

LUFSTRÖMUNGEN IN DER LANDTECHNIK

Von Hermann Blenk

Zahlreiche Landmaschinen bedienen sich einer Luftströmung, sei es zur Reinigung, zur Sortierung oder zum Transport eines bestimmten Gutes. Die Erkenntnisse, die die Strömungsforschung, hauptsächlich angeregt durch die Anforderungen und Erfolge der Luftfahrt, in den letzten Jahrzehnten gewonnen hat, werden aber in der Landtechnik erst wenig beachtet. Es erscheint deshalb angebracht, der Anwendung strömungstechnischer Ergebnisse und Erfahrungen bei der Konstruktion von Landmaschinen grössere Aufmerksamkeit als bisher zu widmen.

Der folgende Bericht bringt in Teil I einige allgemeine Ergebnisse der Strömungsforschung, ohne deren Kenntnis eine sachgemässe Verwendung der in Handbüchern zu findenden Zahlen über Widerstände und sonstige Luftkräfte nicht möglich ist. In Teil II wird über Untersuchungen an fertigen Landmaschinen berichtet, die im Institut für Landtechnische Grundlagenforschung der FAL Braunschweig-Völkenrode durchgeführt wurden, über die Mängel, die sich dabei ergaben, und über die Verbesserungen, die durch gewisse konstruktive Änderungen erzielt werden konnten. Teil III schliesslich enthält einen Kurzbericht über Sortierungsversuche mit einem eigens zu diesem Zweck erstellten Horizontalsichter.

I. Allgemeines

Wer sich mit strömungstechnischen Aufgaben befasst, wird sehr bald auf den Gedanken kommen, dass es möglich sein müsste, Ergebnisse eines bestimmten Versuches auf andere, geometrisch ähnliche Verhältnisse zu übertragen; d.h. man wird versuchen, den Einzelversuch als „Modellversuch“ zu betrachten und durch möglichst einfache Umrechnungen weitere Ergebnisse für andere Verhältnisse daraus abzuleiten.

Wenn man sich nun die Frage vorlegt, unter welchen Umständen die Umströmung geometrisch ähnlicher Gebilde ihrerseits mechanisch ähnlich verlaufen wird, so wird man allgemein antworten können: immer dann, wenn die verschiedenen wirkenden Kräfte im gleichen Verhältnis zueinander stehen. Es kommt also darauf an, was für Kräfte wirken und wie sie von den Abmessungen und den physikalischen Daten abhängen.

Für den Bereich, der uns für Anwendungen im Landmaschinenbau hier interessiert, kommen als wesentlichste Kräfte die Reibungs- und Trägheitskräfte in Betracht.

Die in einem strömenden Medium auftretende innere Reibung messen wir durch die sogenannte „Zähigkeit“, eine Stoffkonstante, die natürlich noch von Temperatur und Druck abhängen kann.

Zu ihrer Definition betrachten wir (Bild 1) zwei parallele Platten, von denen die eine in Ruhe ist, die andere sich in gleichförmiger Bewegung mit der Geschwindigkeit v befindet. In dem Medium zwischen den Platten stellt sich dann eine lineare

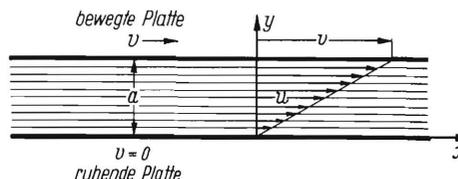


Bild 1. Zur Definition der Zähigkeit eines strömenden Mediums:

- v = Geschwindigkeit der bewegten (oberen) Platte
- $u(y)$ = Geschwindigkeit des Mediums zwischen den Platten
- a = Abstand der Platten.

Geschwindigkeitsverteilung $u(y)$ ein, die an beiden Platten die Geschwindigkeitswerte der Platten selbst (also 0 und v) annimmt:

$$u(y) = v \frac{y}{a}$$

Beziehen wir den Widerstand, der der Bewegung der oberen Platte entgegenwirkt, auf die Flächeneinheit, so erhalten wir eine Schubspannung τ , für die die Beziehung gilt:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy},$$

d.h. diese Schubspannung ist umso grösser, je steiler die Geschwindigkeitskurve an der Wand ansteigt. Sie hängt aber ausserdem von einer Stoffgrösse μ ab, die wir als „Zähigkeit“ oder auch „dynamische Zähigkeit“ bezeichnen. Da es für unsere Betrachtungen

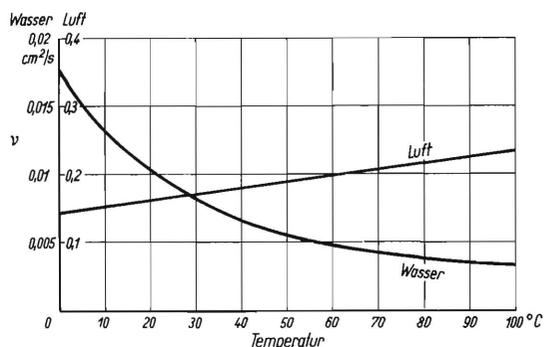


Bild 2. Kinematische Zähigkeit für Wasser und für atmosphärische Luft.

tungen auf das Verhältnis Zähigkeit μ /Dichte ρ ankommt, führen wir noch die „kinematische Zähigkeit“ $\nu = \mu/\rho$ ein. Bild 2 zeigt die kinematische Zähigkeit für Wasser und Luft in Abhängigkeit von der Temperatur. Während die kinematische Zähigkeit für Luft mit der Temperatur wächst, fällt sie für Wasser recht merklich ab [6].

Beziehen wir die Reibungskraft auf die Volumeneinheit des Mediums, so kommt für sie der Wert τ/l in Betracht, wobei l eine charakteristische Länge (z.B. der Rohrdurchmesser bei der Strömung durch Rohre) ist. Bei geometrischer Ähnlichkeit ist u proportional v und y proportional l , also die Reibungskraft je Volumeneinheit gegeben durch

$$\frac{\tau}{l} \approx \frac{\mu}{l} \cdot \frac{v}{l} = \mu \frac{v}{l^2}$$

Für die Trägheitskraft je Volumeneinheit erhält man ebenso:

$$\rho \frac{du}{dt} \approx \rho \frac{v^2}{l}$$

Setzen wir beide Werte zueinander ins Verhältnis, so finden wir:

$$\frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Reibungskräfte}} = \frac{\rho v^2/l}{\mu v/l^2} = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu} = Re$$

Re heisst die „Reynoldssche Zahl“. In Bild 3 sind als Beispiel drei verschiedene Strömungszustände angeführt, die die gleiche Re-Zahl haben. ① und ② sind Strömungen in Wasser und in Luft durch das gleiche Rohr. Dabei ist eine Wassergeschwindigkeit von 4 m/s einer Luftgeschwindigkeit von 30 m/s gleichwertig. ③ ist eine Luftströmung durch ein auf die Hälfte verkleinertes, sonst aber geometrisch gleiches Rohr; hier muss die Geschwindigkeit verdoppelt werden, damit sich die gleiche Re-Zahl wie bei ② ergibt. Das Reynoldssche Ähnlich-

Zustände bei gleichen Re-Zahlen zu erwarten. Bild 4 zeigt einen experimentellen Beweis dieser Behauptung: Über der Reynoldsschen Zahl ist eine grosse Anzahl von Messergebnissen des Strömungswiderstandes in glatten Rohren aufgetragen, die in einem weiten Bereich von Re-Zahlen gemessen wurden, und zwar in Wasser und in Luft. Die Messpunkte liegen recht deutlich auf einer einzigen Kurve, $v \cdot s$

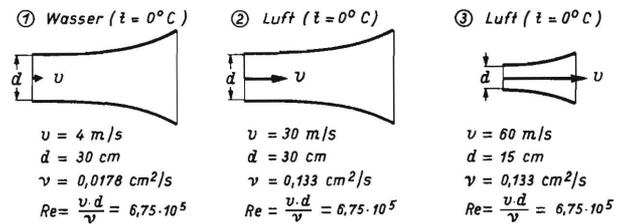


Bild 3. Drei Strömungszustände mit gleicher Reynoldsscher Kennzahl.

ohne die Ordnung durch die Re-Zahl keineswegs der Fall wäre. Ähnliche Darstellungen gewinnt man auch für andere strömungstechnische Fragen; hier wurden die Untersuchungen über Rohrströmungen bevorzugt, da diese für die Anwendung in Landmaschinen besonders wichtig sind.

