegengewichts auf der entgegengesetzten Seite der Umdrehungsaxe den Schwerpunkt der Fahne in die Umdrehungsaxe bringt, wodurch die sogenannten Wetterhähne entstanden sind.

Windgeschwindigkeit. Viel wichtiger als die Windrichtung ist §. 186.
natürlich dem Windmüller die Windgeschwindigkeit, weil von dieser das Arbeitsquantum abhängt, welches er dem Winde durch das Windrad abgewinnen kann. Nach der Größe der Geschwindigkeit hat man folgende Winde:

Kaum wahrnehmbarer Wind mit 0,5 m.
Sehr schwacher Wind mit 1 m.
Schwacher Wind mit 2 m.
Lebhafter Wind mit 6 m.
Günstiger Wind für die Windmühlen mit 7 m Geschwindigkeit;

ferner:

Sehr lebhafter Wind mit 10 m.
Starker Wind mit 14 m.
Sehr starker Wind mit 20 m Geschwindigkeit.

Unter Sturm versteht man den heftigen Wind von 20 bis 28 m Geschwindigkeit, und Orkan ist ein Wind von 30 und mehr Meter Geschwindigkeit. Wind von 3 m Geschwindigkeit ist in der Regel nicht hinreichend, um ein belastetes Windrad im Umgang zu erhalten; steigt hingegen die Windgeschwindigkeit über 12 m, so läßt sich die Windkraft nicht mehr mit Vortheil zu gute machen, weil dann die Flügel eine zu große Geschwindigkeit annehmen würden. Stürme oder gar Orkane sind aber für die Windmühlen im höchsten Grade gefährlich, weil sie sehr oft das Abheben oder Umstürzen derselben herbeiführen.

Um die Windgeschwindigkeit zu ermitteln, wendet man Instrumente an, die man Anemometer oder Windmesser nennt. Obgleich man im Laufe der Zeit schon sehr viele solcher Instrumente vorgeschlagen und versucht hat, so sind doch nur wenige derselben hinreichend bequem und sicher im Gebrauche. Die meisten dieser Instrumente sind den Hydrometern (s. Thl. I) u. s. w. sehr ähnlich, ja es lassen sich sogar manche Hydrometer ohne Abänderung als Anemometer gebrauchen. Unmittelbar läßt sich die Geschwindigkeit des Windes durch leichte Körper angeben, welche man vom Winde fortführen läßt, z. B. durch Federn, Seifenblasen, Rauch, kleine Luftbälle u. s. w. Da die Windbewegung in der Regel nicht bloß progressiv, sondern auch drehend oder wirbelnd ist, so sind diese Mittel, wenigstens bei großen Geschwindigkeiten, oft nicht hinreichend. Am besten sind allerdings große Luftbälle, deren mittlere Dichtigkeit nicht sehr verschieden ist von der des Windes.

Die eigentlichen Anemometer lassen sich, wie die Hydrometer, in drei Classen bringen: entweder giebt man die Windgeschwindigkeit durch ein vom Winde bewegtes Rad an, oder man mißt dieselbe durch die Höhe einer Flüssigkeitssäule, welche dem Windstoße das Gleichgewicht hält, oder man bestimmt dieselbe durch die Kraft, welche der Windstoß gegen eine ebene Fläche ausübt. Von diesen Apparaten möge nun noch das Nothwendigste abgehandelt werden.

Anmerkung. Ausführlich über Anemometer handelt Hülsse in dem ersten Bande der allgemeinen Maschinenencyklopädie. Ueber den Wind ist aber nachzulesen: Kämtz's Meteorologie und Gehler's physikalisches Wörterbuch, Bd. X, sowie im Lehrbuch der Meteorologie von E. E. Schmidt, Leipzig 1860.

§. 187. **Anemometer.** Der Woltmann'sche Flügel (s. Thl. I) läßt sich ebenso gut zur Ausmittelung der Windgeschwindigkeit als zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Wassers gebrauchen. Wird seine Umdrehungsaxe in die Windrichtung gebracht, was durch Hinzufügung einer Windfahne von selbst erfolgt, wenn man beide Instrumente an einer verticalen Umdrehungsaxe so befestigt, daß sie in eine Ebene fallen, so kann man die Anzahl n der

Umdrehungen beobachten, welche dieses Rad in Folge des Windstoßes in einer gewissen Zeit macht und es läßt sich nun, wie früher, die Geschwindigkeit setzen:

$$v = v_0 + \alpha n,$$

wo v_0 die Geschwindigkeit ist, bei welcher das Rad anfängt still zu stehen, α aber das Erfahrungsverhältniß $\frac{v - v_0}{n}$ bezeichnet. Wäre der Windstoß nicht verschieden vom Wasserstoße, und wüchsen beide genau proportional dem Quadrate der relativen Geschwindigkeit, so würde

$$\alpha = \frac{v - v_0}{n}$$

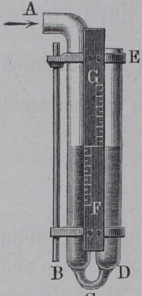
für Wasser und Wind zugleich gelten, da dies aber nur annähernd richtig ist, so können wir auch erwarten, daß die Coefficienten α für die Wind- und Wassergeschwindigkeit nur ungefähr gleich sind. Was dagegen die Anfangsgeschwindigkeit v_0 anlangt, so fällt diese beim Winde ungefähr $\sqrt{800} = 28,3$ mal so groß aus als beim Wasser, weil die Dichtigkeit des Wassers circa 800mal so groß als die des Windes ist und daher der Druck einer Wassersäule nur durch denjenigen einer 800mal so hohen Luftsäule, sowie der Stoß des bewegten Wassers nur durch den Stoß eines $\sqrt{800} = 28,3$mal so schnell wehenden Windes ersetzt werden kann. Dieser große Werth der Constanten v_0 macht es zur Pflicht, den als Anemometer zu gebrauchenden Flügel möglichst leicht zu machen, ihn z. B., nach Combes, mit Flittergold zu überziehen, vorzüglich aber mit feinen Stahlaxen in Lagern von Edelsteinen umlaufen zu lassen.

Die Constanten v_0 und α bestimmt man zwar gewöhnlich durch Bewegung oder Umdrehung des Instrumentes in der ruhigen Luft, es ist indessen diese Methode nicht sicher, weil der Stoß einer bewegten Flüssigkeit nicht ganz derselbe ist, wie der Widerstand der ruhigen Flüssigkeit (s. Thl. I). Besser ist es jedenfalls, man sucht diese Constanten durch Beobachtungen in der bewegten Luft selbst zu bestimmen, indem man deren Geschwindigkeit durch leichte Körper (Luftbälle) ausmittelt. Auch kann man hierzu ein Cylindergebläse oder eine andere Kolbenmaschine gebrauchen, wenn man das Instrument in eine weite Röhre bringt, durch die der Wind mittelst des niedergehenden Kolbens ausgeblasen wird. Die Berechnungen der Constanten aus mehreren zusammengehörigen beobachteten Werthen von v und n sind wie in Thl. I zu führen.

Die Pitot'sche Röhre (s. Thl. I) läßt sich ebenfalls mit großer §. 188.
Bequemlichkeit als Anemometer gebrauchen, sie ist aber dann gewöhnlich unter dem Namen das „Lind'sche Anemometer" bekannt. Die specielle Einrichtung eines solchen Instrumentes ist aus Fig. 419 (a. f. S.) zu ersehen.

AB und DE sind zwei aufrechtstehende etwa 10 mm weite mit Wasser anzufüllende Glasröhren, und BCD ist eine enge krumme Verbindungsröhre zwischen beiden von etwa nur 1 mm Weite, endlich ist FG eine Scala zur Abnahme der Wasserstände. Wird nun das Mundstück A dem Winde entgegengestellt, so drückt dessen Kraft die Wassersäule AB nieder und die in DE eben so viel empor, es läßt sich nun an der zwischenbefindlichen Scala der Niveauabstand h zwischen beiden ablesen und hieraus wieder die Geschwindigkeit v des Windes berechnen, indem man setzt:

Fig. 419.



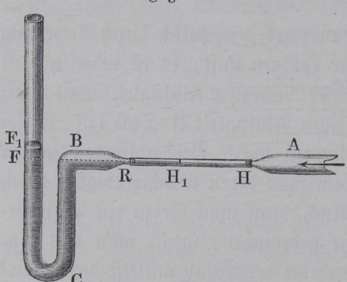
$$v = v_0 + \alpha \sqrt{h},$$

wobei v_0 und α Erfahrungsconstanten ausdrücken.

Dieses Instrument ist jedoch in seinem Gebrauche höchst eingeschränkt, da es mäßige Windgeschwindigkeiten durch sehr kleine Wassersäulen ausdrückt, welche sich nur mit sehr großer Unsicherheit ablesen lassen. Z. B. wird eine Windgeschwindigkeit von 6 m durch einen Anemometerstand h von circa 2 mm angegeben. Um diesem Uebelstande abzuhelfen und das Instrument auch bei mittleren Windgeschwindigkeiten gebrauchen zu können, sind von Robison und Wallaston folgende Verbesserungen angebracht worden.

Bei dem Anemometer von Robison ist eine enge horizontale Röhre HR, Fig. 420, zwischen dem Mundstücke A und dem aufrechtstehenden Röhrenschenkel BC eingesetzt, und man gießt vor dem Gebrauche so viel Wasser zu, daß der Wasserspiegel F mit HR in einerlei Niveau kommt und das Wasser zugleich die enge Röhre bis H anfüllt. Wird nun A dem Winde entgegengerichtet, so treibt derselbe das Wasser in der engen Röhre zurück und es erhebt sich über dem Niveau von HB eine dem Windstoße das Gleichgewicht haltende Wassersäule, deren Höhe FF_1 gemessen wird durch die Länge HH_1 der zurückgedrängten liegenden Wassersäule. Sind d und d_1 die Weiten und h und h_1 die Höhen der Wassersäulen FF_1 und HH_1, so hat man:

Fig. 420.



$$\frac{\pi d^2}{4} h = \frac{\pi d_1^2}{4} h_1,$$

und daher:

$$h = \left(\frac{d_1}{d}\right)^2 h_1,$$

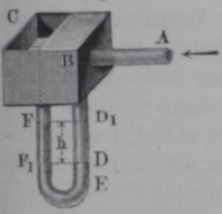
sowie:

$$h_1 = \left(\frac{d}{d_1}\right)^2 h.$$

Es fällt also h_1 stets im Verhältnisse $\left(\frac{d}{d_1}\right)^2$ größer als h aus, und kann daher mit mehr Sicherheit beobachtet werden als h. Ist z. B. $\frac{d}{d_1} = 5$, so giebt die enge Röhre die Höhe FF_1 schon 25fach an.

Endlich läßt sich auch durch das in Fig. 421 abgebildete Differential-Anemometer von Wollaston die Geschwindigkeit des Windes mit erhöhter Genauigkeit messen. Dasselbe besteht aus zwei Gefäßen B und C und aus einer gebogenen Röhre DEF, welche die beiden Gefäße von unten mit einander in Verbindung setzt. Das eine dieser Gefäße ist oben verschlossen und hat ein Seitenmundstück A, welches dem Winde entgegengerichtet wird. Die Füllung des Instrumentes besteht aus Wasser und Oel; das erstere füllt jeden der beiden Schenkel ungefähr bis zur Hälfte, das letztere aber nimmt den übrigen Theil der Röhre ein und füllt auch beide Gefäße zum Theil an. Durch den Windstoß stellt sich das Wasser in dem einen Schenkel höher als in dem andern, und es wird die Kraft dieses Stoßes durch die Differenz der Drücke von der Wassersäule FF_1 und von der Oelsäule DD_1 das Gleichgewicht halten. Setzen wir die gemeinschaftliche Höhe dieser Flüssigkeitssäulen gleich h, und das specifische Gewicht des Oeles gleich ε, so haben wir in der letzten Formel statt h, $h\,(1 - \varepsilon)$ und daher

Fig. 421.



$$v = v_0 + \alpha \sqrt{(1 - \varepsilon)\,h}$$

zu setzen. Z. B. wenn die obere Füllung aus Leinöl besteht, da für dasselbe $\varepsilon = 0{,}94$ ist:

$$v = v_0 + \alpha \sqrt{(1 - 0{,}94)\,h} = v_0 + \alpha \sqrt{0{,}06\,.\,h} = v_0 + 0{,}245\,\alpha \sqrt{h}.$$

Es ist also dann $h = {}^{100}/_{6} = 16^2/_3$mal so groß als bei einer einfachen Wasserfüllung. Durch Mischung des Wassers mit Alkohol läßt sich die Dichtigkeit des Wassers der des Oeles noch näher bringen, und daher $1 - \varepsilon$ noch mehr herabziehen oder die abzulesende Niveaudifferenz und daher auch die Genauigkeit des Ablesens noch mehr vergrößern.

Auch hat man mehrere Anemometer vorgeschlagen und zu gebrauchen §. 189.
gesucht, welche dem Stromquadranten (s. Thl. I) ähnlich sind und mit

demselben einerlei Princip haben, jedoch hierbei die Kugeln durch dünne Scheiben ersetzt. Jedenfalls ist aber eine hohle Blechkugel noch besser als eine ebene Scheibe, weil der Windstoß gegen die Kugel bei allen Neigungen der Stange, woran dieselbe aufgehangen ist, derselbe bleibt, wogegen er sich bei der Scheibe mit der Neigung derselben ändert; während bei Anwendung einer Kugel die Formel

$$v = \psi \sqrt{tg\,\beta}$$

(wo β die Abweichung der Stange von der Verticalen bezeichnet) genügt, ist bei Anwendung einer Scheibe ein complicirterer Ausdruck zur Berechnung der Geschwindigkeit zu gebrauchen.