Bei verhältnismässig kleinen Geschwindigkeiten kann man also Modellversuche, die für Luftströmungen angewandt werden sollen, auch in Wasser ausführen. In Wasserkanälen, bei denen man zur Demonstration die Strömungsverhältnisse durch aufgestreu-

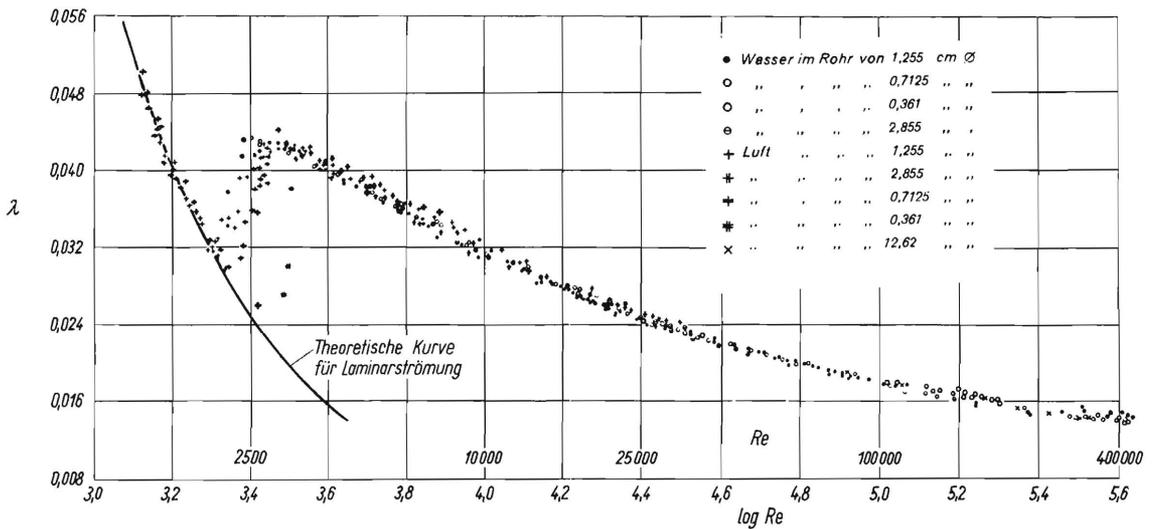


Bild 4. Strömungswiderstand in glatten Rohren, abhängig von der Reynoldsschen Zahl (nach Stanton u. Pannel [5]).

$$\lambda = \frac{\Delta p}{q} \cdot \frac{d}{l} = \text{Widerstandskoeffizient}$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \text{Reynoldssche Zahl}$$

- Δp = Druckabfall auf der Länge l
- q = Staudruck
- v = Geschwindigkeit
- d = Rohrdurchmesser
- ν = kinematische Zähigkeit

keitsgesetz ist nicht mehr ausreichend, wenn bei Wasserströmungen Oberflächenwellen entstehen oder wenn Kavitation auftritt und wenn bei Luftströmungen der Kompressibilitätseinfluss merklich wird (also etwa oberhalb 150 m/s) [1, 9].

Solange es aber nur auf Trägheits- und Reibungskräfte ankommt, sind gleiche strömungstechnische

tes Aluminiumpulver sichtbar macht, muss man meist auf die Einhaltung genauer Re-Zahlen verzichten und erhält deshalb nur qualitativ richtige Ergebnisse.

Man erkennt aus Bild 4 ferner, dass es offenbar zwei verschiedene Strömungsbereiche gibt, die sich deutlich unterscheiden und ziemlich sprunghaft ineinander übergehen. Wir bezeichnen die Strömung im

unteren Bereich der Re-Zahlen, wo der Widerstandskoeffizient λ stark abfällt, als „laminar“, im oberen Bereich als „turbulent“. An der Übergangsstelle sprechen wir von der „kritischen Re-Zahl“. Wenn man sich beide Strömungszustände genauer ansieht, erkennt man im laminaren Bereich ein glattes Aneinandervorbeistreichen der einzelnen Schichten, im turbulenten Bereich aber ein durchwirbeltes Strömen. Man kann beide Zustände oft gleichzeitig bei der Ausströmung von Wasser aus einem Hahn beobachten. Der obere (laminare) Teil des Strahls ist glasklar, während der untere (turbulente) Teil infolge der Durchwirbelung milchig weiss aussieht. Prüft man die Geschwindigkeitsverteilung im Rohr (Bild 5), so erhält man bei laminarer Strömung einen parabelförmigen Verlauf, bei turbulenter Strömung aber einen starken Ausgleich im Inneren und infolgedessen einen stärkeren Abfall am Rande und dadurch einen erhöhten Widerstand.

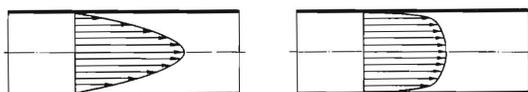


Bild 5. Geschwindigkeitsverteilung im Rohrquerschnitt bei laminarer (links) und bei turbulenter Strömung (rechts).

Bild 6 zeigt den Strömungswiderstand in rauhen Rohren. Im laminaren Teil links hat die Rauigkeit keinen merklichen Einfluss, während sich im turbulenten Teil rechts grosse Unterschiede, allerdings gut geordnet nach der Grösse einer Rauigkeitszahl, zeigen. Dieses Bild kann als Grundlage für die Anwendung von Rohrströmungen in Landmaschinen benutzt werden. Im allgemeinen wird man sich dabei im turbulenten Teil befinden. Die Rauigkeit wird durch die mittlere Wanderhebung k im Verhältnis zum Rohrradius r gemessen. Wir können sagen, dass erst bei gleichem k/r vollständige geometrische Ähnlichkeit vorliegt. Nach Angaben von B. Eck [5] kommen für k folgende Zahlen in Betracht:

Gusseisen neu	$k = 0,5$ bis 1 mm
„ angerostet	1 „ 1,5 „
„ verkrustet	1,5 „ 3 „
Zement geglättet	0,3 „ 0,8 „
„ unbearbeitet	1 „ 2 „
Rauhe Bretter	1 „ 2,5 „
Roher Bruchstein	8 „ 15 „

Bei vielen praktischen Strömungen tritt nun eine Erscheinung auf, die man mit „Ablösung“ bezeichnet. Die Strömung löst sich dabei von einer Wand ab, und es bildet sich zwischen der Wand und dem eigentlichen Strömungsgebiet ein durchwirbeltes Gebiet, das auch als Totwasser bezeichnet wird und die Ursache der grössten Verluste bei praktischen Strömungen darstellt.

Solche Ablösungen zu vermeiden, erscheint mit als die wichtigste strömungstechnische Aufgabe des Konstrukteurs von Landmaschinen. Als Ursache der Ablösungen kommen einerseits mehr oder weniger scharfe Kanten in Betracht, andererseits aber auch zu starke Erweiterungen bei divergenten Rohren. In solchen Erweiterungen wird die Strömung verzögert und

dabei kinetische Energie in Druck umgesetzt. Die ohnehin langsam bewegten Flüssigkeitsteilchen an der Wand können völlig zur Ruhe kommen und sogar umkehren. Dabei sammelt sich Flüssigkeitsmaterial an und bildet Wirbel, bezw. Totwassergebiete. Bei laminarer Strömung ist die Gefahr des Abreissens oder Ablösens besonders gross, da die Geschwindigkeiten in Wandnähe an sich schon klein sind. Durch Turbulenz wird die Ablösungsgefahr vermindert.

(Bei dem Vortrag wurde während der nun folgenden Ausführungen der zweite Teil eines Strömungsfilmes vorgeführt, der in dem früheren Kaiser Wilhelm-Institut (jetzt Max Planck-Institut) für Strömungsforschung in Göttingen entstanden ist und von dem Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht in Göttingen ausgeliehen und auch käuflich erworben werden kann. Der erste Teil des Films, der aus Zeitmangel nicht gezeigt wurde, befasst sich mit der Entstehung von Wirbeln und mit der künstlichen Beeinflussung der Wirbelbildung. Der zweite Teil bringt Anwendungen auf technische Strömungen. Die Aufnahmen sind nach der von F. Ahlborn entwickelten Methode gewonnen worden. Dabei wird die Strömung dadurch sichtbar gemacht, dass feine Aluminiumfitterchen auf das Wasser gestreut werden. Die im Film gezeigten Strömungsvorgänge sind fast alle sogenannte „ebene Strömungen“, d.h. in parallelen Schichten unter der Oberfläche haben wir jeweils den gleichen Vorgang.)

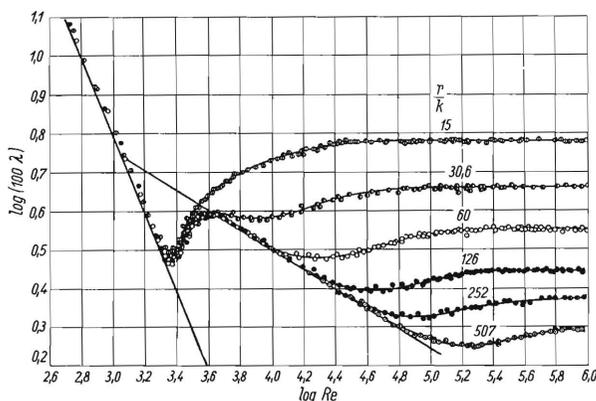


Bild 6. Strömungswiderstand in rauhen Rohren, abhängig von der Reynoldsschen Zahl und der Rauigkeit (nach Nikuradse [5]).

Die Formelzeichen haben die gleiche Bedeutung wie in Bild 4; ausserdem
 r = Rohrhalmmesser
 k = mittlere Wanderhebung
 k/r = Rauigkeitszahl

Bei Dreschmaschinen, Reinigungs- und Sortiermaschinen kommen Strömungen durch einen Krümmer recht häufig vor. In der Umlenkung ergeben sich dabei durch Zentrifugalkräfte aussen höhere Drücke als innen. Dieser Druckanstieg bewirkt eine Strömungsablösung an der Aussenseite des Krümmers, und zwar schon bei Beginn des Krümmers. Am Ende des Krümmers löst sich dann die Strömung auch auf der Innenseite ab, während sie aussen langsam wieder zum Anliegen kommt. Diese innere Ablösung wird umso stärker, je schärfer die Umlenkung ausgeführt wird. Bei einer rechteckigen Ecke ist die Ausbildung eines Wirbels besonders gut zu sehen; er erzeugt ein ausgedehntes Totwassergebiet, das nahezu den halben Querschnitt ausfüllt.

Bei der Strömung in einem Spiralgehäuse mit einem Abfluss in der Mitte nach unten sieht man zunächst wieder die Entstehung eines Wirbels, aus dem sich dann eine regelrechte Senkenströmung entwickelt, deren Geschwindigkeit umgekehrt proportional dem Abstand vom Wirbelzentrum ist. Solche Senkenströmungen – bei umgekehrtem Vorzeichen haben wir es mit Quellströmungen zu tun – spielen in der Strömungslehre eine bedeutende Rolle, da man mit ihrer Hilfe die Umströmung einfacher Körperformen (z.B. von Luftschiffen) theoretisch studieren kann.

Bei Strömungen durch Verzweigungsstücke entstehen ähnliche Strömungsverhältnisse wie in den Krümmern; besonders wichtig ist die Auswirkung von Absperrungen. Strömungen dieser Art sind etwa in den Leitungen von Pflanzenschutzgeräten zu erwarten. Sobald zwei Abflusswege offenstehen, stellt sich wegen der Verzögerung der Strömung auch in dem geraden Rohrstück eine Ablösung ein. Im Endzustand finden wir in beiden Rohren je ungefähr den den halben Querschnitt von Totwasser ausgefüllt.

Falls eine Strömungsbilösung nicht von vornherein durch sanfte Übergänge und langsame Erweiterungen vermieden werden kann, wie es bei Landmaschinen zweifellos oft vorkommt, kann man Ablösungen hauptsächlich durch zwei Massnahmen nachträglich beseitigen, nämlich entweder durch Leitschaufeln oder durch eine geeignet gewählte Absaugung. Bild 7 zeigt, wie man diese Aufgabe beim Bau von Windkanälen für die Luftfahrt gelöst hat. Bei der sogenannten Göttinger Bauart führt man die Luft auf einem geschlossenem Wege vom Auffangtrichter wieder bis zur Düse. Der Weg ist nahezu rechteckig. Um die Luft an den Ecken am Abreissen zu verhindern, ist jede Ecke mit einem System von Umlenkschaufeln versehen. Diese lösen den Luftstrahl in schmale Streifen auf und lenken sie einzeln durch geschickte Profilierung möglichst ohne Abreisserscheinungen um die Ecke. Verwendet man an Stelle der profilierten Schaufeln einfache Leitbleche, so erhält man auch schon eine recht gute Umlenkung,

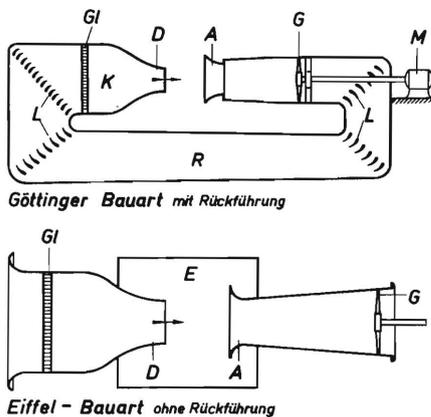


Bild 7. Windkanal-Bauarten.

- | | |
|-------------------|---------------------------------|
| G = Gebläse | K = Kammer vor der Düse |
| M = Antriebsmotor | Gl = Gleichrichter |
| L = Leitschaufeln | D = Düse |
| R = Rückführung | A = Auffangtrichter |
| | E = Eiffel-Kammer (Unterdruck). |

allerdings nur wenn die Ecke schon eine gewisse Abrundung aufweist. Über die günstigsten Abrundungen auf der Innen- und Aussenseite liegen systematische Untersuchungen vor, aus denen man sich im Einzelfall Rat holen kann [5]. Die Verwendung von Leitblechen oder Umlenkschaufeln dürfte bei vielen Landmaschinen eine lohnende Konstruktion sein. Dabei wird es sich nicht so sehr um die durch die Leitbleche erreichbare Verringerung der Reibungsverluste handeln, als darum, an der Stelle, wo eine Reinigungs- oder Sortierungsaufgabe zu erfüllen ist, einen Luftstrahl mit grosser Gleichmässigkeit hinsichtlich Grösse und Richtung der Luftgeschwindigkeit zu haben.