Endlich hat man auch die Windgeschwindigkeit durch den Stoß, welchen der Wind unmittelbar gegen eine ebene, ihm normal entgegengerichtete Fläche ausübt, zu messen gesucht, und dazu Anemometer angewendet, welche dem betreffenden in Thl. I abgebildeten und beschriebenen Hydrometer mehr oder weniger ähnlich sind. Wäre das Gesetz des Windstoßes vollständig bekannt und sicher begründet, so würde sich mit Hülfe eines solchen Anemometers die Geschwindigkeit des Windes ohne weitere Untersuchung bestimmen lassen; allein dies ist nicht der Fall, es führen vielmehr die in Thl. I aufgestellten Formeln und der daselbst angegebene Coefficient nur auf Näherungswerthe. Behalten wir dieselben indessen hier bei, setzen wir also den Windstoß

$$P = \zeta \frac{v^2}{2g} F\gamma, = 1{,}86 \frac{v^2}{2g} F\gamma,$$

oder mit $\frac{1}{2g} = 0{,}051$:

$$P = 0{,}09486\, v^2 F\gamma.$$

Setzt man hierein noch das specifische Gewicht der Luft $\gamma = 1{,}294$ kg, so erhält man

$$P = 0{,}1227\, v^2 F,$$

also für einen Inhalt der gestoßenen Fläche gleich 1 qm

$$P = 0{,}1227\, v^2 \text{ kg},$$

sowie umgekehrt die Windgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{P}{0{,}1227}} = 2{,}855 \sqrt{P} \text{ Meter}.$$

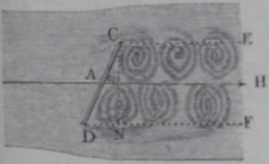
Hiernach ist die folgende Tabelle berechnet:

Windgeschwindigkeit $v =$	3	4	5	6	8	10	12	14	15 m
Windstoß für 1 qm $P =$	1,104	1,963	3,068	4,417	7,853	12,27	17,67	24,05	27,61 kg

Durch Multiplication mit dem Inhalte der gestoßenen Fläche läßt sich hiernach der Normalstoß des Windes gegen jede ebene Fläche leicht berechnen.

Grösse des Windstosses. Wir haben nun die Größe und Leistung des Windstoßes bei den Flügelrädern der Windmühlen näher zu ermitteln. Denken wir uns in dieser Absicht die ganze Flügelfläche durch Normalebenen auf der Flügel- oder Ruthenaxe in lauter schmale Theile oder Elemente zerschnitten und stelle CD, Fig. 422, ein solches Element vor. Wegen der bedeutenden Größe und zumal wegen der großen Länge §. 190.

Fig. 422.



einer Flügelfläche können wir annehmen, daß alle in der Richtung AH ankommenden Windelemente der gegen die Fläche CD anrückenden Windsäule durch den Stoß in entgegengesetzten Richtungen parallel zu CD abgelenkt werden, und deshalb auch von den entsprechenden Formeln in Thl. I Gebrauch machen. Bezeichnet c die Windgeschwindigkeit und v die Flügelgeschwindigkeit, sowie Q das Windquantum, welches pr. Secunde gegen CD anstößt, ferner γ die Dichtigkeit des Windes und α den Winkel CAH, welchen die Windrichtung mit CD einschließt, so haben wir unter der Voraussetzung, daß die Fläche CD in der Richtung des Windes ausweicht, nach Thl. I, den Normalstoß des Windes gegen CD:

$$N = \frac{c - v}{g} \sin \alpha\, Q \gamma.$$

Das zum Stoße gelangende Windquantum Q ist hier, wo der Querschnitt $CN = G$ des Stromes die ganze Stoßfläche einnimmt, nicht gleich Gc, sondern nur $G\,(c - v)$ zu setzen, da die mit der Geschwindigkeit v ausweichende Fläche pr. Secunde einen Raum Gv hinter sich offen läßt, der vom nachfolgenden Windquantum Gc den Theil Gv aufnimmt, ohne eine Richtungsveränderung desselben zu veranlassen. Es ist daher der Normalstoß auch zu setzen:

$$N = \frac{c - v}{g} \sin \alpha\, (c - v)\, G \gamma = \frac{(c - v)^2}{g} \sin \alpha\, G \gamma,$$

oder, wenn F den Inhalt des Elementes CD bezeichnet und $G = F \sin \alpha$ eingeführt wird,

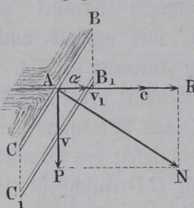
$$N = \frac{(c - v)^2}{g} \sin^2 \alpha F \gamma.$$

Außer diesem Stoße gegen die Vorderfläche von CD findet noch eine Wirkung an der Hinterfläche von CD statt, da ein Theil des in den Richtungen CE und DF an dem Umfange der Fläche vorbeigehenden Windes zur Ausfüllung des Raumes hinter CD eine wirbelnde Bewegung annimmt, und dabei den der relativen Geschwindigkeit $(c - v) \sin \alpha$ entsprechenden Druck $\frac{(c - v)^2}{2g} \sin \alpha^2 F \gamma$ verliert. Wenn man beide Wirkungen vereinigt, so bekommt man zuletzt die vollständige Normalkraft des Windes gegen das Flügelelement F:

$$N = \frac{(c - v)^2}{g} \sin^2 \alpha F \gamma + \frac{(c - v)^2}{2g} \sin^2 \alpha F \gamma = 3 \frac{(c - v)^2}{2g} \sin^2 \alpha F \gamma.$$

§. 191. **Vortheilhafteste Stosswinkel.** Bei Anwendung dieser Formel auf die Windräder haben wir zu berücksichtigen, daß der Windflügel BC, Fig. 423, nicht in der Richtung AR des Windes, sondern in einer Richtung AP rechtwinkelig darauf umläuft, es ist daher auch in der Formel

Fig. 423.



$$N = 3 \frac{(c - v)^2}{2g} \sin^2 \alpha F \gamma$$

für den Normalstoß statt v die Geschwindigkeit $Av_1 = v_1$ einzusetzen, mit welcher der Flügel in Hinsicht auf die Windrichtung ausweicht. Bezeichnet hier v die wirkliche Umdrehungsgeschwindigkeit Av, so haben wir für $Av_1 = v_1 = v \operatorname{cotg} Av_1 v = v \operatorname{cotg} \alpha$ und daher für den vorliegenden Fall:

$$N = 3 \frac{(c - v \operatorname{cotg} \alpha)^2}{2g} \sin^2 \alpha F \gamma$$

oder

$$N = 3 \frac{(c \sin \alpha - v \cos \alpha)^2}{2g} F \gamma.$$

Diesen Normalstoß zerlegt man in zwei Seitenkräfte P und R, eine in der Umdrehungs- und die andere in der Axenrichtung des Flügelelementes wirkend, und es ist

$$P = N \cos \alpha = 3 \frac{(c \sin \alpha - v \cos \alpha)^2}{2g} \cos \alpha F \gamma,$$

dagegen

$$R = N \sin\alpha = 3\,\frac{(c \sin\alpha - v \cos\alpha)^2}{2g} \sin\alpha F\gamma.$$