Eine andere Möglichkeit, Ablösung zu vermeiden, stellt die Absaugung dar. Bild 8 zeigt die Durch-

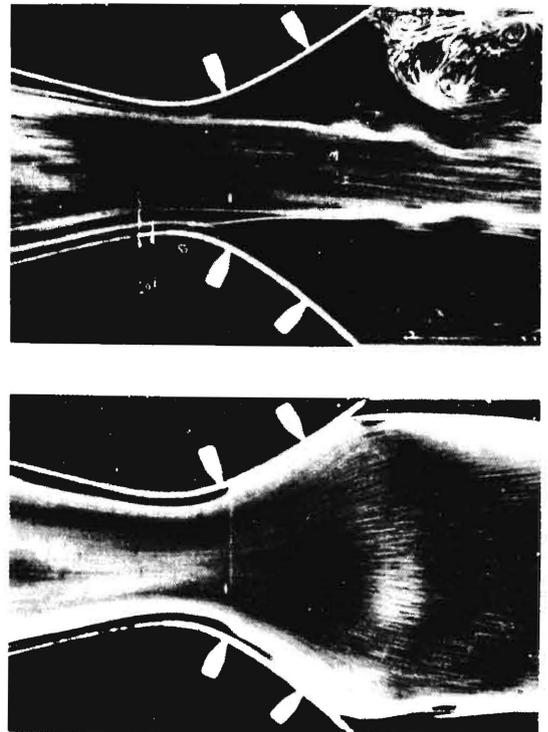


Bild 8. Strömungsbilösung durch Absaugung [8].
oben: gewöhnliche Strömung in einem stark erweiterten Kanal,
unten: dieselbe Strömung mit Absaugung an den durch weiße
Marken gekennzeichneten Stellen.

strömung einer Düse mit einem verhältnismässig grossen Erweiterungswinkel. Dieser Winkel ist hier viel zu gross, als dass man noch ein Anliegen der Strömung erwarten könnte. Das obere Bild zeigt deutlich, wie die Strömung mitten durch die Düse hindurchgeht und auf beiden Seiten der Düse abreisst. Sobald man aber an den durch weiße Marken bezeichneten Stellen durch dünne Schlitze eine gewisse (nicht besonders grosse) Menge der Grenzschicht absaugt, legt sich die Strömung auf beiden Seiten an und lässt nun nichts mehr zu wünschen übrig. Es gibt wohl bisher noch keine Landmaschine, in der eine solche Absaugung benutzt worden wäre. Es erscheint jedoch nicht ausgeschlossen, dass dieses Verfahren in Sonderfällen mit Vorteil verwandt wird.

II. Strömungstechnische Untersuchungen an Landmaschinen*)

In diesem Abschnitt wird über Untersuchungen an von der Industrie zur Verfügung gestellten Landmaschinen berichtet¹⁾. Die Aufgabe bestand dabei darin, zunächst die Strömungsverhältnisse an wesentlichen Stellen der untersuchten Maschine festzustellen und sie dann, falls sich Mängel ergeben hatten, durch konstruktive Änderungen zu verbessern. Dieser Weg erschien uns richtiger, als durch allgemeine, von der einzelnen Landmaschine losgelöste Untersuchungen Lösungen zu suchen, die für möglichst viele Einzelfälle verwendbar wären. Solche allgemeinen Untersuchungen liegen ja auch längst in grosser Zahl vor, wie ein Blick in die Literatur sofort erkennen lässt [5, 6].

Bild 9 zeigt die untersuchte Windführung im Grundriss, Aufriss und Seitenriss. Längs der durch Buchstaben bezeichneten Linien wurden Staudruckmessungen

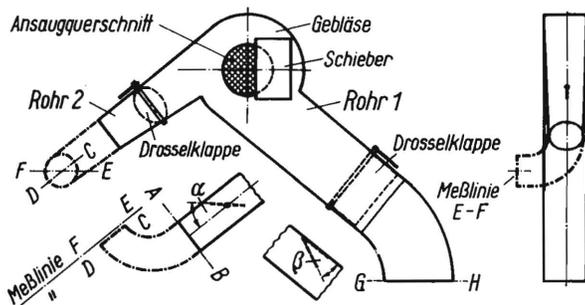


Bild 9. Grundriss, Aufriss und Seitenriss der untersuchten Windführung.

gen vorgenommen. Bild 10 bringt das Ergebnis der Staudruckmessungen auf der Linie A-B, also vor dem Krümmer, der bei dieser Messung abgenommen worden ist. Bei einer Drosselklappenstellung von $\alpha = 0^\circ$ haben wir eine recht gute gleichmässige Verteilung über den Querschnitt. Was hinter dem Krüm-

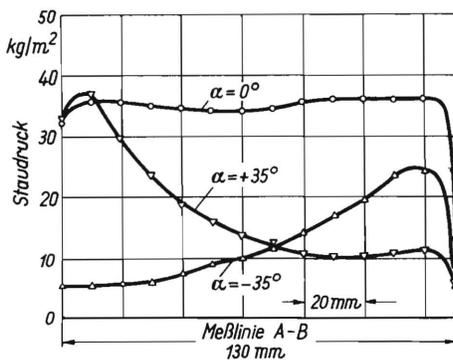


Bild 10. Staudruckverteilung vor dem Krümmer (auf der Meßlinie A-B).

*) Die Durchführung der in Abschnitt II und III geschilderten Versuche wurde durch einen Forschungsauftrag des Herrn Ministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen in dankenswerter Weise ermöglicht.

1) Diese Messungen und die zugehörigen konstruktiven Arbeiten wurden von den Herren Dr.-Ing. H. Trienes und Ing. W. Ihmels durchgeführt.

mer (auf der Linie C-D) daraus wird, zeigt Bild 11. Auf der Innenseite des Krümmers ist die Strömung abgerissen, fast die Hälfte des Rohrquerschnitts ist von „Totwasser“ erfüllt. Ein Ausschlag der Drosselklappe ergibt vor dem (abgenommenen) Krümmer verständlicher Weise eine unsymmetrische Verteilung mit einem Maximum auf der Seite, nach der die schräg stehende Drosselklappe die Strömung

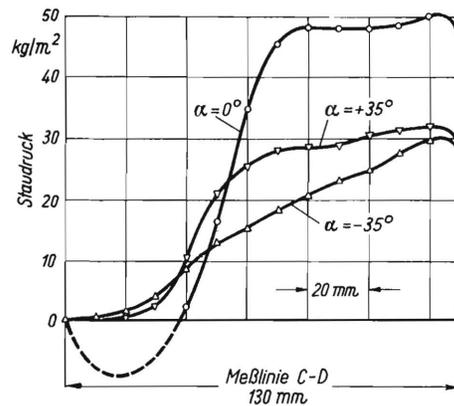


Bild 11. Staudruckverteilung hinter dem Krümmer (auf der Meßlinie C-D).

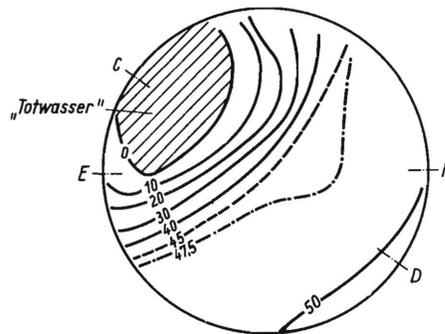


Bild 12. Linien konstanten Staudrucks (kg/m^2) im Querschnitt hinter dem Krümmer.

ablenkt. Hinter dem Krümmer fallen die beiden Kurven für positiven und negativen Ausschlag der Drosselklappe fast zusammen; d.h. die Ablösung im Krümmer ist so stark, dass sie die Wirkung des Drosselklappenausschlags ganz und gar überdeckt. Bild 12 zeigt dasselbe Versuchsergebnis noch einmal in anderer Darstellung. Hier sind Kurven gleichen Staudrucks in den Querschnitt hineingezeichnet.

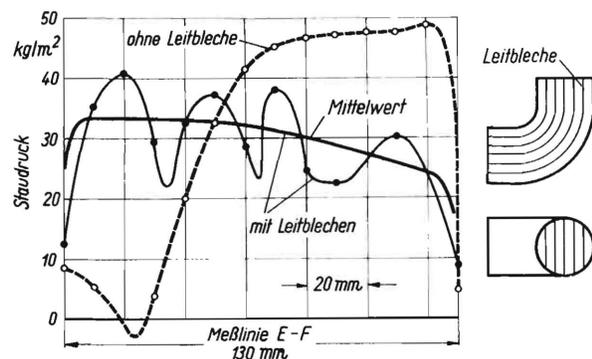


Bild 13. Einfluss von Leitblechen im Krümmer.

Man erkennt das starke Totwassergebiet in der inneren Ecke links oben. Nur etwa die Hälfte des Rohrquerschnitts ist von einer gleichmässigen Strömung erfüllt. Zur Vermeidung der Ablösung wurde der Krümmer durch einige einfache Leitbleche ausgefüllt, wie die Skizze in Bild 13 zeigt. Die Staudruckverteilung hinter dem Krümmer (ausgezogene Kurve in Bild 13) verläuft jetzt wesentlich anders. Die Schwankungen rühren davon her, dass die Messlinie E-F sehr dicht hinter dem Ende der Leitflächen lag. Wären die Messungen etwas weiter stromabwärts ausgeführt worden, so hätte man einen Ausgleich dieser Schwankungen erwarten können. Auf jeden Fall aber zeigt der Vergleich, dass die Leitflächen die Luftströmung recht gut um die Ecke herumführen. Der Staudruck ist sogar auf der Innenseite höher als auf der Aussenseite. Die hier gewählte Form der Leitbleche ist recht primitiv; es sollte aber zunächst eine möglichst billig und schnell auszuführende Änderung des Krümmers versucht werden. Zweifellos hätte man durch Verkürzung der Leitbleche und durch Profilierung noch eine weitere Verbesserung des Krümmerströmung erzielen können. Auch eine Änderung des Querschnittsverlaufes im Krümmer entsprechend den Ergebnissen systematischer Krümmeruntersuchungen [5] hätte noch verbessernd wirken können; dazu wäre aber eine völlige Neukonstruktion des Krümmers erforderlich geworden, was nicht möglich war, da die betreffende Landmaschine nur beschränkte Zeit zur Verfügung stand²⁾.

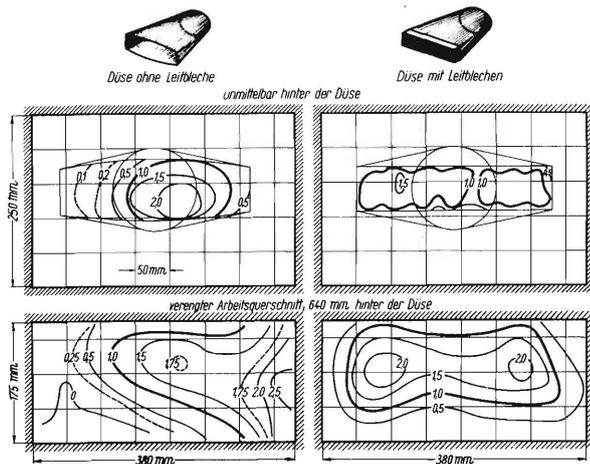


Bild 14. Linien konstanten Staudrucks (kg/m^2) im Querschnitt hinter einer Düse.
links: ohne Leitbleche in der Düse
rechts: mit Leitblechen „ „ „

Bei dem in Bild 14 dargestellten Versuch handelt es sich um die Umformung eines Luftstrahls in einer Düse. Aus dem aus einem runden Rohrquerschnitt herkommenden Luftstrahl soll durch Zusammendrücken und gleichzeitiges Erweitern ein Luftstrahl von rechteckigem Querschnitt gemacht werden, der

2) An dieser Stelle sei erwähnt, dass das Institut für Landtechnische Grundlagenforschung in der FAL Braunschweig-Völkenrode gern bereit ist, an Maschinen, die für eine angemessene Zeit zur Verfügung gestellt werden können, solche und ähnliche Versuche durchzuführen.

nach weiteren 600 mm für eine Reinigungsaufgabe gebraucht wird. Die beiden linken Bilder zeigen die Strömungsverhältnisse im ursprünglichen Zustand, das obere Bild unmittelbar hinter der Düse und das untere in einer Entfernung von 640 mm, d.h. etwa an der Stelle, wo der Luftstrahl seine eigentliche Aufgabe zu erfüllen hat und also sehr gleichmässig sein sollte. Wie wenig gleichmässig er ist, zeigen die Kurven (Linien gleichen Staudrucks) sehr deutlich. Der Kern des Strahles liegt stark rechts, und in der linken Hälfte des Arbeitsquerschnitts treten nur unzulängliche Geschwindigkeiten auf. Dieses Messergebnis stimmt mit Angaben der Herstellerfirma gut überein, die besagen, dass das Saatgut auf der linken Seite oft einfach liegen bleibt und dadurch den reibungsfreien Betrieb der Maschine stört.

Die beiden rechten Bilder zeigen nun, was durch den Einbau von Leitblechen erreicht werden kann. Der gesamte Querschnitt, besonders auch an der Arbeitsstelle, ist jetzt durch eine verhältnismässig gleichmässige Geschwindigkeit erfüllt. Auch hier gilt, dass weitere Verbesserungen durch Verkürzungen der Leitbleche und durch sorgfältigere Gestaltung der Übergänge durchaus möglich erscheinen. Die eingebauten Leitbleche haben jedenfalls bewirkt, dass der Luftstrahl sowohl kurz hinter der Düse als auch im Arbeitsquerschnitt eine recht gleichmässige Geschwindigkeitsverteilung aufweist.

Mit der gleichen Landmaschine konnten noch einige weitere Strömungsmessungen gemacht werden. Es interessiert ja immer, wie man einen Luftstrahl in seiner Geschwindigkeit regulieren kann. Die Bilder 10 und 15 zeigen die Wirkung zweier verschiedener Regulierungen. In Bild 10 sehen wir die Wirkung einer Drosselklappe, in Bild 15 die Wirkung einer Luftzufuhrregelung (Drosselung) am Gebläse. Letztere bewirkt ein verhältnismässig gleichmässiges Absinken des Staudrucks über den ganzen Querschnitt, während die Drosselklappe eine unsymmetrische Verteilung liefert. Wenn der Luftstrahl an einer bestimmten Stelle eine Reinigungs- oder Sortieraufgabe zu erfüllen hat und daher möglichst grosse Gleichmässigkeit erforderlich ist, dürfte in der Rohrleitung kurz vorher keine Drosselklappe zur Regelung verwandt werden. Es ist unmöglich, von einem stark unsymmetrischen Luftstrahl eine gute Sortierung zu erwarten.

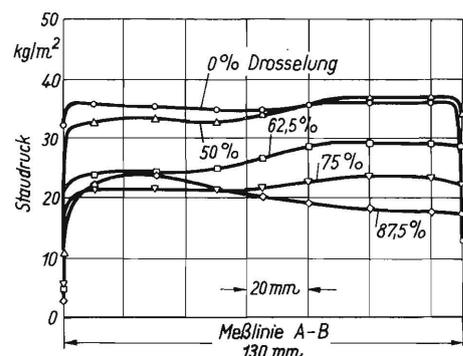


Bild 15. Beeinflussung des Staudrucks im Rohr durch Regelung der Luftzufuhr im Einlassquerschnitt des Gebläses (s. Bild 9).

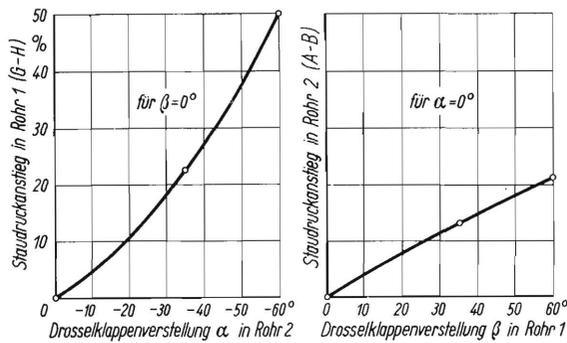


Bild 16. Gegenseitige Beeinflussung des Staudruckes bei Speisung zweier Rohre aus demselben Gebläse.