Durch Multiplication mit der Umdrehungsgeschwindigkeit v folgt aus der Formel für P die mechanische Leistung des Windrades:

$$L = Pv = 3\,\frac{(c \sin\alpha - v \cos\alpha)^2}{2g} v \cos\alpha F\gamma;$$

was dagegen die Axen- oder sogenannte Parallelkraft R anlangt, so verrichtet dieselbe keine Arbeit, sondern sie sucht das Rad fortzuschieben, drückt deshalb die Grundfläche seines hintern Zapfens gegen das Widerlager und giebt durch die hieraus entspringende Reibung zu einem besondern Arbeitsverluste Veranlassung.

Die Formel für L zeigt, daß die Leistung zu Null wird für $\cos\alpha = 0$, oder $\alpha = 90^0$, womit ausgesprochen ist, daß die Flügelflächen schräg gegen die Windrichtung gestellt werden müssen. Ebenso wird die Leistung zu Null für $c \sin\alpha = v \cos\alpha$, d. h. wenn die zur Flügelfläche senkrechten Componenten der Windgeschwindigkeit c und der Flügelgeschwindigkeit v, welche sich bei rechtwinkeliger Zerlegung ergeben, von gleicher Größe sind. Um für eine gewisse Windgeschwindigkeit c und eine ebenfalls festgesetzte Flügelgeschwindigkeit v, d. h. also für ein gewisses Verhältniß $\frac{v}{c}$ den vortheilhaftesten Winkel α zu finden, hat man den Differentialquotienten $\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0$ zu setzen. Durch Ausführung dieser Rechnung erhält man:

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = \frac{3}{2g}\,[v \cos\alpha\,.\,2\,(c \sin\alpha - v \cos\alpha)\,(c \cos\alpha + v \sin\alpha) \\ - (c \sin\alpha - v \cos\alpha)^2 v \sin\alpha] = 0$$

oder, durch $\frac{3v}{2g}(c \sin\alpha - v \cos\alpha)$ dividirt,

$$2c \cos^2\alpha + 2v \cos\alpha \sin\alpha - c \sin^2\alpha + v \cos\alpha \sin\alpha = 0.$$

Diese Gleichung giebt, nach Division mit $\cos^2\alpha$,

$$2c + 2v\,tg\,\alpha - c\,tg^2\alpha + v\,tg\,\alpha = 0$$

oder

$$tg^2\alpha - \frac{3v}{c}\,tg\,\alpha = 2,$$

woraus

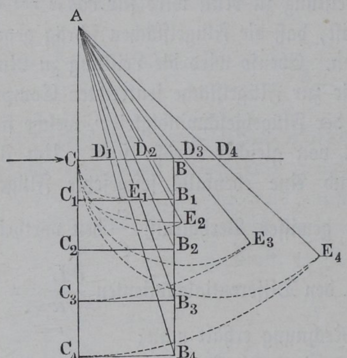
$$tg\,\alpha = \frac{3v}{2c} + \sqrt{\left(\frac{3v}{2c}\right)^2 + 2}$$

folgt. Unter diesem Winkel hat man daher den Flügel gegen die Windrichtung zu neigen, um bei einem gewissen Verhältnisse $\frac{v}{c}$ der Geschwindigkeiten die größte Leistung zu erreichen.

Da bei einem und demselben Flügel die entfernteren Elemente eine größere Geschwindigkeit besitzen, als die der Umdrehungsaxe näherstehenden, so folgt hieraus, daß den entfernteren Flügeltheilen ein größerer Stoßwinkel zu ertheilen ist, als den näheren, um eine möglichst große Leistung zu erhalten. Es sind also die Flügel nicht eben, sondern windschief und zwar so herzustellen, daß die äußeren Theile weniger als die inneren von der Umdrehungsebene abweichen.

Anmerkung. Die vortheilhaftesten Stoßwinkel eines Flügels lassen sich auch leicht durch folgende Construction finden. Man nehme CB, Fig. 424, gleich 1, setze rechtwinkelig darauf: $CA = \sqrt{2}$ gleich der Diagonale eines Quadrates über CB, und ziehe AB. Dann ist

Fig. 424.



$$tg\, ABC = \sqrt{2},$$

und daher

$$\angle\, ABC = 54^0\, 44'\, 8'',$$

d. i. der Stoßwinkel der ganz nahe an der Umdrehungsaxe liegenden Flügelelemente. Setzen wir nun in $y = \frac{3\,\omega x}{2\,c}$ für c die Wind-, sowie für ω die Winkelgeschwindigkeit und für x nach und nach die Entfernungen der Flügelsprossen von der Umdrehungsaxe ein, und tragen wir die so erhaltenen Werthe von y als CD_1, CD_2, CD_3 u. s. w. auf die CB von C aus auf; ziehen wir ferner die Hypotenusen AD_1, AD_2, AD_3 u. s. w. und verlängern wir dieselben so, daß $D_1E_1 = CD_1$, $D_2E_2 = CD_2$, $D_3E_3 = CD_3$ u. s. w. wird; legen wir endlich AE_1, AE_2, AE_3 u. s. w. auf die Richtung von AC als AC_1, AC_2, AC_3 u. s. w. auf, errichten in C_1, C_2, C_3 u. s. w. die Perpendikel C_1B_1, C_2B_2, C_3B_3 u. s. w. $= CB = 1$, und ziehen AB_1, AB_2, AB_3 u. s. w., so erhalten wir in AB_1C_1, AB_2C_2, AB_3C_3 u. s. w. die gesuchten Stoßwinkel, denn es ist:

$$tg\, AB_1C_1 = \frac{AC_1}{B_1C_1} = \frac{AE_1}{1} = D_1E_1 + AD_1 = y_1 + \sqrt{y_1^2 + 2},$$

$$tg\, AB_2C_2 = \frac{AC_2}{B_2C_2} = \frac{AE_2}{1} = D_2E_2 + AD_2 = y_2 + \sqrt{y_2^2 + 2}, \text{ rc.}$$

§. 192. **Leistung der Windräder.** Die Formel für den zweckmäßigsten Stoßwinkel läßt sich auch umkehren, um die einer gegebenen Flügelstellung (α) entsprechende vortheilhafteste Umdrehungsgeschwindigkeit zu finden. Es ist hiernach:

$$tg^2\,\alpha - \frac{3\,v}{c}\,tg\,\alpha = 2,$$

und daher sehr einfach:

$$v = \frac{tg^2\,\alpha - 2}{tg\,\alpha}\,\frac{c}{3} = (tg\,\alpha - 2\,cotg\,\alpha)\,\frac{c}{3}\cdot$$

Setzt man diesen Werth in die Leistungsformel ein, so bekommt man:

$$L = \frac{3}{2\,g}\left[c\sin\alpha - (tg\,\alpha - 2\,cotg\,\alpha)\frac{c}{3}\cos\alpha\right]^2 (tg\,\alpha - 2\,cotg\,\alpha)\frac{c}{3}\cos\alpha\,F\gamma$$

$$= \frac{c^3}{2\,g}\,F\gamma\left(\sin\alpha - \frac{\sin\alpha}{3} + \frac{2\cos^2\alpha}{3\sin\alpha}\right)^2\left(\sin\alpha - \frac{2\cos^2\alpha}{\sin\alpha}\right)$$

$$= \frac{4}{9}\,\frac{c^3}{2\,g}\,F\gamma\,\frac{3\sin^2\alpha - 2}{\sin^3\alpha}\cdot$$

Die theoretische Leistung eines Windrades läßt sich hiernach für jede gegebene Wind- und Umdrehungsgeschwindigkeit berechnen. Aus der gegebenen Umdrehungszahl n pr. Minute folgt zunächst die Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{\pi n}{30} = 0{,}1047\,n$. Theilt man nun die ganze Windruthenlänge in sieben gleiche Theile, und läßt man, wie gewöhnlich, den Flügel im ersten Theilpunkte anfangen, so daß seine eigentliche Länge $^6/_7\,l$ ausfällt, so kann man nun sehr leicht mit Hülfe der Formel

$$tg\,\alpha = \frac{3\,v}{2\,c} + \sqrt{\left(\frac{3\,v}{2\,c}\right)^2 + 2}$$

die jedem der sieben Theilpunkte des Flügels entsprechenden vortheilhaftesten Stoßwinkel $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \ldots$ berechnen, indem man nach und nach

$$v_1 = \omega\,\frac{l}{7},\;\; v_2 = \omega\,\frac{2\,l}{7},\;\; v_3 = \omega\,\frac{3\,l}{7} \cdots \text{ bis } v_7 = \omega\,\frac{7\,l}{7}$$

oder ωl einführt.

Sind nun noch $b_1, b_2, b_3 \ldots b_7$ die durch diese Theilpunkte zu legenden Flügelbreiten, so können wir mit Hülfe der Simpson'schen Regel aus

$$\frac{3\sin^2\alpha_1 - 2}{\sin^3\alpha_1}\,b_1,\;\; \frac{3\sin^2\alpha_2 - 2}{\sin^3\alpha_2}\,b_2,\;\; \frac{3\sin^2\alpha_3 - 2}{\sin^3\alpha_3}\,b_3 \text{ u. s. w.}$$

einen Mittelwerth k berechnen und bekommen daher mit Hülfe desselben die ganze Flügelleistung:

$$L = {}^4/_9\,k\gamma\,.\,{}^6/_7\,l\,\frac{c^3}{2\,g},$$

oder allgemeiner, wenn l_1 die eigentliche Flügellänge bezeichnet:

$$L = {}^4/_9\,\gamma\,k\,l_1\,\frac{c^3}{2\,g}\cdot$$

Wäre der Flügel eben, hätte er also an allen Stellen einen und denselben

Stoßwinkel α, so würde man mittelst $v_1 = \frac{\omega l}{7}$, $v_2 = \omega \frac{2\,l}{7}$ u. s. w. zunächst die entsprechenden Werthe

$$\left(sin\,\alpha - \frac{v_1}{c}\,cos\,\alpha\right)^2 \frac{v_1}{c}\,cos\,\alpha\,.\,b_1,$$

$$\left(sin\,\alpha - \frac{v_2}{c}\,cos\,\alpha\right)^2 \frac{v_2}{c}\,cos\,\alpha\,.\,b_2 \text{ u. s. w.}$$

zu berechnen, aus diesen wieder durch Anwendung der Simpson'schen Regel den Mittelwerth k_1 zu ermitteln und denselben zuletzt in die Formel

$$L = 3\,\gamma k_1 l_1 \frac{c^3}{2\,g}$$

einzusetzen haben.

Ist z die Anzahl der Flügel, so hat man schießlich den letzten Werth noch hiermit zu multipliciren, um die ganze theoretische Radleistung zu erhalten, also

$$L = 3\,z\gamma k_1 l_1 \frac{c^3}{2\,g}$$

zu setzen.

Beispiel 1. Welche Stoßwinkel erfordert ein Flügelrad bei 7 m Windgeschwindigkeit, wenn dasselbe aus 4 Flügeln mit 8,4 m langen Ruthen besteht, und die Bedeckung in 1,2 m Abstand zu 2 m und am äußern Ende zu 3 m Breite angenommen wird, und wenn eine Umdrehungszahl gleich 18 in jeder Minute vorausgesetzt wird? Wie groß ist ferner die theoretische Leistung dieses Rades?

Zunächst ist die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 0{,}1047\,.\,18 = 1{,}885$ m und damit berechnen sich für die Theilpunkte der in 7 gleiche Theile getheilten Ruthenlänge $l = 8{,}4$ m die Werthe der folgenden Tabelle:

	$c = 7$ m; $\omega = 1{,}885$ m						
Axenabstand $r =$ . .	1,2	2,4	3,6	4,8	6,0	7,2	8,4 m
Umfangsgeschwindigkeit $v = r\omega =$ . . .	2,262	4,524	6,786	9,048	11,310	13,572	15,834 m
$tg\ \alpha = \frac{3\,v}{2\,c} + \sqrt{\left(\frac{3\,v}{2\,c}\right)^2 + 2} =$	1,9797	2,6840	3,4826	4,3387	5,2296	6,1422	7,0689
$\alpha =$	63° 12′	69° 34′	73° 59′	77° 1′	79° 10′	80° 45′	81° 57′
$\frac{3\,sin^2\,\alpha - 2}{sin^3\,\alpha} =$ . .	0,5487	0,7708	0,8689	0,9157	0,9436	0,9594	0,9696
Flügelbreite $b =$ . .	2	2,167	2,333	2,50	2,667	2,833	3,00 m
$\frac{3\,sin^2\,\alpha - 2}{sin^3\,\alpha}\,b =$.	1,0974	1,6701	2,0274	2,2893	2,5161	2,7184	2,9087

Aus den Producten der letzten Zeile folgt nun der Mittelwerth:

$$k = \frac{1{,}097 + 2{,}909 + 4\,(1{,}670 + 2{,}289 + 2{,}718) + 2\,(2{,}027 + 2{,}516)}{18}$$

$$= \frac{39{,}800}{18} = 2{,}211,$$

und führt man noch $\gamma = 1{,}294$ kg, $\frac{6}{7}\,l = 7{,}2$ m, sowie $\frac{c^3}{2\,g} = 0{,}051\,.\,7^3 = 17{,}493$ ein, so erhält man die Leistung dieses Windrades:

$$L = 4 \cdot \frac{4}{9} \cdot 1{,}294\,.\,2{,}211\,.\,7{,}2\,.\,17{,}493 = 640{,}6 \text{ mkg} = 8{,}54 \text{ Pferdekraft.}$$

2. Welche Leistung ist von einem Windrade zu erwarten, welches aus vier ebenen Flügeln besteht und bei dem Stoßwinkel von 75° die übrigen Dimensionen und Verhältnisse mit dem Rade des vorigen Beispiels gemein hat?

Man hat hier

	$\alpha = 75^0$						
Axenabstand $r =$	1,2	2,4	3,6	4,8	6,0	7,2	8,4 m
Geschwindigkeitsverhältniß $\frac{v}{c} =$	0,323	0,646	0,969	1,293	1,616	1,939	2,262
$\sin\alpha - \frac{v}{c}\cos\alpha =$	0,8823	0,7987	0,7151	0,6313	0,5477	0,4641	0,3805
Flügelbreite $b =$	2	2,167	2,333	2,50	2,667	2,833	3,0 m
$\left(\sin\alpha - \frac{v}{c}\cos\alpha\right)^2 \frac{v}{c}\cos\alpha\,.\,b =$	0,1332	0,2316	0,2992	0,3334	0,3345	0,3063	0,2543

Aus den letzten Producten ergiebt sich mittelst der Simpson'schen Regel der Mittelwerth:

$$k_1 = \frac{1}{18}[0{,}1332 + 0{,}2543 + 4\,(0{,}2316 + 0{,}3334 + 0{,}3063) + 2\,(0{,}2992 + 0{,}3345)]$$

$$= \frac{5{,}1400}{18} = 0{,}2855$$

und hiermit folgt die gesuchte Leistung:

$$L = 3\,.\,4\,.\,1{,}294\,.\,0{,}2855\,.\,7{,}2\,.\,17{,}493 = 558{,}4 \text{ mkg} = 7{,}45 \text{ Pferdekraft,}$$

wogegen das Rad mit windschiefen Flügeln 8,54 Pferdekraft verspricht.

Reibungsverlust der Windräder. Einen bedeutenden Theil des §. 193.
Arbeitsvermögens, welches ein Flügelrad dem Winde abgewinnt, geht durch die Reibung am Halse des Rades verloren, zumal wenn, wie gewöhnlich, dieser sehr stark ist. Wir können annehmen, daß das ganze Gewicht des Flügelrades im Halse unterstützt sei und den Druck am hinteren Zapfen ganz unberücksichtigt lassen; wenn nun auch dadurch eine etwas zu große Reibung gefunden wird, so wird diese Ungenauigkeit durch Außerachtlassung

der Reibung an der Basis des hintern Zapfens, welche aus dem Windstoße in axialer Richtung entspringt, ungefähr wieder ausgeglichen. Da der hintere Zapfen viel schwächer ist, als der Hals- oder vordere Zapfen, so wird diese Vereinfachung um so eher erlaubt sein. Dies vorausgesetzt, erhalten wir nun aus dem Gewichte G des ganzen Flügelrades die entsprechende Reibung $F = \varphi G$, und ist nun noch r der Halbmesser des Halses, also ωr die Geschwindigkeit der Reibung, so folgt die Arbeit der letztern:

$$F \omega r = \varphi G \omega r = 0{,}1047\, n \varphi G r = \varphi G \frac{r}{l} v,$$

wenn v die Umfangsgeschwindigkeit des Rades bezeichnet.

Dies vorausgesetzt, können wir nun die effective Leistung eines Windrades mit ebenen Flügeln setzen:

$$L = 3 z \gamma k_1 l_1 \frac{c^3}{2g} - \varphi G \frac{r}{l} v,$$

und die eines solchen Rades mit windschiefen Flügeln:

$$L = {}^4/_9\, z \gamma k l_1 \frac{c^3}{2g} - \varphi G \frac{r}{l} v.$$

Aus der oben gefundenen Formel für die theoretische Leistung des Flügelelementes F:

$$L = 3 \frac{(c \sin \alpha - v \cos \alpha)^2}{2g} v \cos \alpha F \gamma$$

ersieht man leicht durch Differentiation, daß dieser Werth ein Maximum wird, wenn

$$v = \frac{c\, tg\, \alpha}{3},$$

d. h. wenn

$$v \cos \alpha = \frac{c \sin \alpha}{3}$$

angenommen wird. Mit diesem Werthe ergiebt sich die theoretische Leistung daher zu

$$L = 3 \frac{4}{27} \frac{c^3 \sin^3 \alpha}{2g} F \gamma.$$

Hieraus würde folgen, daß man die größte Leistung für $\alpha = 90^0$ erlangen würde. Da aber diese Annahme gemäß $v = \frac{c\, tg\, \alpha}{3} = \infty$ ausfallen würde, so läßt sich derselben in Wirklichkeit nicht Genüge leisten. Man darf daher wohl bei einer großen Umdrehungszahl eine große theoretische Nutzleistung erwarten, indessen ist auch dabei zu berücksichtigen, daß mit einer großen Umdrehungsgeschwindigkeit der Flügel auch eine Vergrößerung der schädlichen Nebenhindernisse, besonders der Halsreibung sich einstellt.

Man wird daher in gegebenen Fällen besonders zu untersuchen haben, bei welcher Umdrehungszahl die effective Leistung nach Abzug der Reibungswiderstände ihren größten Werth annimmt, was am einfachsten dadurch geschehen kann, daß man für eine Reihe von Umdrehungszahlen diese Leistungen berechnet, und aus diesen die größte herausnimmt oder durch Interpolation ermittelt.

Anmerkung. Daß der Werth $L = 3\,\frac{(c \sin \alpha - v \cos \alpha)^2}{2g}\, v \cos \alpha\, F \gamma$ für $v \cos \alpha = \frac{1}{3}\, c \sin \alpha$ ein Maximum wird, ergiebt sich durch Differentiation. Setzt man zu dem Ende der Kürze halber $c \sin \alpha = x$ und $v \cos \alpha = y$, so erhält man für den Ausdruck

$$(x - y)^2 y = x^2 y - 2xy^2 + y^3$$

die Bedingung des Maximums, wenn man unter Annahme eines constanten x den Differentialquotienten nach y gleich Null setzt. Dies giebt

$$x^2 - 4xy + 3y^2 = 0,$$

woraus

$$y = \frac{2}{3}\, x \pm \sqrt{\frac{4}{9}\, x^2 - \frac{x^2}{3}} = x^2$$

und $\frac{1}{3}\, x$ folgt. Der erste Werth giebt mit $c \sin \alpha = v \cos \alpha$ die Leistung $L = 0$, während der zweite Werth $y = \frac{1}{3}\, x$, d. h. $v \cos \alpha = \frac{1}{3}\, c \sin \alpha$ dem Maximum angehört.

Beispiel. Wenn die armirte Flügelwelle des in den Beispielen des vorigen Paragraphen betrachteten Rades 4000 kg wiegt, ferner der Halbmesser 120 mm mißt und der Reibungscoefficient zu $\varphi = 0{,}10$ angenommen wird, so hat man die durch die Halsreibung aufgezehrte Arbeit pro Secunde:

$$L_1 = 0{,}10 \,.\, 4000\, \omega r = 400 \,.\, 1{,}885 \,.\, 0{,}12 = 90{,}5 \text{ mkg} = 1{,}2 \text{ Pferdekraft.}$$

Es bleibt also bei dem Rade mit windschiefen Flügeln die Nutzleistung

$$L = 640{,}6 - 90{,}5 = 550{,}1 \text{ mkg} = 7{,}33 \text{ Pferdekraft}$$

oder ungefähr 86 Procent übrig. Bei Anwendung hölzerner Wellen sind aber die Hälse etwa doppelt so stark, so daß daher auch der Arbeitsbetrag der Reibung doppelt so groß ausfällt, die Nutzleistung daher zu nur etwa 70 Procent der theoretischen zu veranschlagen ist.

Erfahrungen über Windräder. Sichere, namentlich zur Prüfung §. 194.
der Theorie vollkommen genügende Beobachtungen sind an Windmühlen bis jetzt noch gar nicht gemacht worden; es fehlt zwar nicht an Angaben über die Leistungen verschiedener Windmühlen, allein dieselben sind meist zur Beurtheilung des Wirkungsgrades dieser Maschinen nicht hinreichend, da sie die Windgeschwindigkeit entweder ganz unbestimmt lassen oder dieselbe nicht mit hinreichender Genauigkeit ausdrücken. Am vollständigsten sind noch die Angaben von Coulomb und Smeaton; neuere Beobachtungen ähnlicher Art fehlen aber ganz. Coulomb stellte seine Beobachtungen an einer der

vielen Windmühlen in der Umgebung von Lille an; es lassen sich aber aus denselben ziemlich sichere Folgerungen ziehen, weil diese Mühle ein zum Auspressen des Rübsamenöles dienendes Pochwerk in Bewegung setzte, dessen Nutzleistung sich sehr leicht berechnen läßt. Die vier Radflügel dieser Mühle waren nach holländischer Art, windschief, mit den Stoßwinkeln von $63^3/_4{}^0$ bis $81^1/_4{}^0$, und jeder von ihnen hatte ungefähr $2 . 10 = 20$ qm Inhalt. Die Versuche wurden bei Windgeschwindigkeiten von 2,27 bis 9,1 m und bei Umfangsgeschwindigkeiten von 7 bis 22 m angestellt, und stimmten nach den Berechnungen von Coriolis (s. dessen Calcul de l'effet des machines) im Mittel ziemlich mit der oben entwickelten Theorie, nach welcher der Windstoß normal gegen ein Flügelelement F:

$$N = 3 \frac{(c \sin \alpha - v \cos \alpha)^2}{2g} F\gamma$$

ist, überein. Es ist übrigens leicht ersichtlich, daß bei den besseren Constructionen mit windschiefen Flügeln der Mittelwerth von $\frac{3 \sin^2 \alpha - 2}{\sin^3 \alpha}$ nicht bedeutend abweichen wird von demjenigen, welcher sich aus den im ersten Beispiele des §. 192 berechneten Werthen ergiebt. Danach bestimmt sich dieser Mittelwerth zu 0,874. Führt man denselben in die allgemeine Formel ein, so erhält man den einfachen Ausdruck für die Leistung eines Windrades mit z Flügeln von je F qm Fläche:

$$L = \frac{4}{9} \cdot 0{,}874 \,.\, 1{,}294\, zF \frac{c^3}{2g} = 0{,}0256\, zFc^3 \text{ mkg}.$$

Das Mittel aus den Coulomb'schen Beobachtungen giebt in guter Uebereinstimmung mit dem vorstehenden Rechnungsresultate

$$L = 0{,}026\, zFc^3 \text{ mkg}.$$

Diese Formeln geben jedoch nur dann genügende Resultate, wenn die Umfangsgeschwindigkeit v des Rades die vortheilhafteste, nämlich circa 2,5 mal so groß als die Windgeschwindigkeit c ist.

Beispiel. Wenn ein Windrad bei einer Windgeschwindigkeit von $c = 6$ m eine Leistung von 4 Pferdekräften geben soll, welche Flügelflächen muß dasselbe erhalten?

Nach der letzten Formel

$$L = 0{,}0256\, zFc^3$$

erhält man bei 4 Flügeln die Fläche F jedes derselben zu

$$F = \frac{4 \,.\, 75}{0{,}0256 \,.\, 4 \,.\, 216} = 13{,}563 \text{ qm}.$$

Macht man die Länge l_1 des Flügels gleich der fünffachen mittlern Breite b, so hat man hiernach $5\, b^2 = 13{,}563$, woraus $b = \sqrt{2{,}7126} = 1{,}647$ m und $l_1 = 5 \,.\, 1{,}647 = 8{,}235$ m folgt.

Smeaton's Regeln. Smeaton hat sehr ausführliche Versuche über Windräder im Kleinen angestellt. Sein Versuchsrad hatte Arme von 21 Zoll engl. (0,543 m) Länge mit Flügeln von 18 Zoll (0,457 m) Länge und 5,6 Zoll (0,143 m) Breite. Er ließ dieses Rad nicht durch den Wind in Umdrehung setzen, sondern er bewegte dasselbe in der ruhigen Luft im Kreise herum, weshalb er denn nicht den Windstoß, sondern den Widerstand der Luft gegen das Rad beobachtet hat, wodurch allerdings die Resultate seiner Beobachtungen bedeutend an Werth verlieren Die Bewegung des Rades gegen den Wind erfolgte durch eine stehende Welle mit einem $5\frac{1}{2}$ Fuß (1,67 m) langen Querarme, an dessen Ende die Lager des Rades befestigt waren; diese Welle aber erhielt ihre Bewegung durch den Beobachter selbst, und zwar mit Hülfe einer Schnur, welche, wie bei einem Kreisel, vor jedem Versuche auf den stärkern Theil dieser Welle aufgewickelt wurde. Um den Windstoß oder vielmehr den Widerstand der Luft zu messen, wurde unmittelbar über der stehenden Welle eine Wagschale mit Gewichten an einer sehr feinen Schnur aufgehangen, und das andere Ende dieser Schnur um die Flügelwelle gelegt, so daß sich bei Umdrehung dieser Welle die Schnur auf sie aufwickelte und das Gewicht am ersten Ende dieser Schnur emporhob. Was nun die Ergebnisse dieser Versuche anlangt, so stimmen sie in qualitativer Hinsicht sehr gut mit der Theorie überein, namentlich weisen sie sehr bestimmt nach, daß die windschiefen Flügel mehr Wirkung haben als die ebenen, und daß die durch die Theorie gefundenen Stoßwinkel wirklich die vortheilhaftesten sind. Während wir im obigen Beispiel zu §. 192 von innen nach außen gegangen und, gleichen Abständen entsprechend, die sieben Stoßwinkel §. 195.

$$63^0\,12'; \; 69^0\,34'; \; 73^0\,59'; \; 77^0\,1'; \; 79^0\,10'; \; 80^0\,45' \text{ und } 81^0\,57'$$

gefunden haben, ergaben sich bei den Versuchen von Smeaton folgende sechs Stoßwinkel als sehr vortheilhaft:

$$72^0; \; 71^0; \; 72^0; \; 74^0; \; 77\tfrac{1}{2}{}^0; \; 83^0;$$

im Mittel also wenig verschieden von den ersteren. Uebrigens bemerkt Smeaton selbst, daß eine Abweichung von 2^0 im Stoßwinkel keinen bedeutenden Einfluß auf die Leistung des Rades habe.

Zuletzt zieht Smeaton aus seinen bei 1,32 bis 2,51 m Wind- oder vielmehr Radaxengeschwindigkeit angestellten Versuchen folgende, mit der Theorie in sehr guter Uebereinstimmung stehende Folgerungen.

Bei einem zweckmäßig besegelten Flügelrade steht die größte Umfangsgeschwindigkeit mit der vortheilhaftesten Umfangsgeschwindigkeit im Verhältnisse wie 3 : 2, und dagegen die größte Last zur vortheilhaftesten Last im Verhältnisse wie 6 : 5. Uebrigens aber ist die größte Umfangsgeschwindigkeit, d. i. die beim leeren Gange, circa 4mal, und daher die beim vortheilhaftesten Gange, $\frac{2}{3} \cdot 4 = \frac{8}{3}$mal so groß wie die Windgeschwindigkeit. Ferner wächst beim vortheilhaftesten, d. h. die größte Nutzleistung gebenden Gange die Belastung beinahe wie das Quadrat, und die Leistung beinahe wie der Cubus der Windgeschwindigkeit. Wenigstens gab die doppelte Windgeschwindigkeit die 3,75 fache Belastung und die 7,02 fache Nutzleistung. Manche andere Regeln, welche Smeaton noch aus seinen Versuchen zieht, sind mit der Theorie im Einklange und lassen sich ebenso gut aus dieser ableiten, weswegen es nicht nöthig ist, hier weiter darauf einzugehen.

Nach diesen Versuchen ist übrigens die Wirkung des Windes bei den Flügelrädern noch größer als sie die Theorie giebt und als die Coulomb'schen Versuche geben.

Schlußanmerkung. Die vollständigste Theorie der Windräder findet man in des Verfassers Handbuch der Bergmaschinenmechanik und in Coriolis' Traité du calcul de l'effet des machines. In den meisten Lehrbüchern über Mechanik werden die Windräder ganz kurz abgehandelt oder wohl gar unbeachtet gelassen. Die Versuche Smeaton's sind in den Philosophical Transactions, Jahrgänge 1759 bis 1776, beschrieben, gesammelt und ins Französische übersetzt aber von Girard, und zwar unter dem Titel „Recherches expérimentales sur l'eau et le vent. Paris 1827". Auszüge davon findet man fast in allen englischen Werken, namentlich auch in Barlow's Treatise on the Manufactures and Machinery of Great-Britain. Coulomb's Versuche sind in dem bekannten Werke: Théorie des machines simples, par Coulomb, beschrieben. Eine Bockwindmühle, genau gezeichnet und ausführlich beschrieben, findet man in Hoffmann's Sammlung der gebräuchlichsten Maschinen, Heft I, Berlin 1833. Siehe auch Schwahn's Lehrbuch der prakt. Mühlenbaukunde und auch Band 8 der Publication industrielle etc. par Armengaud, Paris 1853.

Eine ziemlich vollständige Abhandlung über Windmühlen von A. Burg enthält Bd. 8 (1826) der Jahrbücher des polytechn. Instituts in Wien. Ebenso Rühlmann's Allgemeine Maschinenlehre Bd. I.

Ueber den Windstoß handelt schon Mariotte in seinen Grundlehren der Hydrostatik und Hydraulik; nach ihm ist der Windstoß

$$P = 1{,}73\,\frac{c^2}{2g}\,F\gamma.$$

Nächstdem auch Borda in den Mémoires de l'Académie de Paris, 1763; ferner Rouse (s. das oben citirte Werk von Smeaton), dann noch Hutton und Woltmann. Die letzteren Autoren finden P viel kleiner, als Mariotte u. s. w., weil sie nicht den Windstoß, sondern den Widerstand der Luft gemessen haben. Sicherlich ist daher auch der von Woltmann gefundene Coefficient $\zeta = 4/3$, also die Kraft

$$P = 4/3\,\frac{c^2}{2g}\,F\gamma$$

zu klein, weil er die Constante seines Flügels nicht direct bestimmt hat (s. dessen Theorie und Gebrauch des hydrometrischen Flügels. Hamburg 1790).

Hutton findet aus seinen Versuchen, daß man mit mehr Genauigkeit den Stoß und Widerstand der Luft $F^{0,1}$ proportional wachsend annehmen müsse (s. dessen Philosophical and mathematical Dictionary, T. II). Nehmen wir nun an, daß der Coefficient $\zeta = 1{,}86$ für eine kleine Fläche von 1 Quadratfuß Inhalt richtig sei, so müssen wir hiernach für einen Windflügel von 200 Quadratfuß Flächeninhalt $\zeta = 200^{0,1} . 1{,}86 = 1{,}7 . 1{,}86 = 3{,}162$ setzen, was mit der theoretischen Bestimmung und mit dem obigen Vortrage, wo

$$\zeta = 3 \quad \text{und} \quad P = 3\,\frac{c^2}{2g}\,F\gamma$$

angenommen wurde, gut übereinstimmt.

Eine sehr gute Zusammenstellung und Vergleichung der Versuche über den Stoß und Widerstand der Luft theilt Poncelet in seiner Introduction à la mécanique industrielle mit. Eigenthümliche Ansichten über den Windstoß verfolgt Euler in einer Abhandlung der Berliner Memoiren, 1756; ebenso Crelle in der Abhandlung „Theorie des Windstoßes", Berlin 1802.

Untersuchungen über die empirische Formel

$$L = 0{,}025\, z\, F c^3$$

von Coulomb u. s. w. enthält die kleine Schrift: Notice sur les moulins à vent à ailes réductibles, par M. Ord. de Lacolange, Besançon 1856.