Bild 16 bringt ein weiteres interessantes Ergebnis, das eigentlich nicht verwunderlich ist, aber doch wohl nicht immer richtig bedacht wird. Wie Bild 9 zeigt, werden von demselben Gebläse gleichzeitig zwei Rohre gespeist. Beide Rohrleitungen enthalten Drosselklappen. Drosselt man die Strömung in Rohr 1, so steigt der Staudruck in Rohr 2 und umgekehrt. Eine unabhängige Regulierung der Geschwindigkeit in beiden Rohren liesse sich durch geeignete Verbindung der Drosselklappenverstellungen mit der Luftzufuhrregelung am Gebläse erreichen.

III. Horizontalsichtung

Die Sortierung von Saatgut wird heute fast nur noch durch sogenannte Steigsichter bewirkt, bei denen ein vertikaler Luftstrahl aus dem Saatgut die schlechteren Bestandteile heraushebt. Die Vernachlässigung des Horizontalsichters erscheint jedoch nicht gerechtfertigt, wenn man bedenkt, dass der physikalische Vorgang beim Horizontalsichter wesentlich klarer ist als beim Steigsichter und dass beim Horizontalsichter eine Trennung des Saatgutes in mehrere Güteklassen leichter zu erreichen ist als beim Steigsichter [2, 3, 4, 7]. Beim Horizontalsichter (vergl. Bild 17) legt jedes einzelne Korn einen einfachen Flugweg von dem Schüttkasten zum Auffangkasten zurück. Ist dafür gesorgt, dass jedes Korn unter den gleichen Anfangsbedingungen (gleiche Fallgeschwindigkeit nach Grösse und Richtung) den Schüttkasten verlässt, und besitzt der Luftstrahl eine nach Grösse und Richtung konstante Luftgeschwindigkeit

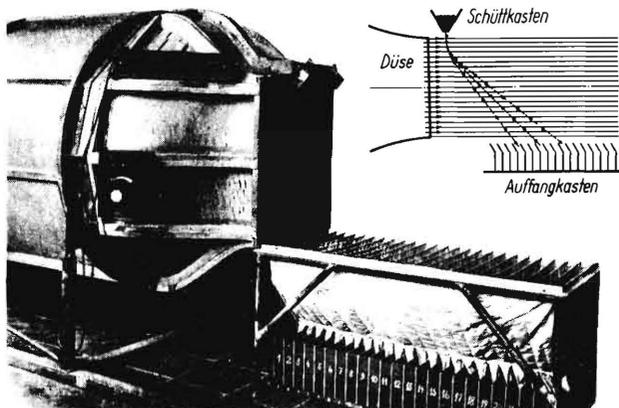


Bild 17. Versuchsausführung eines Horizontalsichters.

im ganzen Querschnitt, so sind wesentliche Streuungen der Messergebnisse nur noch durch die unvermeidlichen Drehungen und Pendelungen der Körner auf ihrem Flugweg zu erwarten. Handelt es sich um kugelförmige Körner, z.B. Erbsen, so werden Drehungen kaum auftreten, und man kann mit idealen Sortierergebnissen rechnen. Mit der im Bilde gezeigten Versuchsausführung eines Horizontalsichters wurden solche Versuche mit Erbsen ausgeführt. In einer Versuchsreihe fiel dabei eine bestimmte Ernte bei 60 Einzelversuchen 59 mal in dasselbe Fach. Die Fächer hatten in Windrichtung eine Breite von nur 5 cm. Bild 17 zeigt eine grundsätzliche Skizze der Horizontalsichtung, die ohne Erläuterung verständlich ist, und ein Lichtbild der Versuchsausführung, mit der der grösste Teil der im folgenden beschriebenen Versuche ausgeführt wurde³⁾.

Bild 18 soll eine Antwort auf die Frage geben, nach welchem Prinzip eine Windsortierung erfolgt. Als Abszisse ist ein Volumenverhältnis, als Ordinate ein Gewichtsverhältnis aufgetragen. Die mit

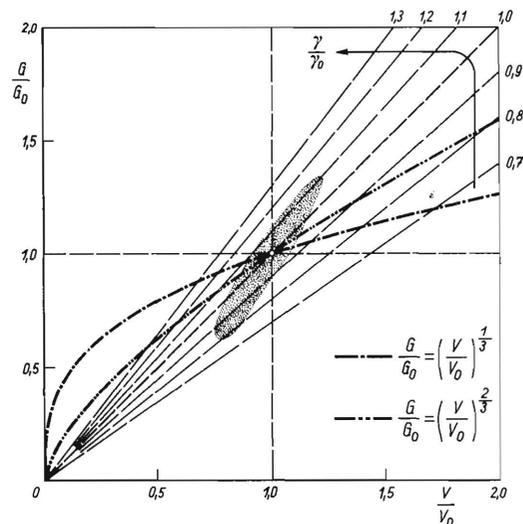


Bild 18. Darstellung verschiedener Sortierungsmöglichkeiten.

V = Volumen
G = Gewicht
γ = spezifisches Gewicht.

Der Index 0 bezeichnet einen geeignet zu wählenden Mittelwert

dem Index 0 versehenen Vergleichswerte können beliebig bestimmt werden. Wählt man für V_0 und G_0 Durchschnittswerte, so ist zu vermuten, dass eine bestimmte Menge Saatgut hinsichtlich Volumen und Gewicht so um den Durchschnitt (hier durch $V/V_0 = 1$ und $G/G_0 = 1$ dargestellt) herum streut, wie es das punktierte Gebiet angibt. Messungen dieses Streubereiches gibt es noch nicht. Eine Sortierung nach Volumen (etwa durch Siebe) wäre in diesem Bild durch vertikale Striche, parallel zur Ordinatenachse, gegeben; eine Sortierung nach Gewicht (etwa durch Waagen) ebenso durch horizontale Striche, parallel zur Abszissenachse. Eine Sortierung

3) Bei den ersten Sortierversuchen, die im Windkanal der TH Braunschweig stattfanden, half Herr Dipl.-Ing. R. Thiel. Die Konstruktion des Horizontalsichters (Bild 17) lag in Händen von Herrn Dr.-Ing. H. Trienes, der auch an allen weiteren Sortierversuchen beteiligt war.

nach spezifischem Gewicht bedeutet eine Aufteilung des punktierten Gebietes durch ein Strahlenbüschel, das sich im Nullpunkt schneidet. Man kann nun nachweisen, dass für eine Windsortierung die Sinkgeschwindigkeit des Kornes massgeblich ist, und es ergibt sich daraus eine Kurve im Bereich der beiden strichpunktierten Linien, je nachdem ob das Widerstandsgesetz mit der Geschwindigkeit linear (Stokes'sche Formel) oder quadratisch verläuft. Die Windsortierung liegt also etwa in der Mitte zwischen einer Sortierung nach absolutem Gewicht und einer Sortierung nach spezifischem Gewicht. Um eine richtige Entscheidung über die beste Sortierung treffen zu können, müsste man wissen, wie sich die biologischen Eigenschaften eines Saatgutes (Keimfähigkeit, Triebkraft, usw.) den in Bild 18 auftretenden physikalischen Eigenschaften (Volumen, Gewicht, spezifisches Gewicht) und den ebenfalls interessierenden chemischen Eigenschaften (Gewicht der Trockensubstanz, Eiweiss- und Stärkegehalt, u.a.m.) zuordnen lassen. Solche Korrelationsversuche sind aber bisher wegen ihrer grossen Schwierigkeiten noch nicht ausgeführt worden.

In Bild 19 sind einige Versuche zur Trennung verschiedener Körner dargestellt. Diese Versuche wurden schon 1949 im Windkanal der TH Braunschweig ausgeführt, als der im Bild 17 gezeigte Horizontalsichter noch nicht fertiggestellt war. Als Abszisse ist in diesem und den nächsten Bildern immer die Nummer des Sortierfaches angegeben. Die Nummern beginnen unmittelbar an der Düse mit 1. Zunächst wurde mit einem Sortierkasten mit 40 Fächern, getrennt durch schräge Blechstege, gearbeitet, später mit dem in Bild 17 gezeigten Kasten, der nur noch 24 Fächer hatte und dessen Trennstege aus Stoff bestehen. Über der Fachnummer sind jeweils die Anzahl der Körner und ihr Tausendkorngewicht aufgetragen. Für die Anzahlen ergeben sich recht gute Annäherungen an Gauss'sche Normalkurven. Die Werte des Tausendkorngewichts fallen mehr oder weniger steil nach rechts hin ab. Sobald die Anzahl der Körner pro Fach sehr klein wird, schwanken die zugehörigen Werte des Tausendkorngewichts beträchtlich. Unsere beiden Versuche zeigen, dass sich Hafer und Wicke (a) sehr gut, dagegen Hafer und Gerste (b) nur recht schlecht trennen lassen. Im letzteren Falle könnte man ein besseres Sortierergebnis dadurch erzielen, dass man alle Körner, die in die mittleren Fächer (etwa Fach 18 bis 28) fallen, immer wieder von neuem in den Schüttkasten zurückführt, und zwar solange, bis die in den mittleren Fächern verbleibenden Körner eine vernachlässigbare Menge darstellen.

Einen besonders schönen Verlauf der Kurve des Tausendkorngewichts findet man beim Zuckerrübensamen (Bild 20). Hier fällt das Tausendkorngewicht von rd. 40 auf 7 g ab. Untersucht man den Rübensamen der verschiedenen Fächer auf seine biologischen Eigenschaften (Keimfähigkeit, Triebkraft, usw.), so erhält man ebenfalls nach rechts hin abfallende Kurven [7].

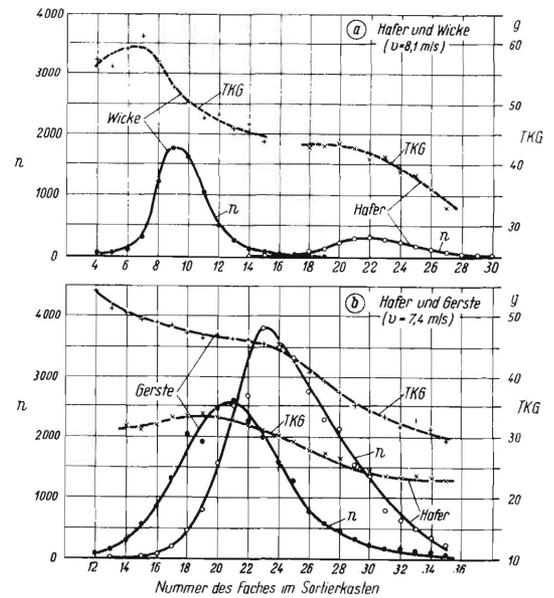


Bild 19. Trennung verschiedener Körner im horizontalen Luftstrom.

n = Anzahl der Körner
TKG = Tausendkorngewicht [g].

Bild 20 zeigt noch, wie sich eine zweifache Sortierung auswirkt. Was bei der ersten Sortierung in Fach 18, 24 und 30 lag, wurde noch einmal durch den Horizontalsichter gegeben und lieferte die unteren Verteilungskurven, deren Maxima recht genau an der ursprünglichen Stelle liegen. Die Streuung bei der zweiten Sortierung zeigt aber deutlich, mit welcher Genauigkeit die Sortierung überhaupt vor sich geht.

Bei allen unseren Sortierungsversuchen ergab sich eine unangenehme störende Wirkung dadurch, dass zahlreiche Körner auf die Zwischenstege des Sortierkastens auftrafen und nach vorn oder hinten sprangen. Um diesen Einfluss zahlenmässig fest-

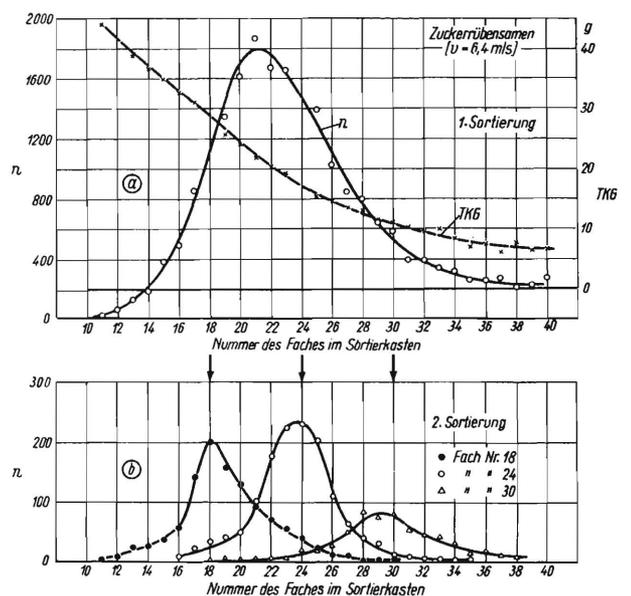


Bild 20. Zweifache Sortierung von Zuckerrübensamen. Die 2. Sortierung wurde nur mit den Samen durchgeführt, die bei der 1. Sortierung in den Fächern 18, 24 und 30 lagen.

zulegen, haben wir uns die Mühe gemacht, in einem Sonderversuch (Bild 21) die springenden Körner — es handelte sich um Erbsen — auszuschalten. Das Ergebnis ist durch die ausgezogene Kurve dargestellt und zeigt für das Tausendkorngewicht einen steilen monotonen Abfall. Schaltet man die springenden Erbsen nicht aus, so erhält man die gestrichelte Kurve, die um ein merkliches Stück weniger steil verläuft und am hinteren Ende wieder ansteigt, was offenbar nur durch springende Erbsen vorgetäuscht wird. Auch die Erbsen, die jetzt in Fach 1 bis 4 fallen, sind offenbar sämtlich gesprungen, da bei Ausschaltung der springenden Erbsen keine einzige vor Fach 5 liegt. Lässt man die Erbsen nicht einzeln,

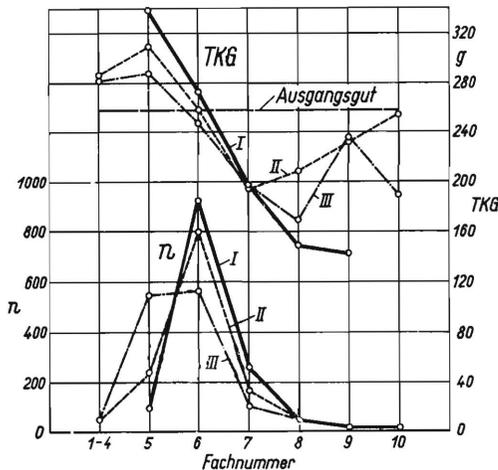


Bild 21. Ermittlung des schädlichen Einflusses springender Körner (Erbsen).

I springende Erbsen ausgeschaltet, II springende Erbsen nicht ausgeschaltet (jede Erbse einzeln fallen gelassen), III Gesamtmenge in dünnem Schleier fallen gelassen. Bei diesen Versuchen wurden jeweils dieselben Erbsen benutzt.

sondern in einem dünnen Schleier fallen, so findet man eine weitere Verschlechterung. Dass hierbei im Ganzen eine Verschiebung nach rückwärts (zu den kleineren Fachnummern hin) auftritt, ist sicherlich durch eine Anfangsgeschwindigkeit nach unten beim Verlassen des Schüttkastens zu erklären.

Der Auffangkasten bestand zunächst aus einem Holzkasten mit schräggestellten Blechstegen. Um das Springen zu vermindern, wurde der in Bild 17 gezeigte zweite Auffangkasten gebaut, dessen Fächer aus Stoff bestehen und dessen Stege durch eingezogene Stahldrähte gebildet werden. Leider wurde durch diese Veränderung keine wesentliche Verminderung des Springens erzielt.

Bis heute fehlt noch eine brauchbare Idee zur Verminderung des Körnerspringens beim Auftreffen auf die Stege des Sortierkastens. Selbstverständlich könnte man für praktische Zwecke mit weniger Fächern auskommen und dadurch das Springen wesentlich eindämmen.

Bild 22 zeigt noch einmal eine zweifache Sortierung, ausgeführt an Erbsen. Man sieht, dass man durch die doppelte Sortierung eine noch schärfere Auslese hinsichtlich des Tausendkorngewichtes erzielen kann.

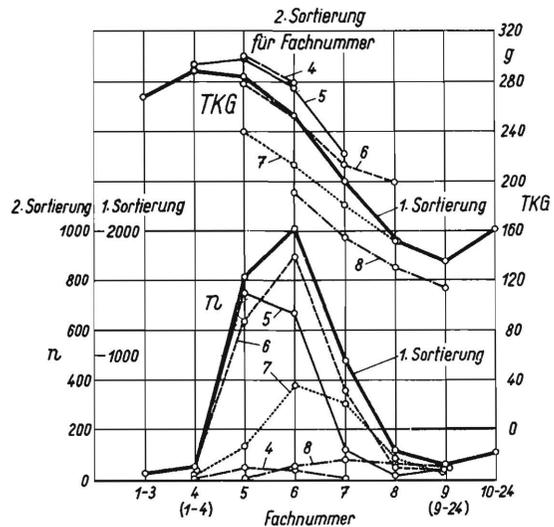


Bild 22. Zweifache Sortierung von Erbsen.

Die beiden letzten Bilder bringen nun noch einen Vergleich zwischen einem Steigsichter, der uns von einer Herstellerfirma für diese Versuche überlassen wurde, und unserem Versuchs-Horizontalsichter. In Bild 23 ist der Vergleich so durchgeführt, dass im Steigsichter die Gewichtsprozente der ersten Sorte, des Windabgangs und des Siebabgangs und die zugehörigen Tausendkorngewichte ermittelt

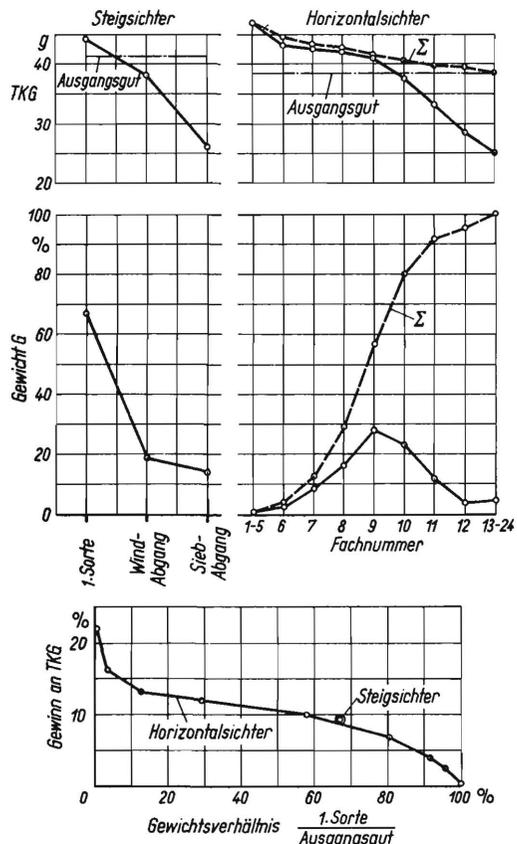


Bild 23. Vergleich zwischen Steig- und Horizontalsichter. Saatgut: Weizen.

Der Steigsichter lief mit Sieb und Trieur bei günstigster Einstellung der Windsichtung.

wurden. Im Horizontalsichter wurden ebenso die Gewichtsprozent je Fach ermittelt und diese, von links her aufsummiert, zu einer veränderlichen ersten Sorte zusammengestellt. Die Kurven für diese erste Sorte des Horizontalsichters sind durch Σ bezeichnet. Trägt man jetzt den Gewinn an Tausendkorngewicht über dem Gewichtsverhältnis

I. Sorte
Ausgangsgut

auf, so findet man das kleine Diagramm unten. Für den Horizontalsichter haben wir so eine ganze Kurve, für den Steigsichter nur einen einzelnen Punkt. Dieser Punkt liegt auf der Horizontalsichterkurve. Beide Geräte müssen also als gleichwertig betrach-

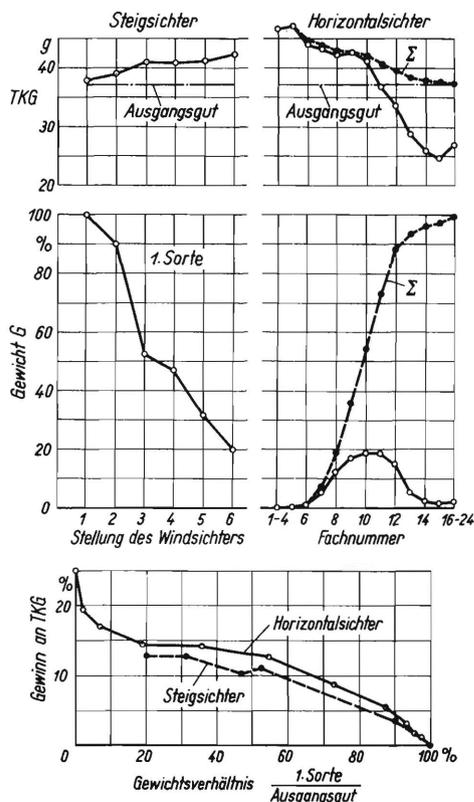


Bild 24. Vergleich zwischen Steig- und Horizontalsichter. Saatgut: Weizen.

Der Steigsichter lief ohne Sieb und ohne Trieur; die gleiche Kornmenge wurde bei 6 verschiedenen Einstellungen der Windsichtung sortiert.

tet werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass bei diesen Versuchen der Steigsichter mit Sieb und Trieur lief.

In Bild 24 wird ein Vergleich gezeigt, bei dem im Steigsichter Sieb und Trieur abgeschaltet waren, sodass nur die Windsortierung übrig blieb. Ausserdem wurde hier die Einstellung der Windgeschwindigkeit in den möglichen Grenzen variiert; d.h. die gleiche Kornmenge wurde hintereinander 6 mal durch den Steigsichter gegeben und jeweils gewogen und gezählt. Der Gewinn an Tausendkorngewicht gegenüber dem Ausgangsgut ist wieder über dem Gewichtsverhältnis

I. Sorte
Ausgangsgut

aufgetragen. Man erkennt eine leichte Überlegenheit des Horizontalsichters. Zu beachten ist hierbei noch, dass die Kurve des Horizontalsichters in einem einzigen Versuch gewonnen wurde, die des Steigsichters in 6 Versuchen hintereinander, aber stets mit der gleichen Kornmenge.

Schriftum

- [1] Barth, W.: Die Anwendung des Modellversuches zur Lösung strömungstechnischer Aufgaben. Z. VDI Bd. 92 (1950) S. 105-110.
- [2] Blenk, H.: Über die Sortierung durch Luftkräfte. Abh. Braunsch. Wiss. Ges. I. (1949) S. 76-82.
- [3] Blenk, H.: Zur Frage der Windsortierung. Landtechnik Bd. 4 (1949) S. 771/772.
- [4] Blenk, H.: Die Sortierung von Saatgut mit besonders gleichmässigem Querwind. (erscheint demnächst in dieser Schriftenreihe).
- [5] Eck, B.: Technische Strömungslehre. 3. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1949.
- [6] Prandtl, L.: Führer durch die Strömungslehre. 3. Aufl., Braunschweig 1949.
- [7] Thielebein, M.: Keimfähigkeit und Triebkraft eines durch gleichmässigen Querwind gesichteten Saatgutes. (erscheint demnächst in dieser Schriftenreihe).
- [8] Tietjens, O.: Hydro- und Aeromechanik nach Vorlesungen von L. Prandtl. 2 Bände, Berlin 1929 u. 1930.
- [9] Weber, M.: Das Ähnlichkeitsprinzip der Physik und seine Bedeutung für das Modellversuchswesen. Forsch. Ing. Wes. Bd. 11 (1940) S. 49-58.

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode
Direktor: Prof. Dr. Ing. W. Kloth

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Hermann Blenk, (20b), Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft