

# Inhaltsverzeichnis

|   | Seite                  |
|---|------------------------|
| I. Problemstellung und Ziel . . . . .   | 5                      |
| II. Messungen des Geschwindigkeitsfeldes im Bereich von Hindernissen<br>(Modellversuche im Windkanal) |                        |
| 1. Grundsätzliches über aerodynamische Modellversuche . . . . .                                       | 7                      |
| 2. Versuchstechnik . . . . .  | 9                      |
| 3. Übersicht über die durchgeführten Versuche . . . . .   | 13                     |
| 4. Versuchsergebnisse . . . . .   | 16                     |
| III. Messungen des Winddruckes auf ein Haus im Schutz einer Hecke<br>(Modellversuche im Windkanal)    |                        |
| 1. Versuchstechnik . . . . .  | 34                     |
| 2. Übersicht über das Programm . . . . .  | 35                     |
| 3. Versuchsergebnisse . . . . .   | 36                     |
| IV. Messungen der Bodenverdunstung im Bereich von Hindernissen<br>(Modellversuche im Windkanal)       |                        |
| 1. Versuchstechnik . . . . .  | 42                     |
| 2. Versuchsergebnisse . . . . .   | 42                     |
| V. Messungen an einer künstlichen Hecke im Freien   |                        |
| 1. Versuchstechnik . . . . .  | 47                     |
| 2. Übersicht über das Programm . . . . .  | 50                     |
| 3. Versuchsergebnisse . . . . .   | 50                     |
| VI. Strömungsaufnahmen in einem Wasserkanal . . . . .   | 53                     |
| VII. Vergleich zwischen Modell- und Freilandversuchen . . . . .                                       | 58                     |
| VIII. Zusammenfassung . . . . .   | 62                     |
| IX. Schrifttum . . . . .  | 64                     |
| X. Tafeln . . . . .   | siehe Heft 8, II. Teil |

## I. Problemstellung und Ziel

Der natürliche Wind richtet je nach seiner Stärke, seiner Häufigkeit, sowie den klimatischen Bedingungen und Bodenverhältnissen mehr oder weniger bedeutende Schäden an, zu deren Abwehr sogenannte Windschutzmaßnahmen erforderlich werden können.

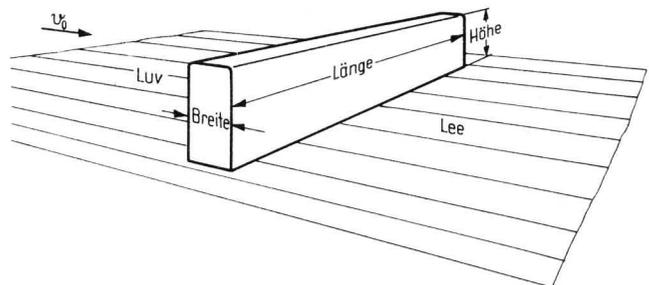
Unter Windschutz versteht man dabei die Herabsetzung der Windstärke durch natürliche oder künstliche Hindernisse in Bodennähe, um die schädlichen Einwirkungen des Windes auf den Boden (z.B. Erosion), auf die Vegetation und die Tierwelt zu vermeiden oder wenigstens zu vermindern. Es ist verständlich, daß der Windschutz nicht in allen Landschaften die gleiche Bedeutung hat. In manchen Teilen der Vereinigten Staaten [55], in Südrußland [8, 22, 56], aber auch in Dänemark [1] und den deutschen Küstengebieten [19, 33] spielt die Windschutzfrage eine beträchtliche Rolle.

Es liegt bereits eine Fülle von Veröffentlichungen über die mit dem Windschutz zusammenhängenden Fragen vor. Meteorologen [16, 17] und besonders Agrarmeteorologen [26, 27] haben die Windverhältnisse an zahlreichen Objekten vermessen, wobei oft auch Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilungen, sowie Verdunstungswerte festgestellt wurden. Vertreter der Forstwissenschaft [36, 37, 38, 62] haben besonders die Windverhältnisse in der Nähe von Wäldern oder hinter Waldstreifen untersucht, während die Landwirte [24, 43] ihre Ertragsstudien meist im Bereich von künstlich gepflanzten Windschutzhecken durchgeführt haben. Von geographischer Seite [33, 57] liegen Untersuchungen über die Ausbreitung von Heckenlandschaften und ihren Zusammenhang mit biologischen, klimatischen und sonstigen Gegebenheiten vor.

Wer sich für diese Dinge näher interessiert, wird in dem am Schluß zusammengestellten Schrifttum eine große Zahl weiterer Hinweise finden.

Vom aerodynamischen Standpunkt aus handelt es sich bei dem Windschutzproblem um die Verquickung

zweier bekannter Probleme der Strömungsforschung, nämlich um die Verbindung einer Windschatten- oder Nachlaufströmung mit der Strömung längs einer ebenen Platte [51]. Im Idealfall streicht der Wind über eine Ebene hin und trifft auf ein senkrecht zur Windrichtung stehendes, möglichst gleichartiges Hindernis (**Bild 1**), das er um- oder durchströmen muß. Dabei erfährt das Windprofil eine mehr oder minder starke Veränderung und zwar schon vor dem Hindernis (in Luv), besonders aber hinter dem Hindernis (in Lee). Die Wirkung eines Hindernisses ist immer auf der Leeseite viel stärker und weitreichender als auf der Luvseite.



**Bild 1.** Schema einer Hecke mit den Bezeichnungen Luv und Lee, Länge, Breite (Tiefe) und Höhe.

Wenn die Gleichartigkeit des Hindernisses, besonders hinsichtlich Höhe, Breite<sup>1)</sup> und Durchlässigkeit, vollkommen ist und das Hindernis sich senkrecht zur Windrichtung (Länge) weit genug ausdehnt (im Idealfall: Länge =  $\infty$ ), können wir das Strömungsproblem als zweidimensional betrachten. Versuchsobjekte in der freien Natur werden diesem zweidimensionalen Idealfall immer nur mit gewisser Annäherung entsprechen. Es dürfte aber trotzdem ratsam sein, Untersuchungen grundsätzlicher Art in der freien Natur hauptsächlich an solchen Beispielen vorzunehmen, die dem zweidimensionalen Fall möglichst nahekommen (Bild 1).

1) Statt „Breite“ ist auch die Bezeichnung „Tiefe“ gebräuchlich. Gemeint ist die Ausdehnung des Hindernisses in Windrichtung.

Bei Windkanalversuchen wird man den zweidimensionalen Fall in der üblichen Weise dadurch herbeiführen, daß man rechts und links ebene Wände anordnet und das Hindernis von Wand zu Wand durchlaufen läßt. In den letzten Jahren haben wir eine große Zahl solcher Windkanalmessungen durchführen können<sup>2)</sup> und zwar größtenteils im Windkanal des *Instituts für Strömungsmechanik*<sup>3)</sup> der Technischen Hochschule Braunschweig. Ergänzende Messungen wurden mit einem für Sortierzwecke gebauten Gebläse [7] im eigenen Hause ausgeführt. Der vorliegende Bericht gibt, nachdem bisher nur Teilergebnisse veröffentlicht wurden [5, 6], einen vollständigen Überblick über die angestellten Versuche und ihre Ergebnisse.

Bei Windkanalversuchen dieser Art taucht von Anfang an die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die freie Natur auf. Wenn es sich um ein reines Nachlaufproblem handelte, könnte man die für diesen Fall bekannten Überlegungen [51] heranziehen und daraus praktisch ausreichende Übertragungsregeln herleiten. Die Tatsache, daß unsere Hindernisse auf einer Fläche (Boden) stehen und sich in der Natur wohl immer innerhalb der sogenannten Grenzschicht befinden, macht das Problem jedoch recht schwierig. Es ist daher nahelegend, sich durch einen Vergleich zwischen Freiland- und Windkanalversuch Klarheit zu verschaffen. Ein solcher Vergleich ist unseres Wissens bisher nur ein einziges Mal durchgeführt worden [40, 41], was bei der Schwierigkeit der Aufgabe nicht verwundert aber auch nicht befriedigen kann. Wir haben deshalb selbst Freilandmessungen an einem künstlichen Hindernis ausgeführt, worüber in Abschnitt V berichtet wird.

Unter den Schäden, die ein übermäßig starker Wind anrichten kann; steht neben der Erosion [10, 11] die Erhöhung der Verdunstung in vorderster

Linie. Wir haben unsere Untersuchungen deshalb auch auf Verdunstungsmessungen ausgedehnt (Abschnitt IV), obwohl die dafür zur Verfügung stehende Versuchseinrichtung nicht voll befriedigen konnte. Es wird erforderlich sein, dieser Frage weiterhin größere Aufmerksamkeit zu schenken und insbesondere einen Klima-Windkanal dafür zu erstellen, in dem nicht nur die Windgeschwindigkeit, sondern auch die Temperatur und Feuchtigkeit in gewissen Grenzen regelbar sind.

Winddrücke auf Bauwerke sind schon seit langer Zeit durch Windkanalversuche [13, 44] ermittelt worden. Wie weit man durch Schutzmaßnahmen eine Herabsetzung der Winddrücke erzielen kann, ist unseres Wissens bisher nur in einem Sonderfall untersucht worden [48]. Im Hinblick auf die z.B. in der Eifel übliche Anordnung von Schutzhecken vor den Häusern war es erwünscht, diese Verhältnisse eingehend zu studieren. Im Abschnitt III wird über unsere Versuche hierzu berichtet.

Um die Vorgänge bei der Um- und Durchströmung von Hindernissen anschaulich zu erkennen, haben wir in der üblichen Weise einen kleinen Wasserkanal benutzt. Im Abschnitt VI werden einige der hiermit gewonnenen Strömungsaufnahmen wiedergegeben. Die stehenden Bilder geben naturgemäß keinen vollständigen Eindruck des dynamischen Vorgangs und der Geschwindigkeitsunterschiede; sie dürften aber trotz dieser Mängel für gewisse grundsätzliche Unterschiede im Strömungsverlauf hinter verschiedenartigen Hindernissen wertvoll sein. Ein wesentlich besseres Bild vermittelt der Strömungsfilm „Windschutz“, der in Zusammenarbeit mit dem *Institut für den wissenschaftlichen Film, Göttingen*, hergestellt worden ist.

Das Ziel aller unserer Untersuchungen war, die i.a. recht verschwommenen Vorstellungen über die Strömung an Windhindernissen durch zahlenmäßige Messungen zu ersetzen, die wiederum als Grundlage für Entscheidungen über die Höhe, die Breite, die Durchlässigkeit und den Abstand von Windschutzanlagen dienen können und den zu erwartenden Erfolg vorausberechnen lassen.

2) Für die Bereitstellung der Mittel für diese Versuche haben wir dem Herrn Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen zu danken.

3) Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr. H. Schlichting, sei auch an dieser Stelle für die entgegenkommende Überlassung des Windkanals gedankt.

## II. Messungen des Geschwindigkeitsfeldes im Bereich von Hindernissen (Modellversuche im Windkanal)

### 1. Grundsätzliches über aerodynamische Modellversuche

Wenn wir von einem Modellversuch sprechen, so meinen wir, daß der Versuch nicht an dem eigentlich zu untersuchenden Objekt selbst, sondern an einem geometrisch ähnlichen, im allgemeinen verkleinerten Modell des Objektes ausgeführt wird. Auch die im Modellversuch benutzte Windgeschwindigkeit wird oft nicht mit derjenigen übereinstimmen, die in der Wirklichkeit (z.B. bei einem Flugzeug im Reiseflug) auftritt. Hinzu kommt ferner, daß das Modell in der Regel bei atmosphärischen Verhältnissen, wie sie in Bodennähe vorkommen, untersucht wird, während z.B. ein Flugzeug nicht nur in Bodennähe, sondern auch in großer Höhe, also bei wesentlich veränderten Luftdrücken und -temperaturen, fliegen muß.

Wir brauchen also, wenn wir einen Modellversuch auswerten wollen, Gesetze, nach denen die Ergebnisse des Versuchs von den im Modell vorliegenden Verhältnissen (Abmessungen, Geschwindigkeiten, physikalische Eigenschaften des Mediums) auf diejenigen der Wirklichkeit umgerechnet werden können. Handelt es sich etwa um den Auftrieb  $A$  oder den Widerstand  $W$  eines Flugzeuges, so zeigt sich, daß die dimensionslosen Größen

$$c_a = \frac{A}{\frac{1}{2} \rho v^2 F} \quad \text{und} \quad c_w = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho v^2 F}$$

im Modellversuch und im Großversuch nahezu gleich groß (natürlich noch abhängig von geometrischen Daten, wie dem Winkel zwischen der Anströmrichtung und einer flugzeugfesten Achse usw.) ausfallen. Dabei bedeuten

- $\rho$  die Dichte des strömenden Mediums,
- $v$  die Geschwindigkeit des strömenden Mediums,
- $F$  die Fläche des Flugzeugflügels (statt dieser könnte eine beliebige charakteristische Fläche in den angegebenen Formeln Verwendung finden).

Das in diesen Formeln zum Ausdruck kommende Gesetz sagt aus, daß die von einem strömenden Medium auf einen Körper ausgeübten Kräfte

1. der Dichte des Mediums, 2. dem Quadrat der Geschwindigkeit und 3. einer charakteristischen Fläche (z.B. der Tragfläche eines Auftrieb erzeugenden Körpers oder der Querschnittsfläche bei einem reinen Widerstandskörper) proportional sind. Soweit dieses Gesetz zutrifft, kann man also einen Modellversuch an einem beliebig verkleinerten Modell, bei beliebigen Geschwindigkeiten und sogar mit einem beliebigen, strömenden Medium (z.B. Wasser, Luft oder Öl) ausführen und die Ergebnisse dann auf die gewünschten Verhältnisse in einfachster Weise umrechnen.

Leider besteht diese einfache Umrechnungsmöglichkeit nicht in beliebigen Grenzen. Man kann, wie eine nähere Untersuchung zeigt, mit der Konstanz solcher Größen wie  $c_a$  und  $c_w$  nur dann rechnen, wenn außer der geometrischen Ähnlichkeit zwischen Modellversuch und Wirklichkeit auch mechanische Ähnlichkeit vorliegt, d.h. wenn alle (oder wenigstens die wesentlichen) an dem Vorgang beteiligten Kräfte sich beim Übergang vom Modellversuch zur Wirklichkeit im gleichen Verhältnis ändern. Nur dann stimmen die den Vorgang beschreibenden Differentialgleichungen im Modell- und im Großversuch überein, und der Vorgang selbst verläuft geometrisch ähnlich.

Für viele Strömungsfragen und auch für das hier vorliegende Problem kommen folgende Kräfte als wesentlich in Betracht:

1. das Druckgefälle,
2. die Reibungskräfte (innere Reibung zwischen Schichten mit verschiedener Geschwindigkeit),
3. die Trägheitskräfte, die mit der Beschleunigung und Verzögerung von Teilen des strömenden Mediums bei der Umströmung eines Körpers verbunden sind.

Da zwischen diesen drei Kräften Gleichgewicht bestehen muß, so genügt es, für die Ähnlichkeitsbetrachtung zwei dieser drei Kräfte näher zu untersuchen; falls diese beiden sich im gleichen Verhält-

nis ändern, muß es die dritte wegen des Gleichgewichts von selbst tun. Man wählt für diese Untersuchung im allgemeinen die Reibungs- und Trägheitskräfte aus und findet, daß die dimensionslose Größe

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu}$$

in beiden Fällen (Großversuch und Modellversuch) den gleichen Wert haben muß. Dabei bedeuten außer den schon bekannten Symbolen:

$\mu$  die Zähigkeit des strömenden Mediums (Koeffizient der inneren Reibung),

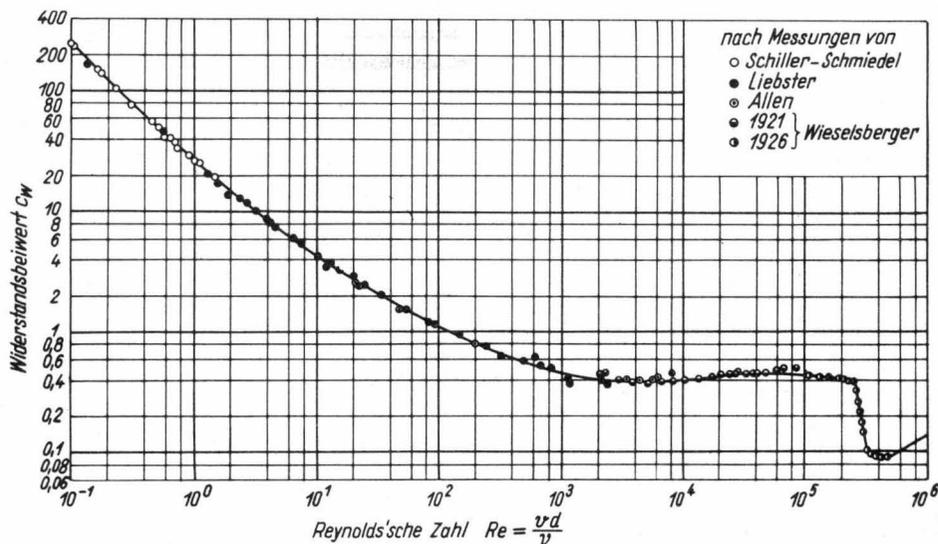
$\nu = \frac{\mu}{\rho}$  die „kinematische“ Zähigkeit

$l$  eine charakteristische Länge (z.B. den Kugeldurchmesser bei der Umströmung einer Kugel).

$Re$  heißt die *Reynoldssche Zahl*. Trägt man z.B. den Widerstandsbeiwert  $c_w$  von Kugeln auf Grund von Messungen an verschiedenen großen Kugeln bei verschiedenen Geschwindigkeiten in Luft und Wasser über der *Reynoldsschen Zahl* auf, so ordnet sich das sonst bestehende Durcheinander an Werten zu einer einzigen klaren Kurve, die als experimenteller Beweis der theoretischen Überlegungen gedeutet werden kann (**Bild 2**).

zogen. Überdies dürfte man die Windgeschwindigkeit oft nicht der *Reynoldsschen Forderung* entsprechend festsetzen, da sonst ein neuer Einfluß, die Kompressibilität der Luft, – bei Annäherung an die Schallgeschwindigkeit – sich störend bemerkbar macht und ein zusätzliches Modellgesetz (ausgedrückt durch die sogenannte *Mach* sche Zahl) erfordert.

In unserem Falle handelt es sich um die Umströmung oder Durchströmung eines Hindernisses auf dem Erdboden bei verhältnismäßig (relativ zur Schallgeschwindigkeit) kleinen Geschwindigkeiten. Es liegt nahe, die Höhe  $H$  des Hindernisses als charakteristische Länge in die *Reynoldssche Zahl* einzusetzen. Vergleichen wir einen Großversuch an einer 3 m hohen Windschutzhecke bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s mit einem entsprechenden Modellversuch im Windkanal, bei dem die Heckenhöhe vielleicht 5 cm und die Windgeschwindigkeit 40 m/s betragen, so ist die Kennzahl  $v \cdot H$  im Großversuch 30 m<sup>2</sup>/s und im Modellversuch 2 m<sup>2</sup>/s. Man sieht, daß die Erreichung gleicher *Reynoldsscher Zahlen* praktisch aussichtslos ist. Trotzdem ist dies kein Anlaß, die Brauchbarkeit von Windkanalversuchen für Windschutzuntersuchun-



**Bild 2.** Widerstandsbeiwert von Kugeln in Abhängigkeit von der *Reynoldsschen Zahl* [51].

$v$  Windgeschwindigkeit     $d$  Kugeldurchmesser     $\nu$  kinematische Zähigkeit

Die Forderung, die durch das *Reynoldssche Ähnlichkeitsgesetz* gestellt wird, ist im allgemeinen nicht leicht und oft überhaupt nicht zu erfüllen. Finden der Großversuch und der Modellversuch beide in Luft gleicher Temperatur und gleichen Druckes statt, so ist die kinematische Zähigkeit in beiden Fällen gleich groß, und es gilt nun, das Produkt  $v \cdot l$  konstant zu halten. Mit Verringerung der Abmessungen müßte die Geschwindigkeit im umgekehrten Verhältnis ansteigen. Durch die Höchstgeschwindigkeit eines Windkanals ist hier dem Modellversuch eine nicht übersteigbare Grenze ge-

gen zu verneinen. Es ist bekannt, daß es bei vielen Strömungsproblemen weite Bereiche der *Reynoldsschen Zahl* gibt, in denen praktisch keine oder nur eine geringe Abhängigkeit von dieser Zahl vorliegt. Als Beispiel sei nochmals auf Bild 2 hingewiesen, in dem die Widerstandsbeizahl von Kugeln über  $Re$  aufgetragen ist; für  $Re = 1000$  bis  $Re = 200000$  ist die Widerstandsbeizahl praktisch konstant.

Man wird also durch Untersuchungen bei verschiedenen *Reynoldsschen Zahlen* prüfen müssen, welche Abhängigkeit in unserem Falle vorliegt, um

daraus eine Übertragungsregel abzuleiten. Da es nicht möglich ist, die *Reynoldssche* Zahl der Wirklichkeit im Modellversuch zu erreichen, muß der Großversuch hierzu herangezogen werden. Die im Anfang dieses Berichtes geschilderten Schwierigkeiten des Großversuchs sind zweifellos der Hauptgrund dafür, daß Vergleichsuntersuchungen dieser Art bisher nur einmal (von *Nøkkentved* in Dänemark [40, 41]) ausgeführt wurden, was bei der großen Bedeutung dieser Frage nicht als ausreichend angesehen werden kann.

Für unser Problem kommt es nicht nur auf die Umströmung des auf einem Boden stehenden Hindernisses von der Höhe  $H$  an, sondern sehr wesentlich auch auf die Strömung längs dieses Bodens. Hierbei bildet sich in Bodennähe eine Grenzschicht aus, die sowohl im Freien als auch bei unseren Windkanalversuchen turbulent ist. Die Dicke dieser turbulenten Grenzschicht ist aber in beiden Fällen (relativ zu den in Frage kommenden Hindernissen) nicht gleich. Im Windkanal haben wir entsprechend der kurzen Anlaufstrecke eine verhältnismäßig geringe Dicke der Grenzschicht, so daß das Heckenmodell aus der Grenzschicht weit herausragt, während die Grenzschichtdicke im freien Gelände ein Mehrfaches der Heckenhöhe betragen kann. Vergleicht man die ungestörten Windgeschwindigkeitsprofile im Freien und im Windkanalversuch (s. die Tafeln I bis XVII), so ist der Unterschied

deutlich erkennbar. Im Freien gilt für den ganzen Höhenbereich, der für eine Hecke oder einen Waldstreifen in Frage kommt, ein logarithmisches Gesetz, demzufolge die Windgeschwindigkeit auch über der Hecke noch weiter (wenn auch immer langsamer) ansteigt. Im Windkanalversuch dagegen liegt nur ein Bruchteil des Heckenmodells innerhalb der Grenzschicht, und der größere Teil der Hecke wird mit konstanter Geschwindigkeit angeblasen. Es besteht kein Zweifel daran, daß durch diesen Unterschied Schwierigkeiten in der Übertragbarkeit der Modellversuchsergebnisse auf die freie Natur bedingt sein können.

Die turbulente Strömung längs einer ebenen Platte ohne Hindernis ist sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht worden [51]. *W. Paeschke* [45] hat gezeigt, daß auch für den natürlichen Wind über mehr oder weniger rauhem Boden grundsätzlich dieselben Gesetzmäßigkeiten gelten wie bei Versuchen in Wasser- und Luftkanälen.

Die Strömungsverhältnisse hinter einfachen Hindernissen (Nachlaufströmung) sind ebenfalls theoretisch und experimentell untersucht worden, aber nur ohne Anwesenheit eines Bodens. Für unser Problem wäre eine theoretische Behandlung der Nachlaufströmung hinter einem auf ebenem Boden stehenden Hindernis erwünscht.

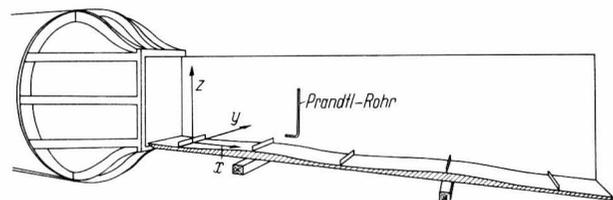
## 2. Versuchstechnik

Für die Versuche stand der Windkanal des *Instituts für Strömungsmechanik* an der TH Braunschweig zur Verfügung. Dieser Windkanal ist in der üblichen Göttinger Bauart, d.h. mit geschlossener Rückführung, ausgeführt. Der Meßquerschnitt des Kanals ist kreisrund und hat einen Durchmesser von 1,2 m. Für die hier vorliegenden Versuche wurde eine Vorsatzdüse von rechteckigem Querschnitt mit 0,60 m Breite und 1,00 m Höhe vorgebaut.

In die Meßstrecke wurde ein oben offener Kasten von 2,50 m Länge und 0,60 m Breite eingebaut. **Bild 3** zeigt die Düse des Windkanals und den Kasten mit abgenommener vorderer Wand; der Kastenboden war entweder eben oder in Form einer Sinuskurve leicht gewellt. Im Bild ist die gewellte Bodenform dargestellt. Das Bild zeigt außerdem die Modellhecken in verschiedenen Lagen. Die Böden waren bei den ersten Messungen glatt (lasierte Holzböden), später wurden rauhe Böden bevorzugt.

Die Geschwindigkeits- bzw. Druckmessungen wurden mit einem 4mm-*Prandtl*-Rohr ausgeführt, das an einem Verschiebegerät montiert war und von

oben her in die Versuchsstrecke eingeführt wurde. Die Drücke wurden auf ein *Prandtl*-Manometer übertragen und dort abgelesen. Das Verschiebegerät gestattet eine Lageänderung des *Prandtl*-Rohres in allen Koordinatenrichtungen. Eine leichte Behinderung tritt dabei nur durch die Modellhecken selbst



**Bild 3.** Düse des Windkanals mit der Messstrecke und den Modellhecken (Die vordere Wand, die die Messstrecke seitlich begrenzt, ist abgenommen).

und den gewellten Boden auf. Da das *Prandtl*-Rohr eine Länge von 45 mm hat, konnten nur bis rund 50 mm vor einer Hecke Messungen in Bodennähe ausgeführt werden. Ebenso konnte auf dem ansteigenden Teil der Bodenwellen nicht in unmittelbarer Bodennähe gemessen werden.

Zahlentafel 1. Übersicht über die Versuche im Windkanal der T.H. Braunschweig

| Versuch | Tafel      | Wind<br>m/s | Boden          | Zahl | Heckenmodell |            |               |              | Durch-<br>lässigkeit | Bemerkungen                                   |
|---------|------------|-------------|----------------|------|--------------|------------|---------------|--------------|----------------------|---|
|         |            |             |                |      | Lage<br>x/H  | Höhe<br>mm | Breite<br>b/H | Länge<br>l/H |                      |   |
| 1       |            | 40          | eben, glatt    | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 2       | I          | 40          | " "            | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 3       |            | 50          | " "            | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 4       |            | 20          | " "            | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 5       |            | 40          | " "            | 1    | 0            | 60         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 6       |            | 50          | " "            | 1    | 0            | 60         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 7       |            | 20          | " "            | 1    | 0            | 60         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 8       | I          | 40          | " "            | 1    | 0            | 30         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 9       |            | 50          | " "            | 1    | 0            | 30         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 10      |            | 20          | " "            | 1    | 0            | 30         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 11      |            | 40          | " "            | 1    | 0            | 100        | 0             | ∞            | A                    |   |
| 12      |            | 50          | " "            | 1    | 0            | 100        | 0             | ∞            | A                    | nicht durchführbar                            |
| 13      |            | 20          | " "            | 1    | 0            | 100        | 0             | ∞            | A                    |   |
| 14      | I          | 40          | " "            | 1    | 0            | 30         | 0             | ∞            | B                    |   |
| 15      | I          | 40          | " "            | 1    | 0            | 30         | 0             | ∞            | C                    |   |
| 16      | I          | 40          | " "            | 1    | 0            | 30         | 0             | ∞            | D                    |   |
| 17      | I          | 40          | " "            | 2    | 0/30         | 30         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 18      | II         | 40          | " "            | 2    | 0/30         | 30         | 0             | ∞            | D                    |   |
| 19      | II         | 40          | " "            | 2    | 0/45         | 30         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 20      | II         | 40          | " "            | 2    | 0/45         | 30         | 0             | ∞            | C                    |   |
| 21      | II         | 40          | " "            | 2    | 0/45         | 30         | 0             | ∞            | D                    |   |
| 22      | II         | 40          | " "            | 2    | 0/60         | 30         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 23      | II         | 40          | " "            | 2    | 0/60         | 30         | 0             | ∞            | D                    |   |
| 24      | III        | 40          | " "            | 3    | 0/20/40      | 30         | 0             | ∞            | D                    |   |
| 25      | III        | 40          | " "            | 3    | 0/30/60      | 30         | 0             | ∞            | D                    |   |
| 26      | III        | 40          | " "            | 3    | 0/20/40      | 60/30/30   | 0             | ∞            | D                    |   |
| 27      | III        | 40          | " "            | 3    | 0/30/60      | 60/30/30   | 0             | ∞            | D                    |   |
| 28      | III        | 40          | " "            | 1    | 10           | 30         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 29      | III        | 40          | " "            | 1    | 10           | 30         | 0             | ∞            | D                    |   |
| 30      | IV         | 40          | " "            | 1    | 8,3 ÷ 10     | 30         | 1,7           | ∞            | A                    |   |
| 31      | IV         | 40          | " "            | 1    | 0 ÷ 10       | 30         | 10            | ∞            | A                    |   |
| 32      | IV         | 40          | " "            | 1    | 8,3 ÷ 10     | 30         | 1,7           | ∞            | D                    |   |
| 33      | IV         | 40          | gewellt, glatt | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 34      | IV         | 40          | " "            | 1    | 0            | 30         | 0             | ∞            | C                    |   |
| 35      | IV         | 40          | " "            | 1    | 8,3          | 30         | 0             | ∞            | C                    |   |
| 36      | V          | 40          | " "            | 1    | 16,7         | 30         | 0             | ∞            | C                    |   |
| 37      | V          | 40          | " "            | 1    | 25           | 30         | 0             | ∞            | C                    |   |
| 38      | V          | 40          | " "            | 1    | 33,3         | 30         | 0             | ∞            | C                    |   |
| 39      | V          | 40          | " "            | 1    | 50           | 30         | 0             | ∞            | C                    |   |
| 40      | V          | 40          | " "            | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 41      | V          | 40          | " "            | 1    | 0            | 30         | 0             | ∞            | P                    |   |
| 42      | V          | 40          | " "            | 1    | 16,7         | 30         | 0             | ∞            | P                    |   |
| 43      | VI         | 40          | eben, glatt    | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 44      | VI         | 40          | " "            | 1    | 30           | 30         | 0             | ∞            | D                    |   |
| 45      | VI         | 40          | " "            | 1    | 30           | 30         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 46      | VI         | 40          | " "            | 1    | 30           | 30         | 0             | ∞            | P                    |   |
| 47      | VI         | 40          | " "            | 1    | 30           | 30         | 0             | ∞            | C                    |   |
| 48      | VII        | 40          | " "            | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 49      | VII        | 40          | " "            | 1    | -2           | 50         | 0             | 2            | C                    | Versuch 50-57 mit Haus<br>Seitenwand zum Wind |
| 50      | VII XVIII  | 40          | " "            | —    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 51      | VII XVIII  | 40          | " "            | 1    | -1,25        | 50         | 0             | 2            | C                    |   |
| 52      | VIII XVIII | 40          | " "            | 1    | -2           | 50         | 0             | 2            | C                    | " " "   |
| 53      | VIII XVIII | 40          | " "            | 1    | -3           | 50         | 0             | 2            | C                    | " " "   |
| 54      | XVIII      | 40          | " "            | —    | —            | —          | —             | —            | —                    | Giebelwand zum Wind                           |
| 55      | XVIII      | 40          | " "            | 1    | -1,25        | 50         | 0             | 2            | C                    |   |
| 56      | XVIII      | 40          | " "            | —    | —            | —          | —             | —            | —                    | Hausecke zum Wind                             |
| 57      | XVIII      | 40          | " "            | 1    | -1,25        | 50         | 0             | 2            | C                    |   |
| 58      |            | 40          | " "            | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    |   |
| 59      | IX         | 40          | " "            | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    | Gitter I                                      |
| 60      | IX         | 40          | " "            | 1    | 10           | 30         | 0             | ∞            | A                    |   |
| 61      | IX         | 40          | " "            | 1    | 10           | 30         | 0             | ∞            | C                    | " I   |
| 62      | IX         | 40          | " "            | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    | " II  |
| 63      | IX         | 40          | " "            | 1    | 10           | 30         | 0             | ∞            | A                    | " II  |
| 64      | IX         | 40          | " "            | 1    | 10           | 30         | 0             | ∞            | C                    | " II  |
| 65      | X          | 40          | " "            | 0    | —            | —          | —             | —            | —                    | " III   |
| 66      | X          | 40          | " "            | 1    | 10           | 30         | 0             | ∞            | A                    | " III   |
| 67      | X          | 40          | " "            | 1    | 10           | 30         | 0             | ∞            | C                    | " III   |
| 68      | X          | 40          | " "            | 1    | 30           | 30         | 0             | ∞            | A                    | " III   |
| 69      | X          | 40          | " "            | 1    | 30           | 30         | 0             | ∞            | C                    | " III   |

Zahlentafel 1. (Fortsetzung)

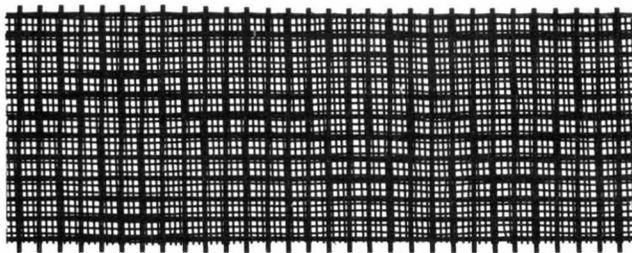
| Versuch | Tafel | Wind<br>m/s | Boden       | Heckenmodell |                        |            |                |              | Durch-<br>lässigkeit | Bemerkungen  |
|---------|-------|-------------|-------------|--------------|------------------------|------------|----------------|--------------|----------------------|--|
|         |       |             |             | Zahl         | Lage<br>x/H            | Höhe<br>mm | Breite<br>b/H  | Länge<br>l/H |                      |  |
| 70      | XI    | 40          | eben, rauh  | 0            | —                      | —          | —              | —            | —                    |  |
| 71      | XI    | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | A                    |  |
| 72      | XI    | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | C                    |  |
| 73      | XI    | 40          | „ „         | 0            | —                      | —          | —              | —            | —                    | Gitter III   |
| 74      | XI    | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | A                    | „ III  |
| 75      | XI    | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | C                    | „ III  |
| 76      | XII   | 40          | eben, glatt | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | $\lambda=0,5$        | Lochdurchm. d = 2 mm                                     |
| 77      | XII   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | $\lambda=0,5$        | „ d = 5 mm   |
| 78      | XII   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | $\lambda=0,5$        | „ d = 8 mm   |
| 79      | XII   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | $\lambda=0,2$        | „ d = 5 mm   |
| 80      | XII   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | $\lambda=0,35$       | „ d = 5 mm   |
| 81      | XII   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | $\lambda=0,65$       | „ d = 5 mm   |
| 82      | XIII  | 40          | „ „         | 1            | } 9,75<br>bis<br>10,25 | 30         | 0,5            | ∞            | A <sub>0,5</sub>     | Bild 8, scharfkantig                                     |
| 83      | XIII  | 40          | „ „         | 1            |                        | 30         | 0,5            | ∞            | A <sub>3,75</sub>    | „ 8, leicht abgerundet                                   |
| 84      | XIII  | 40          | „ „         | 1            |                        | 30         | 0,5            | ∞            | A <sub>7,5</sub>     | „ 8, stark abgerundet                                    |
| 85      |       | 40          | „ „         | 0            | —                      | —          | —              | —            | —                    |  |
| 86      |       | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 100        | 0              | ∞            | C                    |  |
| 87      |       | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0,25           | ∞            | —                    | elastisch, einreihig, weich                              |
| 88      |       | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0,25           | ∞            | —                    | „ „ „ „ , steif  |
| 89      |       | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0,50           | ∞            | —                    | „ „ „ „ , zweireihig, weich                              |
| 90      |       | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0,50           | ∞            | —                    | „ „ „ „ , steif  |
| 91      | XIV   | 40          | eben, rauh  | 0            | —                      | —          | —              | —            | —                    |  |
| 92      | XIV   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | C                    | Hecke siehe Bild 5                                       |
| 93      | XIV   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | C <sub>0</sub>       | „ „ „ 13   |
| 94      | XIV   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | C <sub>u</sub>       | „ „ „ 14   |
| 95      | XIII  | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0,5            | ∞            | C <sub>0,5</sub>     | Bild 10, scharfkantig                                    |
| 96      | XIII  | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0,5            | ∞            | C <sub>3,75</sub>    | „ 11, leicht abgerundet                                  |
| 97      | XIII  | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0,5            | ∞            | C <sub>7,5</sub>     | „ 12, stark abgerundet                                   |
| 98      | XV    | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Messung hinter einem Überhälter<br>(Hecke siehe Bild 15) |
| 99      | XVI   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 30         | 0              | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Messung hinter einer Lücke                               |
| 100     | XV    | 40          | „ „         | —            | 10                     | 30         |                | ∞            | —                    | Bahndamm ohne Hecke (Bild 16)                            |
| 101     | XV    | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 2×30       |                | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Stellung 1 der Hecke (Bild 84)                           |
| 102     | XVI   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 2×30       |                | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Messung hinter einem Überhälter,<br>wie 101, jedoch      |
| 103     | XV    | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 2×30       |                | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Messung hinter einer Lücke                               |
| 104     | XVI   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 2×30       | } 1,25<br>oben | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Stellung 2 der Hecke (Bild 84)                           |
| 105     | XVI   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 2×30       |                | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Messung hinter einem Überhälter<br>wie 103, jedoch       |
| 106     | XV    | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 2×30       |                | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Messung hinter einer Lücke                               |
| 107     | XVI   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 2×30       |                | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Stellung 3 der Hecke (Bild 84)                           |
| 108     | XVI   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 2×30       |                | ∞            | C <sub>ü</sub>       | Messung hinter einem Überhälter<br>wie 105, jedoch       |
| 109     | XVII  | 40          | „ „         | —            | 10                     | 0,25       | } 0,5<br>unten | ∞            | —                    | Messung hinter einer Lücke                               |
| 110     | XVII  | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 1,25       |                | ∞            | C                    | Knick ohne Hecke (Bild 17)                               |
| 111     | XIV   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 1          | 0              | ∞            | $\lambda=0,5$        | Knick mit Hecke (Bild 17)                                |
| 112     | XIV   | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 1          | 0              | ∞            | $\lambda=0,35$       | Mitte Krone des Knicks                                   |
| 113     | XVII  | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 1          | 0,25           | ∞            | —                    | Lochdurchm. d = 5 mm                                     |
| 114     | XVII  | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 1          | 0,25           | ∞            | —                    | „ d = 5 mm   |
| 115     | XVII  | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 1          | 0,5            | ∞            | —                    | elastisch, einreihig, steif                              |
| 116     | XVII  | 40          | „ „         | 1            | 10                     | 1          | 0,5            | ∞            | —                    | „ „ „ „ , weich  |

Bild 4 bis 7 zeigen die benutzten Heckenmodelle in natürlicher Größe. Die undurchlässige Hecke A bestand aus einem 1 mm starken Blechstreifen, die durchlässigen Hecken B, C, D und P aus verschiedenen Drahtgeweben. Im Falle B wurde über die Hecke D ein engmaschiges Drahtgewebe gelegt. Die Hecke P ist aus Hecke C durch Abkneifen des unteren Drittels entstanden, wobei aber jeder dritte senkrechte Draht seine volle Höhe beibehält; auf

diese Weise entspricht Modell P in seiner Durchlässigkeit etwa einer Baumreihe (Pappelallee).

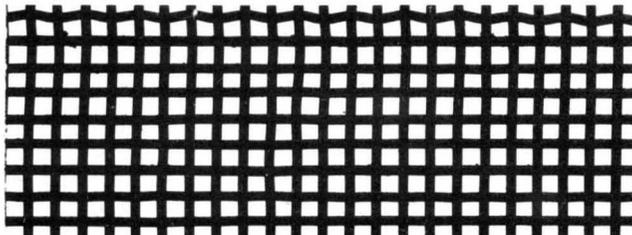
Bezeichnet man das Verhältnis der offenen Flächen zur Gesamtfläche als geometrische Durchlässigkeit  $\lambda$ , so ergeben sich für die Hecken aus Drahtgewebe folgende Werte:

Hecke A:  $\lambda = 0$       Hecke C:  $\lambda = 0,48$   
Hecke B:  $\lambda = 0,35$     Hecke D:  $\lambda = 0,65$



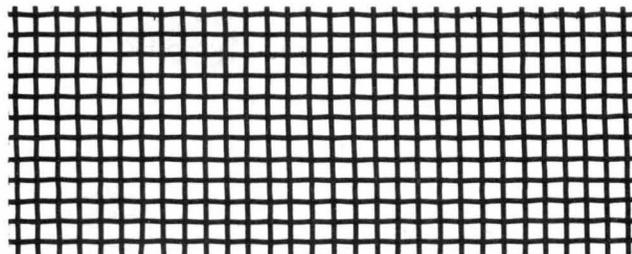
Hecke B

Bild 4



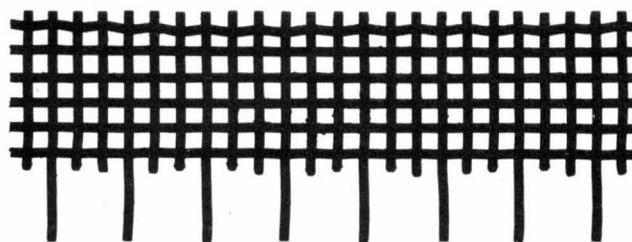
Hecke C

Bild 5



Hecke D

Bild 6



Hecke P

Bild 7

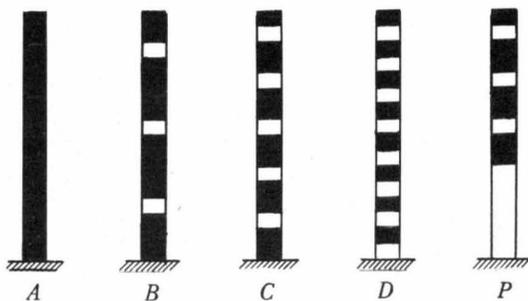


Bild 4 bis 7. Schattenrisse der Modellhecken A, B, C, D und P in natürlicher Grösse und ihre Kennzeichnung in den Tafeln I bis XI.

Bei den Versuchen 1 bis 47 (s. **Zahlentafel 1** auf S.10/11) wurden die Drücke nur in der Symmetrieebene des Windkanals und des Kastens (Bild 3) gemessen. Es genügt bei diesen Messungen daher, die Lage der Meßpunkte jeweils durch zwei Koordinaten  $x$  und  $z$  anzugeben,  $x$  bezeichnet die horizontale Koordinate, positiv in Windrichtung, und  $z$  die vertikale Koordinate, positiv nach oben. Als Anfangspunkt wurde die vorderste Stellung der Modellhecken gewählt (Bild 3); sie liegt 250 mm hinter der angeschärften Vorderkante des Kastenbodens.

Bei den Versuchen 48 bis 53, die im Abschnitt III besprochen werden, in denen die Umströmung eines Modellhauses untersucht wurde, mußten auch Messungen außerhalb der Symmetrieebene ausgeführt werden. Der Abstand der Meßstelle von der Symmetrieebene wurde dann durch die Koordinate  $y$  bezeichnet, die in der Regel wie  $x$  und  $z$  auf die Hindernishöhe  $H$  bezogen wurde.

Die gemessenen Staudrücke  $q(x, z)$  sollten, um dimensionslose Darstellungen zu erhalten, auf den ungestörten Staudruck  $q_0$  bezogen werden. Da dieser mit genügender Genauigkeit gleich dem Gesamtdruck  $g_0$  in der Düsenvorkammer des Windkanals ist, wurde der letztere zum Vergleich herangezogen. Für die Geschwindigkeit  $v$  im Verhältnis zur ungestörten Geschwindigkeit  $v_0$  ergibt sich dann

$$\frac{v(x, z)}{v_0} = \sqrt{\frac{q(x, z)}{g_0}}$$

Der Gesamtdruck  $g_0$  wurde vor und nach jeder Vermessung eines Geschwindigkeitsprofils kontrolliert. Traten Abweichungen von dem Sollwert von mehr als  $\pm 1\%$  auf, so wurden entsprechende Korrekturen unter der Annahme durchgeführt, daß der Gesamtdruck sich von Meßpunkt zu Meßpunkt um ein gleiches Maß vom Anfangs- zum Endwert hin verändert hat (lineare Interpolation).

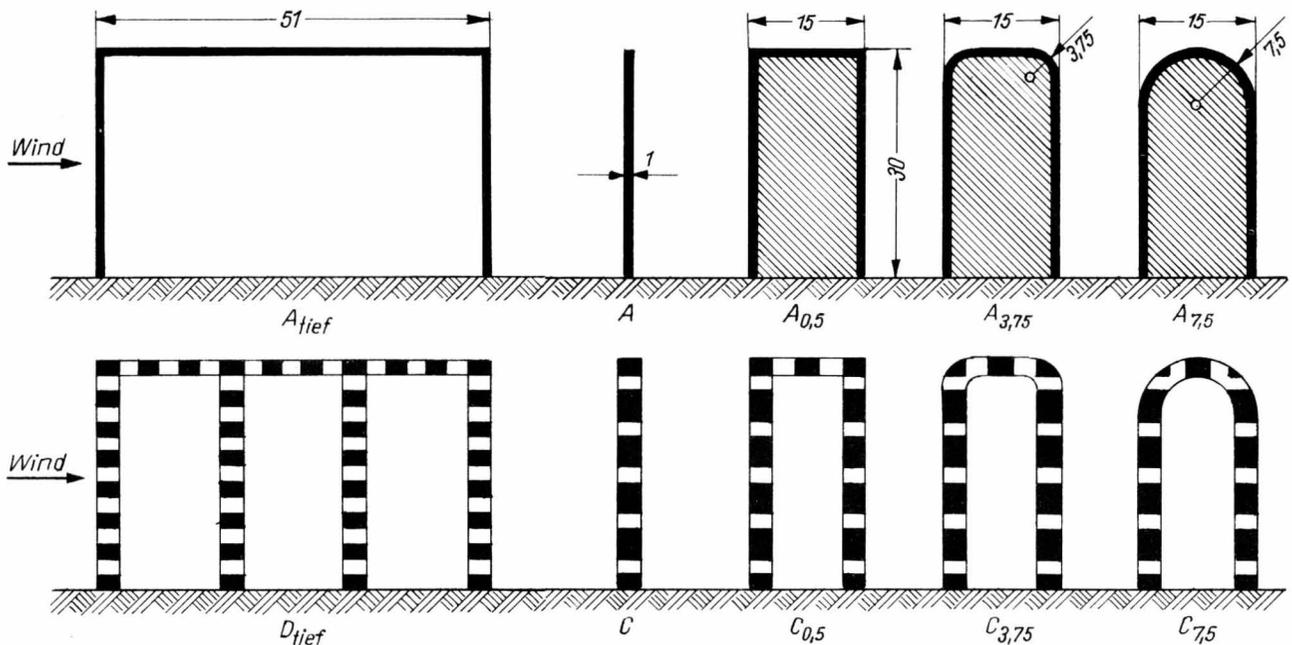
Um das Hausmodell (Näheres siehe Abschnitt III) etwas größer ausführen zu können, wurde bei diesen Messungen als Hindernishöhe  $H$  für Haus und Hecke einheitlich 5 cm gewählt (statt wie bei den meisten Versuchen 3 cm). Für das Haus wurde eine möglichst einfache geometrische Gestalt mit quadratischem Grundriß festgelegt, wobei die Seite des Quadrats gleich der Haushöhe war und der Giebel bis zu halben Höhe herunterreichte; die beiden Dachseiten standen also senkrecht aufeinander. Haus und Hecke wurden in verschiedenen Lagen zueinander untersucht.

### 3. Übersicht über die durchgeführten Versuche

Zahlentafel 1 gibt eine Übersicht über die Versuche. Die Versuche Nr. 1 bis 13 wurden mit verschiedenen Höhen des undurchlässigen Hindernisses und mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten angestellt, um einen Kennzahleinfluß – falls in diesem Bereich vorhanden – feststellen zu können. Bei den weiteren Versuchen war die Hindernishöhe, von wenigen Ausnahmen abgesehen, 30 mm und die Windgeschwindigkeit 40 m/s.

Die Versuche Nr. 14 bis 32 dienten der Untersuchung verschieden durchlässiger Hindernisse in einfacher und mehrfacher Anordnung über glattem ebenem Boden.

In den Versuchen Nr. 58 bis 75 wurde die Turbulenz des Windkanals durch künstlich hinter der Düse eingebaute Gitter aus Stäben mit kreisförmigem Querschnitt verändert, um ihren Einfluß festzustellen. Die benutzten Rundstäbe hatten Durchmesser von 2 mm (Gitter I), 3 mm (Gitter II) und 4 mm (Gitter III). Der Abstand der Stäbe von Mitte zu Mitte war jeweils gleich dem 3-fachen Stabdurchmesser. Bei diesen Versuchen wurde neben dem glatten Boden (lasierter Holzboden) auch ein rauher Boden untersucht, der durch Aufkleben eines groben Sandpapiers (Rotschleifpapier Nr. 24) hergestellt wurde.



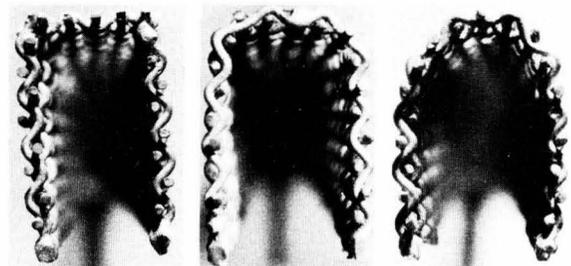
**Bild 8.** (obere Reihe). Querschnitte der undurchlässigen Modellhecken A verschiedener Tiefe und Abrundung der oberen Kanten in natürlicher Grösse (Tafel IV und XIII).

**Bild 9** (untere Reihe). Querschnitte der durchlässigen Modellhecken C und D verschiedener Tiefe und Abrundung der oberen Kanten in natürlicher Grösse und ihre Kennzeichnung in den Tafeln IV und XIII.

Die Versuche Nr. 33 bis 42 wurden angestellt, um das Verhalten von Hindernissen über Bodenwellen zu studieren.

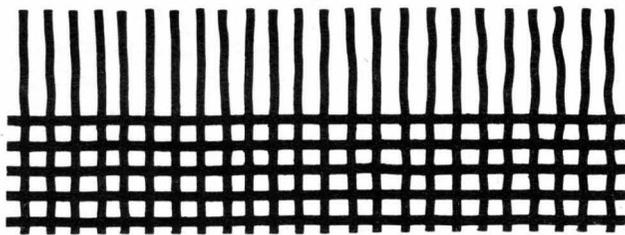
Bei den Versuchen Nr. 43 bis 47 handelte es sich um die Frage, ob die größere Rücklage des Hindernisses (gegenüber den Versuchen Nr. 16, 8, 15) einen merklichen Einfluß auf die Geschwindigkeitsprofile in Lee des Hindernisses hat oder nicht.

Die Versuche Nr. 48 bis 57 bezogen sich auf die Untersuchung des Heckeneinflusses auf ein hinter der Hecke stehendes Haus. Hierbei wurde neben den Windprofilen auch die Druckverteilung auf das Haus gemessen.



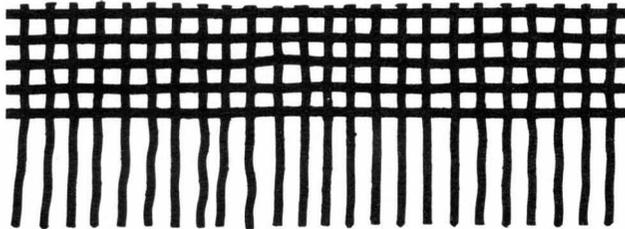
**Bild 10 bis 12.** Querschnittsaufnahmen der durchlässigen Modellhecken C in natürlicher Grösse (Tafel XIII).

In den Versuchen Nr. 76 bis 81 wurde die Durchlässigkeit des Hindernisses systematisch variiert. Die dabei benutzten Heckenspalte wurden aus Blechstreifen hergestellt, in die Löcher mit verschiedenen Durchmessern und verschiedenen Abständen voneinander gebohrt wurden. **Bild 18 bis 24** zeigen diese Heckenspalte in natürlicher Grösse. In den Versuchen Nr. 82 bis 84 wurde die Abrundung an den oberen Kanten variiert.



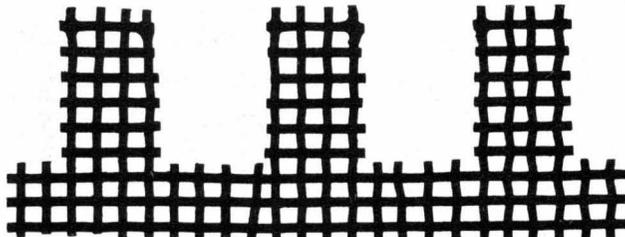
Hecke  $C_o$

Bild 13



Hecke  $C_u$

Bild 14



Hecke  $C_{\bar{u}}$

Bild 15

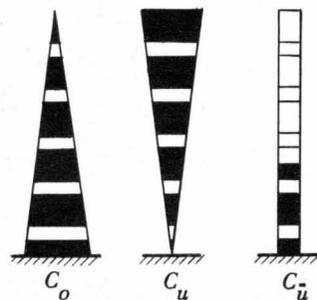


Bild 13 bis 15. Modellhecken mit ungleichförmiger Durchlässigkeit ( $C_o$  und  $C_u$ ) und mit Überhängern ( $C_{\bar{u}}$ ) in natürlicher Grösse und ihre Kennzeichnung in den Tafeln XII bis XVI.

Versuch Nr. 86 wurde ausnahmsweise mit einem Hindernis von 100 mm Höhe durchgeführt, um in unmittelbarer Nähe hinter dem Hindernis genauere Messungen über das Hindurchtreten der Luft machen zu können.

In den Versuchen Nr. 87 bis 90 wurden Messungen an Modellen ausgeführt, die nachgiebig waren. Es handelte sich um eine oder zwei Reihen von Borsten nach Bild 25, die wie bei der Herstellung von Besen in den Holzboden eingesetzt waren. Die Borsten hatten zwei verschiedene Steifigkeiten. Da diese Versuche infolge eines Versehens unbrauchbar waren, wurden sie später wiederholt (Versuche Nr. 113 bis 116, allerdings auf rauhem Boden).

Von Versuch Nr. 91 an wurden nur noch raue Böden benutzt, da sich herausgestellt hatte, daß der Rauigkeitseinfluß die Modellversuchsergebnisse in größere Nähe zu den Versuchsergebnissen in der freien Natur bringt. Bei den Versuchen Nr. 93 und 94 wurden Heckenmodelle benutzt, deren Durchlässigkeit in der oberen und unteren Hälfte verschieden war (Bild 13/15). Die Versuche Nr. 95 bis 97 entsprechen den Versuchen Nr. 82 bis 84, erstere beziehen sich auf durchlässige, letztere auf undurchlässige Modelle.

Die Versuche Nr. 98 und 99 sind an durchlässigen Modellhecken mit sogenannten „Überhängern“ durchgeführt. Dabei wurde je eine Meßreihe in einer Ebene, die den Überhänger in der Mitte schneidet, und in einer Ebene durch die Mitte einer Lücke angesetzt.

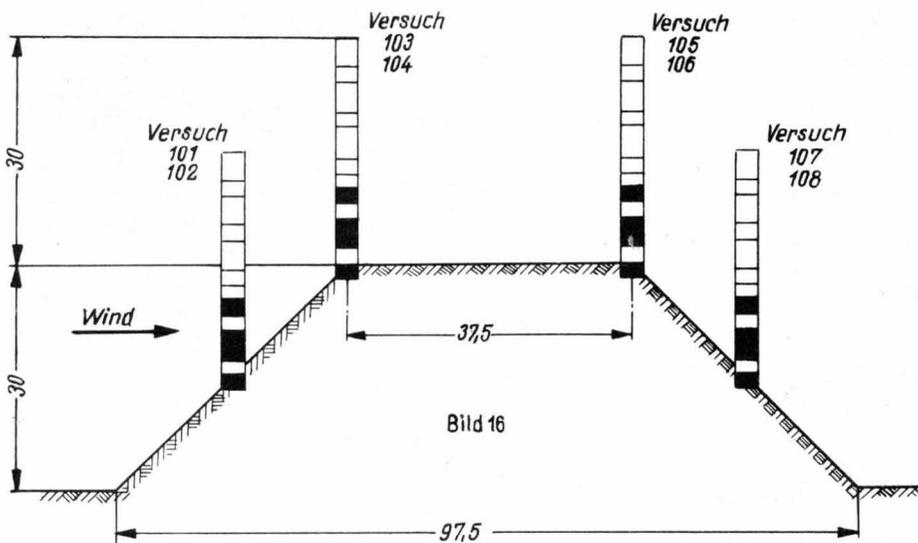


Bild 16

Bild 16 (links). Kennzeichnung der vier verschiedenen Stellungen der Modellhecke  $C_{\bar{u}}$  mit Überhängern (Bild 15) auf einem Bahndamm (in natürlicher Grösse) in den Tafeln XV und XVI.

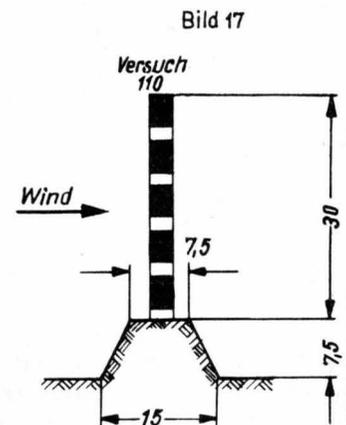
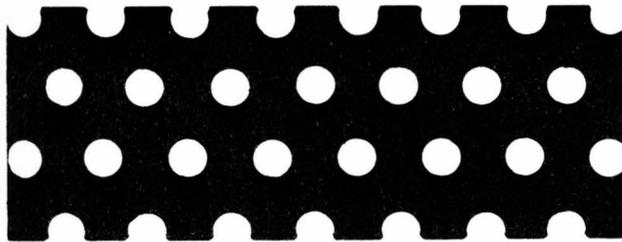


Bild 17

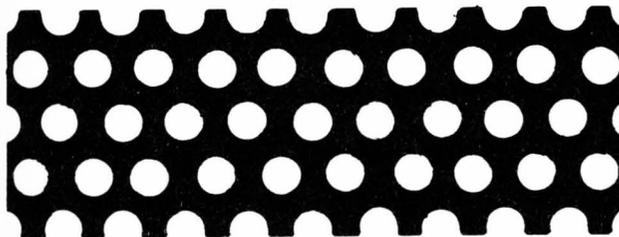
Bild 17 (rechts). Kennzeichnung der durchlässigen Modellhecke  $C$  (Bild 5) auf einem Knick (in natürlicher Grösse) und ihre Kennzeichnung in Tafel XVII.

Bei den Versuchen Nr. 100 bis 108 handelt es sich um eine durchlässige Hecke mit Überhängern (Bild 15), die an verschiedenen Stellen auf einem Bahndamm (Bild 16) steht. Der Bahndamm selbst



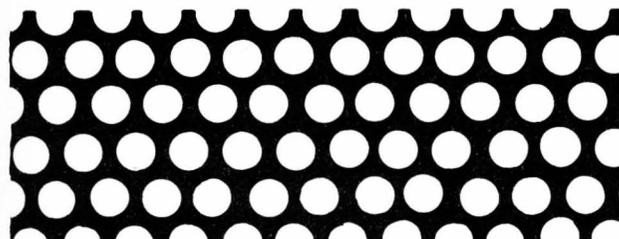
Hecke L 5/0,2

Bild 18



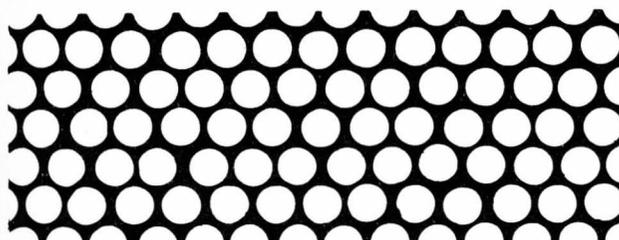
Hecke L 5/0,35

Bild 19



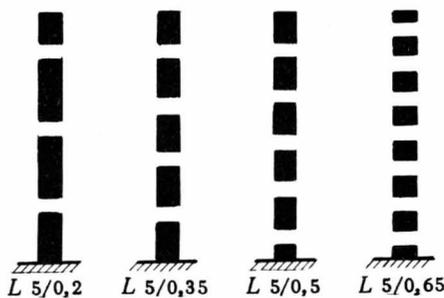
Hecke L 5/0,5

Bild 20



Hecke L 5/0,65

Bild 21



L 5/0,2

L 5/0,35

L 5/0,5

L 5/0,65

Versuch Nr. 79

80

77

81

**Bild 18 bis 21.** Gelochte Bleche als Heckenmodelle (in natürlicher Grösse) und ihre Kennzeichnung in den Tafeln XII und XIV.

Lochdurchmesser  $d = 5 \text{ mm} = \text{const}$

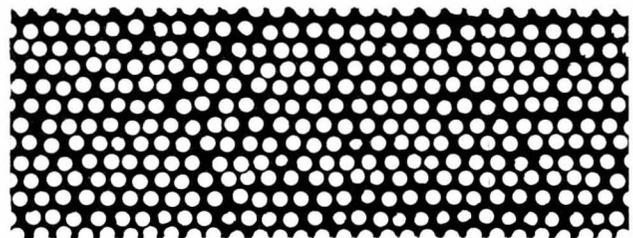
Die erste Zahl in den Kurzzeichen gibt den Lochdurchmesser, die zweite die geometrische Durchlässigkeit an.

hat die Höhe der Hecke. Die Hecke steht zunächst auf halber Höhe der luvseitigen Böschung, dann auf der luv- und leeseitigen Kronenkante und schließlich wieder auf halber Höhe der leeseitigen Böschung. In jedem Falle sind wegen der Überhänger zwei Meßreihen erforderlich.

Die Versuche Nr. 109 und 110 wurden am Modell eines sogenannten „Knicks“ (Bild 17) mit und ohne Hecke angestellt. Der Knick hatte nur  $1/4$  der Heckenhöhe.

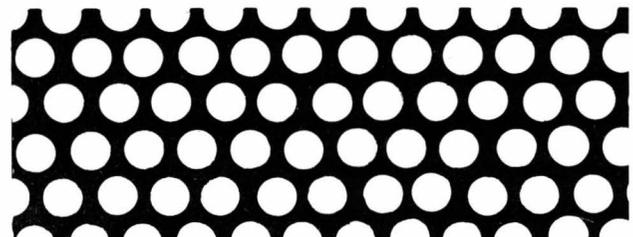
Die Versuche Nr. 111 und 112 wurden zum Vergleich mit den Versuchen Nr. 77 und 80 durchgeführt.

Bild 4 bis 25 geben eine Übersicht über alle untersuchten Heckenmodelle.



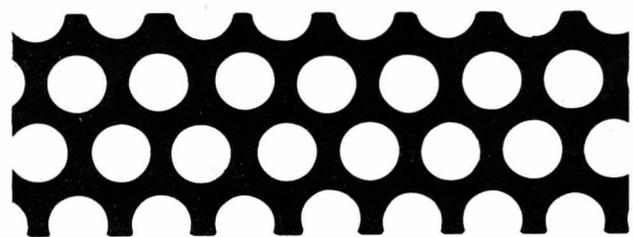
Hecke L 2/0,5

Bild 22



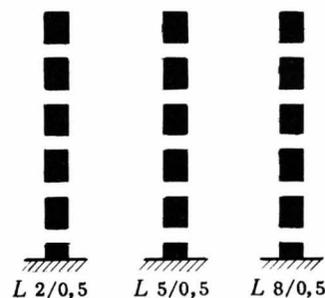
Hecke L 5/0,5

Bild 23



Hecke L 8/0,5

Bild 24



L 2/0,5

L 5/0,5

L 8/0,5

Versuch Nr.

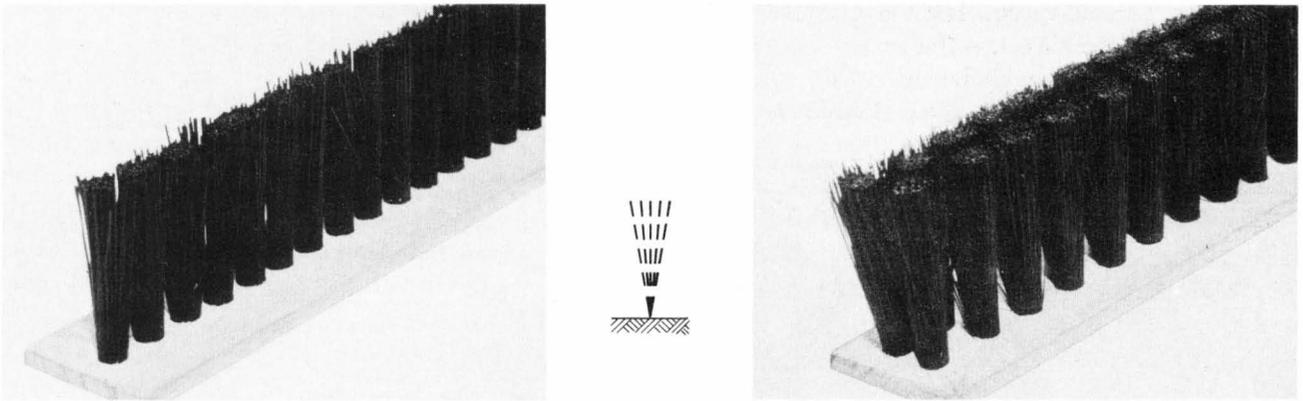
76

77

78

**Bild 22 bis 24.** Gelochte Bleche als Heckenmodelle (in natürlicher Grösse) und ihre Kennzeichnung in Tafel XII.

Geometrische Durchlässigkeit  $\lambda = 0,50 = \text{const}$



**Bild 25.** Elastische Modellhecken (erzielt durch die Borsten von ein- und zweireihigen Bürsten) und ihre Kennzeichnung in der Tafel XVII.

#### 4. Versuchsergebnisse

Die zur Feststellung eines Kennzahleinflusses angestellten Versuche Nr. 5 bis 13 an undurchlässigen Hindernissen verschiedener Höhe (30, 60 und 100 mm) bei verschiedenen Geschwindigkeiten (20, 40 und 50 m/s) sind in **Bild 26** miteinander verglichen. Dabei ist die durch die ungestörte Geschwindigkeit  $v_0$  dividierte Geschwindigkeit  $v$  (horizontal) über der Höhe  $z$  (vertikal) aufgetragen. Da die Versuchsreihe 12 wegen zu starker Unruhe im Kanal abgebrochen werden mußte, bleibt eine Variation der durch das Produkt  $v \cdot H$  gebildeten Kennzahl zwischen 0,6 und 4,0  $\text{m}^2/\text{s}$  übrig. Wie **Bild 26** zeigt, fallen die gemessenen Geschwindigkeitsprofile nahezu zusammen; ein Kennzahleinfluß ist also in diesem Bereich nicht festzustellen. Dieses Ergebnis kann selbstverständlich nicht so gedeutet werden, daß für unser Problem überhaupt kein Einfluß der *Reynoldsschen* Zahl zu erwarten wäre. Hierzu müssen aber sorgfältige Vergleiche zwischen Modell- und Freilandversuchen ausgeführt werden.

Da in dem Bereich, der uns durch Modellversuche zugänglich ist, kein merklicher Einfluß der Kennzahl feststellbar ist, sind alle weiteren Versuche bei nur einer Geschwindigkeit (40 m/s) und – von Ausnahmen abgesehen – an Modellen mit nur einer Höhe (30 mm) ausgeführt worden.

In den Tafeln I bis XVII sind unsere Versuchsergebnisse in einheitlicher Darstellung wiedergegeben. Als Abszisse ist jeweils die Koordinate  $x$  in Windrichtung, bezogen auf die Heckenhöhe  $H$ , gewählt. Der Punkt  $x = 0$  liegt 250 mm hinter der angeschärften Einlaufkante des Bodenbrettes (s. **Bild 3**). Die Heckenmodelle stehen jedoch nicht immer bei  $x = 0$  (s. Spalte „Lage“ in Zahlentafel 1). Um einen besseren Vergleich durchführen zu können, wurden auch die Messungen ohne Hecke

über  $x$  gleich dem Mehrfachen von  $H$  aufgetragen, wobei  $H = 30$  mm entsprechend der bei den meisten Messungen benutzten Modellhöhe gesetzt ist.

An jeder Stelle  $x$ , an der eine Messung stattfand, ist nun über der vertikalen Koordinate  $z$  das Geschwindigkeitsverhältnis  $v/v_0$  (horizontal) aufgetragen. Das so entstehende Geschwindigkeitsprofil gilt also jeweils für dasjenige  $x$ , das im Nullpunkt des betreffenden Profils abzulesen ist. Durch Vergleich der mit wachsendem  $x$  aufeinanderfolgenden Kurven erhält man ein anschauliches Bild von der Entwicklung der Geschwindigkeitsprofile in Windrichtung.

Im Gegensatz zu bisherigen Messungen [24, 36, 40], bei denen die Windgeschwindigkeiten nur in einer oder zwei verschiedenen Höhen über dem Boden ermittelt wurden, haben wir immer das ganze Windprofil bis auf eine solche Höhe festgestellt, in der kein merklicher Einfluß des Hindernisses mehr erkennbar war. Da es aus Raumgründen unmöglich ist, aus diesen Profilen alle Vergleichskurven, die interessieren könnten, zu bestimmen und mitzuteilen, haben wir es für richtig befunden, die Geschwindigkeitsprofile selbst (gewissermaßen als Rohmaterial) in den Tafeln I bis XVII vollständig wiederzugeben, um jedem Interessenten eigene Auswertungen zu ermöglichen.

Tafel I enthält zunächst einen Vergleich von Hindernissen verschiedener Durchlässigkeit. Wir sehen, wie in Versuch 8 hinter einem undurchlässigen Hindernis in Bodennähe ein ausgedehntes Gebiet mit Rückströmung vorliegt, die aber nicht gemessen wurde, da das *Prandtl*-Rohr nicht ohne weiteres umkehrbar war. Erst in größerer Entfernung hinter dem Hindernis finden sich wieder positive Geschwindigkeiten in Bodennähe. Bei den durchlässigen Hindernissen in den Versuchen 14, 15 und

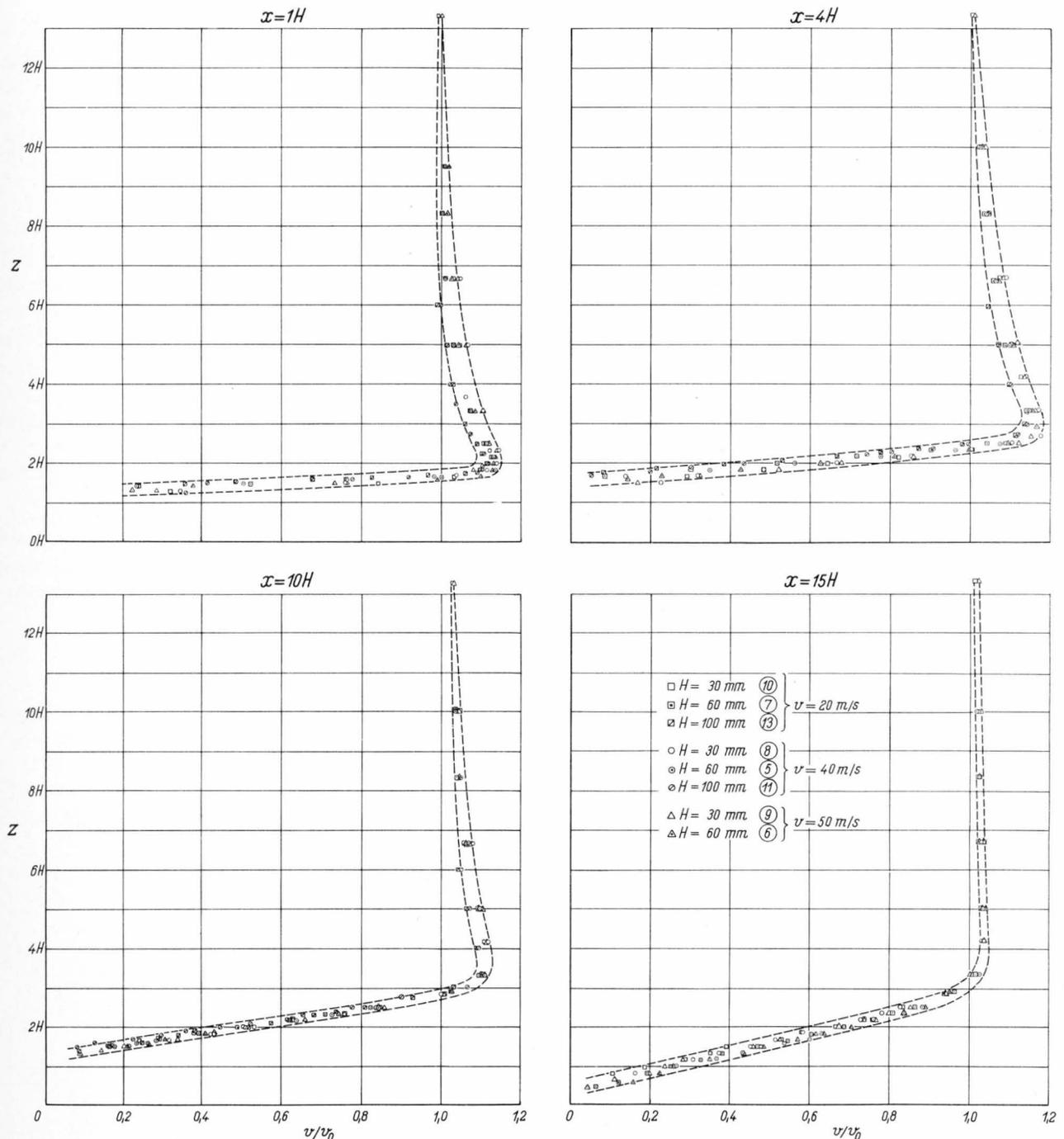


Bild 26. Geschwindigkeitseinfluss hinter durchlässigen Hecken bei verschiedenen Kennzahlen  $v \cdot H$ .

$x$  horizontaler Abstand der Messstelle von der Hecke auf der Leeseite

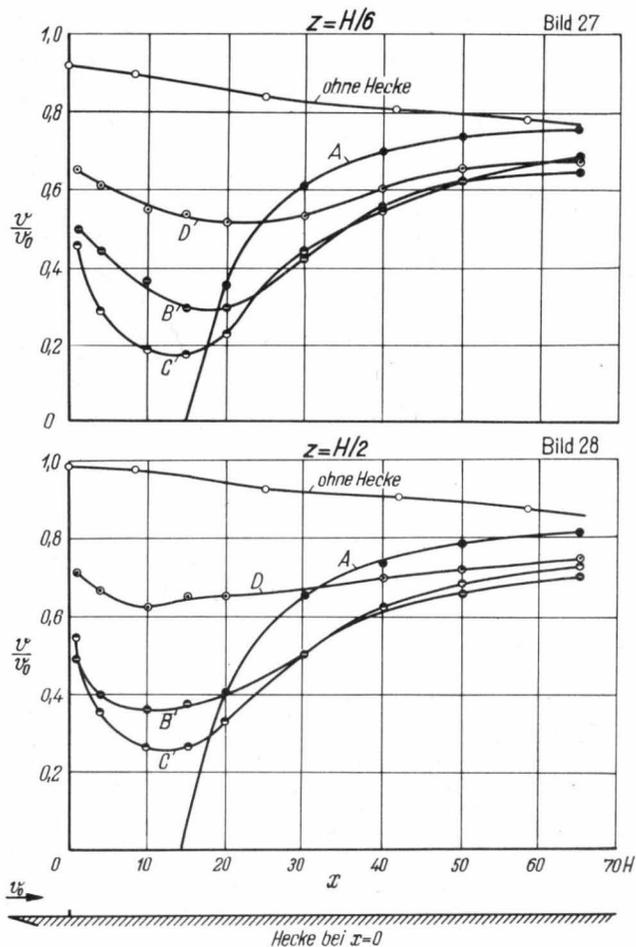
$z$  vertikaler Abstand der Messstelle über dem Boden (in Vielfachen von  $H$ )

$H$  Heckenhöhe  
 $v$  Windgeschwindigkeit

16 ergibt sich ein völlig anderes Bild. Da die Strömung durch das Hindernis hindurchtreten kann, erhalten wir auch in unmittelbarer Nähe des Hindernisses schon positive Geschwindigkeiten. In größerer Entfernung vom Hindernis ergeben sich aber bei den durchlässigen Hindernissen kleinere Windgeschwindigkeiten als bei dem undurchlässigen Hindernis. Dieses Ergebnis findet sich bei allen späteren Untersuchungen wieder, so daß der Schluß berechtigt erscheint, daß man von durchlässigen Hindernissen eine auf der Leeseite weiter reichende Schutzwirkung erwarten darf als von un-

durchlässigen Hindernissen. Die durch letztere erzeugte starke Verwirbelung der Strömung auf der Leeseite ist weniger günstig als die gleichmäßige Bremsung der Strömung durch ein durchlässiges Hindernis.

Um auch die Luvseite der Hindernisse genauer durchzumessen, wurden in den Versuchen 43 bis 47 (Tafel VI) die Hindernisse bei  $x = 30 H$  aufgestellt. Dabei wurde erstmalig auch ein Hindernis mit ungleichmäßiger Durchlässigkeit (Modell P in Bild 7) untersucht, wodurch die Strömungsverhältnisse an einer Pappelallee nachgeahmt werden sollten. Die



**Bild 27 und 28.** Windgeschwindigkeit hinter Hecken verschiedener Durchlässigkeit (Drahtgeflechte nach Bild 4 bis 6).

|              |               |
|--------------|---------------|
| ohne Hecke:  | Versuch Nr. 2 |
| mit Hecke A: | " " 8         |
| " " B:       | " " 14        |
| " " C:       | " " 15        |
| " " D:       | " " 16        |

- H Höhe der Hecken
- x, z Ordinaten der Messstellen in Windrichtung (x) und über dem Boden (z)
- v<sub>0</sub> Windgeschwindigkeit (unbeeinflusst)
- v Windgeschwindigkeit an der Messstelle

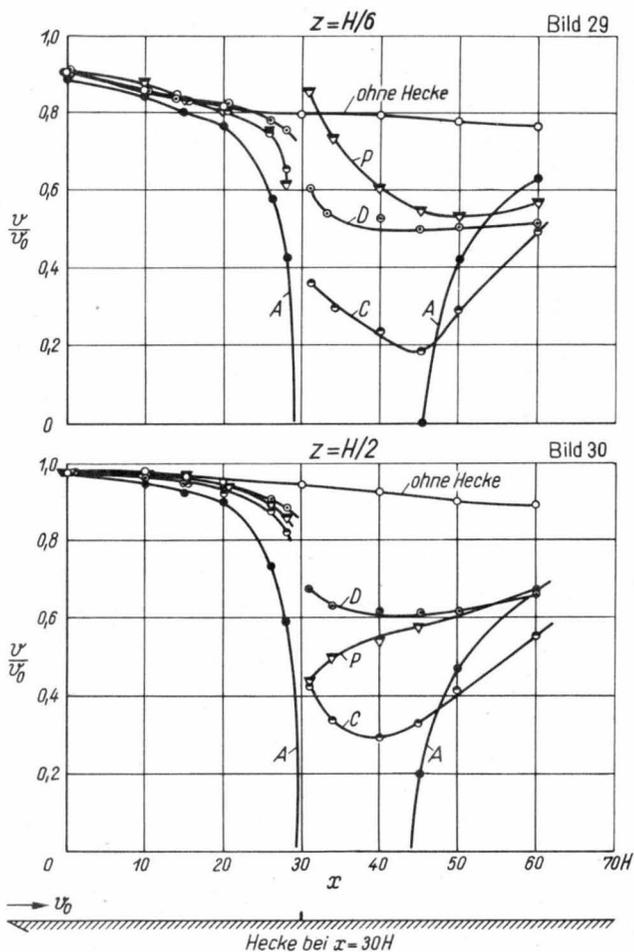
Geschwindigkeitsprofile von Versuch 47 zeigen deutlich, wie die Strömung im unteren Drittel zunächst fast ungehindert hindurchtreten kann (ja, daß sogar eine schwache Düsenwirkung erkennbar ist), daß im weiteren Verlauf aber eine Mischung mit den stärker gebremsten Teilen in den oberen Dritteln eintritt, so daß das Hindernis P in seiner Gesamtwirkung dem Hindernis D etwa gleichkommt.

Man kann aus den Versuchen 14 bis 16 auch schon erkennen, daß es nicht gleichgültig ist, wie durchlässig ein Hindernis ist, und daß es offensichtlich eine optimale Durchlässigkeit gibt. Da die für die Versuche 14 bis 16 benutzten Drahtgewebe (Bild 4-6) keine systematische Veränderung der Durchlässigkeit ermöglichten, wurde eine solche Systematik in den Versuchen 76 bis 81 (Tafel XII) durchgeführt. Die hierfür benutzten Modelle sind in Bild 18 bis 24 dargestellt; es handelt

sich dabei um 3 mm starke Messingbleche mit kreisrunden Löchern, deren Größe und Anzahl systematisch variiert wurden. In diesen Versuchen stehen die Modelle bei  $x = 10 H$ .

Um den Vergleich deutlicher zu machen, sind die Windverhältnisse vor und hinter den Hindernissen verschiedener Durchlässigkeit (entsprechend den Versuchen 8, 14 bis 16, 43 bis 47, 76 bis 81) abhängig von  $x$  für zwei bestimmte Höhen, nämlich für  $z = H/6$  und  $z = H/2$ , in Bild 27 bis 34 einzeln dargestellt. Aus **Bild 27 und 28** muß man schließen, daß das undurchlässige Hindernis A die schlechteste, das durchlässige Hindernis C die beste Schutzwirkung bietet. Das Hindernis B ist fast so gut wie C, während das Hindernis D offensichtlich schon eine zu große Durchlässigkeit besitzt. Die Kurve für D rückt schon näher an die Kurve „ohne Hecke“ (Durchlässigkeit 100%) heran.

Zur Beurteilung der Schutzwirkung einer Hecke oder ihrer Reichweite braucht man eine klare Definition dieser Größe. Wegen der asymptotischen An-



**Bild 29 und 30.** Windgeschwindigkeit vor und hinter Hecken verschiedener Durchlässigkeit (Drahtgeflechte nach Bild 4 bis 7).

|              |                |
|--------------|----------------|
| ohne Hecke:  | Versuch Nr. 43 |
| mit Hecke A: | " " 45         |
| " " C:       | " " 47         |
| " " D:       | " " 44         |
| " " P:       | " " 46         |

näherung der Windkurven an die Kurve „ohne Hecke“ ist eine Definition derart, daß die Strecke bis zum Erreichen der unbeeinflussten Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe (etwa  $H/6$  oder auch absolut 1,5m) als Reichweite bezeichnet wird, praktisch unbrauchbar.

Zweckmäßig wäre etwa folgende Definition: Reichweite einer Windschutzhecke ist die Strecke bis zum Erreichen von 80% der Windgeschwindigkeit „ohne Hecke“. In der freien Natur wird sich letztere nicht immer gut bestimmen lassen, da der Vergleichsversuch „ohne Hecke“ nicht ausführbar ist. Trotzdem wird man, wenn überhaupt eine Schutzwirkung festgestellt werden soll, eine Vergleichsgeschwindigkeit irgendwo ermitteln müssen. Von der Reichweite einer Hecke zu sprechen, ohne diese klar zu definieren – wie es vielfach im Schrifttum geschieht – ist jedenfalls sinnlos.

Aus Bild 27 ergeben sich nach dieser Definition, wenn wir die Messungen in der Höhe  $H/6$  zu Grunde legen, folgende Reichweiten:

|                         |      |
|-------------------------|------|
| Undurchlässige Hecke A: | 34 H |
| Durchlässige „ B:       | 53 H |
| „ C:                    | 53 H |
| „ D:                    | 46 H |

Im Abschnitt VII wird noch darüber zu sprechen sein, wie sich diese Zahlen auf die Verhältnisse in der freien Natur übertragen lassen.

Bild 29 und 30 zeigen auch die Wirkung der Hindernisse nach der Luvseite. Während die durchlässigen Hindernisse hier nur eine recht geringe Abminderung der Geschwindigkeit auf der Luvseite bringen, erhalten wir für das undurchlässige Hindernis wegen der Stauwirkung einen merklichen Einfluß. Auf der Leeseite liegen die Kurven für die Hindernisse der Durchlässigkeit A, C und D ganz

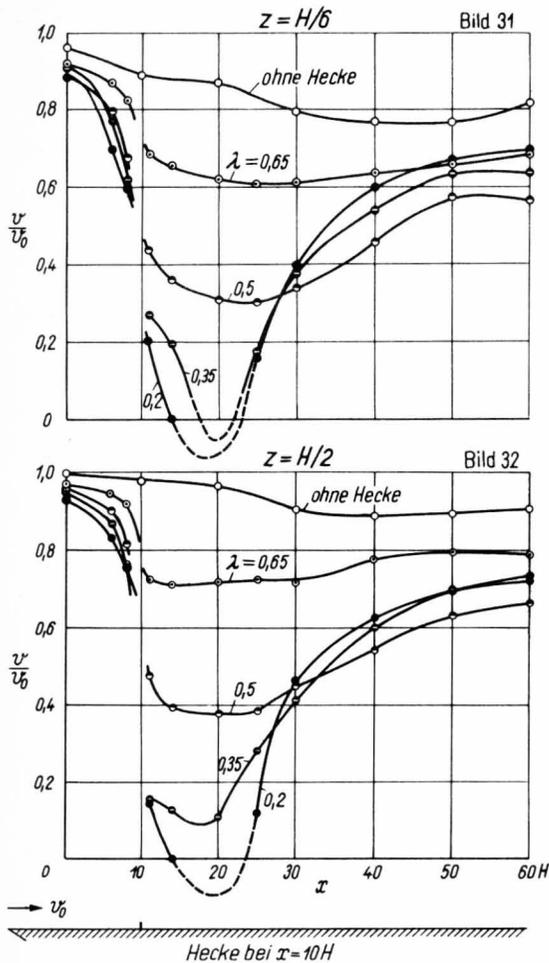


Bild 31 und 32. Windgeschwindigkeit vor und hinter Hecken verschiedener Durchlässigkeit (gelochte Bleche mit gleichem Lochdurchmesser  $d = 5$  mm nach Bild 18 bis 21).

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| ohne Hecke:                 | Versuch Nr. 58 |
| Hecke mit $\lambda = 0,2$ : | „ „ 79         |
| „ „ $\lambda = 0,35$ :      | „ „ 80         |
| „ „ $\lambda = 0,5$ :       | „ „ 77         |
| „ „ $\lambda = 0,65$ :      | „ „ 81         |

$\lambda$  geometrische Durchlässigkeit der Modellhecken (Verhältnis der Lochfläche zur Gesamtfläche).

$H$  Höhe der Hecken  
 $x, z$  Ordinaten der Messstellen in Windrichtung ( $x$ ) und über dem Boden ( $z$ )

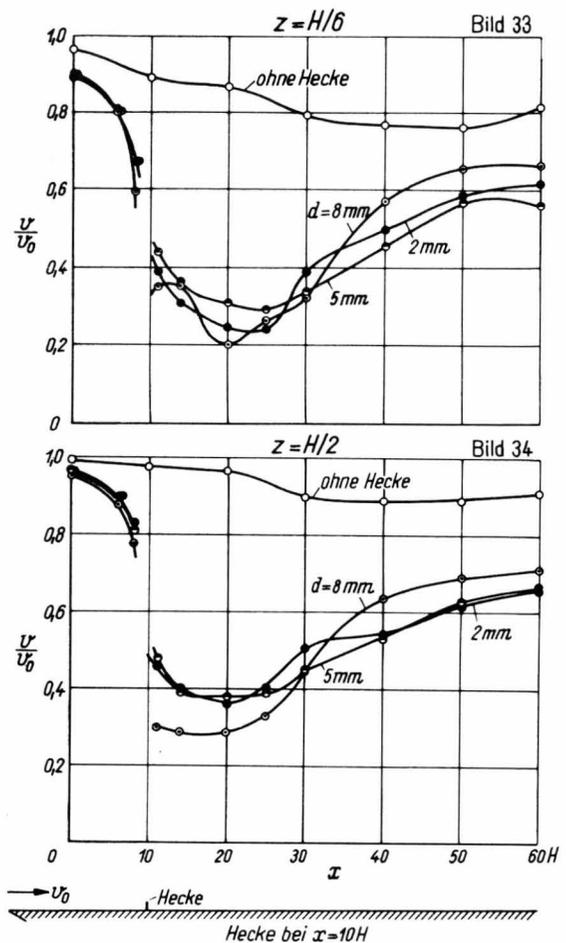


Bild 33 und 34. Windgeschwindigkeit vor und hinter Hecken verschiedener Durchlässigkeit (gelochte Bleche mit gleicher geometrischer Durchlässigkeit von  $\lambda = 0,5$  nach Bild 22 bis 24).

|                       |                |
|-----------------------|----------------|
| ohne Hecke:           | Versuch Nr. 58 |
| Hecke mit $d = 2$ mm: | „ „ 76         |
| „ „ $d = 5$ mm:       | „ „ 77         |
| „ „ $d = 8$ mm:       | „ „ 78         |

$d$  Lochdurchmesser in mm in den Modellhecken

ähnlich wie in Bild 27/28. Auf die Kurve für das Hindernis *P* (Pappelallee) sei besonders hingewiesen. In der Höhe  $z = H/2$  beginnt die Kurve für *P* dicht hinter dem Hindernis an der gleichen Stelle wie die Kurve für *C*. Beide Hindernisse stimmen in dieser Höhe in ihrer Form völlig überein (vergl. Bild 5 mit 7). Mit wachsendem  $x$  nähert sich die Kurve für *P* derjenigen für *D*. Hier macht sich, wie ein Blick auf die Geschwindigkeitsprofile von Versuch 46 (Tafel VI) lehrt, der Ausgleich zwischen den unteren und oberen Schichten bemerkbar. Für  $z = H/6$  haben wir dicht hinter dem Hindernis *P* sogar eine höhere Geschwindigkeit als „ohne Hecke“ (Düsenwirkung zwischen den Stämmen), die dann aber schnell absinkt und sich wie für  $z = H/2$  der Kurve für *D* nähert.

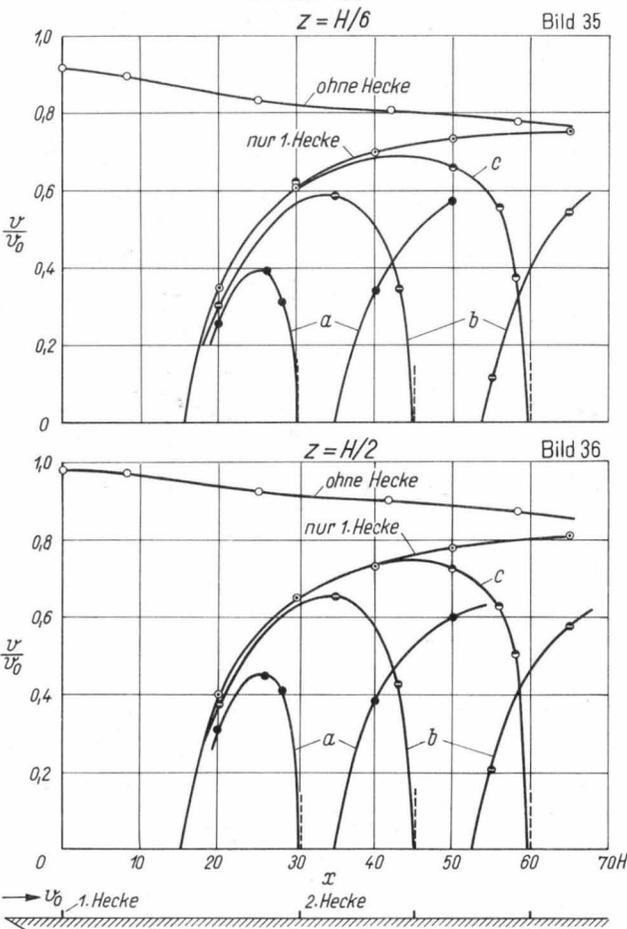
In Bild 31 und 32 sind Hindernisse verschiedener Durchlässigkeit (nach Bild 18 bis 21), aber gleicher Lochgröße miteinander verglichen. Die Durchlässigkeit  $\lambda$  ist dabei definiert als das Verhältnis der Lochfläche zur Gesamtfläche. Die Kurve für die geringste Durchlässigkeit ( $\lambda = 0,2$ ) verläuft ähnlich

wie die für das undurchlässige Hindernis *A* ( $\lambda = 0$ ) in Bild 27/28. Das Optimum der Schutzwirkung liegt bei etwa  $\lambda = 0,5$ . Die Kurve für die größte Durchlässigkeit ( $\lambda = 0,65$ ) rückt schon recht nah an die Kurve „ohne Hecke“ ( $\lambda = 1,00$ ) heran. Rein geometrisch entsprechen den Hecken *A*, *B*, *C*, *D*, und *P* hinsichtlich der Durchlässigkeit folgende Hecken aus gelochten Blechen:

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Hecke <i>A</i> : $\lambda = 0$ | Hecke <i>L</i> 5/0,20 $\lambda = 0,20$ |
| „ <i>B</i> : $\lambda = 0,35$  | „ <i>L</i> 5/0,35 $\lambda = 0,35$     |
| „ <i>C</i> : $\lambda = 0,48$  | „ <i>L</i> 5/0,50 $\lambda = 0,50$     |
| „ <i>D</i> : $\lambda = 0,65$  | „ <i>L</i> 5/0,65 $\lambda = 0,65$     |
| „ <i>P</i> : $\lambda = 0,62$  |  |

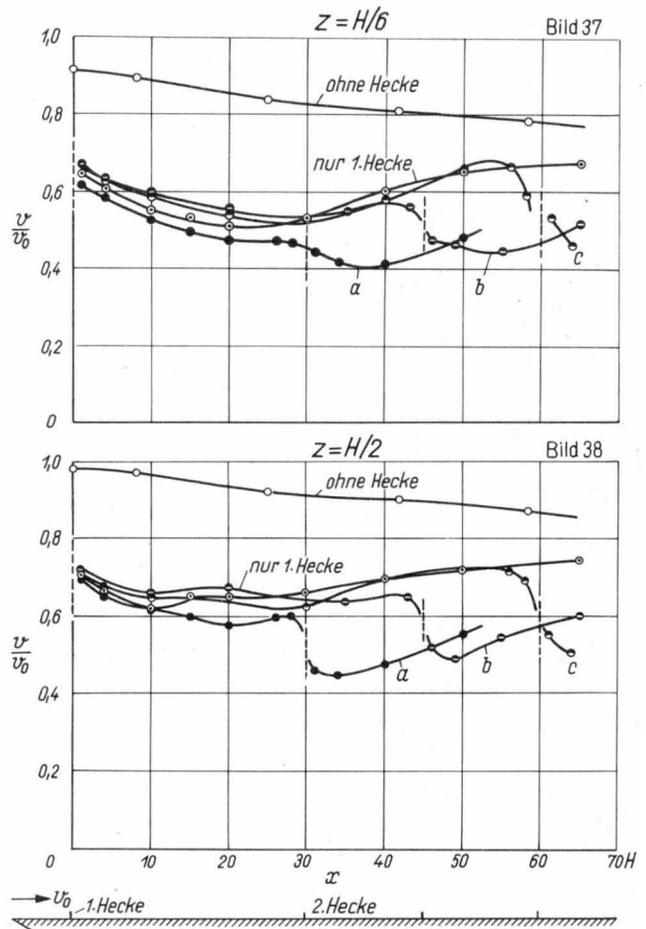
Ein Vergleich zwischen Bild 27/28 und 31/32 zeigt, daß beide Meßreihen gut miteinander übereinstimmen.

Inwieweit außer der geometrischen Durchlässigkeit auch die Lochgröße von Bedeutung ist, kann aus Bild 33/34 entnommen werden. Hier sind drei Hindernisse bei gleichem  $\lambda$ , aber verschiedenem  $d$  miteinander verglichen (Bild 22 bis 24). Die Kur-



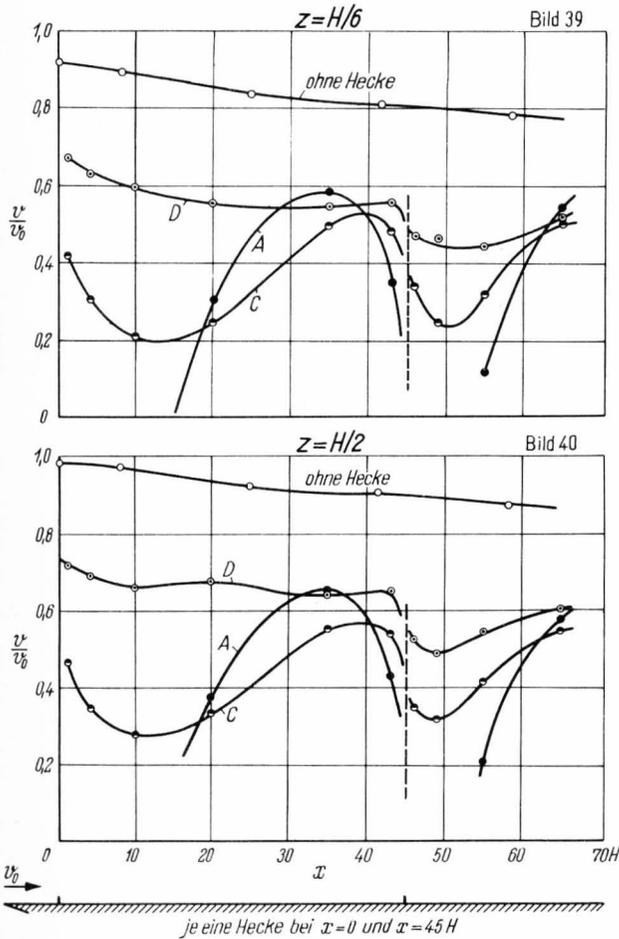
**Bild 35 und 36.** Windgeschwindigkeit zwischen einer undurchlässigen Hecke (*A*) bei  $x = 0$  und einer zweiten undurchlässigen Hecke bei  $x = 30H$ ,  $45H$  und  $60H$ .

|                                    |               |
|------------------------------------|---------------|
| ohne Hecke:                        | Versuch Nr. 2 |
| nur eine Hecke bei $x = 0$ :       | „ „ 8         |
| mit einer 2. Hecke bei $x = 30H$ : | „ „ 17        |
| „ „ 2. „ „ $x = 45H$ :             | „ „ 19        |
| „ „ 2. „ „ $x = 60H$ :             | „ „ 22        |



**Bild 37 und 38.** Windgeschwindigkeit zwischen einer durchlässigen Hecke *D* bei  $x = 0$  und einer zweiten durchlässigen Hecke *D* bei  $x = 30H$ ,  $45H$  und  $60H$ .

|                                    |               |
|------------------------------------|---------------|
| ohne Hecke:                        | Versuch Nr. 2 |
| nur eine Hecke bei $x = 0$ :       | „ „ 16        |
| mit einer 2. Hecke bei $x = 30H$ : | „ „ 18        |
| „ „ 2. „ „ $x = 45H$ :             | „ „ 21        |
| „ „ 2. „ „ $x = 60H$ :             | „ „ 23        |



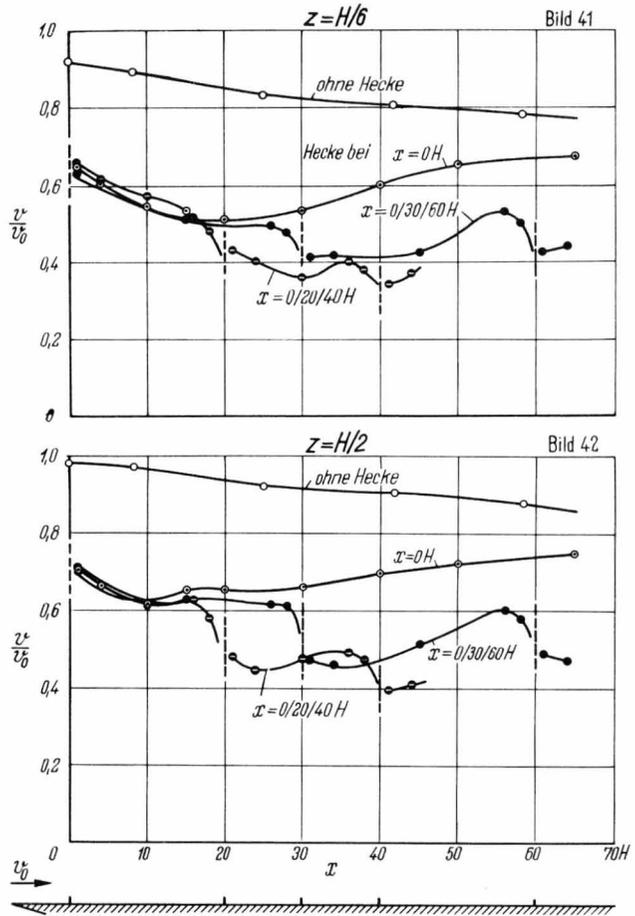
**Bild 39 und 40.** Windgeschwindigkeit zwischen zwei Hecken verschiedener Durchlässigkeit.

|             |               |
|-------------|---------------|
| ohne Hecke: | Versuch Nr. 2 |
| 2 Hecken A: | " " 19        |
| 2 " C:      | " " 20        |
| 2 " D:      | " " 21        |

ven für  $d = 2$  mm und 5 mm stimmen gut miteinander überein, während sich für  $d = 8$  mm eine größere Abweichung zeigt, und zwar in der Richtung (Bild 31/32), als ob die Durchlässigkeit verringert worden wäre. Man darf hieraus wohl schließen, daß Lochgrößen, die fast mit der Hindernishöhe vergleichbar sind, nicht verwendet werden sollten.

In den Tafeln I bis III sind die Ergebnisse der Versuche 17 bis 27, die mit 2 oder 3 Hecken verschiedener Durchlässigkeit in verschiedenen Abständen voneinander angestellt wurden, zusammengestellt. Bei den undurchlässigen Hindernissen kann man deutlich erkennen, wie das zuerst vom Wind getroffene Hindernis noch über das zweite Hindernis hinaus einen Einfluß auf den Geschwindigkeitsverlauf ausübt. Wesentlich geringer ist dieser Einfluß bei den Hindernissen der Durchlässigkeit  $D$ .

In Bild 35 bis 44 sind verschiedene Gegenüberstellungen von Versuchen mit ein, zwei oder drei Heckenmodellen für die Höhen  $z = H/6$  und  $z = H/2$  vorgenommen. Bild 35 und 36 gelten für undurchlässige Hecken und zeigen, wie durch die zweite Hecke, die entweder bei  $30 H$  oder  $45 H$  oder  $60 H$



**Bild 41 und 42.** Windgeschwindigkeit zwischen drei Hecken der Durchlässigkeit  $D$ .

|                                      |               |
|--------------------------------------|---------------|
| ohne Hecke:                          | Versuch Nr. 2 |
| nur eine Hecke $D$ :                 | " " 16        |
| drei Hecken $D$ bei $x = 0/20/40H$ : | " " 24        |
| " " $D$ " $x = 0/30/60H$ :           | " " 25        |

steht, die Geschwindigkeitskurve von der entsprechenden Kurve für nur eine Hecke (bei  $x \approx 0$ ) heruntergebogen wird, so daß zwischen den beiden Hecken ein Geschwindigkeitsmaximum entsteht. Dieses Maximum ist umso größer, je größer der Abstand der beiden Hecken ist, und liegt um rund ein Viertel dieses Abstandes vor der zweiten Hecke. Wenn die Geschwindigkeit zwischen zwei Hecken, bezogen auf die Geschwindigkeit „ohne Hecke“, einen Größtwert nicht überschreiten soll, kann man aus Bild 35/36 den notwendigen Heckenabstand ermitteln (wobei aber die in Abschnitt VII angegebene vorläufige Übertragungsregel beachtet werden muß).

Aus Bild 35/36 kann man noch entnehmen, daß der Bereich der Rückströmung hinter der zweiten Hecke offenbar viel kleiner ist, als hinter der ersten Hecke. Hinter der ersten Hecke reicht dieses Gebiet bis etwa  $15 H$ , dagegen hinter der zweiten Hecke, wenn sie bei  $x \approx 30 H$  liegt, nur bis etwa  $5 H$  und, wenn sie bei  $x = 45 H$  liegt, nur bis etwa  $7,5 H$ . Es ist möglich, daß sich hierin ein Turbulenzeinfluß äußert. Durch die erste Hecke

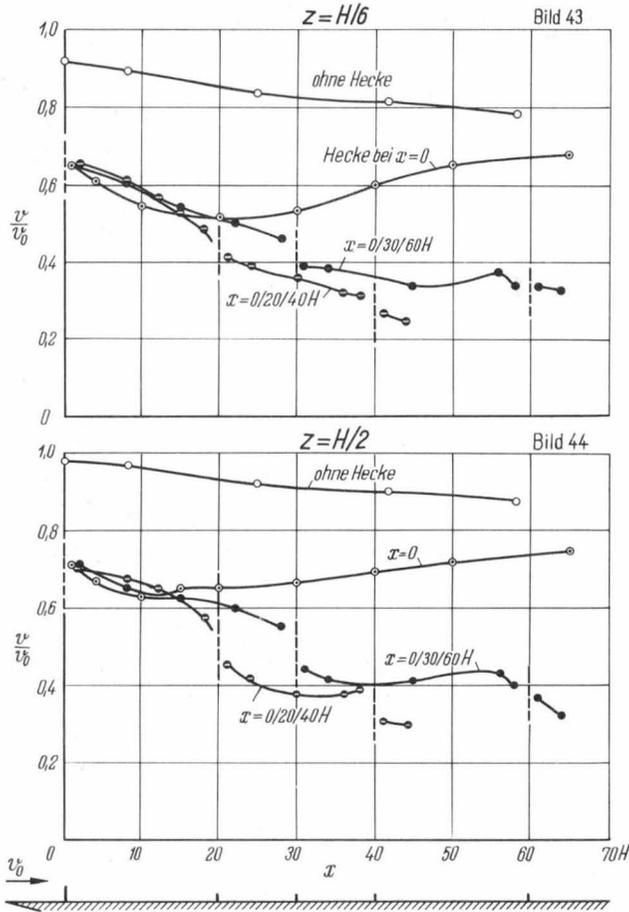


Bild 43 und 44. Windgeschwindigkeit zwischen drei Hecken der Durchlässigkeit  $D$ ; erste hat die Höhe  $2H$ .

|                                      |               |
|--------------------------------------|---------------|
| ohne Hecke:                          | Versuch Nr. 2 |
| nur eine Hecke $D$ :                 | " " 16        |
| drei Hecken $D$ bei $x = 0/20/40H$ : | " " 26        |
| " " " $x = 0/30/60H$ :               | " " 27        |

wird die Turbulenz des Luftstromes in grober Weise vermehrt.

Bild 37 und 38 zeigen denselben Vergleich wie Bild 35/36, nur für die Durchlässigkeit  $D$ . Die durchlässigen Heckenmodelle haben keine merkliche luvseitige Wirkung. Durch Hintereinanderschaltung durchlässiger Hecken in geeigneten Abständen kann man offensichtlich eine recht gleichmäßige Herabsetzung der Windgeschwindigkeit in Bodennähe erzielen.

In Bild 39 und 40 sind bei gleicher Lage beider Hecken die Durchlässigkeiten  $A$ ,  $C$  und  $D$  miteinander verglichen. Die Kurven zeigen den schon bekannten Verlauf, wobei sich die Durchlässigkeit  $C$  wieder als günstiger als  $D$  erweist.

In Bild 41 und 42 sind die Messungen an drei Hecken zusammengestellt. Die Windgeschwindigkeiten zwischen der zweiten und dritten Hecke liegen durchweg niedriger als zwischen der ersten und zweiten Hecke. Man kann hierin einen Turbulenzeinfluß sehen.

Bei den in Bild 43 und 44 wiedergegebenen Messungen hat die erste Hecke die doppelte Höhe (ge-

genüber den beiden anderen Hecken). Dabei ist aber  $H$  auch hier = 30 mm (Höhe der 2. und 3. Hecke) gesetzt. Die doppelte Höhe der ersten Hecke in Bild 43/44 (im Vergleich mit Bild 41/42) macht sich erst hinter der zweiten und dritten Hecke deutlich bemerkbar. (Für eine eingehende Untersuchung von mehreren Hecken hintereinander wäre ein Sonderwindkanal mit langer Versuchsstrecke dringend erforderlich.)

In den Erörterungen über den künstlichen Windschutz taucht oft die Frage auf, ob ein Waldstreifen von bestimmter Breite (Tiefe) eine bessere Schutzwirkung hat als eine Einzelhecke oder eine Baumreihe. Zur Klärung dieser Frage wurden die Versuche 28 bis 32 (Tafel III und IV) angestellt. Bild 45 bis 48 zeigen daraus einige Vergleiche für die Höhen  $z = H/6$  und  $z = H/2$ .

In Bild 45 und 46 sind zwei verschieden breite, undurchlässige Hecken mit entsprechenden Einzelhecken in verschiedener Anordnung verglichen. Man sieht zunächst, daß die Stauwirkung auf der

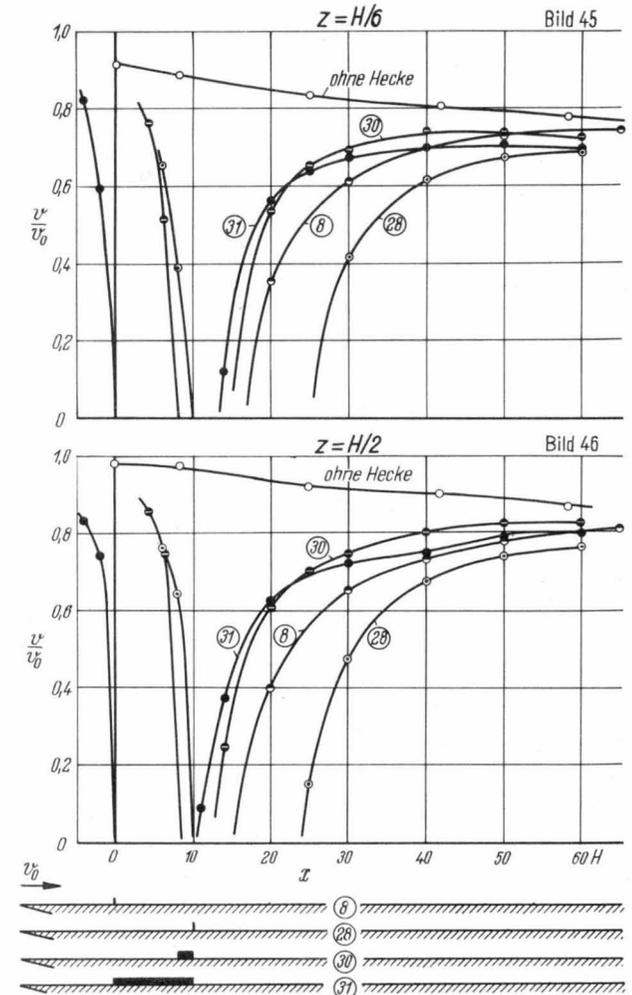
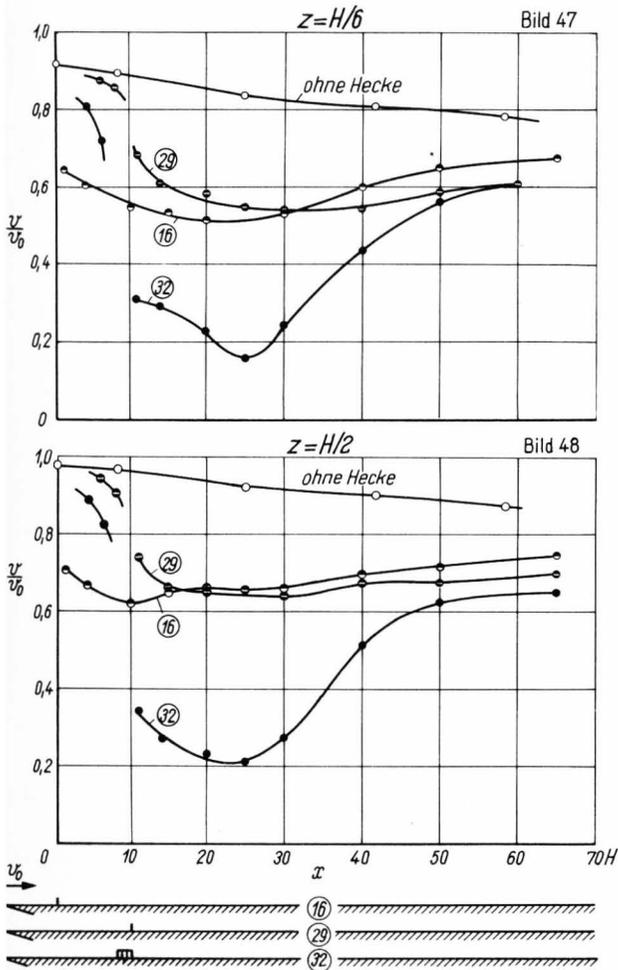


Bild 45 und 46. Windgeschwindigkeit vor und hinter undurchlässigen Hecken verschiedener Breite.

|                             |               |
|-----------------------------|---------------|
| ohne Hecke:                 | Versuch Nr. 2 |
| eine Hecke bei $x = 0$ :    | " " 8         |
| " " " $x = 10H$ :           | " " 28        |
| " " " $x = 8,3$ bis $10H$ : | " " 30        |
| " " " $x = 0$ bis $10H$ :   | " " 31        |



**Bild 47 und 48.** Windgeschwindigkeit vor und hinter durchlässigen Hecken (Durchlässigkeit  $D$ ) bei verschiedener Lage und Breite.

|                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| ohne Hecke:                     | Versuch Nr. 2 |
| eine Hecke $D$ bei $x = 0$ :    | „ „ 16        |
| „ „ $D$ „ $x = 10H$ :           | „ „ 29        |
| „ „ $D$ „ $x = 8,3$ bis $10H$ : | „ „ 32        |

Luvseite in allen Fällen nahezu die gleiche ist, unabhängig von der Breite des Hindernisses. Die Geschwindigkeitsverhältnisse in Lee sind aber recht unterschiedlich. Hinter den breiten Hindernissen (Breite =  $1,7 H$  und  $10 H$ ) steigt die Geschwindigkeit sehr bald steil an und nähert sich wieder der Geschwindigkeit „ohne Hecke“. Vergleicht man die Einzelhecke bei  $x = 10 H$  mit den beiden tiefen Hecken (wobei alle Hindernisse bei  $x = 10 H$  aufhören), so ergibt sich für die Einzelhecke ein um 10 bis 15  $H$  größerer Wirkungsbereich als für die tiefe Hecke. Eine Erklärung dieses Ergebnisses, das für die Praxis eine deutliche Überlegenheit der Einzelhecke oder einer Baumreihe gegenüber einem mehr oder weniger tiefen Waldstreifen bedeutet, ergibt sich aus der Betrachtung der Geschwindigkeitsverhältnisse oberhalb des hinteren Endes der Hindernisse. Während die Strömung hier bei den tiefen Hindernissen im wesentlichen horizontal verläuft, hat sie über der Einzelhecke eine merkliche Komponente nach oben. Eine Bestätigung dieser Erklärung ergibt sich aus den in Abschnitt VI mitgeteilten Strömungsbildern. Der

neueste Bericht von Nägeli [75] bringt eine Bestätigung dieses Ergebnisses aus Freilandversuchen.

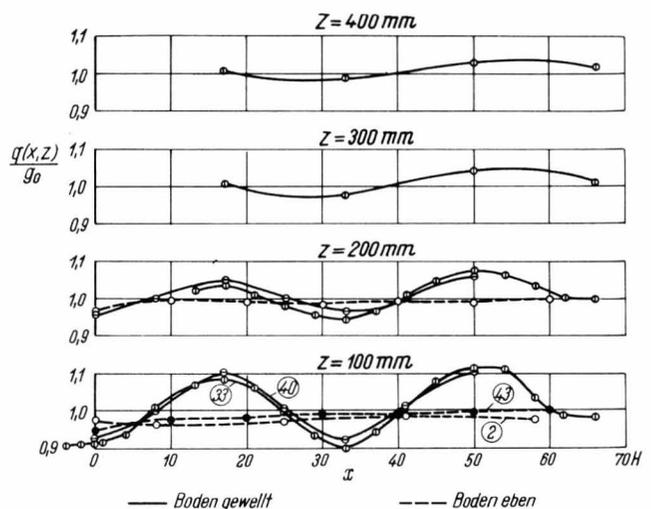
**Bild 47 und 48** zeigen den entsprechenden Vergleich für durchlässige Heckenmodelle. Die tiefe Hecke ( $1,7 H$ ) besteht hier aus 4 in gleichem Abstand hintereinander liegenden Drahtgeweben der Durchlässigkeit  $D$ , deren Oberkanten durch ein Drahtgewebe derselben Durchlässigkeit verbunden sind. Aus den Geschwindigkeitsprofilen auf Tafel III und IV erkennt man, daß durch diese vierfache Hecke immer noch eine merkliche Strömung hindurchtritt. Wie ein Vergleich mit Bild 27/28 zeigt, würde man von einer Modellhecke der Durchlässigkeit  $C$  bei  $x = 10 H$  die gleiche Geschwindigkeitskurve erwarten können. Es kommt hier nur auf die „aerodynamische“ Durchlässigkeit an, die man auf ganz verschiedene Weise realisieren kann.

Da in der Praxis ein Windschutz nicht nur in der Ebene gebraucht wird, sondern vielfach auch in hügeligem Gelände, sollte auch ein welliger Boden in das Versuchsprogramm aufgenommen werden. Der klaren Definition und der Reproduzierbarkeit wegen wurde eine sinusförmige Bodenform gewählt, wobei im Modell eine Bodenwelle (von Tal zu Tal) sich über 1000 mm erstreckte und eine größte Höhe von 30 mm erreicht. Bezeichnet  $h(x)$  die Höhe des gewellten Bodens über der Horizontalen, so ist also

$$h(x) = 15 \cdot \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{1000}\right).$$

Wie Bild 3 zeigt, sind zwei Bodenwellen hintereinander ausgeführt. Bezogen auf die Heckenhöhe  $H = 30$  mm liegen

- das 1. Tal bei  $x = 0$
- der 1. Berg „  $x = 16,7 H$
- das 2. Tal „  $x = 33,3 H$
- der 2. Berg „  $x = 50 H$
- das 3. Tal „  $x = 66,7 H$ .



**Bild 49.** Druckverhältnis längs der Versuchsstrecken über ebenem und gewelltem Boden (ohne Hecken).

$q$  = Staudruck an der Messstelle ( $x, z$ )  
 $q_0$  = Gesamtdruck in der Düsenvorkammer des Windkanals (= dem ungestörten Staudruck  $q_0$ )

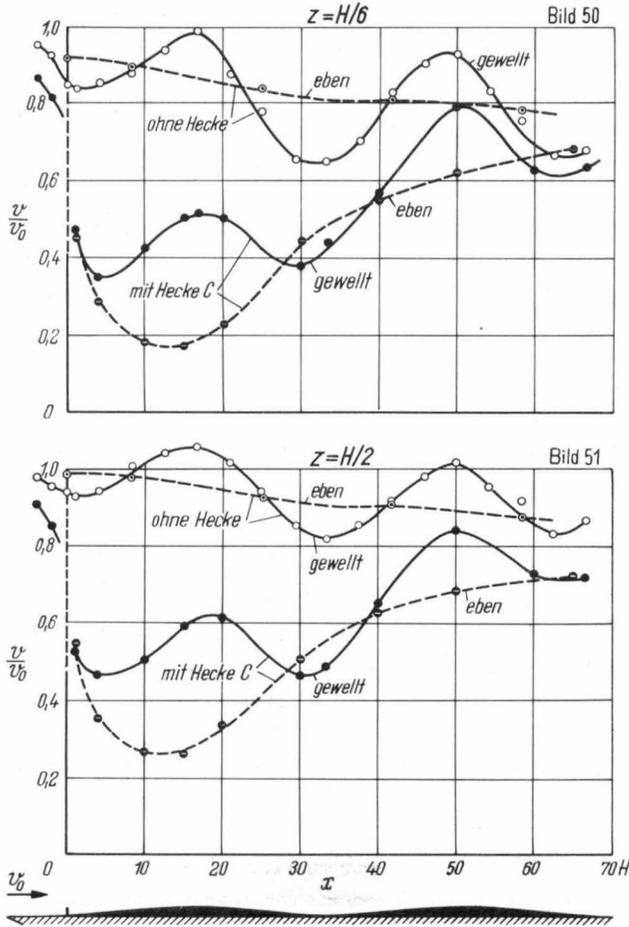


Bild 50 und 51. Windgeschwindigkeit über ebenem und gewelltem Boden ohne und mit einer Hecke C bei  $x = 0$ .

|                            |               |
|----------------------------|---------------|
| ohne Hecke, ebener Boden:  | Versuch Nr. 2 |
| " " gewellter Boden:       | " " 33        |
| mit Hecke C, ebener Boden: | " " 15        |
| " " C, gewellter Boden:    | " " 34        |

Mit dem gewellten Boden wurden die Meßreihen 33 bis 42 ausgeführt, der größere Teil davon mit Hekkenmodellen der Durchlässigkeit C, ein kleinerer Teil mit P. Die Tafeln IV und V enthalten die gemessenen Geschwindigkeitsprofile. Es ist recht interessant, das Zusammenwirken des welligen Bodens mit den Hecken, die an verschiedenen Stellen der Bodenwellen aufgesetzt waren, in diesen Tafeln zu verfolgen.

Wie sich die wellige Bodenform ohne Hecken auf die Geschwindigkeits- bzw. Druckverhältnisse in verschiedener Höhe  $z$  über dem Boden auswirkt, zeigt Bild 49. Hier ist das Druckverhältnis  $q(x, z)/g_0$  (vergl. S. 12) über  $x$  für verschiedene  $z$  aufgetragen. Man erkennt deutlich, wie der Bodeneinfluß mit wachsender Höhe abklingt.

Aus Bild 49, und zwar sowohl für den ebenen als auch für den gewellten Boden, ergibt sich mit wachsendem  $x$  ein langsames Ansteigen des Staudruckes, bzw. des von dem Einfluß der Bodenwelle bereinigten Wertes. Das liegt daran, daß die Abbremsung der Geschwindigkeiten durch den Boden

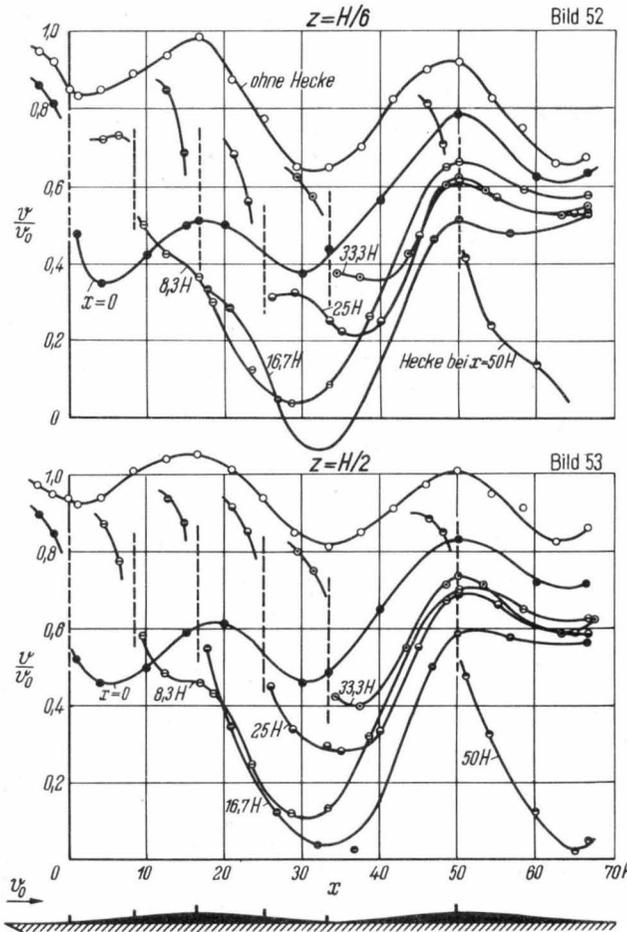


Bild 52 und 53. Windgeschwindigkeit über gewelltem Boden hinter verschieden gelegenen Hecken mit der Durchlässigkeit C.

|                         |                |
|-------------------------|----------------|
| ohne Hecke:             | Versuch Nr. 33 |
| mit Hecke bei $x = 0$ : | " " 34         |
| " " " $x = 8,3 H$ :     | " " 35         |
| " " " $x = 16,7 H$ :    | " " 36         |
| " " " $x = 25 H$ :      | " " 37         |
| " " " $x = 33,3 H$ :    | " " 38         |
| " " " $x = 50 H$ :      | " " 39         |

eine Verdrängungsströmung und damit höhere Geschwindigkeiten in größeren Höhen mit sich bringt. In Bild 49 sind die Versuchsreihen, die ohne Hecken gefahren wurden, übereinander aufgetragen. Die kleinen Abweichungen zwischen den Kurven geben einen Anhaltspunkt für die Meßgenauigkeit bei allen Messungen.

Aus den Tafeln IV und V wurden in der gleichen Weise wie bisher Bild 50 bis 57 abgeleitet. Es sei besonders betont, daß die Koordinate  $z$  jeweils vom Boden aus (also bei der Bodenwelle nicht von einer Horizontalen aus) gemessen wurde.

Bild 50 und 51 bringen zunächst einen Vergleich zwischen dem Geschwindigkeitsverlauf über ebenem und gewelltem Boden, und zwar mit einer Hecke C bei  $x = 0$  und „ohne Hecke“. Man kann in grober Annäherung sagen, daß durch die Bodenwelle die über ebenem Boden gemessenen Kurven von je einer Schwingung überlagert werden, die mit der Bodenwelle selbst gleiche Periode und Phase hat.

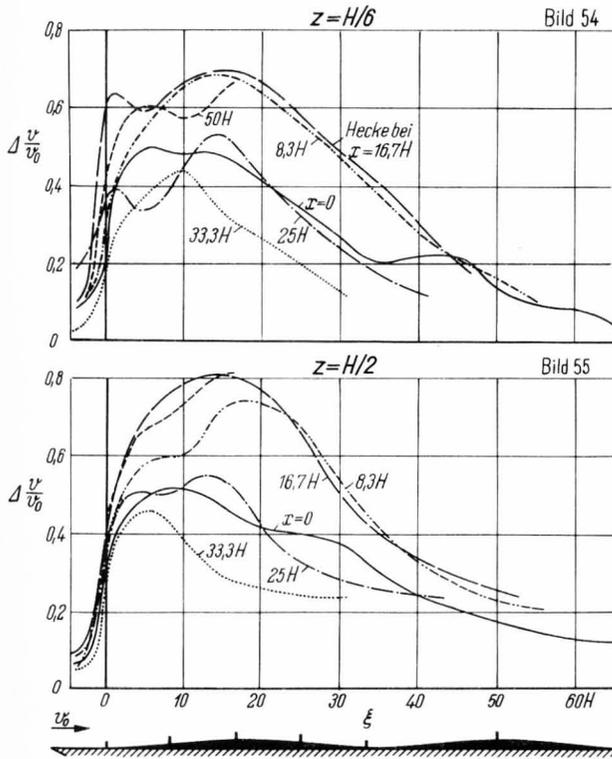


Bild 54 und 55. Geschwindigkeitsverlust durch Heckenwirkung über gewelltem Boden nach Bild 52 und 53 (Versuch Nr. 34 bis 39).

In Bild 52 und 53 sind die Versuchsreihen 33 bis 39 zusammengestellt. Sie zeigen, welchen Einfluß die Lage der Hecke, relativ zur Bodenwelle, auf den Geschwindigkeitsverlauf hat. Man erkennt unschwer, daß die Hecken bei  $x = 8,3 H$  und  $16,7 H$  (also auf der ansteigenden Bodenwelle und oben auf dem Berg) die stärkste Bremswirkung liefern. Um die Unterschiede deutlicher zu machen, sind in Bild 54 und 55 die Differenzen der Einzelkurven von Bild 52/53 gegenüber der Kurve „ohne Hecke“ über  $\xi$  aufgetragen, d.h. so, daß sämtliche Hecken an die Stelle 0 rücken. Man sieht jetzt deutlich, daß die Hecken auf dem Berg ( $x = 16,7 H$ ) die günstigsten Kurven liefern; kaum weniger günstig ist die Lage der Hecke auf dem ansteigenden Teil des Berges. Dagegen fallen die Kurven der Hecke auf dem absteigenden Teil der ersten Bodenwelle und der Hecke bei  $x = 0$  um ein beträchtliches Maß ab. Am wenigsten wirksam ist die Hecke, die im Tal zwischen den beiden Bodenerhebungen steht. Wenn also die Hauptwindrichtung bekannt ist, aus der die starken Winde kommen, gegen die man die Landschaft schützen will, und wenn Bodenwellen vorhanden sind, die ungefähr senkrecht zur Windrichtung verlaufen, wird man die Schutzhecken entweder oben auf dem Berg oder aber, in Windrichtung gesehen, auf dem ansteigenden Teil des Berges, nicht allzu weit von der Kuppe entfernt, anlegen.

In Bild 56 und 57 sind zwei Hecken mit den Durchlässigkeiten C und P in den Lagen  $x = 0$  und  $16,7 H$  (vor und auf dem ersten Berg) miteinander

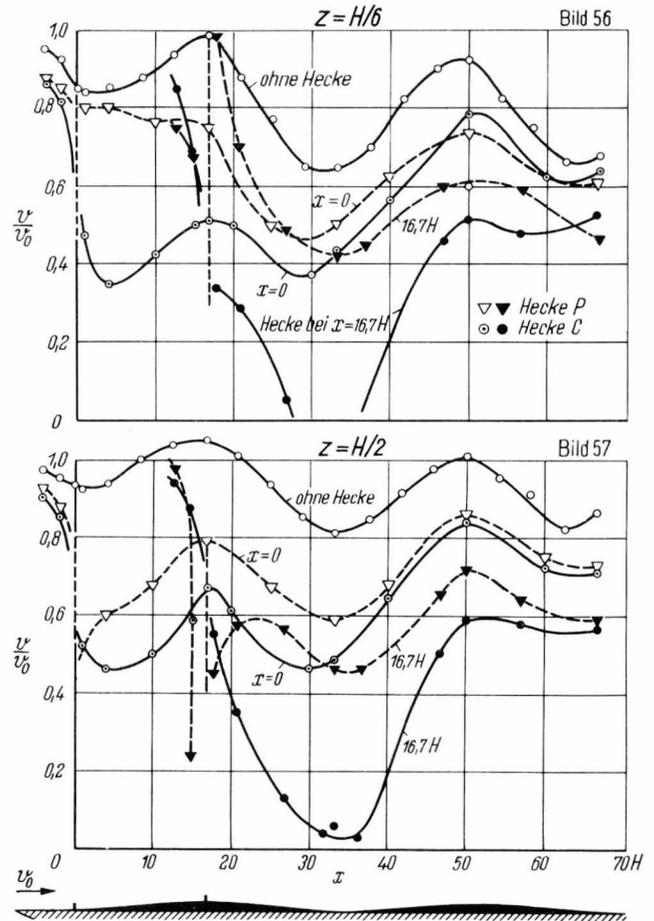


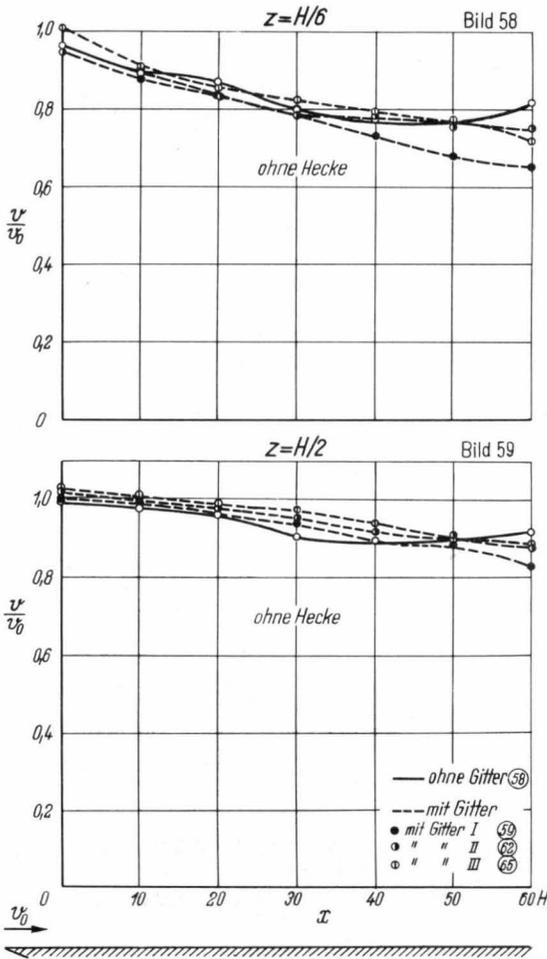
Bild 56 und 57. Vergleich der Windgeschwindigkeit verschieden durchlässiger Hecken (C und P) über gewelltem Boden.

|                       |                |
|-----------------------|----------------|
| ohne Hecke:           | Versuch Nr. 33 |
| Hecke C bei $x = 0$ : | „ „ 34         |
| „ C „ $x = 16,7 H$ :  | „ „ 36         |
| „ P „ $x = 0$ :       | „ „ 41         |
| „ P „ $x = 16,7 H$ :  | „ „ 42         |

verglichen. Für die Hecken P ergibt sich wieder der gleiche Unterschied zwischen dem oberen Diagramm ( $z = H/5$ ) und dem unteren ( $z = H/2$ ) wie in Bild 29/30. Die Überlegenheit der auf dem Berge stehenden Hecke gegenüber der vor dem Berge stehenden Hecke bei der Durchlässigkeit C findet sich bei der Durchlässigkeit P nicht in demselben Maße wieder. Die große Durchlässigkeit zwischen den Stämmen der Baumreihe mildert diesen Unterschied erheblich.

Ein Vergleich der ersten Modellversuche mit Freilandversuchen verschiedener Herkunft (Abschnitt VII) ergab, daß die Heckenwirksamkeit im Windkanal immer günstiger ausfiel als in der freien Natur. Es wurde die Vermutung geäußert, daß der Unterschied durch die geringere Turbulenz des Luftstrahls im Windkanal zu erklären sei. Aus diesem Grunde wurden einige Versuche mit künstlich erhöhter Turbulenz im Windkanal ausgeführt (Versuche 59 bis 75, Tafel IX – XI).

In Bild 58 und 59 sind in der üblichen Weise die Windgeschwindigkeiten  $v$ , relativ zur ungestörten Windgeschwindigkeit  $v_0$ , in ihrem Verlauf längs des



**Bild 58 und 59.** Der Einfluss einer durch Gitter künstlich erhöhten Turbulenz im Windkanal auf die Windgeschwindigkeit über dem Boden (ohne Hecken).

Bodens dargestellt, und zwar für die Versuchsreihen 58, 59, 62 und 65, d.h. ohne Hecke, aber mit verschiedenen Gittern an der Düse. (Obwohl keine Hecke bei diesen Versuchen vorhanden ist, ist die Längskoordinate  $x$  auf die Heckenhöhe  $H = 30$  mm bezogen, um dieses Bild leichter mit den folgenden vergleichen zu können.) Die Kurven in Bild 58/59 (für die Höhe  $z = H/6$  und  $z = H/2$  über dem Boden) zeigen einen überraschend geringen und keineswegs systematischen Einfluß der Gitter, bzw. der von den Gittern erzeugten zusätzlichen Turbulenz.

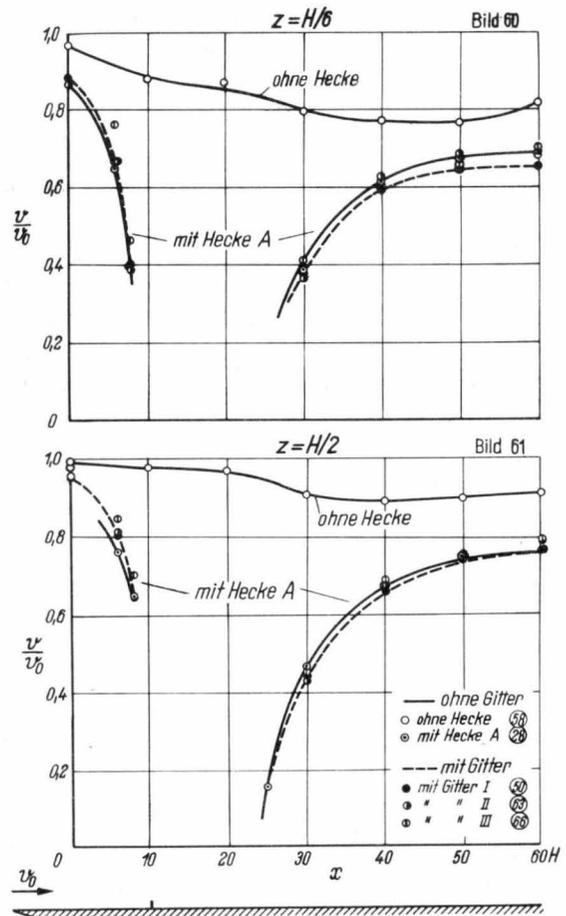
In **Bild 60 und 61** ist derselbe Vergleich für die Versuchsreihen 60, 63 und 66 mit der undurchlässigen Hecke A durchgeführt, wobei zum Vergleich die Versuchsreihe 58 (ohne Hecke, ohne Gitter) und die alte Versuchsreihe 28 (Hecke A, ohne Gitter) herangezogen wurden. Hier fallen die Kurven für alle Gitteranordnungen noch besser aufeinander als in Bild 58/59.

In gleicher Weise sind in **Bild 62 und 63** die Versuchsreihen 61, 64 und 67 für die durchlässige Hecke C einander gegenübergestellt. Zum Vergleich sind die Versuchsreihen 58 und 15 eingetragen, wobei allerdings eine kleine Verschiebung der Meßwerte von Versuchsreihe 15 notwendig wurde, weil

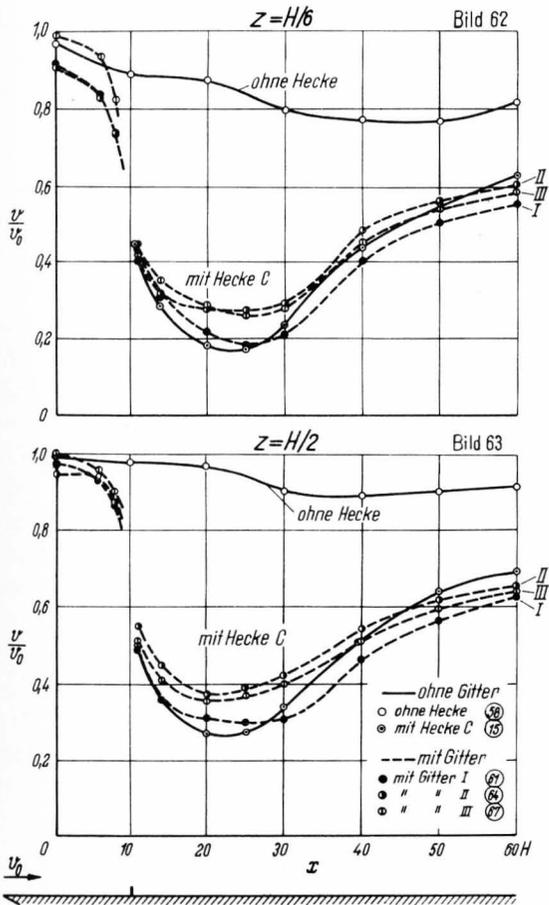
die Lage der Hecke nicht genau mit derjenigen der anderen Versuchsreihen übereinstimmte. Da der Unterschied nur 300 mm beträgt, dürfte er keinen nennenswerten Einfluß haben.

Es ist offensichtlich, daß bei den durchlässigen Heckenmodellen ein stärkerer Einfluß der Gitter, d.h. also der Turbulenz vorliegt als bei der undurchlässigen Wand in Bild 60/61. Da die Unterschiede aber auch hier nicht systematisch verlaufen – die Kurven „ohne Gitter“ laufen quer durch alle anderen Kurven hindurch, und diese sind nicht der Größe der Gitterstäbe nach geordnet –, so ist es sehr schwer, eine einwandfreie Deutung der Versuchsergebnisse zu geben. Leider war kein Gerät vorhanden, um die durch die Gitter erzeugte Turbulenz irgendwie zu messen, so daß die angestellten Versuche auch in dieser Hinsicht noch nicht befriedigen können.

In Bild 64 bis 67 sind Versuchsreihen miteinander verglichen, die sich durch die Lage der Hecke bei  $x = 10 H$  und  $30 H$  unterscheiden, in **Bild 64 und 65** für die undurchlässige Hecke A und in **Bild 66 und 67** für die durchlässige Hecke C. Wie man sieht, sind die entsprechenden Kurven jeweils um rund  $20 H$  gegeneinander verschoben; d.h. sie würden praktisch zur Deckung kommen, wenn man



**Bild 60 und 61.** Der Einfluss einer durch Gitter künstlich erhöhten Turbulenz im Windkanal auf die Windgeschwindigkeit über dem Boden vor und hinter einer undurchlässigen Hecke A bei  $x = 10 H$ .

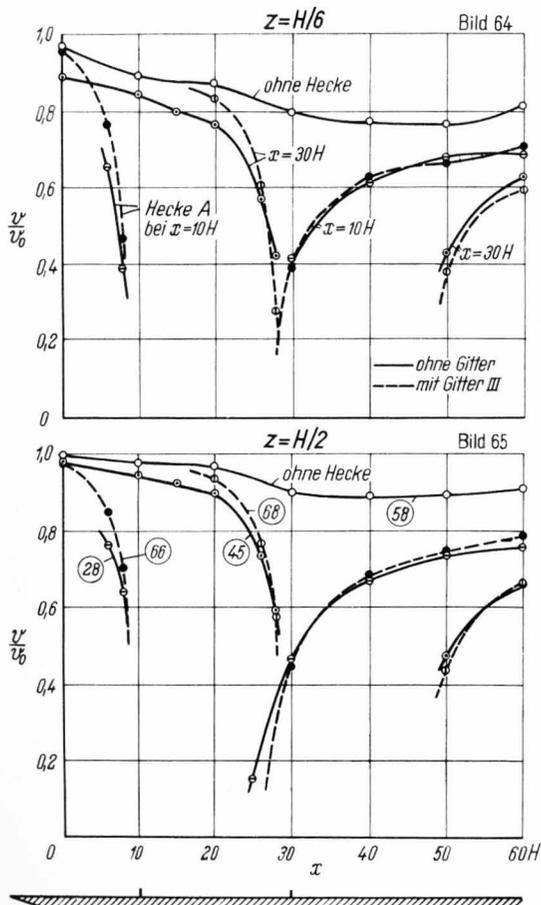


die Hecke bei der Auftragung im Diagramm an die gleiche Stelle rückte. Die um  $20 H = 600 \text{ mm}$  verlängerte Anlaufstrecke ändert die Geschwindigkeitskurven noch nicht wesentlich. Erforderlich wären Vergrößerungen der Anlaufstrecke auf etwa das 10-fache oder mehr.

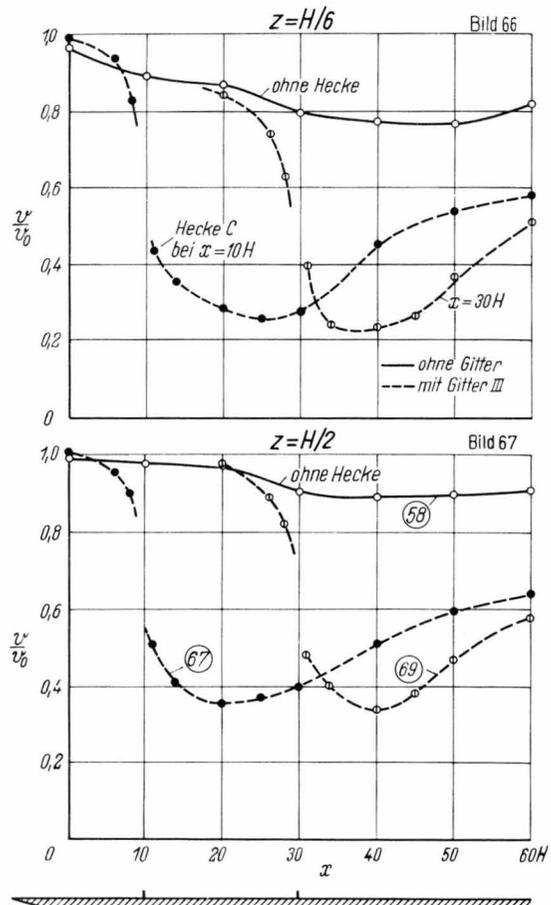
Es ist notwendig, der Turbulenzfrage noch größere Aufmerksamkeit zu widmen. Erwünscht wäre dazu eine wesentlich längere Meßstrecke im Windkanal, damit infolge des längeren Anlaufs auch das Profil der ungestörten Strömung von vornherein mehr den Verhältnissen in der freien Natur entspricht. Dadurch, daß dann der Abstand zwischen den Turbulenzgittern und den Heckenmodellen größer wird, ist auch eine gleichmäßigere Turbulenz (wie in der freien Natur) zu erwarten. Besonders wichtig wäre, die Turbulenz selbst zu messen und nicht nur die geometrischen Formen und Abmessungen der benutzten Gitter.

In **Bild 68** und **69** sind die Versuchsreihen miteinander verglichen, die alle ohne Hecke durchgemessen wurden, die sich aber durch die Bodenrauigkeit und durch die Gitteranordnung (Turbu-

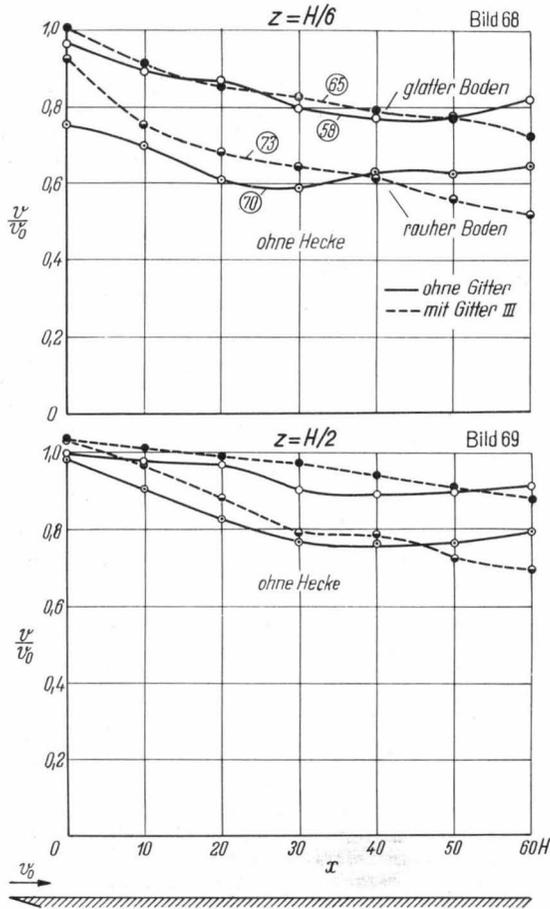
**Bild 62 und 63.** Der Einfluss einer durch Gitter künstlich erhöhten Turbulenz im Windkanal auf die Windgeschwindigkeit über dem Boden vor und hinter einer durchlässigen Hecke C bei  $x = 10 H$ .



**Bild 64 und 65.** Einfluss der Lage der undurchlässigen Hecke A ( $x = 10 H$  und  $30 H$ ) bei turbulenter Strömung (Gitter III) auf die Windgeschwindigkeit.



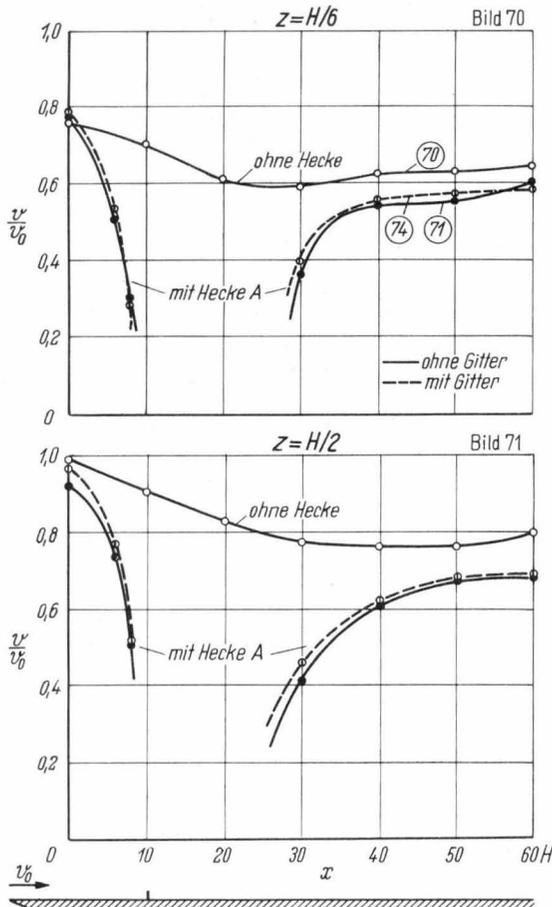
**Bild 66 und 67.** Einfluss der Lage der durchlässigen Hecke C ( $x = 10 H$  und  $30 H$ ) bei turbulenter Strömung (Gitter III) auf die Windgeschwindigkeit.



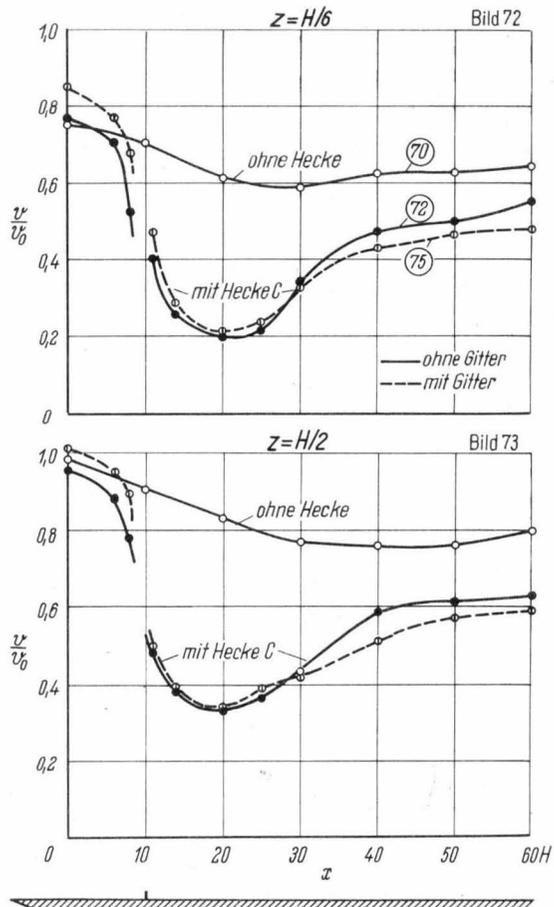
lenz) unterscheiden. Bei rauhem Boden wird die Geschwindigkeit in Bodennähe umso mehr und umso schneller gebremst, je dichter man an den Boden herangeht. Das ist ohne weiteres verständlich. Der Einfluß des Gitters ist auch bei diesem Vergleich gering. Der etwas unruhige Verlauf der Kurven erklärt sich wahrscheinlich durch den kurzen Abstand der Meßpunkte vom Gitter.

**Bild 70 und 71** enthalten den Vergleich der Geschwindigkeitskurven für die undurchlässige Hecke A. Man sieht, daß das vorgesetzte Gitter III keinen nennenswerten Einfluß auf den Geschwindigkeitsverlauf vor und hinter dem Hindernis, das bei  $x = 10 H$  steht, hat. Vergleicht man überdies Bild 70/71 mit den entsprechenden Versuchsergebnissen bei glattem Boden (Bild 27/28), so findet man zwar, daß alle Kurven (auch diejenigen „ohne Hecke“) bei rauhem Boden beträchtlich niedriger liegen als bei glattem Boden, daß aber die durch die Hecke verursachten Geschwindigkeitsverminderungen in beiden Fällen nahezu gleich sind; d.h. die Schutzwirkung, die von einem undurchlässigen Hindernis geboten wird, ist von der Bodenrauigkeit nur wenig abhängig. Um den Rauigkeitsein-

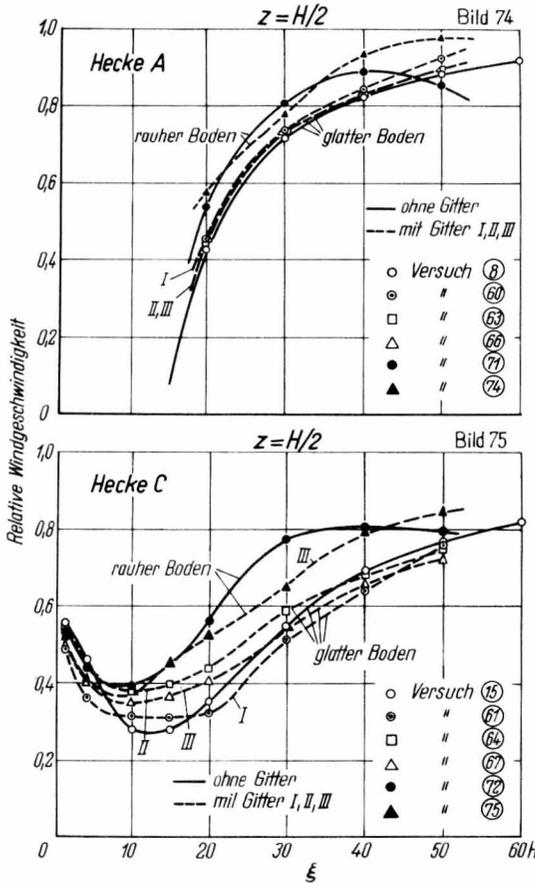
**Bild 68 und 69.** Einfluss der Rauigkeit des Bodens und der Turbulenz der Strömung (ohne Hecken) auf die Windgeschwindigkeit.



**Bild 70 und 71.** Einfluss der Turbulenz der Strömung vor und hinter einer Hecke A bei rauhem Boden auf die Windgeschwindigkeit.



**Bild 72 und 73.** Einfluss der Turbulenz der Strömung vor und hinter einer Hecke C bei rauhem Boden auf die Windgeschwindigkeit.



**Bild 74 und 75.** Einfluss der Turbulenz und der Bodenrauigkeit auf die relative Windgeschwindigkeit für die undurchlässige Hecke A und die durchlässige Hecke C.

$$\text{Relative Windgeschwindigkeit} = \frac{(v/v_0) \text{ mit Hecke}}{(v/v_0) \text{ ohne Hecke}}$$

fluß deutlicher zu machen, sind in **Bild 74** die Versuchsreihen 8, 60, 63, 66, 71 und 74 miteinander verglichen. Dabei ist als Ordinate die

$$\text{relative Windgeschwindigkeit} = \frac{(v/v_0) \text{ mit Hecke}}{(v/v_0) \text{ ohne Hecke}}$$

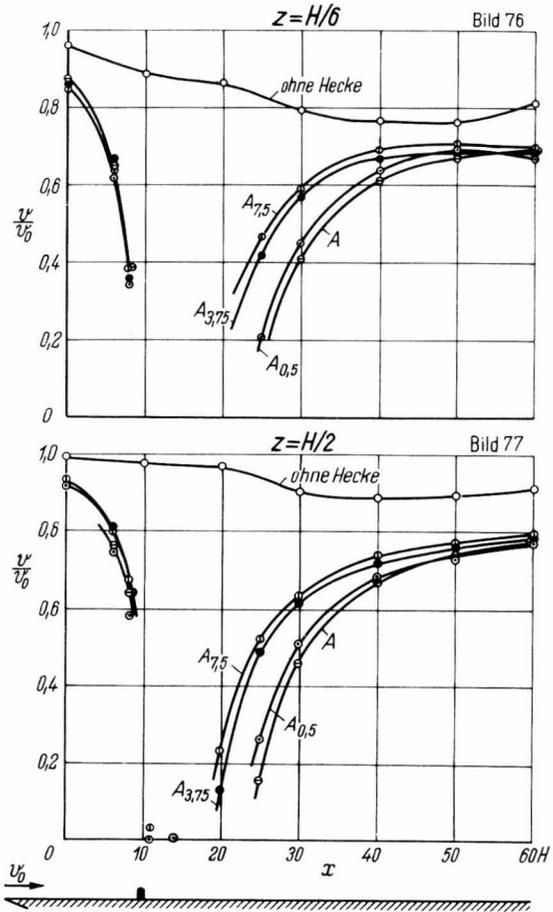
aufgetragen. Die Werte im Nenner entstammen den Versuchsreihen 2, 59, 62, 65, 70 und 73, und zwar jeweils an der gleichen Stelle hinter dem Hindernis wie der entsprechende Wert des Zählers. Die Ordinate gibt also an, auf welchen Prozentsatz der an gleicher Stelle gemessenen ungestörten Geschwindigkeit die Windgeschwindigkeit durch die Anwesenheit des Hindernisses absinkt. Die Abszisse  $\xi$  unterscheidet sich von  $x$  jeweils nur durch eine additive Konstante, und zwar so, daß die Hindernisse immer bei  $\xi = 0$  stehen. Bild 74 zeigt noch einmal deutlich den sehr geringen Einfluß der Gitter. Die Aufrauhung des Bodens bringt eine Verschiebung der Kurven nach links mit sich. Es ist bemerkenswert, daß die Kurven sich durch die zusätzliche Rauigkeit nach der Richtung hin verschieben, in der die entsprechenden Freilandversuchsergebnisse liegen.

Was in Bild 70/71 für die undurchlässige Hecke A dargestellt war, wird in **Bild 72 und 73** für die durch-

lässige Hecke C gezeigt. Auch hier liegen infolge des rauhen Bodens sämtliche Kurven tiefer als bei glatterm Boden.

Besonderes Interesse verdient nun **Bild 75**, das (entsprechend Bild 74) die relative Windgeschwindigkeit für die durchlässige Hecke C wiedergibt. Hier sind die Versuchsreihen 15, 61, 64, 67, 72 und 75 nebeneinander betrachtet, wobei jeweils zum Vergleich (ohne Hecke) die Versuchsreihen 2, 59, 62, 65, 70 und 73 dienen. Wie schon oben festgestellt wurde, ist ein gewisser Einfluß der Gitter unverkennbar; er ist aber nicht systematisch, und die Kurve „ohne Gitter“ läuft quer durch die anderen hindurch. Bei rauhem Boden liegt die Kurve aber um ein beträchtliches Stück nach links verschoben und nähert sich damit den im Freien gemessenen Werten (Abschnitt VII).

Auf Grund dieser Messung darf man hoffen, daß die bisher festgestellten Unterschiede zwischen Freilandversuch und Modellversuch wesentlich geringer werden, wenn man im Modellversuch nur noch rauhe Böden verwendet. Natürlich genügen die Ver-



**Bild 76 und 77.** Einfluss undurchlässiger Hecken verschiedener Form (s. Bild 8) auf die Windgeschwindigkeit (ebener, glatter Boden).

|                                     |                |
|-------------------------------------|----------------|
| ohne Hecke:                         | Versuch Nr. 58 |
| undurchlässige Hecke A:             | " " 28         |
| " " $A_{0,5}$ (scharfkantig):       | " " 82         |
| " " $A_{3,75}$ (leicht abgerundet): | " " 83         |
| " " $A_{7,5}$ (stark abgerundet):   | " " 84         |

suchsreihen 70 bis 75 noch nicht, um diese Frage endgültig zu entscheiden.

Daß in Bild 75 die Kurve für die Versuchsreihe 75 (rauhes Boden, mit Gitter III) wieder etwas mehr rechts verläuft, bedarf auch noch weiterer Aufklärung.

Bild 76 und 77 zeigen den Einfluß undurchlässiger Hindernisse verschiedener Form (vergl. Bild 8) auf die Windgeschwindigkeit. Der Übergang von dem scharfkantigen Blechstreifen  $A$  zu dem  $H/2$  breiten scharfkantigen Hindernis  $A_{0,5}$  bringt nur eine geringfügige Verschiebung der Windgeschwindigkeitskurve nach links. Dagegen wird durch die Abrundung der Kanten eine merkliche weitere Verschiebung nach links erreicht, wobei der Unterschied der beiden hier gewählten Abrundungen wiederum einen nur geringen Einfluß hat. Da die Abrundung offensichtlich die Ergebnisse in größere Nähe der im Freien gemessenen Werte bringt, muß hieraus geschlossen werden, daß die Umströmung lebender Hecken im Freien mehr Ähnlichkeit mit der Umströmung eines abgerundeten Hindernisses als ei-

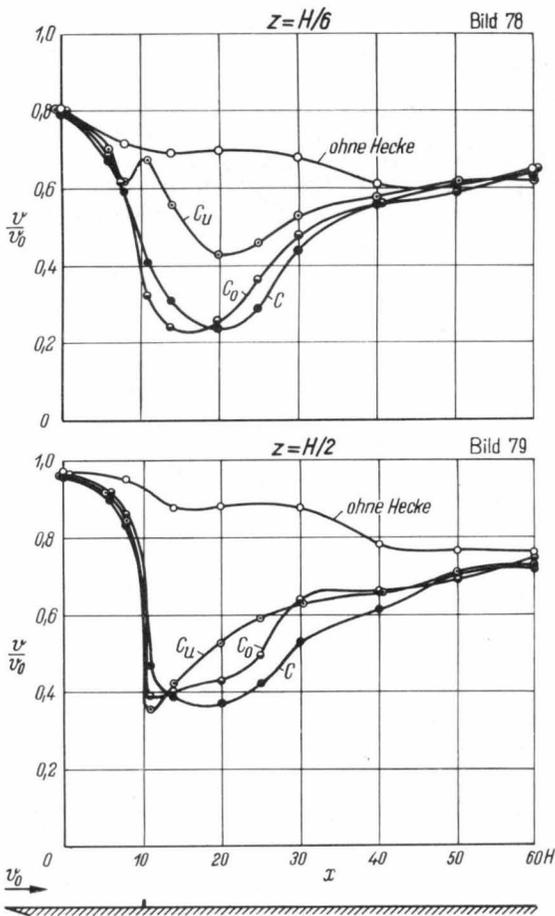


Bild 78 und 79. Windgeschwindigkeit hinter Hecken mit oben bzw. unten grösserer Durchlässigkeit (nach Bild 13 und 14).

|  |                |
|--|----------------|
| ohne Hecke                             | Versuch Nr. 91 |
| mit Hecke $C$ :                        | " " 92         |
| mit Hecke $C_0$ (oben durchlässiger):  | " " 93         |
| mit Hecke $C_u$ (unten durchlässiger): | " " 94         |

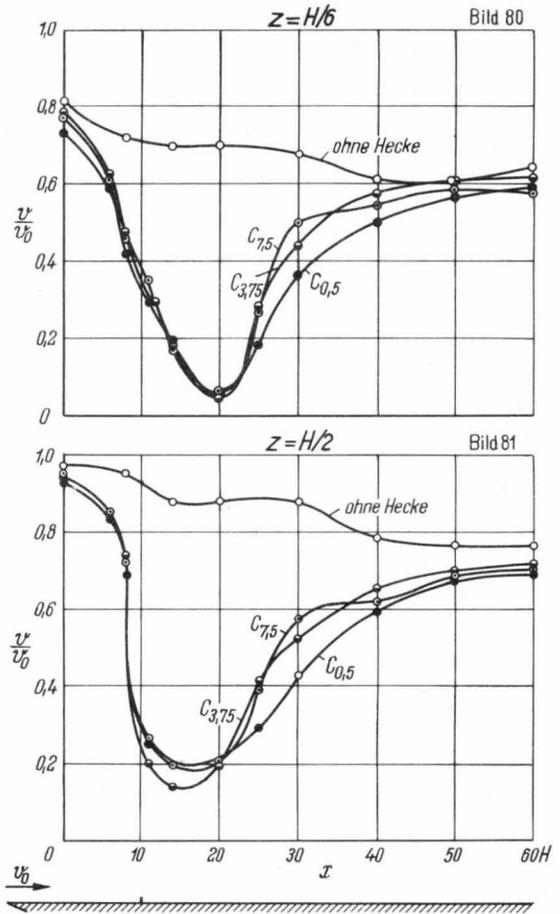


Bild 80 und 81. Einfluss durchlässiger Hecken verschiedener Form (s. Bild 10 bis 12) auf die Windgeschwindigkeit (ebener, glatter Boden).

|   |                |
|---|----------------|
| ohne Hecke:                               | Versuch Nr. 91 |
| mit Hecke $C_{0,5}$ (scharfkantig):       | " " 95         |
| mit Hecke $C_{3,75}$ (leicht abgerundet): | " " 96         |
| mit Hecke $C_{7,5}$ (stark abgerundet):   | " " 97         |

nes scharfkantigen Hindernisses hat. Es wird sich bei zukünftigen Modellversuchen empfehlen, die wirklichen Hecken nicht nur ihrer Höhe und Durchlässigkeit nach, sondern auch ihrer Tiefererstreckung nach im Modell nachzubilden.

Von Versuch 91 an wurden nur noch raue Böden benutzt.

Die Gegenüberstellung der Versuche 91 bis 94 auf Tafel XIV zeigt deutlich, wie sich die Windverhältnisse hinter Hecken, deren Durchlässigkeit in der oberen ( $C_0$ ) oder unteren ( $C_u$ ) Hälfte (s. Bild 13 und 14) größer als normal (Hecke  $C$  in Bild 5) ist, von den Windverhältnissen hinter Hecken mit gleichmäßiger Durchlässigkeit unterscheiden. Die gesamte Bremswirkung ist natürlich in beiden Fällen geringer als bei der gleichmäßigen Hecke. In der Nähe des Bodens und in geringen Entfernungen von der Hecke besteht aber ein großer Unterschied zwischen den beiden Hecken mit oben oder unten erhöhter Durchlässigkeit. Es ist wesentlich günstiger, wenn die Durchlässigkeit von unten nach oben zunimmt als umgekehrt.

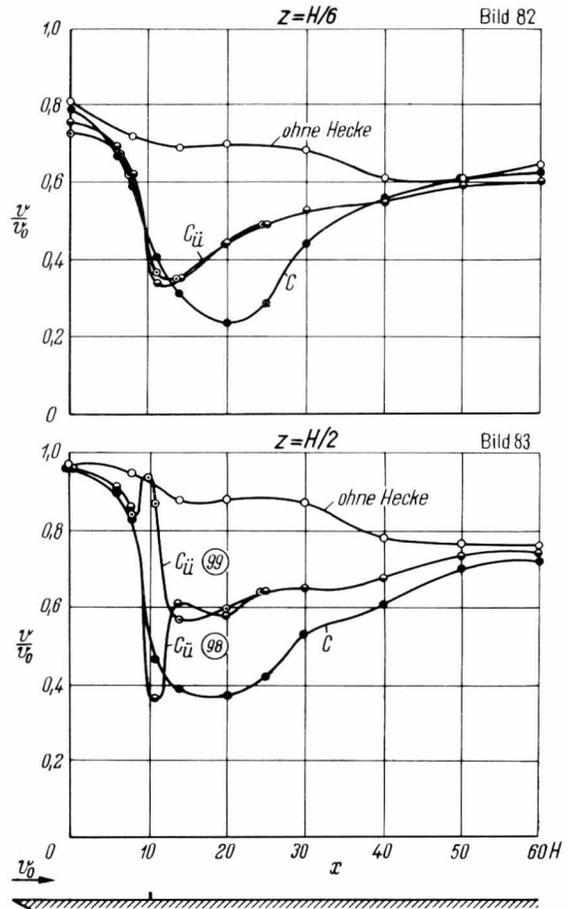
Aus den Windprofilen auf Tafel XIV sind wie seither die Werte für die Höhen  $H/6$  und  $H/2$  herausgezogen und in **Bild 78 und 79** dargestellt. In geringem Abstand vom Boden ( $H/6$ ) liegen die beiden Kurven für die Hecken mit teilweise erhöhter Durchlässigkeit wesentlich weiter auseinander, als in halber Heckenhöhe. Je größer der Abstand von der Hecke ist, desto mehr verwischen sich diese Unterschiede; es kommt dann nur noch auf die Gesamtdurchlässigkeit an.

In **Bild 76/77** wurde der Einfluß einer Abrundung der oberen Kante bei undurchlässigen Hindernissen gezeigt. In **Bild 80 und 81** sind nun die Windverhältnisse für die durchlässigen Heckenmodelle  $C_{0,5}$ ,  $C_{3,75}$  und  $C_{7,5}$  nach **Bild 9 bis 12**, die aus dem Drahtgewebe der Durchlässigkeit  $C$  gebaut waren, dargestellt.

Auf **Tafel XIII** sind die Geschwindigkeitsprofile für die Versuche 95 bis 97 zu finden. Die oben abgerundeten Hindernisse  $C_{3,75}$  und  $C_{7,5}$  liefern eine merklich geringere Schutzwirkung als das scharfkantige Hindernis  $C_{0,5}$ ; der Unterschied ist etwa der gleiche wie bei den undurchlässigen Hindernissen, wie ein Vergleich von **Bild 80/81** mit **Bild 76/77** zeigt. Da die Hindernisse der freien Natur (gewachsene Hecken) an der Oberkante u.a. recht unregelmäßig gestaltet sind, wird man sie kaum als scharfkantig ansehen dürfen. Dieses Ergebnis vermindert den bisher vorhandenen Unterschied zwischen Windkanal- und Freilandversuchen.

Zur Erfassung einer Hecke  $C_u$  mit sogenannten „Überhältern“ sind aus einer Hecke der Durchlässigkeit  $C$  gewisse Stücke in regelmäßigen Abständen herausgeschnitten worden (**Bild 15**). In **Bild 82 und 83** sehen wir den Verlauf der Windkurven in den Höhen  $H/6$  und  $H/2$ , und zwar einmal hinter der Mitte des Überhälters und das andere Mal hinter der Mitte einer Lücke gemessen. Für  $H/6$  ergibt sich kein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Kurven, wohl aber für  $H/2$ . Aber auch hier ist schon nach relativ kurzer Entfernung hinter der Hecke ein Ausgleich festzustellen, so daß die beiden Kurven von  $x = 20 H$  an nahezu zusammenfallen. Im ganzen ist natürlich eine geringere Bremswirkung als bei der durchlaufenden Hecke  $C$  festzustellen.

Auf den **Tafeln XV und XVI** sind alle Messungen an Hecken auf dem Bahndamm (**Bild 16**) zusammengestellt. Da die Lage der Hecke auf dem Bahndamm wechseln mußte, war es möglich, als Nullage ( $x = 10 H$ ) entweder die Lage des Bahndamms oder die der Hecke zu wählen. Wir haben uns für die letztere Möglichkeit entschieden und die Versuche 101 bis 108 auf die Lage der Hecke ( $x = 10 H$ ) bezogen. Nur bei Versuch 100 (Bahndamm allein) bedeutet  $x=10 H$  die Mitte des Bahndamms. **Bild 16** zeigt die verschiedenen Lagen der Hecke  $C_u$ .



**Bild 82 und 83.** Einfluss durchlässiger Hecken  $C_u$  mit „Überhältern“ nach **Bild 15** auf die Windgeschwindigkeit im Vergleich mit der Wirkung einer normalen Hecke  $C$  nach **Bild 5**.

|  |                |
|--|----------------|
| ohne Hecke:                                  | Versuch Nr. 91 |
| mit Hecke $C$ :                              | „ „ 92         |
| mit Hecke $C_u$ , Messung hinter Überhälter: | „ „ 98         |
| „ „ „ Lücke:                                 | „ „ 99         |

Für die Messungen hinter den Überhältern (wie bei Versuch 98) sind in **Bild 84 und 85**, für die Messungen hinter der Lücke (wie bei Versuch 99) sind in **Bild 86 und 87** die üblichen Windkurven in  $H/6$  und  $H/2$  Höhe über dem Boden aufgetragen. Dabei ist zu beachten, daß  $H$  hier immer die Heckenhöhe allein (30 mm) bedeutet. Bei den Versuchen 101, 102, 107, 108 betrug die gesamte Hindernishöhe 45 mm, bei den Versuchen 103 bis 106 sogar 60 mm. Trotzdem sind alle Angaben auf  $H = 30$  mm bezogen.

Die Messungen hinter den Überhältern sind sämtlich bis  $x = 60 H$  durchgeführt, die entsprechenden Messungen hinter den Lücken aber jeweils abgebrochen (meist bis  $x = 30 H$ ), wenn kein wesentlicher Unterschied mehr zwischen den zusammengehörigen Messungen hinter Überhälter oder Lücke festzustellen war. In **Bild 86/87** sind die fehlenden Kurvenstücke ohne Angabe von Meßpunkten entsprechend **Bild 84/85** ergänzt. Die Ergebnisse zeigen, daß die günstigste Lage der Hecke auf dem Bahndamm diejenige oben auf der luvseitigen Kante

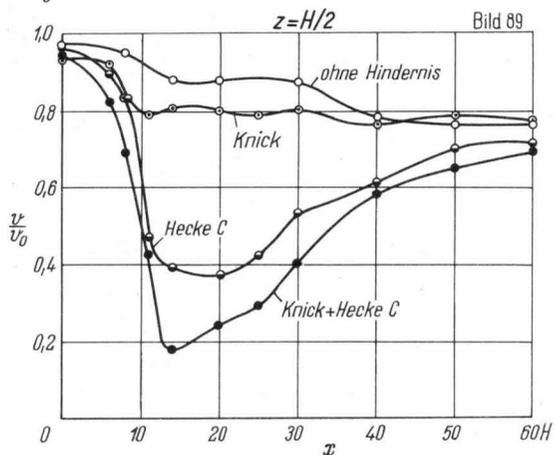
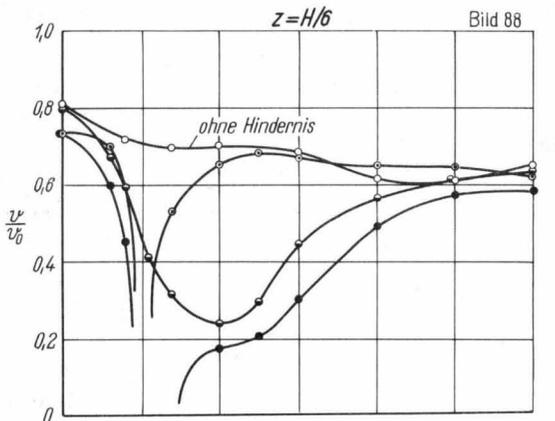
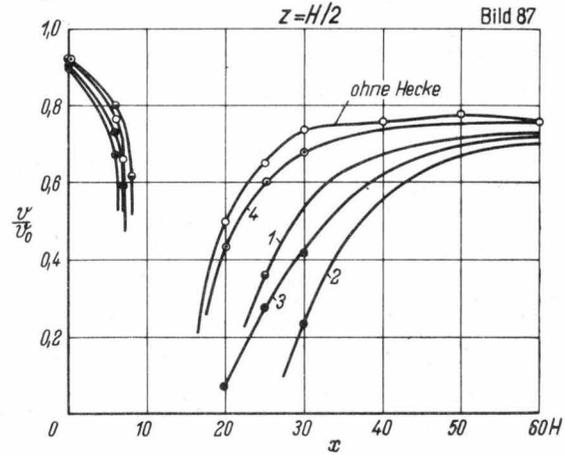
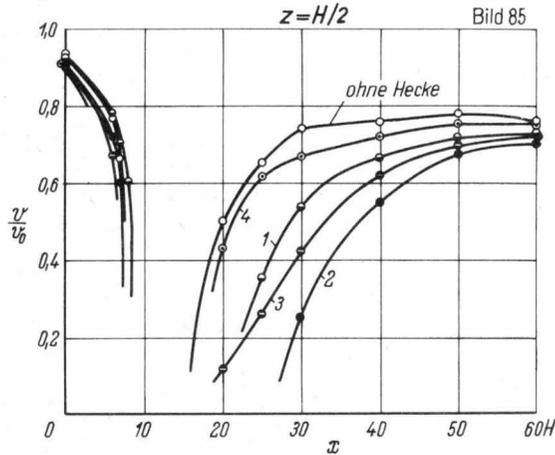
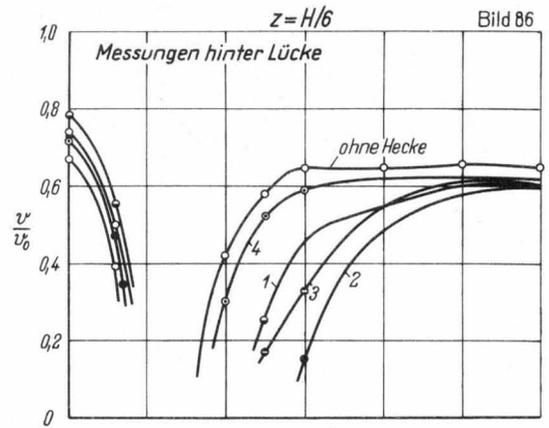
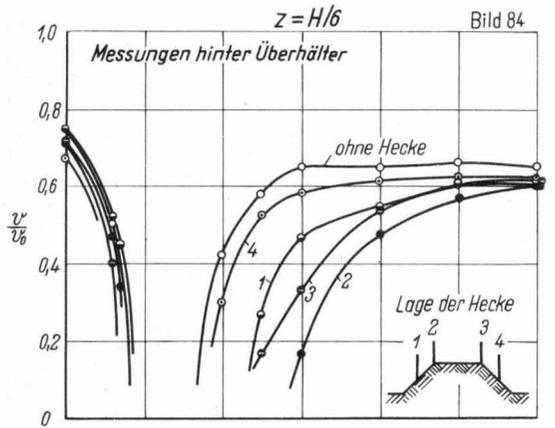


Bild 84 bis 87. Einfluss einer Hecke  $C_u$  nach Bild 15 auf einem Bahndamm (Bild 16) auf die Windgeschwindigkeit je nach Lage der Hecke.

| Bahndamm, allein:              | Versuch Nr. 100 |
|--------------------------------|-----------------|
| mit Hecke $C_u$ in Stellung 1: | 101/102         |
| " " " " " 2:                   | 103/104         |
| " " " " " 3:                   | 105/106         |
| " " " " " 4:                   | 107/108         |

ist, die schlechteste Lage ist die auf halber Höhe der Leeseite, bei der man eine sehr geringe Schutzwirkung findet.

Auf Tafel XVII und Bild 88 und 89 sind die Ergebnisse der Messungen an einem Knick mit einer Hecke  $C$  nach Bild 17 zu finden. Auch hier ist  $H$  immer = 30 mm, obwohl die Höhe des Knicks nur 7,5 mm und infolgedessen die Höhe von Knick und Hecke 37,5 mm betragen. Die Windkurven in Bild 88/89 für  $H/6$  und  $H/2$  sprechen für sich selbst. In grober Annäherung kann man sagen, daß die Bremswirkung von Knick und Hecke sich durch Addition der Bremswirkungen des Knicks allein und der Hecke allein ergeben.

Auf Grund der Versuche 70 bis 75 hatten wir uns entschieden, in Zukunft nur noch raue Böden zu verwenden, da die Windkanalversuche mit rauhem Boden den Freilandmessungen besser entsprechen, als die mit glatten Böden. Durch die Versuche 111 und 112 sollte noch einmal ein Vergleich gewonnen werden (Tafel XIV).

Bild 90 und 91 zeigen den Vergleich der Messungen mit rauhem Boden mit den entsprechenden

Bild 88 und 89. Einfluss einer Hecke  $C$  auf einem Knick nach Bild 17 auf die Windgeschwindigkeit.

|                           |                |
|---------------------------|----------------|
| ohne Hindernis:           | Versuch Nr. 91 |
| mit Hecke $C$ allein:     | " " 92         |
| mit Knick allein:         | " " 109        |
| mit Knick und Hecke $C$ : | " " 110        |

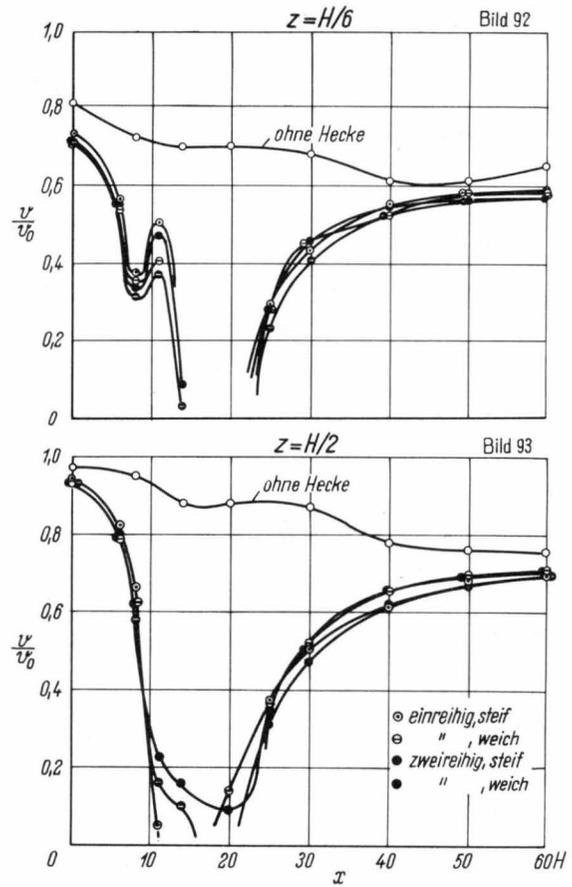
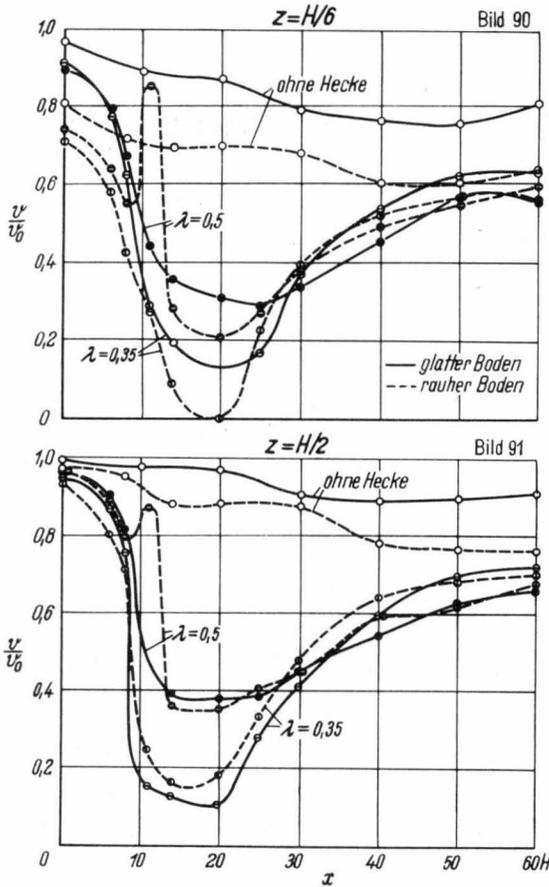


Bild 90 und 91. Schutzwirkung von Hecken über rauhem und glattem Boden.

|                              |             |            |
|------------------------------|-------------|------------|
| ohne Hecke:                  | Versuch Nr. | 58 (glatt) |
|                              | " "         | 91 (rauh)  |
| mit Hecke $\lambda = 0,5$ :  | " "         | 77 (glatt) |
|                              | " "         | 111 (rauh) |
| mit Hecke $\lambda = 0,35$ : | " "         | 80 (glatt) |
|                              | " "         | 112 (rauh) |

Bild 92 und 93. Schutzwirkung von nachgiebigen Hecken nach Bild 25.

|                                      |             |     |
|--------------------------------------|-------------|-----|
| ohne Hecke:                          | Versuch Nr. | 91  |
| nachgiebige Hecke, einreihig, steif: | " "         | 113 |
| " " " " weich:                       | " "         | 114 |
| " " zweireihig, steif:               | " "         | 115 |
| " " " " weich:                       | " "         | 116 |

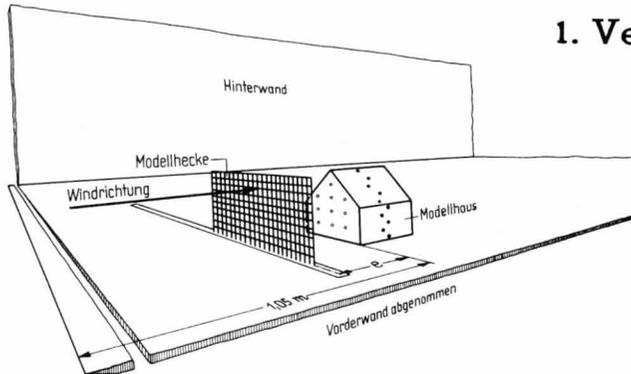
Messungen mit glattem Boden. Die Kurven für rauhen und glatten Boden liegen verhältnismäßig dicht beieinander. Wenn man aber berücksichtigt, daß als Schutzwirkung jeweils nur die Differenz der gemessenen Werte gegenüber denjenigen „ohne Hindernis“ zu betrachten ist, so sieht man, daß diese Schutzwirkung über rauhem Boden wesentlich geringer ist, als über glattem Boden. Das vorher bereits ausgesprochene Ergebnis bestätigt sich also. Um im Windkanalversuch bessere Übereinstimmung mit den Freilandversuchen zu erhalten, tut man gut, einen recht rauhen Boden zu verwenden.

Aus Tafel XVII sind die Meßergebnisse an den nachgiebigen Heckenmodellen (Bild 25) wiedergegeben. In Bild 92 und 93 sind die üblichen Windkurven für die Höhen  $H/6$  und  $H/2$  aufgetragen. Vergleicht man diese Kurven mit früheren Untersuchungen (z.B. Bild 27/28 und Bild 76/77) so erkennt man, daß die aus Borsten aufgebauten Modelle als praktisch undurchlässig und scharfkantig

angesehen werden müssen. Das Maximum in den Kurven für  $H/6$  kurz hinter den Hindernissen erklärt sich durch die Düsenwirkung im untersten Teil, wo durch die Bündelung der Borsten Lücken entstehen (vergl. Bild 25). Da die vier Kurven nahezu zusammenfallen, kann kein nennenswerter Unterschied zwischen den ein- und zweireihigen Anordnungen und zwischen den steiferen und weichen Borsten festgestellt werden. Die Beobachtung der Modelle zeigte, daß sie sich in ihrer Lage nur wenig durch den Wind beeinflussen ließen. Die in der freien Natur so oft beobachtete starke Bewegung von Büschen und Hecken ist nur eine Folge der in der Natur fast immer vorhandenen starken Windschwankungen; bei konstantem Wind würden die Büsche auch im Freien sich auf eine neue Gleichgewichtslage einstellen und dann relativ ruhig stehen. Es ist jedenfalls nicht damit zu rechnen, daß die Nachgiebigkeit eines Hindernisses in dem hier in Frage kommenden Bereich einen wesentlichen Einfluß auf die Windkurven hat.

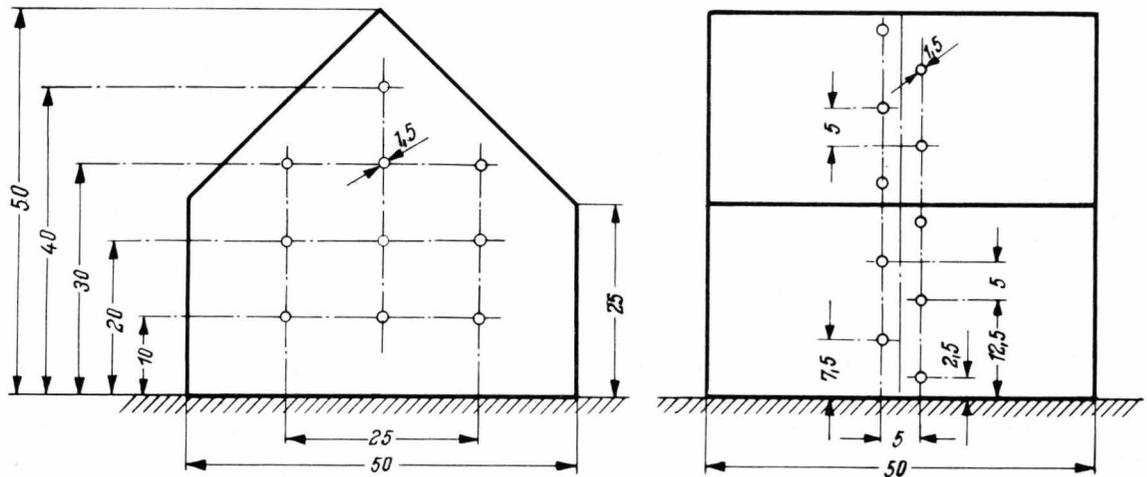
### III. Messungen des Winddruckes auf ein Haus im Schutze einer Hecke (Modellversuche im Windkanal)

#### 1. Versuchstechnik

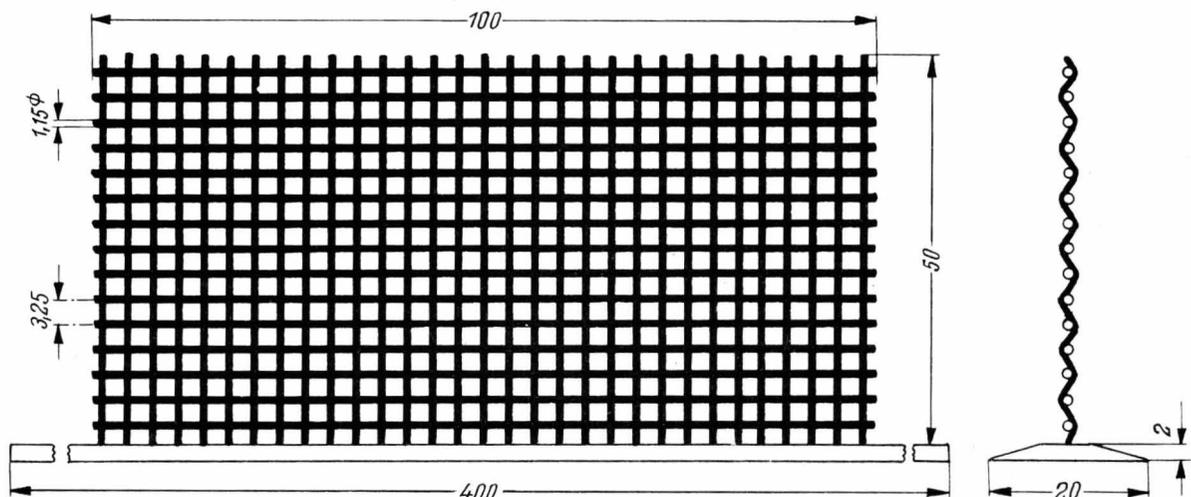


**Bild 94.** Einbau des Hausmodells mit davorstehender Hecke C in den Windkanal (vordere Wand abgenommen).

In die Meßstrecke des Windkanals bzw. des Gebläses wurde der bereits erwähnte oben offene Kasten (2,5 m lang) eingebaut, auf dessen glattem Boden das aus Messing ausgeführte Hausmodell steht. Nach **Bild 94** ist das Hausmodell 1,05 m hinter der abgeschrägten Vorderkante des Bodens in der Mitte zwischen den beiden Seitenwänden aufgebaut. Der Abstand der Seitenwände voneinander ist bei den Versuchen im Windkanal 0,6 m und bei den Versuchen am Gebläse 0,5 m.



**Bild 95.** Modellhaus mit den Messstellen (natürl. Grösse).

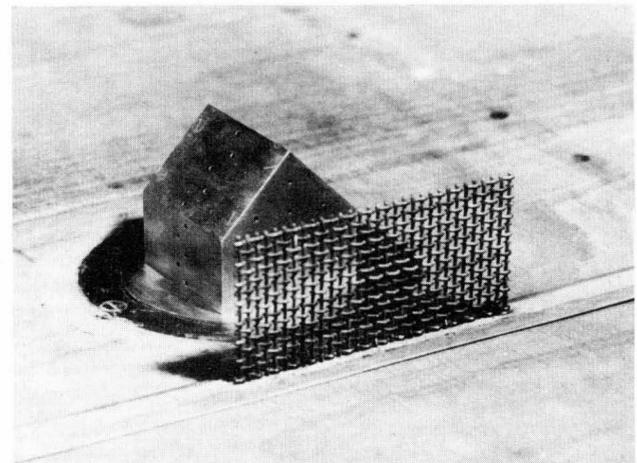
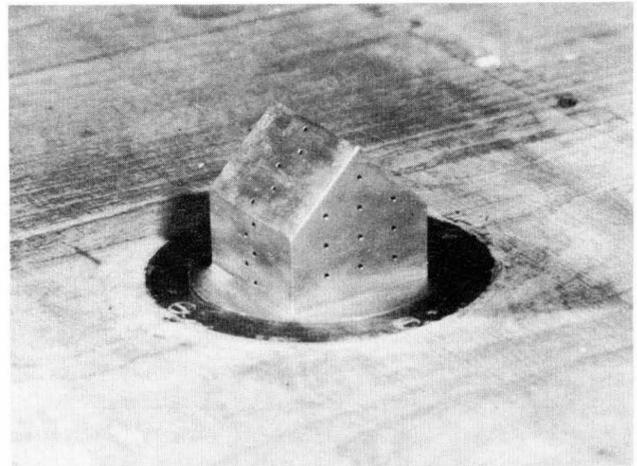


**Bild 96.** Modellhecke (natürliche Grösse).

Das Haus hat einen quadratischen Grundriß von 5 cm Seitenlänge. Die Höhe des Hauses ist ebenfalls 5 cm. Das Dach reicht bis auf 2,5 cm herab und hat somit einen Neigungswinkel von  $45^\circ$ . Die Maße des Hauses sind auch aus **Bild 95** zu ersehen. **Bild 97 und 98** zeigen das eingebaute Hausmodell im Kanal. An den in Bild 95 gekennzeichneten 20 Stellen hat das Haus Anbohrungen zur Druckmessung. Durch eine Verdrehung um  $180^\circ$  können die Meßstellen auf die Gegenseite gebracht und dadurch bei jedem Versuch an 40 Stellen die Drücke auf das Haus gemessen werden. Die Druckleitungen sind nach unten herausgeführt und an ein *Prandtl*-Manometer angeschlossen, von dem die Drücke abgelesen werden.

Die für diese Messungen benutzte Modellhecke hat die gleiche Höhe wie das Haus, also 5 cm (**Bild 96**). Ihre Länge ist entweder 10 cm, also = 2 Haushöhen, oder unendlich, d.h. die Modellhecke geht von Seitenwand zu Seitenwand durch. Sie besteht aus einem Drahtgewebe ( $\sim 3,2 \times 1,0$  mm) mit einer geometrischen Durchlässigkeit von 48% und entspricht somit der Hecke C bei den Messungen der Geschwindigkeitsverteilungen in Abschnitt II. Diese Hecke hatte sich als die günstigste, d.h. als diejenige mit der am meisten leewärts reichenden Schutzwirkung, erwiesen. Dieses Drahtgeflecht hat eine Durchlässigkeit wie etwa eine mitteldichte Weißdornhecke im Sommer [36 bis 38].

Das Modellhaus kann um seinen Mittelpunkt (Schnittpunkt der Diagonalen im Grundriß) gedreht werden. Der Abstand der Hecke vom Haus ist veränderlich. Die Hecke kann ebenfalls um den Hausmittelpunkt geschwenkt werden. Zunächst wurden die auf Tafel XVIII zusammengestellten Versuche 50 bis 57 im Windkanal der T.H. Braunschweig durchgeführt (s. Zahlentafel 1 auf S. 10). Nachdem sich



**Bild 97 und 98.** Modellhaus mit Hecke im Windkanal. Blickrichtung schräg von vorn, also etwa in Windrichtung.

durch einige Vergleichsversuche gezeigt hatte, daß Messungen mit dem kleinen Sortiergebläse [7] praktisch dieselben Ergebnisse hatten wie die entsprechenden Messungen im Windkanal, wurden weitere systematische Meßreihen mit dem Sortiergebläse durchgeführt.

## 2. Übersicht über das Programm

Die Versuche 50 bis 57 (s. Zahlentafel 1) sollen den Einfluß einer durchlässigen Hecke auf die Winddruckverteilung an einem Haus in verschiedenen Lagen feststellen. Das Haus wurde in drei verschiedenen Lagen (Seitenwand zum Wind, Giebelwand zum Wind, Hausecke unter  $45^\circ$  zum Wind) untersucht. Auch für den Abstand zwischen Haus und Hecke wurden drei verschiedene Werte gewählt. Eine Übersicht über die Ergänzungsmessungen mit dem kleinen Sortiergebläse gibt **Zahlentafel 2**. Die Windgeschwindigkeit betrug bei diesen Versuchen nur 9,4 m/s.

Bei den Versuchen 1a bis 12a steht die  $2H$  lange Hecke in verschiedenen Abständen vor dem

Haus; der Abstand wird von  $H/4$  bis  $18H$  variiert. Die Versuche 14a bis 24a beziehen sich mit der gleichen Systematik auf die unendlich lange Hecke.

Bei den Versuchen 25a bis 32a wird das Haus allein unter verschiedenen Winkeln (jeweils um  $22,5^\circ$  weiter gedreht) vermessen. Die gleiche Variation liegt bei den Versuchen 33a bis 40a für einen Abstand zwischen Haus und Hecke von  $H/4$  und bei den Versuchen 44a bis 48a von  $1H$  vor; dabei werden Haus und Hecke gemeinsam verdreht.

Während bei den Versuchen 1a bis 24a die Seitenwand des Hauses dem Wind zugekehrt ist, gilt dies bei den Versuchen 1b bis 24b für die Giebelwand. Ebenso liegt die Hecke bei den Versuchen

**Zahlentafel 2.** Übersicht über die Versuche mit Haus und Hecke (im Sortiergebläse)

| Versuch   | Tafel | Haus              |            |                  | Hecke C           |                   |   | Versuch | Tafel      | Haus             |                   |                   | Hecke C |                  |                   |
|---|-------|-------------------|------------|------------------|-------------------|-------------------|---|---------|------------|------------------|-------------------|-------------------|---------|------------------|-------------------|
|   |       | Stellung zum Wind | Länge      | Abstand vom Haus | Stellung zum Wind | Stellung zum Wind | Länge   |         |            | Abstand vom Haus | Stellung zum Wind | Stellung zum Wind | Länge   | Abstand vom Haus | Stellung zum Wind |
| 1 a   | 1)    | XIX               | Seitenwand | —                | —                 | —                 | 1 b   | 5)      | XXIV       | Giebelwand       | —                 | —                 | —       | —                |                   |
| 2 a   | 2)    | XIX               | „          | 2H               | 1/4 H             | 90°               | 2 b   | 6)      | XXIV       | „                | 2H                | 1/4 H             | 90°     |                  |                   |
| 3 a   | 3)    | XIX               | „          | „                | 1 H               | „                 | 3 b   | XXIV    | „          | „                | 1 H               | „                 | „       |                  |                   |
| 4 a   | 4)    | XIX               | „          | „                | 2 H               | „                 | 4 b   | XXIV    | „          | „                | 2 H               | „                 | „       |                  |                   |
| 5 a   |       | XIX               | „          | „                | 4 H               | „                 | 5 b   | XXIV    | „          | „                | 4 H               | „                 | „       |                  |                   |
| 6 a   |       | XIX               | „          | „                | 6 H               | „                 | 6 b   | XXIV    | „          | „                | 6 H               | „                 | „       |                  |                   |
| 7 a   |       | XIX               | „          | „                | 8 H               | „                 | 7 b   | XXIV    | „          | „                | 8 H               | „                 | „       |                  |                   |
| 8 a   |       | XIX               | „          | „                | 10 H              | „                 | 8 b   | XXIV    | „          | „                | 10 H              | „                 | „       |                  |                   |
| 9 a   |       | XIX               | „          | „                | 12 H              | „                 | 9 b   | XXIV    | „          | „                | 12 H              | „                 | „       |                  |                   |
| 10 a  |       | XIX               | „          | „                | 14 H              | „                 | 10 b  | XXIV    | „          | „                | 14 H              | „                 | „       |                  |                   |
| 11 a  |       | XIX               | „          | „                | 16 H              | „                 | 11 b  | XXIV    | „          | „                | 16 H              | „                 | „       |                  |                   |
| 12 a  |       | XIX               | „          | „                | 18 H              | „                 | 12 b  | XXIV    | „          | „                | 18 H              | „                 | „       |                  |                   |
| 14 a  |       | XX                | Seitenwand | ∞                | 1/4 H             | 90°               | 14 b  | XXV     | Giebelwand | ∞                | 1/4 H             | 90°               |         |                  |                   |
| 15 a  |       | XX                | „          | „                | 1 H               | „                 | 15 b  | XXV     | „          | „                | 1 H               | „                 |         |                  |                   |
| 16 a  |       | XX                | „          | „                | 2 H               | „                 | 16 b  | XXV     | „          | „                | 2 H               | „                 |         |                  |                   |
| 17 a  |       | XX                | „          | „                | 4 H               | „                 | 17 b  | XXV     | „          | „                | 4 H               | „                 |         |                  |                   |
| 18 a  |       | XX                | „          | „                | 6 H               | „                 | 18 b  | XXV     | „          | „                | 6 H               | „                 |         |                  |                   |
| 19 a  |       | XX                | „          | „                | 8 H               | „                 | 19 b  | XXV     | „          | „                | 8 H               | „                 |         |                  |                   |
| 20 a  |       | XX                | „          | „                | 10 H              | „                 | 20 b  | XXV     | „          | „                | 10 H              | „                 |         |                  |                   |
| 21 a  |       | XX                | „          | „                | 12 H              | „                 | 21 b  | XXV     | „          | „                | 12 H              | „                 |         |                  |                   |
| 22 a  |       | XX                | „          | „                | 14 H              | „                 | 22 b  | XXV     | „          | „                | 14 H              | „                 |         |                  |                   |
| 23 a  |       | XX                | „          | „                | 16 H              | „                 | 23 b  | XXV     | „          | „                | 16 H              | „                 |         |                  |                   |
| 24 a  |       | XX                | „          | „                | 18 H              | „                 | 24 b  | XXV     | „          | „                | 18 H              | „                 |         |                  |                   |
| 25 a  |       | XXI               | 22,5°      | —                | —                 | —                 | 1) entspr. Vers. 50, Zahlentafel 1<br>2) „ „ 51, „<br>3) „ „ 52, „<br>4) „ „ 53, „<br>5) = Versuch 28 a entspr. Vers. 54, Zahlentafel 1<br>6) entspr. Vers. 55, Zahlentafel 1 |         |            |                  |                   |                   |         |                  |                   |
| 26 a  |       | XXI               | 45°        | —                | —                 | —                 |   |         |            |                  |                   |                   |         |                  |                   |
| 27 a  |       | XXI               | 67,5°      | —                | —                 | —                 |   |         |            |                  |                   |                   |         |                  |                   |
| 28 a  |       | XXI               | 90°        | —                | —                 | —                 |   |         |            |                  |                   |                   |         |                  |                   |
| 29 a  |       | XXI               | 112,5°     | —                | —                 | —                 |   |         |            |                  |                   |                   |         |                  |                   |
| 30 a  |       | XXI               | 135°       | —                | —                 | —                 |   |         |            |                  |                   |                   |         |                  |                   |
| 31 a  |       | XXI               | 157,5°     | —                | —                 | —                 |   |         |            |                  |                   |                   |         |                  |                   |
| 32 a  |       | XXI               | 180°       | —                | —                 | —                 |   |         |            |                  |                   |                   |         |                  |                   |
| Haus und Hecke werden gemeinsam von Versuch zu Versuch um 22,5° gedreht |       |                   |            |                  |                   |                   |   |         |            |                  |                   |                   |         |                  |                   |
| 33 a  |       | XXII              | 22,5°      | 2 H              | 1/4 H             | 112,5°            |   |         |            |                  |                   |                   | 33 b    | XXVI             | 22,5°             |
| 34 a  |       | XXII              | 45°        | „                | „                 | 135°              | 34 b  | XXVI    | 45°        | „                | „                 | 135°              |         |                  |                   |
| 35 a  |       | XXII              | 67,5°      | „                | „                 | 157,5°            | 35 b  | XXVI    | 67,5°      | „                | „                 | 157,5°            |         |                  |                   |
| 36 a  |       | XXII              | 90°        | „                | „                 | 180°=0°           | 36 b  | XXVI    | 90°        | „                | „                 | 180°=0°           |         |                  |                   |
| 37 a  |       | XXII              | 112,5°     | „                | „                 | 22,5°             | 37 b  | XXVI    | 112,5°     | „                | „                 | 22,5°             |         |                  |                   |
| 38 a  |       | XXII              | 135°       | „                | „                 | 45°               | 38 b  | XXVI    | 135°       | „                | „                 | 45°               |         |                  |                   |
| 39 a  |       | XXII              | 157,5°     | „                | „                 | 67,5°             | 39 b  | XXVI    | 157,5°     | „                | „                 | 67,5°             |         |                  |                   |
| 40 a  |       | XXII              | 180°       | „                | „                 | 90°               | 40 b  | XXVI    | 180°       | „                | „                 | 90°               |         |                  |                   |
| 41 a  |       | XXIII             | 22,5°      | 2H               | 1H                | 112,5°            | 41 b  | XXVII   | 22,5°      | 2H               | 1H                | 112,5°            |         |                  |                   |
| 42 a  |       | XXIII             | 45°        | „                | „                 | 135°              | 42 b  | XXVII   | 45°        | „                | „                 | 135°              |         |                  |                   |
| 43 a  |       | XXIII             | 67,5°      | „                | „                 | 157,5°            | 43 b  | XXVII   | 67,5°      | „                | „                 | 157,5°            |         |                  |                   |
| 44 a  |       | XXIII             | 90°        | „                | „                 | 180°=0°           | 44 b  | XXVII   | 90°        | „                | „                 | 180°=0°           |         |                  |                   |
| 45 a  |       | XXIII             | 112,5°     | „                | „                 | 22,5°             | 45 b  | XXVII   | 112,5°     | „                | „                 | 22,5°             |         |                  |                   |
| 46 a  |       | XXIII             | 135°       | „                | „                 | 45°               | 46 b  | XXVII   | 135°       | „                | „                 | 45°               |         |                  |                   |
| 47 a  |       | XXIII             | 157,5°     | „                | „                 | 67,5°             | 47 b  | XXVII   | 157,5°     | „                | „                 | 67,5°             |         |                  |                   |
| 48 a  |       | XXIII             | 180°       | „                | „                 | 90°               | 48 b  | XXVII   | 180°       | „                | „                 | 90°               |         |                  |                   |

33a bis 48a parallel zur Seitenwand und bei den Versuchen 33b bis 48b parallel zur Giebelwand des Hauses.

Die Versuche 25b bis 32b entsprechen in anderer Reihenfolge den Versuchen 25a bis 32a; eine doppelte Ausführung war nicht erforderlich.

### 3. Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche sind in Bild 100 bis 103 und in den Tafeln XVIII bis XXVII dargestellt, wobei einige Versuche ausgelassen wurden, um Platz zu sparen. Die kleine Skizze links auf den Tafeln und Bildern gibt für jeden Versuch den jeweiligen Lageplan im Grundriß, Aufriß und Seitenriß. Die Windrichtung ist im Aufriß eingetragen. Die beiden zugehörigen Kurvenbilder zeigen die Druckverteilung auf allen vier Seiten des Hauses ein-

schließlich der Dächer. Die kleinen Buchstaben a, b, c, d kennzeichnen im Grundriß die vier Seiten und in den Kurvenbildern die zugehörigen Druckverteilungen. Diese sind für die Seitenwand mit Dach in den meisten Fällen zu je einer Kurve zusammengefaßt, obwohl die Anbohrungen am Haus zur Vermeidung der gegenseitigen Beeinflussung von der Mittellinie aus abwechselnd nach links und rechts etwas versetzt sind. In einigen Fällen ist die

Druckänderung längs der Seitenwand jedoch so groß, daß sich die Druckwerte rechts der Mittellinie so sehr von denen links der Mittellinie unterscheiden, daß man sie nicht durch einen Kurvenzug zusammenfassen kann. In diesen Fällen sind zwei Kurven gezeichnet. Für die Giebelwände sind jeweils drei Kurven aufgetragen, wobei die Meßpunkte den Anbohrungen entsprechend verschieden gekennzeichnet sind.

Sämtliche Drücke sind dimensionslos dargestellt, d.h. die gemessenen Drücke  $p$  sind durch den Staudruck  $q = (\rho/2) \cdot v^2$  dividiert ( $\rho =$  Luftdichte,  $v =$  Windgeschwindigkeit) und die Verhältniszahlen  $p/q$  aufgetragen. Die Darstellung wird auf diese Weise unabhängig von der Windgeschwindigkeit im Modellversuch. Wie schon *Eiffel* [12] 1914 durch Windkanalversuche an Hausmodellen nachwies, erhält man bei verschiedenen Modellgrößen und Windgeschwindigkeiten praktisch die gleichen Kurven; d.h. aber, daß die Druckverteilungen weitgehend unabhängig von der *Re*-Zahl [44] sind.

Zur Ermittlung der Drücke sind die Werte  $p/q$  aus den Tafeln zu entnehmen und mit dem jeweiligen Staudruck  $q$  zu multiplizieren.

Alle Druckkräfte sind auf den Tafeln durch ein Pluszeichen (+), alle Saugkräfte durch ein Minuszeichen (-) gekennzeichnet; beide werden in der Regel von den Hauswänden aus nach außen aufgetragen, um Überschneidungen zu vermeiden. Nur wenn auf derselben Wand Druck- und Saugkräfte gemessen wurden, sind erstere nach außen, letztere nach innen aufgetragen.

Die Versuche 1a bis 4a (Tafel XIX) im Gebläse entsprechen den Versuchen 50 bis 53 (Tafel XVIII) im Windkanal, ebenso die Versuche 1b und 2b (Tafel XXIV) den Versuchen 54 und 55 (Tafel XVIII). Sie wurden angestellt, um durch den Vergleich die Verwendbarkeit des relativ kleinen Gebläses für Versuche dieser Art zu prüfen. Die Tatsache, daß zwischen den Ergebnissen der im Gebläse durchgeführten Versuche (mit dem Zusatz *a* und *b*) und den Ergebnissen der Windkanalversuche (ohne Zusatz) kein merklicher Unterschied festgestellt werden kann, bestätigt noch einmal das *Eiffelsche* Versuchsergebnis [12] (vergl. Tafel XVIII, XIX und XXIV). Außerdem aber gibt diese Tatsache die Berechtigung, derartige Versuchsreihen überhaupt in einem solch kleinen Gebläse mit nur  $\sim 10$  m/s Windgeschwindigkeit durchzuführen.

Tafel XIX mit den Messungen 1a bis 12a zeigt die Druckverteilung auf das Modellhaus, das mit seiner Seitenwand (im Gegensatz zur Giebelwand) zum Wind steht, und zeigt ferner, wie sich diese Druckverteilung unter dem Einfluß einer Hecke in verschiedenen Abständen vor dem Hause ändert.

Auf der dem Winde zugekehrten Seitenwand des Hauses ohne Hecke (Versuch 1a und 50) herrscht ein starker Überdruck, der dann längs des Daches bis zum First hin fast auf Null abfällt. Auf der gegenüberliegenden Seitenwand und dem zugehörigen Dach wird ein recht gleichmäßiger Unterdruck gemessen. Auch auf den beiden Giebelwänden herrscht Unterdruck, der kurz hinter der zuerst vom Winde umströmten Hausecke am stärksten ist und dann merklich abfällt. Diese Druckverteilung stimmt mit entsprechenden Ergebnissen früherer Messungen [12 und 44] gut überein.

Wie diese Druckverteilung durch eine vor dem Hause stehende Hecke verändert wird, zeigen die Ergebnisse der Versuche 2a bis 12a. Die Hecke hat dabei die gleiche Höhe wie das Haus und die doppelte Länge. Die Druck- und Saugkräfte werden durch die Hecke deutlich herabgesetzt. Diese Verminderung ist abhängig vom Abstand zwischen Haus und Hecke. Die größte Wirkung hat nicht die nur  $0,25 H$  vor dem Hause stehende Hecke, sondern die weiter weg stehenden Hecken. (Im Folgenden wird darauf ausführlicher eingegangen.) Eine Klärung dieses gemessenen Winddruckabfalls erhält man ganz zwanglos aus vielen eigenen und fremden Windkanal- und Freilandversuchen [36 bis 41], wonach die Windgeschwindigkeit hinter einer durchlässigen Hecke zunächst noch absinkt und erst in größerer Entfernung wieder ansteigt. Entsprechend der Windgeschwindigkeitszunahme wachsen auch die Druck- und Saugkräfte auf das Haus erst bei einem größeren Heckenabstand wieder an. Selbst bei einer Heckenentfernung von  $18 H$  vor dem Hause ist der Druck auf das Haus immer noch geringer als beim Haus ohne Hecke. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß mit großer Wahrscheinlichkeit bei der Übertragung der Modellversuchsergebnisse auf die Wirklichkeit die Entfernungen zwischen Haus und Hecke mit dem gleichen Umrechnungsfaktor (etwa 0,5) zu multiplizieren sind wie bei den Geschwindigkeitsmessungen im vorangehenden Abschnitt II. Das Minimum der Winddruckkräfte, das bei unseren Messungen etwa bei Entfernungen zwischen  $4 H$  und  $6 H$  liegt, wird in der freien Natur also etwa zwischen  $2 H$  und  $3 H$  auftreten.

**Bild 99** ist einer sehr sorgfältigen Untersuchung von *Nägeli* [37] entnommen und zeigt die Zusammenstellung der Windgeschwindigkeitskurven in Luv und Lee von 12 verschiedenen Windschutzobjekten im Freien. Das Minimum der Kurven liegt deutlich auf der Leeseite in einem Abstände von der Hecke, der das ein- bis sechsfache der Heckenhöhe beträgt. Mit diesen Geschwindigkeitsmessungen stehen unsere Winddruckmessungen also nicht im Widerspruch.

Die Messungen, deren Ergebnisse Tafel XX bringt, unterscheiden sich von denen der Tafel XIX nur

dadurch, daß in diesem Falle eine unendlich lange Hecke vor das Haus gesetzt wurde; d.h. daß die Hecke quer durch unseren Versuchskasten von Seitenwand zu Seitenwand reichte. Wie ein Vergleich der beiden Tafeln XIX und XX leicht erkennen läßt, unterscheiden sich die Ergebnisse nicht wesentlich. Auch hier sinken die Druck- und Saugkräfte auf das Haus mit zunehmendem Heckenabstand auf

Der auf das Haus wirkende mittlere Druck läßt sich aus dem Druck auf die Vorderseite und dem Sog auf die Rückseite, beide in Windrichtung wirkend, berechnen. Die Drücke auf die Wände des Hauses, die parallel zur Windrichtung liegen, heben sich bei symmetrischer Anblasung auf. Summiert man der Einfachheit halber die an je 10 Stellen gemessenen Druck- und Saugkräfte auf der Vor-

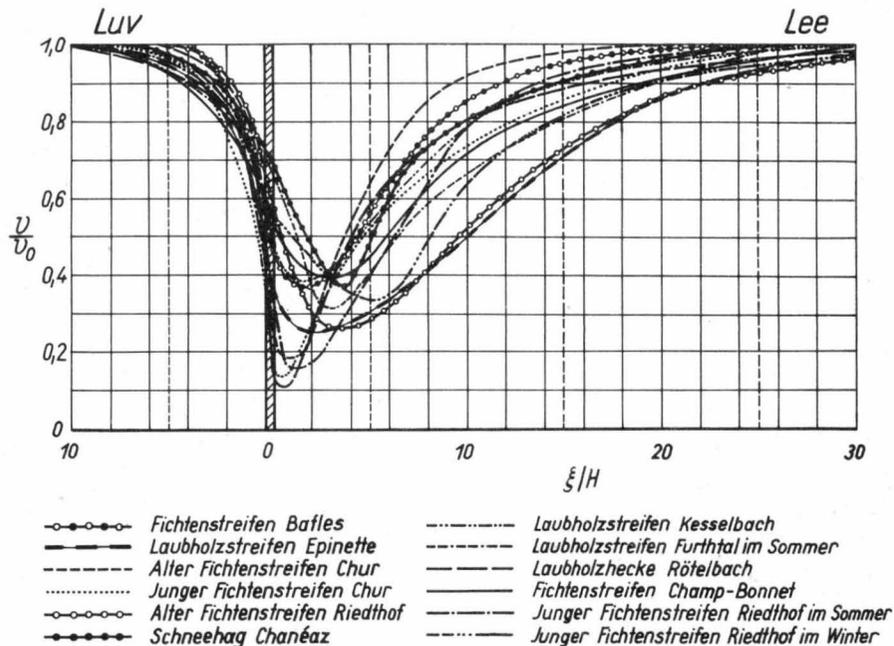


Bild 99. Windverteilung in Luv und Lee von Windschutzstreifen im Freien nach Nägeli [36, 37].

ein Minimum und steigen dann langsam wieder an; das Minimum liegt jetzt etwa bei einer Entfernung zwischen Haus und Hecke von  $10 H$ , bei entsprechender Anordnung in der freien Natur etwa von  $5 H$ .

Die Tafeln XXIV und XXV mit den Versuchsnummern 1b bis 24b zeigen die Ergebnisse der Messungen, bei denen der Wind auf die Giebelwand des Hauses bläst. Auf der dem Winde zugekehrten Giebelwand herrscht wieder Überdruck, auf allen anderen Seiten dagegen Unterdruck (Versuchsnummer 1b). Auffallend niedrig ist der Sog auf der rückwärtigen Giebelwand. Die vor das Haus gestellte Hecke verringert den Winddruck auf die angeblasene Giebelwand und die beiden Seitenwände, erhöht jedoch den Sog geringfügig auf der windabgewandten Giebelwand bei kleinem Heckenabstand. Mit zunehmendem Heckenabstand verringern sich auch bei diesen Versuchen die Druck- und Saugkräfte auf allen Seiten des Hauses, sowohl für die Hecke, die die doppelte Hausbreite hat, als auch für die Hecke mit unendlicher Breite.

Um den Einfluß des Abstandes zwischen Haus und Hecke auf den Winddruck am Haus deutlicher zu machen, wurden die gemessenen Drücke zusammengefaßt und in Abhängigkeit von dem Abstand  $e$  zwischen Haus und Hecke dargestellt (Bild 101/102).

der- und Hinterseite des Hauses unter Berücksichtigung ihrer Vorzeichen und Richtungen und dividiert man diese Summe durch die Anzahl (10) der Meßpunkte, so erhält man den mittleren Druck  $p_m$ , den wir als ein Maß für die gesamte Windwirkung auf das Haus ansehen können. Der Quotient  $p_m/q$  entspricht einem Widerstandsbeiwert. Bei dieser Auswertung ist gewissermaßen angenommen, daß zu jeder Druckmeßstelle ein gleich großes Flächenstück gehört, und daß der Druck auf diesen Flächenstücken jeweils konstant ist. Die unmittelbare Addition der auf den Seitenwänden und dem Dach gemessenen Druck- und Saugkräfte (ohne Berücksichtigung von Winkelfunktionen) ist berechtigt, wie Bild 100 zeigt. Wirkt der Druck  $p$  auf ein Flächenelement  $dF$ , das mit der Horizontalen den Winkel  $\varphi$  bildet, so ist  $dP = p \cdot \sin \varphi \cdot dF$  die in horizontaler Richtung wirkende Kraft.  $dF \cdot \sin \varphi$  ist aber die Projektion von  $dF$  in vertikaler Richtung (im Bild 100 mit  $dF_y$  bezeichnet). Also ist  $dP = p \cdot dF_y$ , d.h.

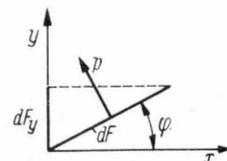


Bild 100. Bestimmung des Druckes auf schrägen Flächen.

man kann die gemessenen Druckkräfte unmittelbar über den Flächenprojektionen auftragen und summieren oder integrieren.

In **Bild 101** ist der Quotient  $p_m/q$  für verschiedene Anordnungen über dem Heckenabstand  $e$  (bezogen auf  $H$ ) aufgetragen. Die Kurven fallen für kleine  $e$  steil ab und haben dann ein flaches Minimum bei einem Heckenabstand von etwa 5 bis 10  $H$ ; danach steigen sie langsam wieder an und erreichen bei dem größten gemessenen Heckenabstand von 18  $H$  noch nicht wieder den Wert des Hauses ohne Hecke. Dabei zeigt die unendlich lange Hecke ein wesentlich flacheres Minimum und ein schwächeres Ansteigen als die nur 2  $H$  lange Hecke. Dies ist auch einleuchtend. Die an der 2  $H$  langen Hecke seitlich ausweichende Luft hat als Verdrängungsströmung eine höhere Geschwindigkeit als die ungestörte Luft und beschleunigt nun ihrerseits die hinter Haus und Hecke verzögerte Strömung. Bei der unendlich langen Hecke fällt diese Beschleunigung weg.

Während **Bild 101** die Windwirkung auf das Haus, das mit seiner Seitenwand zum Winde steht, wiedergibt, zeigt **Bild 102** die entsprechenden Kurven für das Haus, dessen Giebelwand angeblasen wird. Die Abhängigkeit der Größe  $p_m/q$  von  $e$  ist in beiden Bildern nahezu gleich.

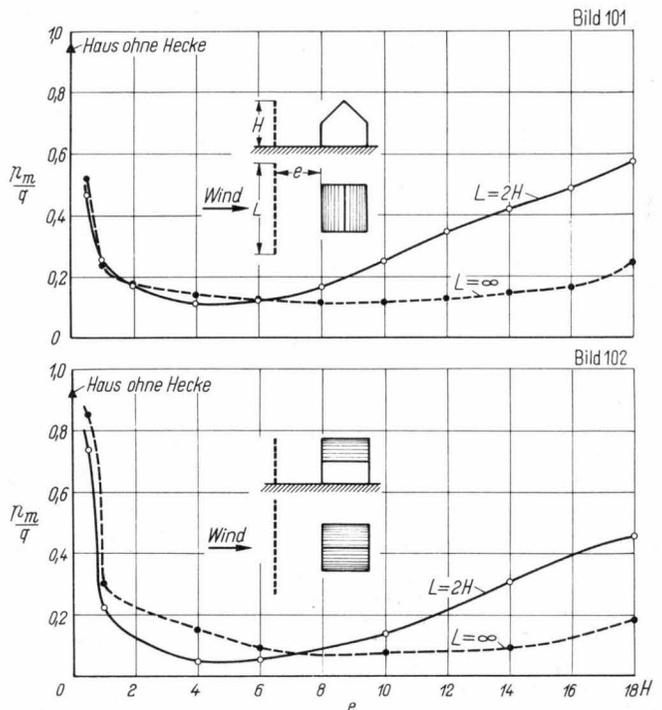
Auch hier müssen, wie schon erwähnt, bei der Übertragung der Windkanalergebnisse auf die freie Natur die relativen Abstände  $e/H$  zwischen Haus und Hecke mit einem Umrechnungsfaktor (etwa 0,5) multipliziert werden. Der günstigste Abstand der Hecke vom Haus ist demnach in der freien Natur bei 2,5 bis 5  $H$  zu erwarten, in guter Übereinstimmung mit dem Ort des Geschwindigkeitsminimums (**Bild 29 bis 32**).

Die im folgenden beschriebenen Tafeln geben die Ergebnisse von Versuchsreihen wieder, bei denen einmal das Haus allein und zum anderen das Haus mit der davorstehenden Hecke aus verschiedenen Richtungen vom Winde angeblasen wurden, Haus und Hecke konnten um eine lotrechte Achse durch den Mittelpunkt des Hausgrundrisses gedreht werden. Bei der Darstellung der Meßergebnisse erwies es sich aber als zweckmäßig, das Haus als feststehend zu betrachten und den Windvektor um das Haus drehen zu lassen.

Bei der Wanderung des Windes um das Haus (s. **Tafel XXI**) erkennt man deutlich, wie das Druckgebiet am Hause sich langsam von der vorderen Hausseite über die Giebelwand zur hinteren Seite verlagert. Auch das Unterdruckgebiet auf den drei anderen Hausseiten verlagert sich sinngemäß.

Die auf **Tafel XXI** wiedergegebenen Versuchsergebnisse sind die Vergleichsgrundlage für die weiteren Versuche 33 bis 48. Steht das Hausmodell mit seiner Seitenwand parallel zur Hecke (**Tafeln XXII**

und **XXIII**), so haben die Versuchsnummern den Zusatz  $a$ ; steht es jedoch mit der Giebelwand parallel zur Hecke (**Tafel XXVI und XXVII**), wurde der Zusatz  $b$  verwandt. Versuche mit dem gleichen Winkel zwischen der Symmetrieachse von Haus und Hecke und der Windrichtung haben die gleiche Versuchsnummer. Dabei entsprechen sich die Versuche 1  $b$  und 28  $a$ .



**Bild 101.** Der mit dem Staudruck dimensionslos gemachte mittlere Gesamtdruck auf das Haus  $p_m/q$  in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Haus und Hecke. Das Haus ist mit einer Seitenwand zum Winde hin gerichtet.

**Bild 102.** Der mit dem Staudruck dimensionslos gemachte mittlere Gesamtdruck auf das Haus  $p_m/q$  in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Haus und Hecke. Das Haus steht mit einer Giebelwand zum Winde.

$p_m$  mittlerer Gesamtdruck  
 $q$  Staudruck

**Tafel XXII und XXVI** enthalten den Einfluß des Winkels zwischen Hecke und Wind für den Hausabstand  $e = H/4$ , **Tafel XXIII und XXVII** das Gleiche für  $e = H$ . Wird der Windvektor aus der zur Hecke senkrechten Richtung (**Versuch 2a, Tafel XIX**) um  $22,5^\circ$  gedreht (**Versuch 33a, Tafel XXII**), so zeigen sich bereits gewisse Veränderungen in der Druckverteilung. Der Druck auf der dem Wind zugekehrten Seite fällt ab. Ebenso verringern sich die Saugkräfte auf den dem Winde ursprünglich parallelen Wänden, während auf der rückwärtigen Wand keine merkliche Verminderung des Soges festzustellen ist. Vergleicht man **Versuch 33a** mit **Versuch 25a (Tafel XXI)**, so ist der Heckeneinfluß bei gleichbleibender Anblasrichtung ( $22,5^\circ$ ) leicht zu erkennen.

Versuch 41a (Tafel XXIII) zeigt im Vergleich mit 3a (Tafel XIX) den Einfluß des Winkels zwischen Hecke und Wind wie Versuch 33a.

Steht das Haus mit der Giebelwand parallel zur Hecke, so erhalten wir ein ganz analoges Verhalten der Drücke wie bei der Stellung der Hausseitenwand parallel zur Hecke. Man erkennt das deutlich durch Vergleich der Versuche 33b (Tafel XXVI) mit 2b (Tafel XXIV) und 41b (Tafel XXVII) mit 3b (Tafel XXIV).

Wird der Windvektor weiter um das Haus herumgedreht, so sehen wir bei allen Versuchsanordnungen ähnliche Wirkungen. Bei Winkeln von  $45^\circ$  und  $135^\circ$ , d.h. bei Anblasung in Richtung der Diagonale des Hausgrundrisses, erfahren die beiden dem Winde zugekehrten Seiten Druckkräfte. Bei Winkeln von  $22,5^\circ$ ,  $67,5^\circ$ ,  $112,5^\circ$  und  $157,5^\circ$  zeigt die stärker vom Winde getroffene Hauswand selbstverständlich Druckkräfte, während die schwächer getroffene Wand nahezu drucklos ist; das gilt sowohl für das Haus allein (Tafel XXI) als auch für das Haus mit Hecke im Abstand  $1 H$  (Tafeln XXIII und XXVII), während für das Haus mit Hecke im Abstand  $H/4$  (Tafeln XXII und XXVI) die Verhältnisse etwas undurchsichtiger sind. Man vergleiche hierzu

|              |                |
|--------------|----------------|
| die Versuche | 33a, 41a, 25a; |
| " "          | 35a, 43a, 27a; |
| " "          | 37a, 45a, 29a; |
| " "          | 39a, 47a, 31a; |
| " "          | 33b, 41b, 29a; |
| " "          | 35b, 43b, 31a; |
| " "          | 37b, 45b, 25a; |
| " "          | 39b, 47b, 27a. |

Bei jedem dieser Vergleiche wandert die Hecke gewissermaßen von  $e = H/4$  über  $1 H$  nach  $\infty$ .

Wenn der Heckenabstand  $e = H/4$  ist und der Wind parallel zur Hecke oder sogar schräg von hinten bläst (Versuche 36a bis 40a, Tafel XXII), zeigen die Druckanbohrungen auf der Hausseite 2,5 mm vom Mittelschnitt nach rechts wesentlich andere Drücke an als die nach links liegenden Bohrungen. Es ist in diesen Fällen nicht mehr möglich, nur eine Druckkurve zu zeichnen (vgl. die Bemerkungen dazu auf Seite 37). In den Versuchen 36b bis 40b zeigt sich in den drei Meßschnitten ebenfalls dieser starke Druckabfall längs der zur Hecke zeigenden Giebelwand. Bei dem Heckenabstand  $1 H$  ist dieser Effekt schwächer (Versuch 44a bis 47a und 44b bis 47b), aber auch bei den Messungen ohne Hecke (Versuche 26a, 28a, 30a) noch zu bemerken.

Die vom Winde angeblasenen Hausseiten ändern ihre Druckverteilung gegenüber den Messungen ohne Hecke am wenigsten, mit Ausnahme natürlich derjenigen Fälle, wo der Wind erst die Hecke und dann das Haus trifft (etwa  $0^\circ$  bis  $45^\circ$  Drehung). Der Sog auf der dem Winde abgewandten Seite ändert sich gegenüber den Messungen ohne Hecke nicht wesentlich.

Es bleibt nun noch übrig, die Versuche 56 und 57 auf Tafel XVIII zu erörtern. Die anderen auf Tafel XVIII wiedergegebenen Versuchsergebnisse sind bei der Besprechung der Tafeln XIX und XXIV mit erläutert worden. Die auf Tafel XVIII zusammengestellten Versuche, die im Windkanal der T.H. Braunschweig stattfanden, liegen zeitlich weit vor den anderen Versuchen. Da zunächst nicht zu erwarten war, daß mit dem Gebläse brauchbare Versuche zu dieser Frage gewonnen werden könnten, sollte die auf Tafel XVIII erkennbare Auswahl von Anordnungen einen möglichst guten Überblick über die verschiedenen Abhängigkeiten (Lage des Hauses zum Wind, Abstand von Haus und Hecke, Schrägstellung des Hauses) bringen.

Bei den Versuchen 56 und 57 steht das Haus unter einem Winkel von  $45^\circ$  zum Wind, die Hecke jedoch senkrecht zum Wind. Die Hausecke  $a|d$  hat dabei nur noch 2,15 mm Abstand von der Hecke, das entspricht  $H/23$ . Der Versuch 56 wurde in Versuch 26a wiederholt (s. Übersicht, Zahlentafel 2). Die beiden dem Winde zugekehrten Hausseiten zeigen wieder Überdruck, während auf den anderen beiden Seiten Sog herrscht. Druck und Sog werden durch den Einfluß der Hecke vermindert, wie Versuch 57 zeigt. Dieses Ergebnis stimmt also mit den anderen Ergebnissen über die Wirkung der Hecke auf das Haus überein. Überraschend ist allerdings das starke Zusammenbrechen des Druckes auf der dem Winde zugekehrten Seitenwand bei Hinzutreten der Hecke. Auf dem Dach dieser Seite  $d$  ist sogar Unterdruck zu messen.

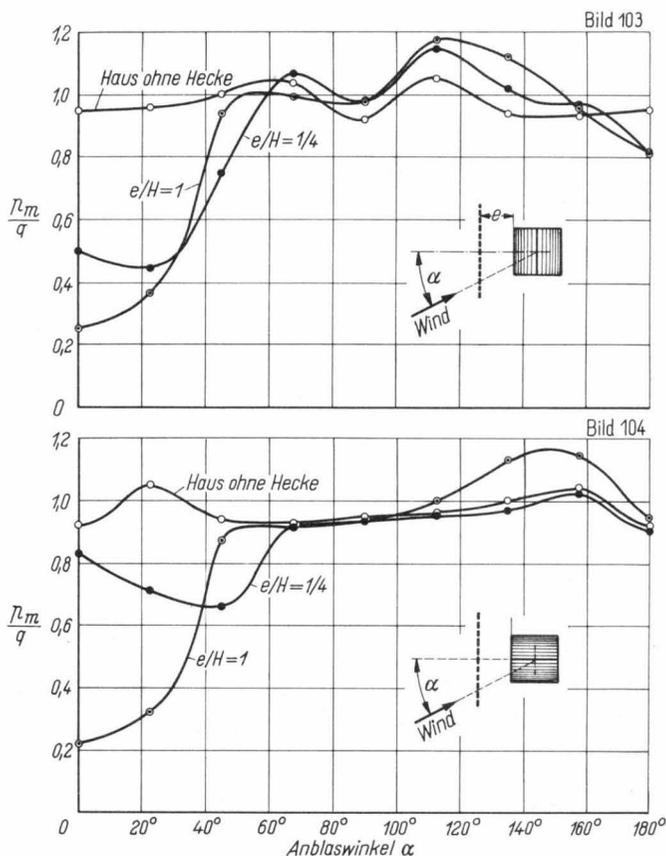
Zu dem Versuch 57 ist zu sagen, daß eine solche Zuordnung von Haus und Hecke in der Praxis wohl kaum auftritt. In unserem Versuchsprogramm jedoch ergab sich diese Stellung aus versuchstechnischen Gründen, da bei diesen ersten Versuchen nur das Haus drehbar war, die Hecke aber nicht.

Bei der Zusammenfassung der Versuchsergebnisse über den Einfluß des Heckenabstandes vom Haus in Bild 101 und 102 haben wir einen mittleren Druck definiert und damit ein übersichtliches Bild erhalten. Um auch den Einfluß des Winkels zwischen Windrichtung und Haus (oder Haus und Hecke) deutlich zu machen, bilden wir wieder einen mittleren Druck auf das Haus, wobei diesmal aber die Drücke auf allen Seiten zu berücksichtigen sind. Zunächst werden die Drücke auf je zwei gegenüberliegenden Seiten unter Berücksichtigung ihrer Vorzeichen und Richtungen addiert. Aus diesen beiden aufeinander senkrecht stehenden Drücken wird durch vektorielle Addition der „resultierende mittlere Druck“ ermittelt. Es werden also die Drücke auf den Hausseitenwänden einschließlich Dach genau so gewertet wie die Drücke auf den Giebelwänden, obwohl die zugehörigen Flächen nicht genau gleich

sind. Dieser „resultierende mittlere Druck“ fällt immer nahezu in die Anblasrichtung und ist daher – dimensionslos gemacht – als Widerstandsbeiwert denkbar. Er ist in Bild 103 und 104 über dem Winkel zwischen Windrichtung und Hausachse aufgetragen.

Bild 103 gibt das Ergebnis für die Versuche wieder, in denen das Haus mit der Seitenwand zur Hecke zeigt. Der Vergleich der Kurvenzüge zeigt den Einfluß der Hecke auf das Haus. Die starke, bei senkrechter Anblasung ( $\alpha = 0^\circ$ ) vorhandene Schutzwirkung der Hecke ist auch bei  $\alpha = 22,5^\circ$  noch von der gleichen Größenordnung, bei  $\alpha = 45^\circ$  aber schon merklich geringer, besonders wenn der Heckenabstand  $1 H$  beträgt. Bei weiterer Drehung des Windes relativ zur Symmetrieachse von Haus und Hecke nimmt die Heckenwirkung schnell ab und wandelt sich zwischen  $70^\circ$  und  $160^\circ$  sogar in eine geringe druckerhöhende Wirkung um. Man erkennt auch hier wieder, daß die  $1 H$  vom Hause entfernte Hecke bei kleinen Winkeln günstiger wirkt als die  $H/4$  entfernte Hecke. Der Kurvenverlauf bei Winkeln zwischen  $30^\circ$  und  $90^\circ$  ist sicherlich von der Heckenlänge stark abhängig. Je länger die Hecke relativ zum Hause ist, desto länger wird auch die Schutzwirkung anhalten, wenn die Windrichtung von der Symmetrieachse abweicht. Der Winkeleinfluß auf die Schutzwirkung der Hecke läßt sich leicht durch das allmähliche Heraustrreten des Hauses aus dem (geometrisch definierten) Windschatten der Hecke erklären. In Bild 104 sind die Ergebnisse für die Versuche dargestellt, in denen das Haus mit der Giebelwand zur Hecke zeigt. Im wesentlichen gilt hier das gleiche wie für Bild 103.

Außer den bisher beschriebenen Druckmessungen am Haus wurden auch Geschwindigkeitsprofile in der Umgebung des Hauses nach der bereits beschriebenen Methode (siehe II, Seite 12) gemessen. Die Tafeln VII und VIII enthalten sämtliche Geschwindigkeitsprofile, wie sie in den Versuchsreihen 48 bis 53 (s. Zahlentafel 1, S. 10/11) gemessen wurden. Um eine Übersicht zu gewinnen, mußten die Geschwindigkeitsprofile perspektivisch dargestellt werden. Dabei ergaben sich aber in der Nähe von Hecke und Haus wegen der engen Lage der Meßstellen zueinander so starke Überschneidungen daß die hier gemessenen Profile herausgezogen und gesondert dargestellt werden mußten. Bei Versuch 49, 50 und 51 (Tafel VII), sowie Versuch 53 (Tafel VIII) sind diese Profile nach links versetzt darge-



**Bild 103.** Der mit dem Staudruck dimensionslos gemachte mittlere Gesamtdruck auf das Haus  $p_m/q$  in Abhängigkeit von der Windrichtung. Das Haus ist mit einer Seitenwand zur Hecke parallel.

**Bild 104.** Der mit dem Staudruck dimensionslos gemachte mittlere Gesamtdruck auf das Haus  $p_m/q$  in Abhängigkeit von der Windrichtung. Das Haus steht mit einer Giebelwand parallel zur Hecke.

stellt. Bei Versuch 52 (Tafel VIII) wurden sie dagegen in einem besonderen Bild darunter wiedergegeben. Dabei kennzeichnen die Buchstaben  $a, b, c, \dots$  die Lage der Meßstellen und die zugehörigen Geschwindigkeitsprofile.

Wie leicht zu sehen ist, hat das Haus allein (Versuch 50) eine verhältnismäßig geringe Windschutzwirkung auf das leewärts gelegene Gebiet. Dieses Ergebnis entspricht den früheren Messungen an undurchlässigen Hindernissen. Durch das Hinzukommen der Hecke (Versuch 51) tritt eine wesentliche Vergrößerung des windgeschützten Gebietes ein. Weiter läßt sich sagen, daß die gute Windschutzwirkung der Hecke (Versuch 49) durch das Haus hinter der Hecke verschlechtert wird. Das Ergebnis besagt, daß die Kurven für „Haus und Hecke“ etwa in der Mitte zwischen den Kurven für „Hecke allein“ und „Haus allein“ liegen.

## IV. Messungen der Bodenverdunstung im Bereich von Hindernissen (Modellversuche im Windkanal)

### 1. Versuchstechnik

Von Anfang an bestand der Wunsch, die Geschwindigkeitsmessungen durch Verdunstungsmessungen zu ergänzen. In vielen praktischen Fällen wird die Beeinflussung der Verdunstung durch Hecken wichtiger sein als die Beeinflussung der Windgeschwindigkeit.

Es zeigt sich, daß es hierüber kaum Vorarbeiten gibt. Außer einer schwer zugänglichen Arbeit von *Kuhnke* [30] konnten keine Messungen des Windeinflusses auf die Verdunstung bei Ackerböden festgestellt werden.

Bei unseren Versuchen benutzten wir wieder den schon erwähnten Kastenaufbau aus Holz, wobei der Wind von dem Sortiergebläse [7] mit einer Düse von 500 mm Breite und 600 mm Höhe erzeugt wurde. Die Geschwindigkeiten lagen zwischen 1,0 und 9,5 m/s. In den Holzboden wurden hintereinander 6 rechteckige Blechschalen (Länge in Windrichtung 100 mm, Breite 250 mm, Tiefe 40 mm) eingelassen. Diese Blechschalen wurden mit gut durchmischter Erde gefüllt, und zwar so, daß die Oberfläche mit der des Kastenbodens möglichst gut in einer Ebene lag. Der Gewichtsverlust der Blechschalen in einer bestimmten Zeit (im allgemeinen 100 min) wurde als Maß der Verdunstung betrachtet und durch Wägung mit einer Genauigkeit von 1/10 g bestimmt. Bei jedem Versuch wurde die Bodenfeuchtigkeit im Ausgangszustand, die Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur vor und nach dem Versuch bestimmt. Auf die Messung der Bodentemperatur wurde vorerst verzichtet; es ist jedoch geplant, bei weiteren Messungen auch die Bodentemperatur durch besonders hergerichtete Thermometer zu ermitteln.

Die bisher ausgeführten Versuche bezweckten die Feststellung der Verdunstung eines Bodens, der im Ausgangszustand eine gleichmäßig verteilte d.h. von der Tiefe unabhängige Feuchtigkeit besitzt. Sobald dem Boden Feuchtigkeit von oben entzogen wird, entwickelt sich ein gewisses Feuchtigkeitsprofil im Boden, dessen zeitliche Änderung zu erforschen sicher wichtig wäre, aber zunächst nicht beabsichtigt war. Wir dürfen annehmen, daß innerhalb der Versuchszeit von 100 min die Feuchtigkeitsänderungen noch nicht bis zur Schalentiefe (40 mm) vorgedrungen ist, so daß die geringe Schalentiefe unsere Ergebnisse nicht beeinträchtigt.

Der Umstand, daß Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur nicht frei gewählt werden konnten, erwies sich als störend für die Systematik der Versuche. Eine weitere Störquelle bildet die verschiedene Helligkeit während des Tages, die sicherlich nicht nur auf die Wärmeabgabe sondern auch auf die Verdunstung einen Einfluß hat.

Schließlich darf nicht übersehen werden, daß das Einfüllen der Erde in die Schalen nicht einfach ist und Anlaß zu Streuungen der Ergebnisse geben kann. Bei den hier mitgeteilten Versuchen handelt es sich um *Broitzemer Ackerboden*<sup>4)</sup>, der fest in die Schalen eingedrückt und mit einem Messer glatt gestrichen wurde.

Bei allen Versuchen wurde eine Vergleichsschale außerhalb des Windkanals aufgestellt, um auch die Verdunstung ohne Wind zu ermitteln.

<sup>4)</sup> Die Korngrößenverteilung dieses Bodens war: Grobsand 12 %, Feinsand 54 %, Schluff 26 %, Ton 8 %.

### 2. Versuchsergebnisse

In **Bild 105** ist versucht, die Abhängigkeit der Verdunstung von der Windgeschwindigkeit und von der relativen Luftfeuchtigkeit zu ermitteln. Es handelt sich dabei jeweils um die vorderste von 6 hintereinander angeordneten Schalen. Die Versuche erstreckten sich über je 100 Minuten. Als Ordinate ist die Verdunstung in  $\text{g/m}^2 \cdot \text{min}$  aufgetragen. Die

relative Luftfeuchtigkeit ist neben jedem Meßpunkt angeschrieben. Man kann nun ohne besondere Schwierigkeit die gestrichelten Kurven als Linien konstanter relativer Luftfeuchtigkeit eintragen. Bei diesen Versuchen schwankte die Bodenfeuchtigkeit im Ausgangszustand zwischen 22,0 und 23,8 %, die Lufttemperatur zwischen 19,2 und 23,8°C. Bei der

Geschwindigkeit 0 sind nicht alle Meßpunkte eingetragen, da sie sich zum Teil überdecken; sie können aber aus Bild 106 übertragen werden.

Aus Bild 105 kann man entnehmen, daß die Verdunstung mit der Windgeschwindigkeit etwas weniger als linear ansteigt, etwa nach dem gleichen Gesetz, das Nusselt [42] für die Verdunstung einer Wasseroberfläche, über die der Wind streicht, angegeben hat. Jedenfalls kann keine Rede davon sein, daß die Verdunstung mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit ansteige, wie gelegentlich behauptet wurde.

Bild 106 zeigt die Abhängigkeit der Verdunstung von der relativen Luftfeuchtigkeit; hier sind aus Bild 105 die Meßwerte bei der Windgeschwindigkeit 4 und 8 m/s und sämtliche Vergleichswerte zu den Versuchen von Bild 105 für die Windgeschwindigkeit 0 eingetragen. Trotz beachtlicher Streuung fügen sich die Meßwerte einem Gesetz, das durch die schraffierten Gebiete angedeutet ist. Dabei ist angenommen, daß bei einer Luftfeuchtigkeit von 100% d.h. bei mit Wasserdampf gesättigter Luft keine Verdunstung mehr stattfindet.

Die in Bild 105 und 106 dargestellten Versuche sollten lediglich dazu dienen, Vergleichswerte für die Verdunstung ohne den Einfluß eines am Boden stehenden Hindernisses, z.B. einer Hecke, zu schaffen [53]. Bei den weiteren Versuchen wurde die Versuchseinrichtung so umgebaut, daß 15 Schalen von 120 mm Länge, 250 mm Breite und 40 mm Tiefe hintereinander angeordnet werden konnten. Zwischen den Kästen wurden nun an verschiedenen Stellen verschiedenartige Modellhecken nach folgendem Plan (Zahlentafel 3) aufgestellt. Die Übersicht enthält zugleich Angaben über die bei den Versuchen festgestellten Werte der relativen Luftfeuchtigkeit, der Lufttemperatur und der Bodenfeuchtigkeit.

Bild 107 bis 110 bringen die Ergebnisse dieser Messungen in verschiedenen Gegenüberstellungen. Dabei ist jeweils die Verdunstung in  $g/m^2 \cdot min$  über

Zahlentafel 3. Verdunstungsversuche

| Ver-such | Heckenmodelle   |                           | Relative Luftfeucht. % | Luft-temp. °C | Bodenfeucht. % |
|----------|-----------------|---------------------------|------------------------|---------------|----------------|
|          | Durchlässigkeit | Lage zwischen den Schalen |                        |               |                |
| V 1      | —               |                           | 68                     | 19,5          | 22,6           |
| V 2      | A               | 5/6                       | 67,5                   | 19,7          | 22,7           |
| V 3      | C               | 5/6                       | 67                     | 17            | 21,5           |
| V 4      | P               | 5/6                       | 70                     | 15,5          | 23,2           |
| V 5      | C               | 2/3 10/11                 | 70                     | 17,2          | 21,8           |
| V 6      | C               | 10/11                     | 72                     | 16            | 22,8           |
| V 7      | C               | 2/3 10/11                 | 68,5                   | 16            | 21,6           |
| V 8      | C               | 2/3                       | 65                     | 17            | 21,3           |
| V 9      | C               | 2/3 7/8 12/13             | 67                     | 15            | 22,7           |
| V 10     | C               | 2/3 7/8                   | 68                     | 15            | 21,3           |
| V 11     | C               | 2/3 12/13                 | 73,5                   | 17            | 21,4           |
| V 12     | C               | 7/8 12/13                 | 68                     | 15,5          | 21,8           |
| V 13     | C               | 7/8                       | 69                     | 15            | 21,5           |
| V 14     | C               | 12/13                     | 67,5                   | 15,7          | 22,8           |

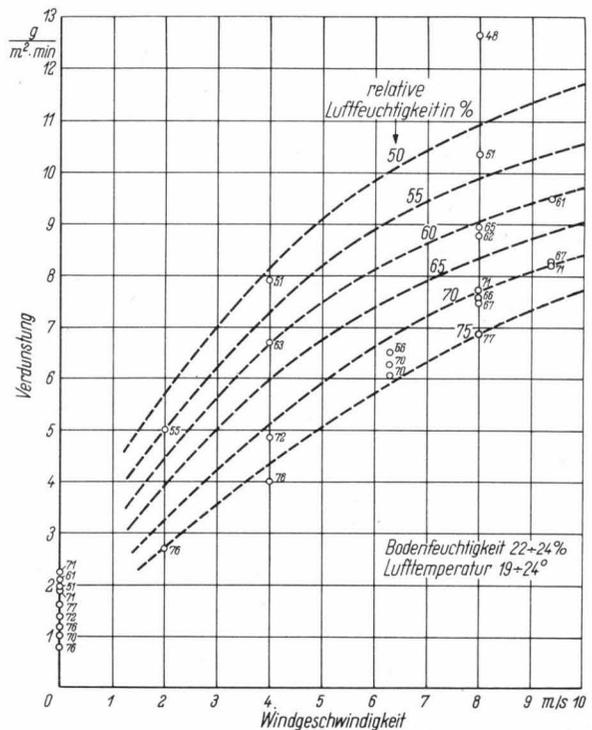


Bild 105. Die Verdunstung des Bodenwassers in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der relativen Luftfeuchtigkeit.

x aufgetragen. Da die Schalen in Windrichtung eine Länge von 120 mm haben, liefert jede Schale einen Mittelwert für einen Bereich von der vierfachen Hindernishöhe  $H (= 30 \text{ mm})$ .

Da es bei diesen Versuchen nicht möglich war, die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur selbst zu wählen, mußten gewisse Schwankungen dieser Werte in Kauf genommen werden (Zahlentafel 3). Es gelang auch nicht, die Bodenfeuchtigkeit genau gleich zu halten, da die Bodenproben für jeden Versuch neu angesetzt werden mußten. Diesen Schwankungen entsprechend zeigen die Ver-

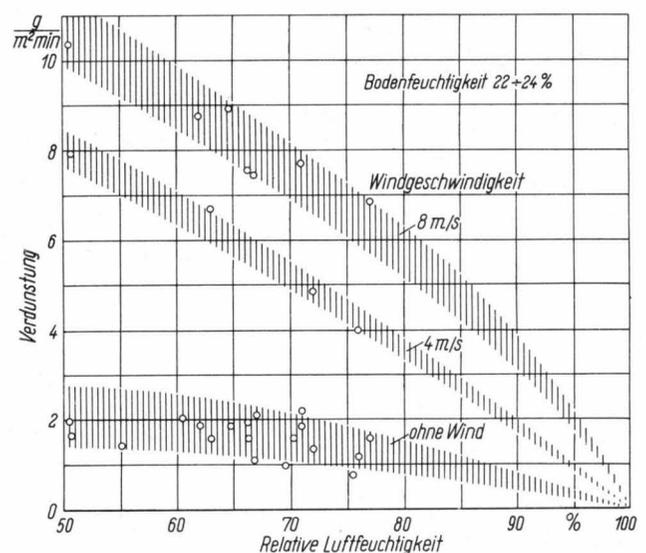


Bild 106. Die Verdunstung des Bodenwassers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit.

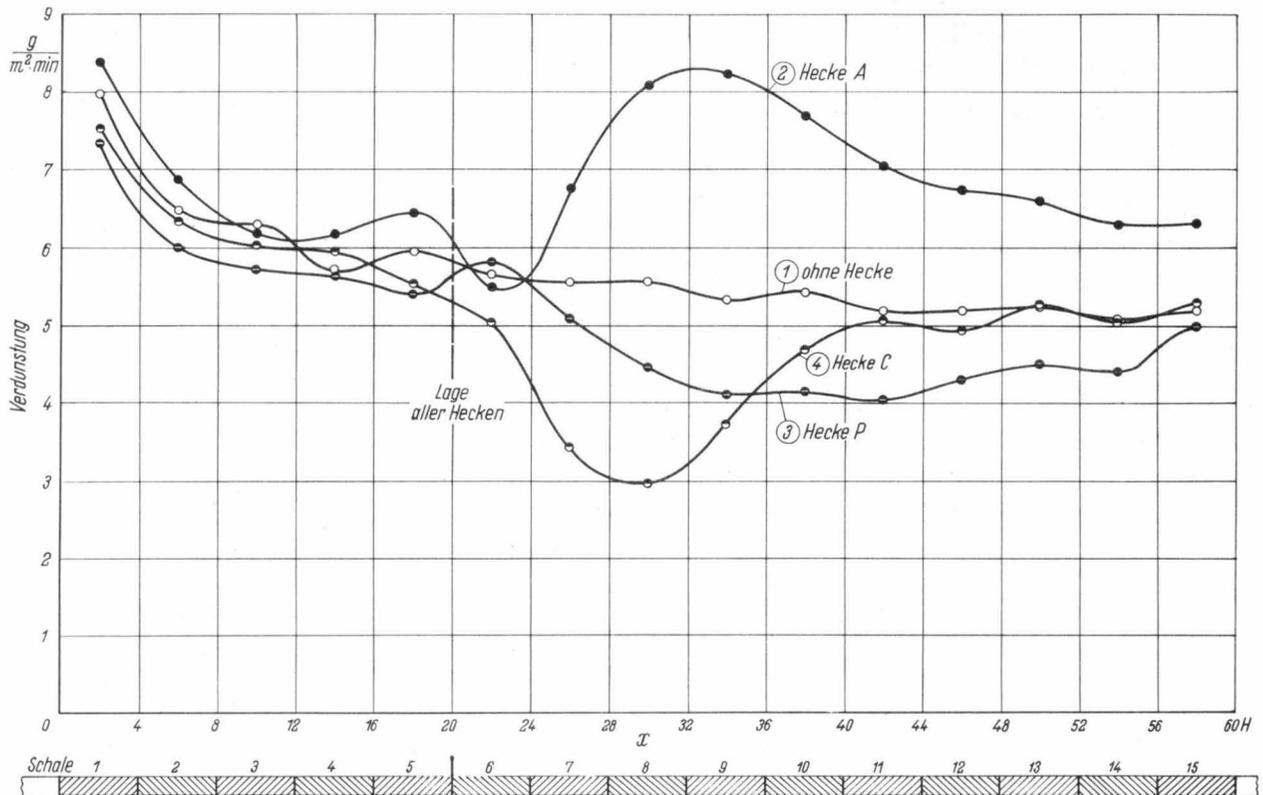


Bild 107. Verdunstung des Bodenwassers im Bereich von Hecken (A, C, P). Lage der Hecken:  $x = 20 H$ .

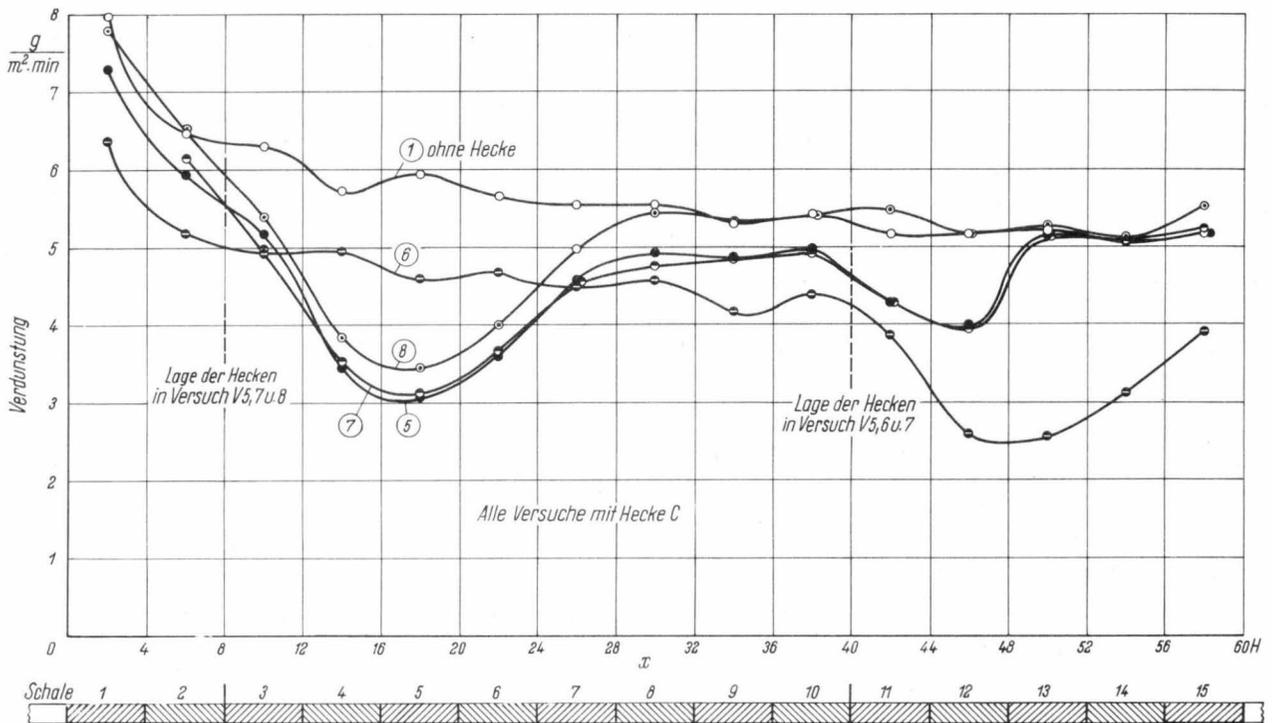


Bild 108. Verdunstung des Bodenwassers im Bereich von Hecken (C). Lage der Hecken:  $x = 8 H$  und  $40 H$ .

suchskurven in Bild 107 bis 110 im Ganzen ziemlich große Streuungen. Man hätte wohl als Ausgleich dieser Streuungen die einzelnen Kurven in vertikaler Richtung so verschieben dürfen, daß die von einem Hindernis unbeeinflussten Teile übereinander zu liegen kommen. Auf diese Korrektur wurde aber verzichtet, da es bei der Betrachtung der Kurven

durchaus möglich ist, ihre allgemeine Tendenz von ihrer Höhenlage zu trennen.

In Bild 107 sind die Versuche mit Hindernissen verschiedener Durchlässigkeit miteinander verglichen. Die Hindernisse stehen zwischen der 5. und 6. Schale. Für die Schalen 1 bis 4 ergibt sich bei allen Versuchen die gleiche abfallende Tendenz der

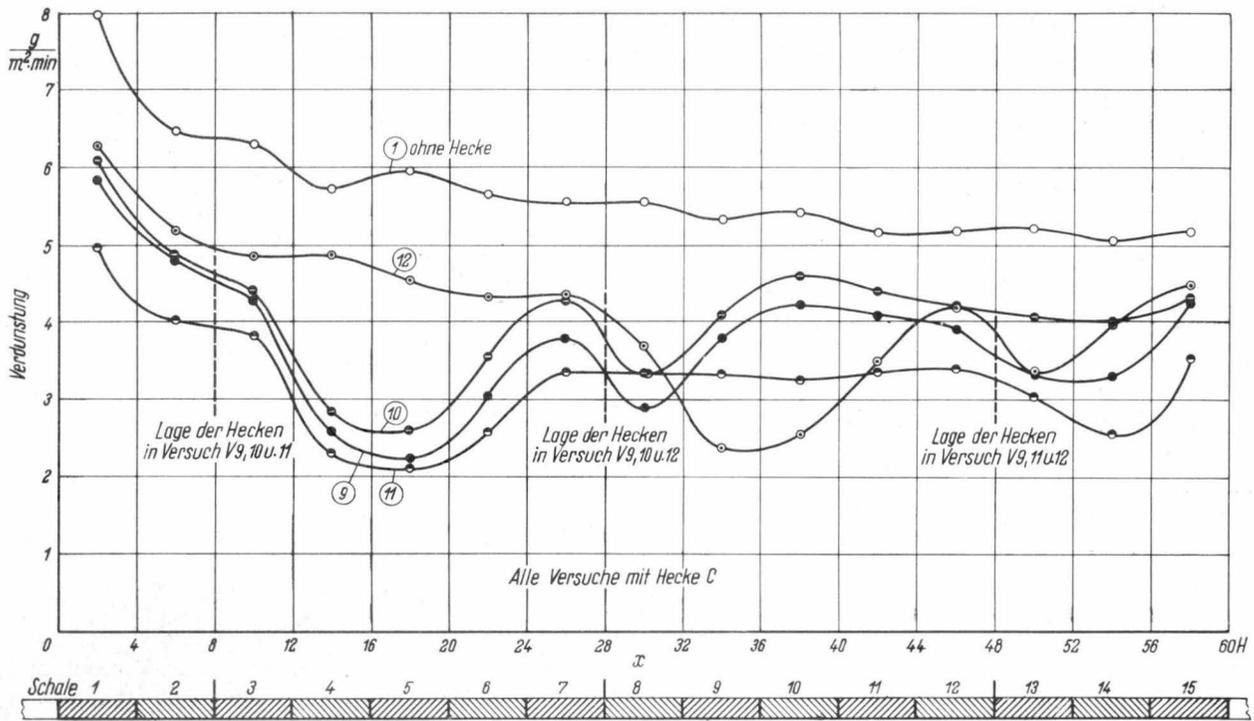


Bild 109. Verdunstung des Bodenwassers im Bereich von Hecken (C). Lage der Hecken:  $x = 8 H, 28 H$  und  $48 H$ .

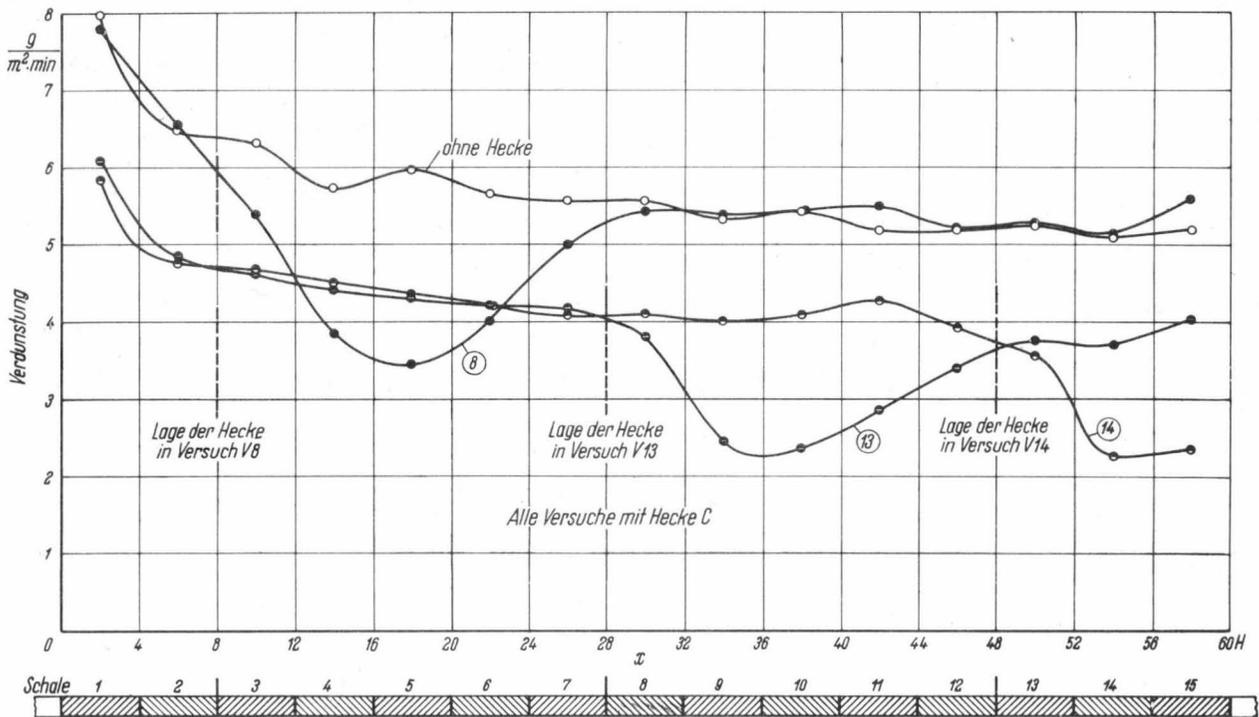


Bild 110. Verdunstung des Bodenwassers im Bereich von Hecken (C). Lage der Hecken:  $x = 8 H, 28 H$  und  $48 H$ .

Verdunstungskurven, bedingt durch das Abfallen der Windgeschwindigkeit in Bodennähe und das Anwachsen der Grenzschicht. Im Lee der Hindernisse laufen die Kurven stark auseinander. Für das undurchlässige Hindernis A erhält man eine merkliche Erhöhung der Verdunstung, für die beiden durchlässigen Hindernisse eine fast ebenso große Verminderung der Verdunstung gegenüber der Messung „ohne Hecke“. Die gleichmäßig durchlässige

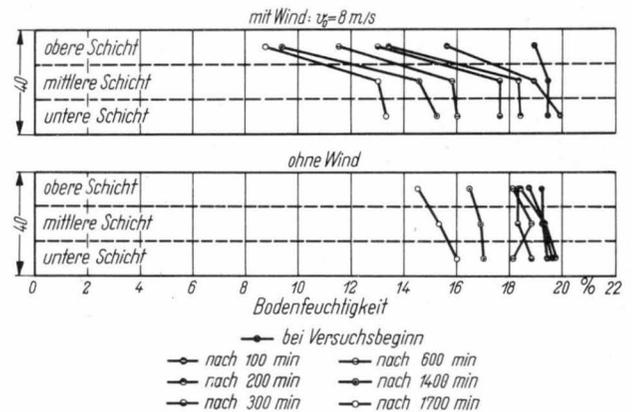
Hecke C zeigt einen starken Abfall der Verdunstung, jedoch nur auf geringe Entfernung hinter dem Hindernis, während die Hecke P (Pappelallee) einen geringeren Abfall der Verdunstung, aber auf größere Entfernung aufweist.

Bild 108 gibt einen Vergleich der Versuche V 5 bis V 8, bei denen zwei durchlässige Heckenmodelle zwischen den Schalen 2|3 ( $x = 8 H$ ) und 10|11 ( $x = 40 H$ ) sowohl einzeln als auch in ihrer Zusam-

menwirkung untersucht wurden. Der Versuch *V 7* ist eine Wiederholung des Versuches *V 5*. Die geringen Abweichungen der beiden Versuchskurven geben einen Anhaltspunkt für die Beurteilung des Meßverfahrens. Die Verminderung der Verdunstung hinter einem durchlässigen Hindernis ist von der Lage des Hindernisses offensichtlich nur wenig abhängig. Die Ausbuchtung der Kurven nach unten ist für die Heckenlage zwischen den Schalen 10|11 dieselbe wie für die Heckenlage 2|3. Wesentlich geringer ist dieser Effekt jedoch hinter dem Heckenmodell an der Stelle 10|11, wenn das entsprechende Heckenmodell gleichzeitig auch bei 2|3 vorhanden ist (Versuche *V 5* und *V 7*). Das erste Hindernis erteilt der vorbei- und hindurchstreichenden Luft eine zusätzliche Turbulenz, deren Einfluß wahrscheinlich der geringere Verdunstungsabfall hinter dem zweiten Hindernis zuzuschreiben ist. Dieses Ergebnis liefert uns einen deutlichen Hinweis darauf, daß bei Verdunstungsmessungen dieser Art die Turbulenz des Luftstrahls mit in die Messung eingeschlossen werden muß und daß die vorliegenden Messungen keineswegs ohne weiteres auf die freie Natur, bei der die Turbulenz verschieden groß sein kann (abhängig von dem Vorgelände, das der Wind überstreichen muß), übertragen werden dürfen.

Die Versuche *V 9* bis *V 14* sind in **Bild 109** und **110** einander gegenübergestellt. Sie liefern eine Bestätigung des bereits Gesagten.

Von Interesse ist weiterhin die Frage, wie die Wasserabgabe des Bodens nach der Tiefe hin zeitlich verläuft. Da unsere Schalen eine Tiefe von nur 40 mm besitzen, konnten wir nur eine Aufteilung des Bodens in drei Schichten von je 13 mm Höhe vornehmen. Mit einem kleinen angeschärften Rohr von 10 mm Durchmesser wurden nach bestimmten Zeiten den drei Schichten je eine Bodenprobe ent-



**Bild 111.** Verdunstung des Bodenwassers bei Wind in Abhängigkeit von der Bodentiefe.

nommen und deren Gewichtsverlust gegenüber dem als konstant angenommenen Ausgangswert ermittelt. Der ausgestochene Raum wurde durch einen genau passenden Holzpflock geschlossen, um an dieser Stelle die Oberfläche wieder herzustellen und zusätzliche Verdunstung möglichst zu vermeiden. Die hintereinander entnommenen Proben hatten etwa 30 mm horizontalen Abstand voneinander. **Bild 111** zeigt das Ergebnis dieses Versuchs. Man sieht deutlich, wie die Bodenfeuchtigkeit mit und ohne Wind allmählich abnimmt und wie das Wasser von unten heraufsteigt. Daß einzelne Kurven sich überschneiden, bedeutet nicht, daß eine Feuchtigkeitszunahme vorliegt, sondern nur, daß die Feuchtigkeitsverteilung bei unseren Versuchen nicht genau konstant war.

Es kann kein Zweifel daran bestehen, daß durch grundsätzliche Versuche dieser Art in einem Klima-Windkanal mit einstellbaren Feuchtigkeits- und Temperaturwerten unsere Kenntnis des Verdunstungsvorgangs in Abhängigkeit von vielen wesentlichen Faktoren sehr vermehrt werden könnte.

## V. Messungen an einer künstlichen Hecke im Freien

### 1. Versuchstechnik

Bei den hier mitgeteilten Versuchsergebnissen wurden Windgeschwindigkeitsprofile in Bodennähe in Luv und Lee einer künstlichen Hecke vermessen. Diese Hecke wurde nahezu in Nord-Süd-Richtung auf dem nahezu ebenen Gelände der Forschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig-Völkenrode (siehe Lageplan Bild 112) so aufgestellt, daß möglichst weit vor und hinter der Hecke kein anderes Hindernis die Anströmung beeinflussen sollte. Sie war 2 m hoch und 100 m lang und bestand aus dünnem, verzinktem Maschendrahtgewebe von 2“ Maschenweite, in das Aluminiumfolien von 3 cm Breite im Abstände von 2 cm senkrecht von oben nach unten eingezogen waren (Bild 113). Unter Vernachlässigung des Maschendrahtgewebes ergibt sich eine geometrische Durchlässigkeit von  $\lambda = 40\%$  (Lochfläche : Gesamtfläche). Westlich der aufge-

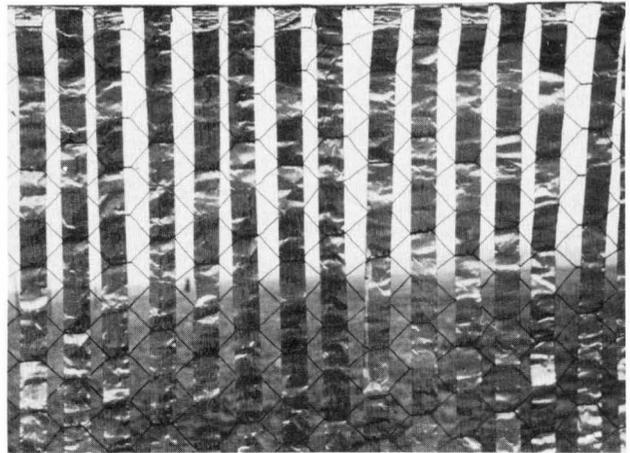


Bild 113. Künstliche Hecke aus Maschendraht. Die in das Gewebe eingezogenen Aluminiumfolien sind 3 cm breit.

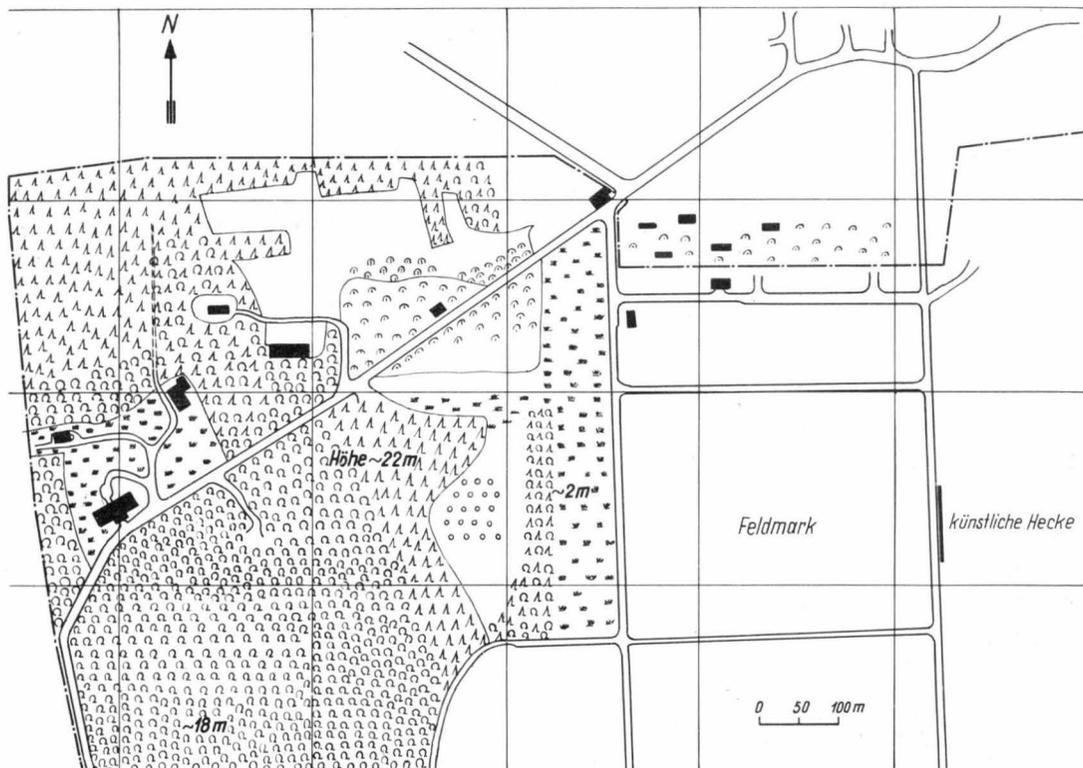
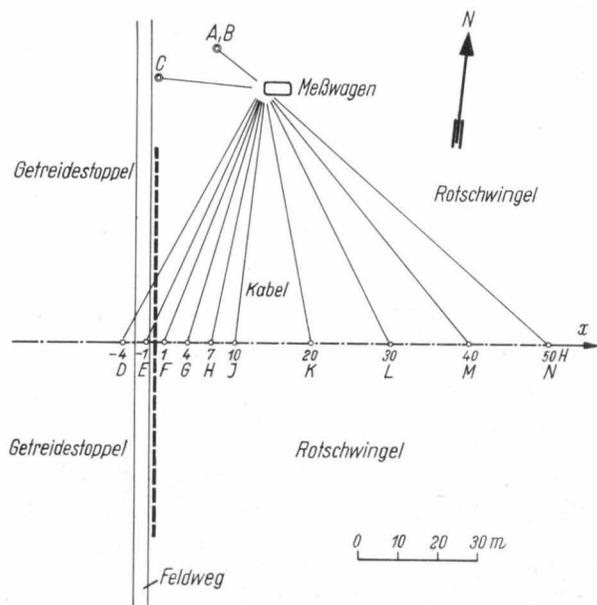
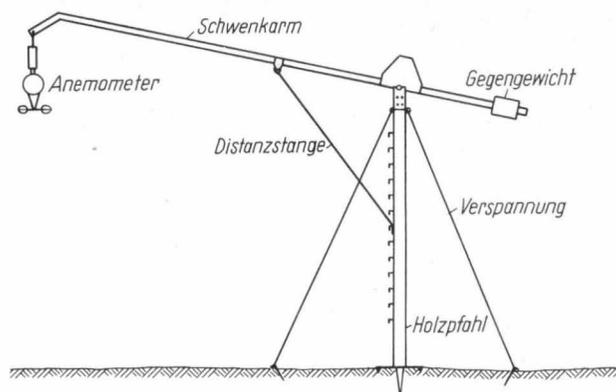


Bild 112. Lageplan der Versuchshecke im Gelände der Forschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig-Völkenrode. Die eingetragenen Zahlen sind die Höhe des Bestandes über dem nahezu ebenen Gelände.

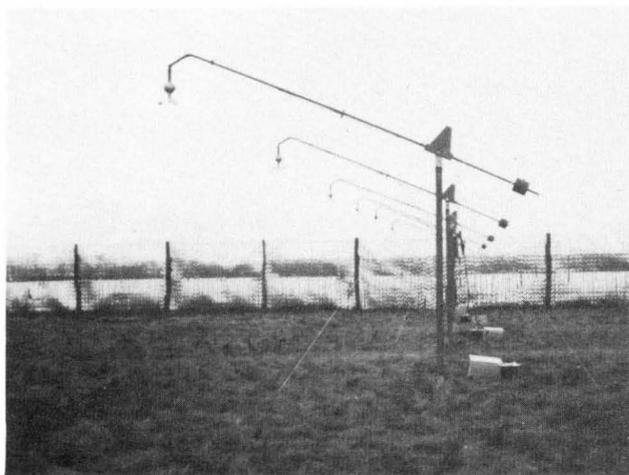
stellten Hecke befand sich ein etwa 4 m breiter befestigter Feldweg, an den sich ein Stoppfeld anschloß. Im Osten der Hecke lag ein Rotschwingschlag mit einer mittleren Bestandshöhe von 10 cm.



**Bild 114.** Übersicht über den Versuchsaufbau. Bestandshöhe des Rotschwings: i.M. 10 cm.

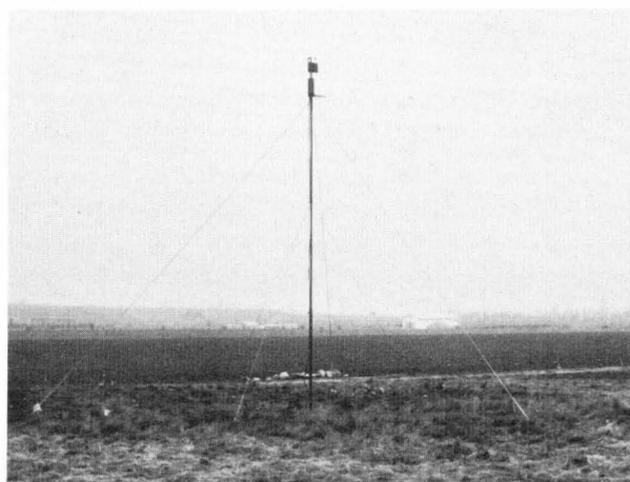


**Bild 115.** Messpfahl mit dem Messgerät (Anemometer) am Ende des Schwenkarmes.



**Bild 116.** Die Anordnung der Messpfähle mit den Schwenkarmen im Gelände.

**Bild 114** zeigt eine schematische Übersicht des Versuchsaufbaues. An den Meßstellen C bis N befindet sich je ein 2 m hoher Pfahl, der mittels drei Schnüren mit Heringen im Boden verankert ist (**Bild 115** und **116**). Am Kopf des Pfahles ist ein Schwenkarm drehbar gelagert, der eine Einstellung des am Ende seines langen Hebelarmes hängenden Schalenkreuz-Anemometers in jeder beliebigen Höhe über dem Erdboden zwischen 0 und 4 m gestattet. Am kürzeren Ende des Schwenkarmes ist ein Gegengewicht angebracht. Die eingestellte Höhe wird durch eine Distanzstange zwischen Hebelarm und Pfahl eingehalten. Die Meßstelle C neben der Hecke gestattet die Messung der Windprofile ohne Beeinflussung durch die Hecke. Eine weitere Meßstelle A,B (**Bild 117**) auf einem verspannten Rohrmast in 6 m Höhe mißt die Windrichtung und Windgeschwindigkeit an dieser Stelle und wird als „Nullstelle“ für alle anderen Messungen benutzt, d.h. alle anderen Meßwerte werden auf die Meßwerte dieser Meßstelle bezogen. Sämtliche verwendeten Meßgeräte sind elektrische Geber. Sie liefern eine von der Drehzahl des Anemometerkreuzes abhängige Wechselspannung, die durch Kabel auf die Anzeigeeinstrumente im Meßwagen übertragen wird. Alle Anzeigeeinstrumente sind auf einer gemeinsamen Tafel montiert (**Bild 118**).



**Bild 117.** Die „Null“-Messstelle A,B zur Messung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit in 6 m Höhe.

Um eine genügend genaue (hinreichende) Mittelwerts- und Streuungsberechnung zu ermöglichen, waren 50 Einzelmessungen in möglichst gleichen Zeitabständen in jeder Meßhöhe vorgesehen. Die folgende Beschreibung des Meßvorganges soll die Arbeitsweise der gesamten Anordnung (**Bild 119**) erläutern. Alle Anemometer der Meßstellen C bis N werden auf eine bestimmte Meßhöhe  $z$  über dem Boden (z.B.  $z = 0,25 H$  d.h. bei einer Heckenhöhe von  $H = 2$  m eine absolute Höhe von  $z = 0,5$  m) eingestellt. Die Anzeigeeinstrumente B bis N zeigen die Windgeschwindigkeit an. Um die Gleichzeitigkeit der Ablesung aller 13 Anzeigeeinstrumente

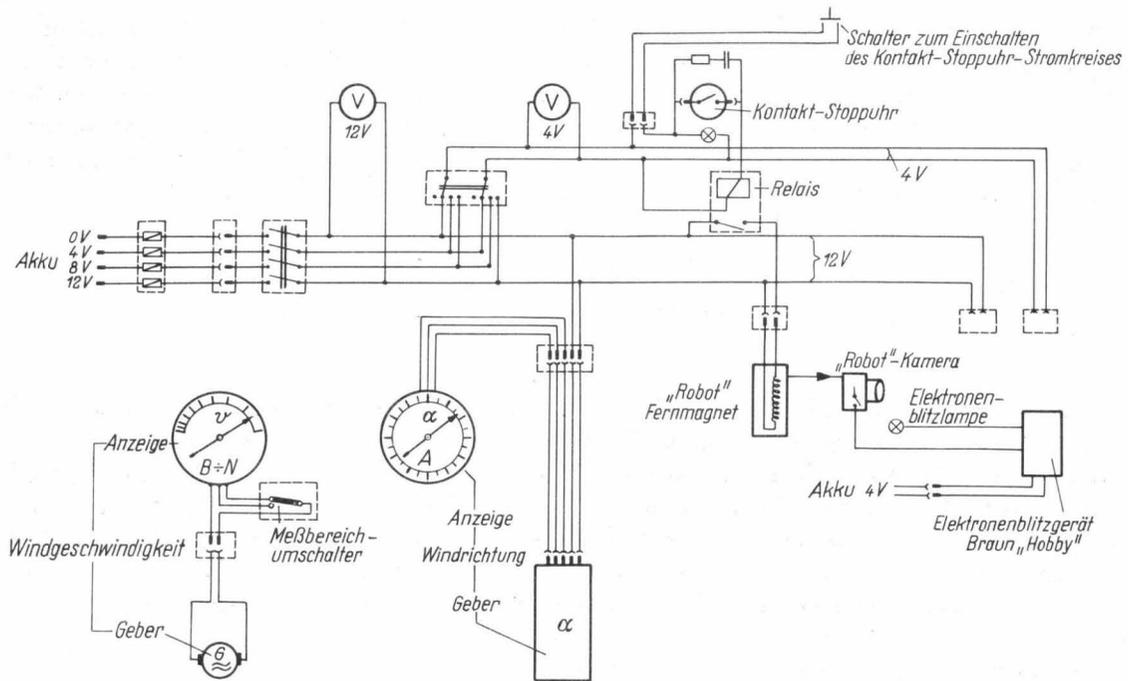


Bild 119. Schaltschema der Tafel mit den Anzeigegeräten.

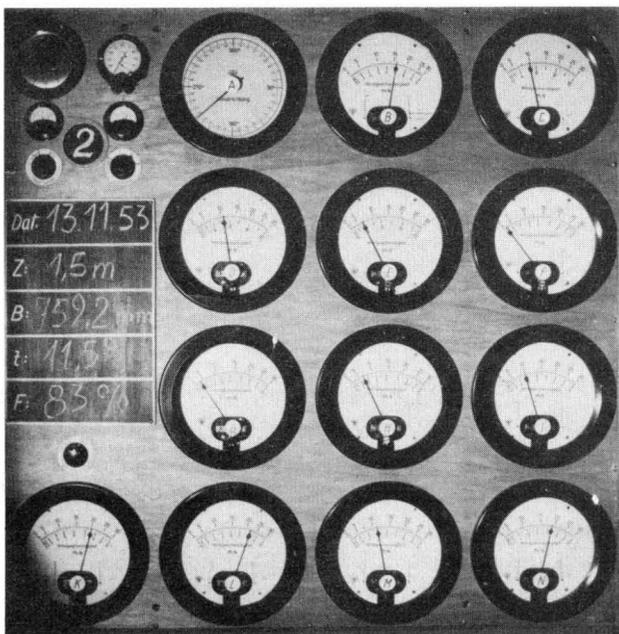


Bild 118. Blitzlichtaufnahme von der Tafel mit den aufmontierten Anzeigegeräten während eines Versuchs.

einerseits und die Einhaltung exakter Meßintervalle andererseits zu gewährleisten, wird die Anzeigetafel mit einer Robot-Kamera automatisch in bestimmten, gleichen Abständen 50 mal fotografiert. Dabei werden die Tagesdaten, Uhrzeit, Schalterstellungen usw. gleichzeitig im Bilde mit festgehalten (Bild 118). Die Einhaltung des Zeitintervalles wird durch eine Kontaktstoppuhr gesteuert, die alle 10 s einen Kontakt schließt, wodurch ein Fernmagnet über ein Relais betätigt wird (Bild 119 und 120). Durch den Fernmagneten (ein Fernauslöser zur Robot-Kamera) wird die Kamera betätigt und durch sie in üblicher Weise ein Elektronenblitzgerät

Hobby. Sind die Meßwerte einer Meßhöhe 50 mal im Bilde festgehalten, so werden alle Anemometer C bis N auf eine neue Meßhöhe eingestellt und in die Kamera gleichzeitig ein neuer Film eingelegt, worauf der ganze Vorgang wieder wie geschildert abläuft. Auf diese Weise gelingt es, mit zwei Personen in rund 1,5 Stunden 8 Meßhöhen durchzumessen. Das entspricht etwa 5000 Einzelwerten in 90 Minuten. Diese Meßdichte ist nur mit einer automatischen Meßvorrichtung möglich. Eine kurze Versuchszeit ist aber nötig, da der Wind während einer Messung seine Richtung und Stärke möglichst nicht ändern soll. Der Aufbau zu den von uns durchgeführten Untersuchungen dauert etwa zwei Stunden, wenn der Mast A, B und die Pfähle C bis N bereits

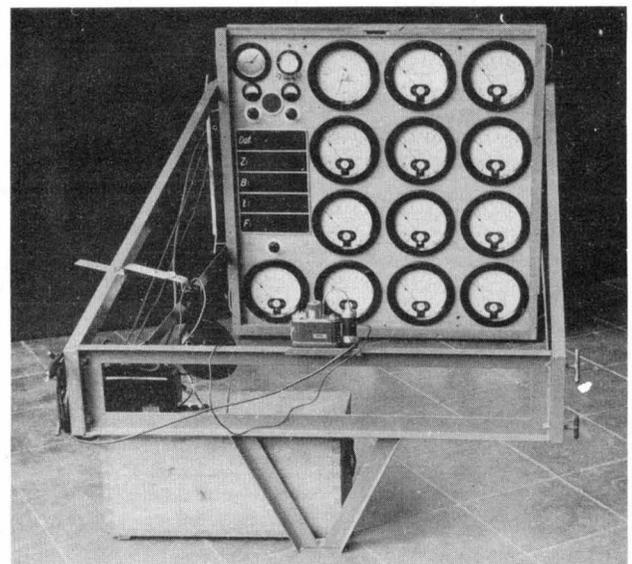


Bild 120. Einrichtung zur Aufnahme der Tafel mit den Anzeigegeräten.

im Gelände aufgestellt sind. Müssen diese dagegen erst aufgestellt werden, dauert der Aufbau etwa vier Stunden. Diese Zeit ist für einen meteorologischen Versuchsaufbau dieser Art oft schon zu lang, wenn man berücksichtigt, daß die Windrichtung während des Aufbaues nicht mehr als etwa

$\pm 20^\circ$  von der Senkrechten auf die Hecke abweichen soll, und daß die Windgeschwindigkeit möglichst nicht unter einen gut meßbaren Wert absinken soll. Diese Bedingungen erschweren, wie allgemein bekannt, derartige Windmessungen an Hecken im Freien außerordentlich.

## 2. Übersicht über das Programm

Es wurden bisher, z.T. bedingt durch die vorher angedeuteten Schwierigkeiten nur drei Messungen an der unter 1. beschriebenen künstlichen Hecke I (siehe Bild 113) durchgeführt. Weitere Messungen an natürlichen Hecken und an einer künstlichen Hecke, bei der die Streifen durch besonders präparierte Garnierungen ersetzt sind, werden folgen.

**Zahlentafel 4** gibt einen Überblick über die bisherigen Messungen.

Wie die Übersicht zeigt, lag die Windgeschwindigkeit bei rund 6 m/s. Die Richtung des Windes war einmal Nordwest und zweimal Südwest. Beim ersten Versuch wurden 5 Meßhöhen, bei den beiden anderen je 8 Meßhöhen vermessen.

**Zahlentafel 4.** Messungen an einer Hecke im Freien

| Ver-such | Datum      | Tages-zeit          | Baro-meter-stand mm Hg | Luft-tempera-tur °C | Luft-feuchtig-keit % | Anzahl der Messhöhen | mittl. Wind-richtung $\alpha_w$ | Richtung der Hecke | Abweichung d. Windrichtung v.d.Hecken-senkrechten*) | mittlere Wind-stärke m/s |
|----------|------------|---------------------|------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|---|--------------------------|
| 1        | 5. X. 53   | 17–18 <sup>00</sup> | 760,6                  | 13°–9°              | 77–90                | 5                    | 308°                            | 357°               | + 41°   | 5,6                      |
| 2        | 13. XI. 53 | 15–17 <sup>00</sup> | 759,2                  | 11°–11,5°           | 83                   | 8                    | 238°                            | 357°               | – 29°   | 6,4                      |
| 3        | 2. IV. 54  | 14–16 <sup>00</sup> | 753,8                  | 12°                 | 58–64                | 8                    | 242°                            | 357°               | – 25°   | 5,6                      |

\*) positiv, wenn Abweichung im Uhrzeigersinn

## 3. Versuchsergebnisse

Bevor auf die eigentlichen Versuchsergebnisse eingegangen wird, sei noch einiges über die Auswertung gesagt. Als Filmmaterial verwendeten wir *Agfa-Agepe* Dokumentenfilm. Die einzelnen 24 mal 24 mm großen Negative des 50 Aufnahmen fassenden Filmstreifens wurden mit Hilfe eines Projektors auf die Rückseite eines transparenten Schirmes (etwa 40 mal 40 cm) abgebildet. Auf der Vorderseite dieses Bildschirms waren die Instrumente bei dieser Methode auch bei nur schwach abgedunkeltem Raum sehr deutlich erkennbar. Die an den Instrumenten angezeigten Werte der einzelnen Meßstellen wurden in einen Vordruck übertragen. Diese Zahlentafeln enthalten jetzt das ursprüngliche Meßmaterial. Bei der Auswertung wurden der Mittelwert der Windrichtung für das Instrument A und der Windgeschwindigkeit für die Instrumente B bis N gebildet:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum n_j \cdot v_j \quad (\text{arithm. Mittel})$$

Außerdem wurde für alle Meßreihen die Streuung errechnet:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{n-1} \sum n_j (v_j - \bar{v})^2 \quad (\text{mittl. quadr. Abweichung})$$

**Bild 121 bis 123** geben einen Überblick über den Verlauf des „Wetters“ während der Messungen, repräsentiert durch die Windrichtung und Windgeschwindigkeit in 6 m Höhe (Instrument A und B), sowie durch die Luftfeuchtigkeit, -temperatur und den Luftdruck in 1,5 m Höhe über dem Boden.

Bild 121 zeigt dabei eine starke Schwankung der mittleren Windrichtung während des Versuches 1 von  $\bar{\alpha}_w \approx \pm 20^\circ$ . Die Windgeschwindigkeit war während der ersten Messung zeitlich konstant und fiel bei den beiden letzten Meßpunkten etwas ab, die mittlere Streuung mit  $\bar{\sigma}_v \approx \pm 1$  m/s ist durchaus normal. Gegen Schluß der Meßreihe wurde die Streuung kleiner.

Versuch 2 (Bild 122) zeigt eine ausgesprochen stabile Windrichtung mit einer mittleren Streuung von nur  $\bar{\alpha}_w \approx \pm 6^\circ$ , während die Geschwindigkeit von 6 auf 8 m/s innerhalb der beiden ersten Meßreihen ansteigt und von der 5. Meßreihe an mit 6 m/s nahezu konstant bleibt. Die mittlere Streuung liegt hier bei  $\bar{\sigma}_v \approx \pm 1,2$  m/s.

Während der Dauer des Versuches 3 (Bild 123) war die Windrichtung ebenfalls wieder sehr stabil.

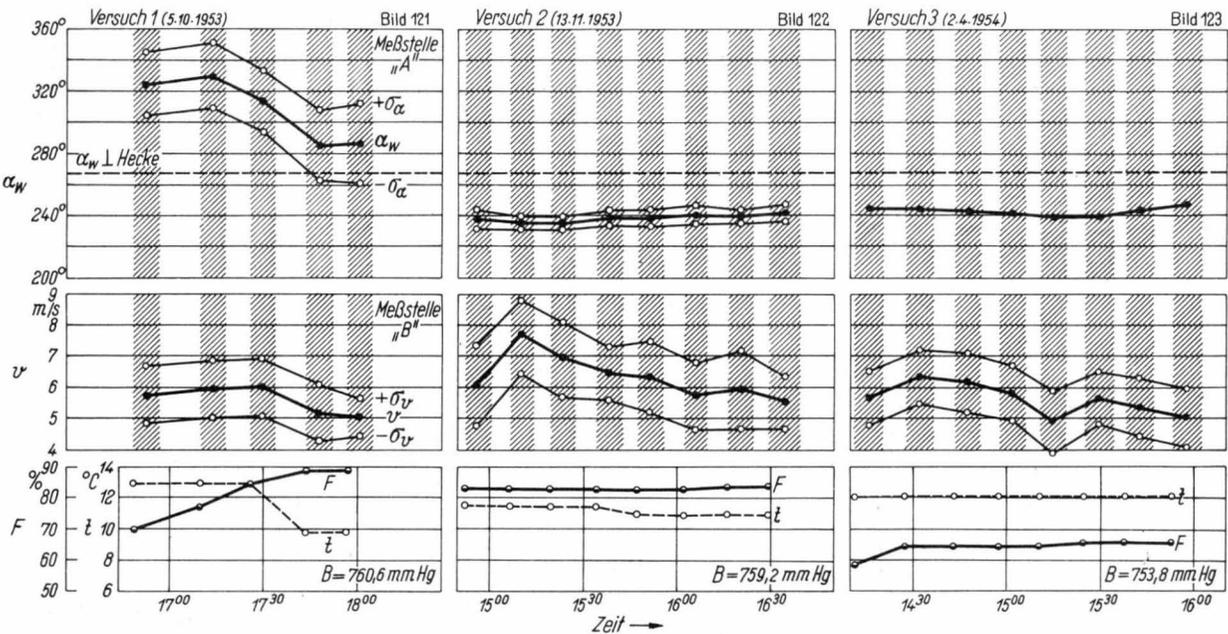


Bild 121 bis 123. Der Verlauf der Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und des Luftdrucks während der Versuche.

Eine Angabe der Streuung ist nicht eindeutig möglich, da sich nach Beendigung des Versuches herausstellte, daß das Instrument A nicht einwandfrei gearbeitet hatte. Nach eigener Schätzung war sie nicht wesentlich. Auch die Geschwindigkeit war ziemlich konstant und wies eine geringere mittlere Streuung von  $\sigma_v \approx \pm 0,9 \text{ m/s}$  auf.

Tafel XXVIII zeigt eine Gesamtdarstellung der Windverteilung in Luv und Lee der Freilandversuche 1 bis 3. Die Wiedergabe der Windprofile in der Form  $\bar{v}/\bar{v}_B$  über  $x/H$  entspricht völlig der Darstellung auf den Tafeln für die Versuchsergebnisse  $v/v_0$  der Windkanalmodellversuche, so daß hier darauf nicht näher eingegangen wird.

Weiterhin ist auf Tafel XXVIII die Streuung der Windgeschwindigkeit (siehe obige Gleichung) im Verhältnis zur mittleren Windgeschwindigkeit an der Nullstelle B ( $\sigma_v/\bar{v}_B$ ) angegeben. Sie nimmt durchweg zum Boden hin ab, woraus hervorgeht, daß die Gleichmäßigkeit des Windes dicht über dem Boden größer ist, als in weiterem Abstand vom Boden. Das Maß der Streuung mit 10 – 20 % entspricht einer normalen Schwankung der Windgeschwindigkeit.

In Bild 124 und 125 ist die Windverteilung in Luv und Lee der künstlichen Hecke in  $1/6$  und  $1/2$  der Heckenhöhe wiedergegeben. Dieses Bild verwendet wiederum dieselbe Art der Darstellung wie sie bei den Modellversuchen im Windkanal gewählt wurde. Man erkennt ganz deutlich das ausgeprägte Windminimum dicht hinter der Hecke und den Anstieg der Windgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand von der Hecke. Außerdem ist ein Einfluß der Schräg-anblasung erkennbar. Die Kurven für den Versuch 1 liegen deutlich über den Kurven für die Versuche 2 und 3. Beim Versuch 1 war die Abweichung der

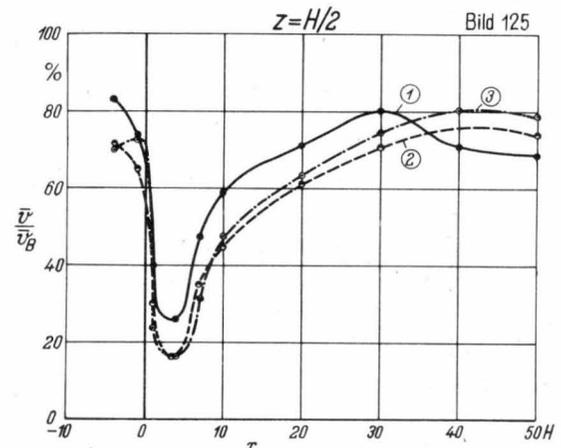
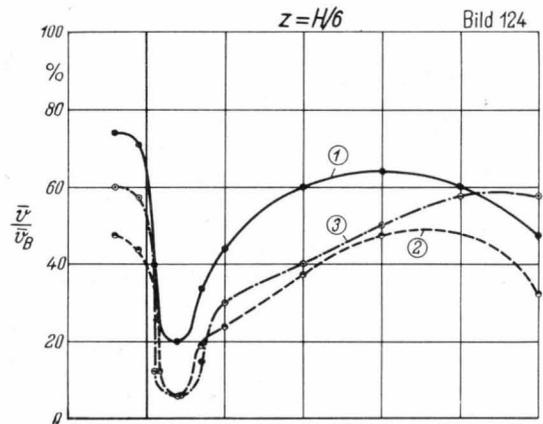
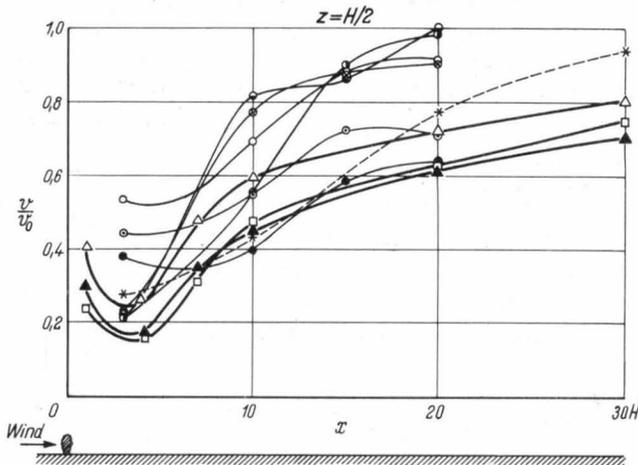


Bild 124 und 125. Die Windverteilung in  $1/6$  und halber Heckenhöhe in Luv und Lee der künstlichen Hecke.

Windrichtung von der Senkrechten auf die Hecke  $41^\circ$ , bei den Versuchen 2 und 3 dagegen nur  $29^\circ$  bzw.  $25^\circ$ . Der Abfall der Kurven von  $x = 30H$  bzw.  $x = 40H$  an liegt darin begründet, daß das Gelände von  $x \approx 15$  bis  $\approx 35H$  ganz leicht ansteigt und ab  $x \approx 45H$  wieder ganz schwach abfällt. Dicht über dem Boden bei  $z =$

$H/6$  macht sich dieser Effekt natürlich noch deutlicher bemerkbar. Wie eine kleine Rechnung zeigt, tritt die Meßlinie bei Schräganblasung (siehe Bild 114) aus dem Windschatten der Hecke umso stärker heraus, je größer die Abweichung der Windrichtung von der Heckensenkrechten ist: bei Versuch 1 schon bei  $x = 30 H$ , bei Versuch 2 und 3 bei  $x \approx 45 H$  bzw.  $\approx 55 H$ . Obwohl dieses Heraustreten aus dem Windschatten eine Erhöhung der Geschwindigkeit zur



**Bild 126.** Vergleich zwischen Freilandmessungen der Windgeschwindigkeit  $v$  in halber Heckenhöhe (im Lee der Hecke) in % der ungestörten Windgeschwindigkeit  $v_0$  an natürlichen und künstlichen Hecken (nach Nøkkentved).

Siehe auch **Zahlentafel 5.**

- $H$  Heckenhöhe
- $z$  Höhe der Messstellen über dem Boden
- $x$  Entfernung der Messstellen von der Hecke in Vielfachen von  $H$

**Bild 126** zeigt einen Vergleich zwischen Meßergebnissen an natürlichen Hecken [40, 41] und der künstlichen Hecke. Man kann hierbei sagen, daß die künstliche Hecke durchweg besser wirkt, als die natürlichen Hecken, die zum Vergleich herangezogen wurden. Das kann verschiedene Ursachen haben, abgesehen davon, daß die Schräganblasung eine bestimmte Rolle spielt:

1. Die lebenden Hecken sind dichter als die künstliche Hecke. Dieser Annahme scheint das tiefere Minimum der künstlichen Hecke zu widersprechen.
2. Die Turbulenz der Luft bei den verglichenen Messungen war verschieden.
3. Das Gelände vor und hinter der Hecke spielt eine gewisse Rolle. Dafür spricht, daß die Geschwindigkeit hinter dem von Nøkkentved vermessenen Lattenzaun mit 38 % bei größerem Abstand von der Hecke schneller wieder ansteigt.
4. Wie die Kanalmessungen gezeigt haben (Versuch 82 bis 84 und 95 bis 97) sind scharfkantige Hindernisse wirksamer als abgerundete. Sicherlich wird das auch bei dem Vergleich in diesem Bild 126 eine Rolle spielen.

Die Freilandversuche waren deshalb durchgeführt worden, um die Verbindung zwischen Windkanalversuch an Heckenmodellen technischer Art und Freilandversuch an lebenden Hecken herzustellen. In **Bild 127** sind diese drei Versuchsgruppen (Windkanalversuch mit künstlichen Heckenmodellen, Freilandversuch mit künstlichen Hecken und Frei-

**Zahlentafel 5.** Freilandmessungen an natürlichen und künstlichen Hecken

|                             | siehe Bild 126 | Hecke                  | Höhe m | Richtung der Hecke | Windrichtung | Abweichung v.d.Senkr. Grad | Messhöhe m | Messhöhe Heckenhöhe | Durchlässigkeit % |
|-----------------------------|----------------|------------------------|--------|--------------------|--------------|----------------------------|------------|---------------------|-------------------|
| nach Nøkkentved             | —○—            | 8 <sup>1)</sup>        | 3      | N-S                | WSW          | ~23                        | 1,5        | 0,5                 | —                 |
|                             | —●—            | 15 <sup>1)</sup>       | 4      | OSO-WNW            | S            | ~23                        | 1,5        | ~0,4                | —                 |
|                             | —○—            | 16 <sup>1)</sup>       | 3      | N-S                | NW           | ~45                        | 1,5        | 0,5                 | —                 |
|                             | —●—            | 26 <sup>2)</sup>       | 3      | N-S                | W            | ~0                         | 1,5        | 0,5                 | —                 |
|                             | —●—            | 27 <sup>1)</sup>       | 3      | NW-SO              | W            | ~45                        | 1,5        | 0,5                 | —                 |
|                             | —●—            | 29 <sup>2)</sup>       | 4      | N-S                | SW           | ~45                        | 1,5        | ~0,4                | —                 |
|                             | ---*---        | Lattenz. <sup>3)</sup> | 3,5    | —                  | —            | —                          | ~0         | 1,5                 | ~0,4              |
| nach Versuchen d. Verfasser | —△—            | künstl.                | 2      | N-S                | ~NW          | ~40                        | 1,5        | 0,5                 | 40                |
|                             | —▲—            | Hecke                  | 2      | N-S                | ~SW          | ~30                        | 1,5        | 0,5                 | 40                |
|                             | —□—            | (Bild 113)             | 2      | N-S                | ~NW          | ~25                        | 1,5        | 0,5                 | 40                |

1) Laubholzhecken. — 2) Nadelholzhecken. — 3) Der Lattenzaun bestand aus waagrecht angeordneten Brettern.

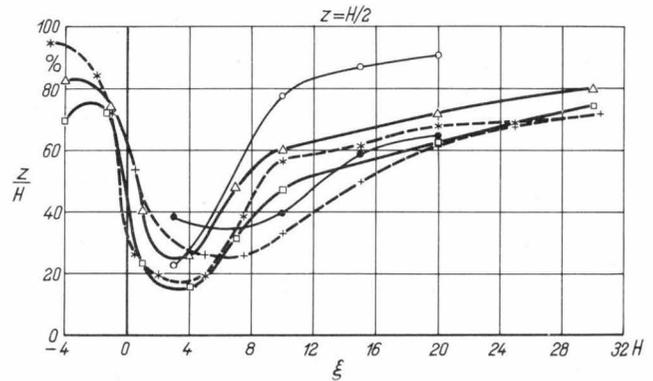
Folge haben müßte, fallen die Kurven ab. Man kann das damit erklären, daß die Geländeform (Anstieg und Abstieg) sehr stark in Erscheinung tritt. Sicherlich sind derartige Erscheinungen ein Zeichen dafür, daß man bei Freilandversuchen ohne genaue Berücksichtigung des Meßgeländes die Ergebnisse nicht zu sehr verallgemeinern darf. Dicht hinter der Hecke ist der Einfluß der hier beobachteten Störung sicherlich gering.

landversuch an natürlich gewachsenen Hecken) zusammen dargestellt. Dabei wurde das  $x$  der Kanalversuche mit dem Faktor 0,5 multipliziert (vergl. auch dazu S. 60). Wie zu sehen, ist die Übereinstimmung gut. Kanalversuch 97 fällt mit Freilandversuch 3 nahezu zusammen. Dazu ist zu sagen, daß die Durchlässigkeiten verschieden sind und auch die Heckenform. Die künstliche Hecke hat eine Durchlässigkeit von 40 % und ist oben scharfkantig,

während das Modell eine Durchlässigkeit zwischen 30 und 40 % hat (2 mal Hecke C mit je 48 %) und oben stark abgerundet ist. Weiterhin stimmt der Kanalversuch 15 mit der Hecke 15 von Nøkkentved gut überein. Die weiteren Kurven sollen nur zeigen, daß Kanalversuche und Freilandversuche an künstlichen sowie natürlichen Hecken unter Berücksichtigung des vorläufigen „Umrechnungsfaktors“ von 0,5 und der Art, wie sie gewonnen wurden, überraschend gut übereinstimmen.

Zum Schluß seien noch einmal mehrere Punkte festgehalten, die sich aus diesen Versuchen und Vergleichen herauschälen:

1. Freilandmessungen an natürlichen oder künstlichen Hecken können bei entsprechender meßtechnischer Anordnung in gleicher Weise durchgeführt werden, wie Windkanalversuche. Man erhält dadurch eine gute Vergleichsmöglichkeit, da in beiden Fällen Windprofile gemessen werden.
2. Freilandmessungen an natürlichen und einer künstlichen Hecke beweisen, daß Windkanalversuche durchaus einen richtigen Einblick in die Grundgesetze des Windschutzes gestatten. Durch Mängel des benutzten Windkanales ist vorerst bei der Übertragung der Kanalergebnisse auf die freie Natur noch ein Umrechnungsfaktor notwendig. Dieser wird voraussichtlich kleiner bzw. verschwindet ganz, wenn ein Spezialwindkanal für Windschutzuntersuchungen erstellt werden



| Versuch Nr. | Objekt   | Boden | Durchlässigkeit | Heckenart od. -Form | Bemerkung     |
|-------------|----------|-------|-----------------|---------------------|---------------|
| 15          | Kanal    | glatt | 48%             | scharfkantig        | Hecke C       |
| 27          | "        | rauh  | ~30+40%         | abgerundet          | 2x Hecke C    |
| 1           | Freiland | -     | 40%             | künstliche Hecke    | -             |
| 3           | "        | -     | 40%             | scharfkantig        | -             |
| 15          | "        | -     | -               | Laubholz            | n. Nøkkentved |
| 27          | "        | -     | -               | "                   | "             |

Bild 127. Vergleich zwischen Freilandmessungen an natürlichen und künstlichen Hecken mit Modellmessungen im Windkanal. Die Windkanalergebnisse wurden dabei auf  $\xi = 0,5 \times$  umgerechnet.

könnte, der ein Grenzschichtprofil ähnlich dem der freien Natur, ähnliche Turbulenz und ähnliche Bodenrauigkeit hat.

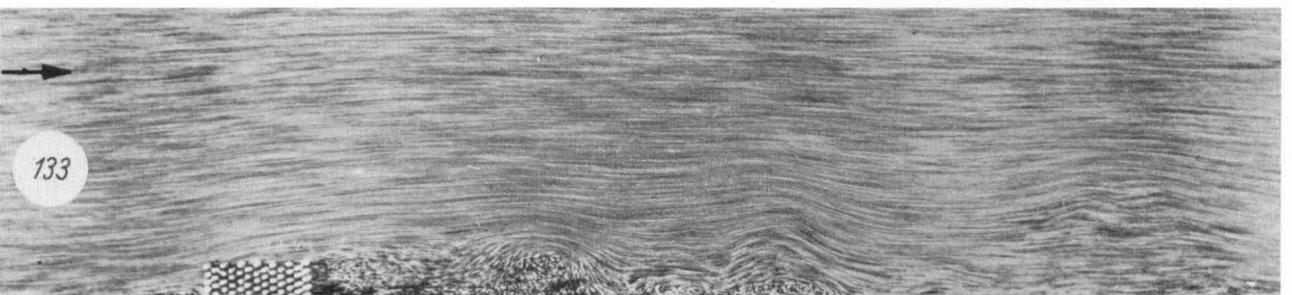
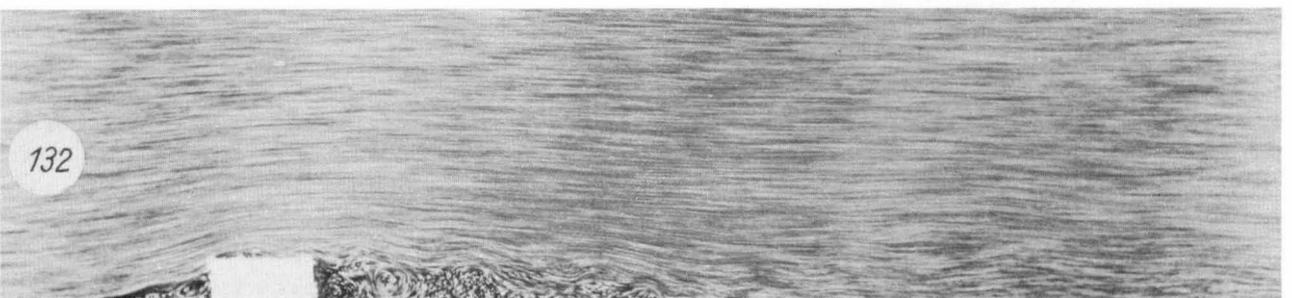
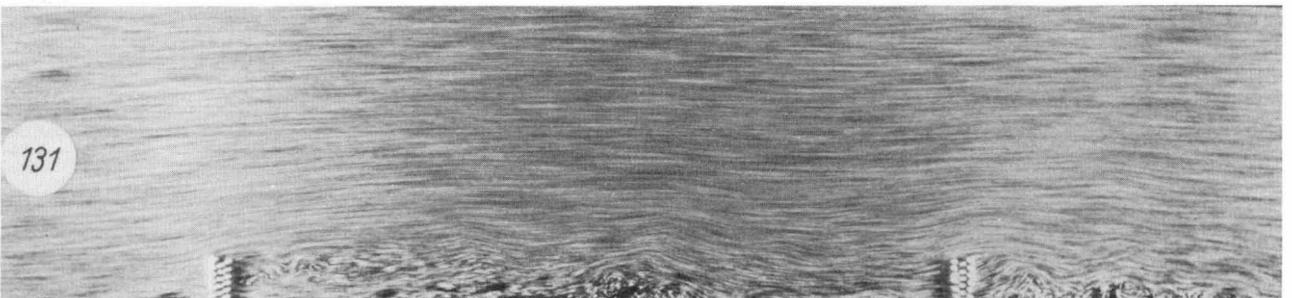
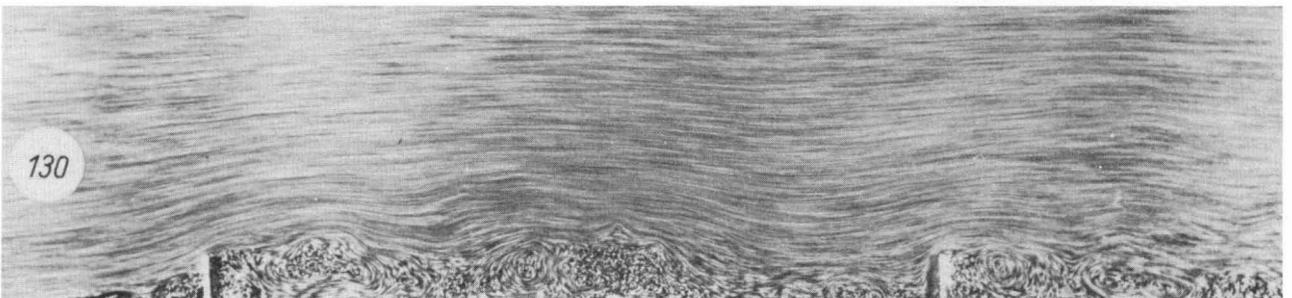
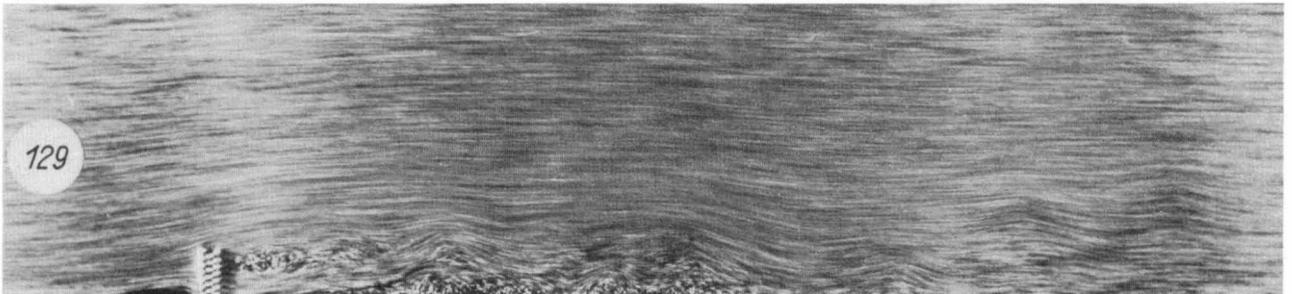
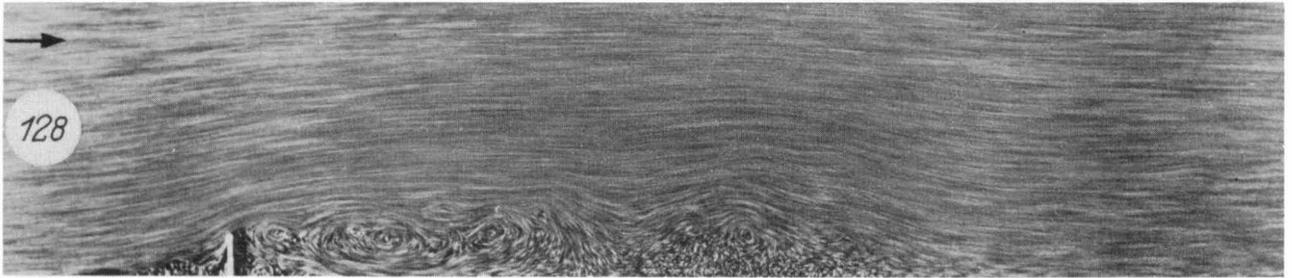
3. Künstliche Hecken wirken im Freien besser, bzw. mindestens genau so gut wie natürliche Hecken. Die Gründe hierfür sind nicht eindeutig und bedürfen weiterer Klärung.

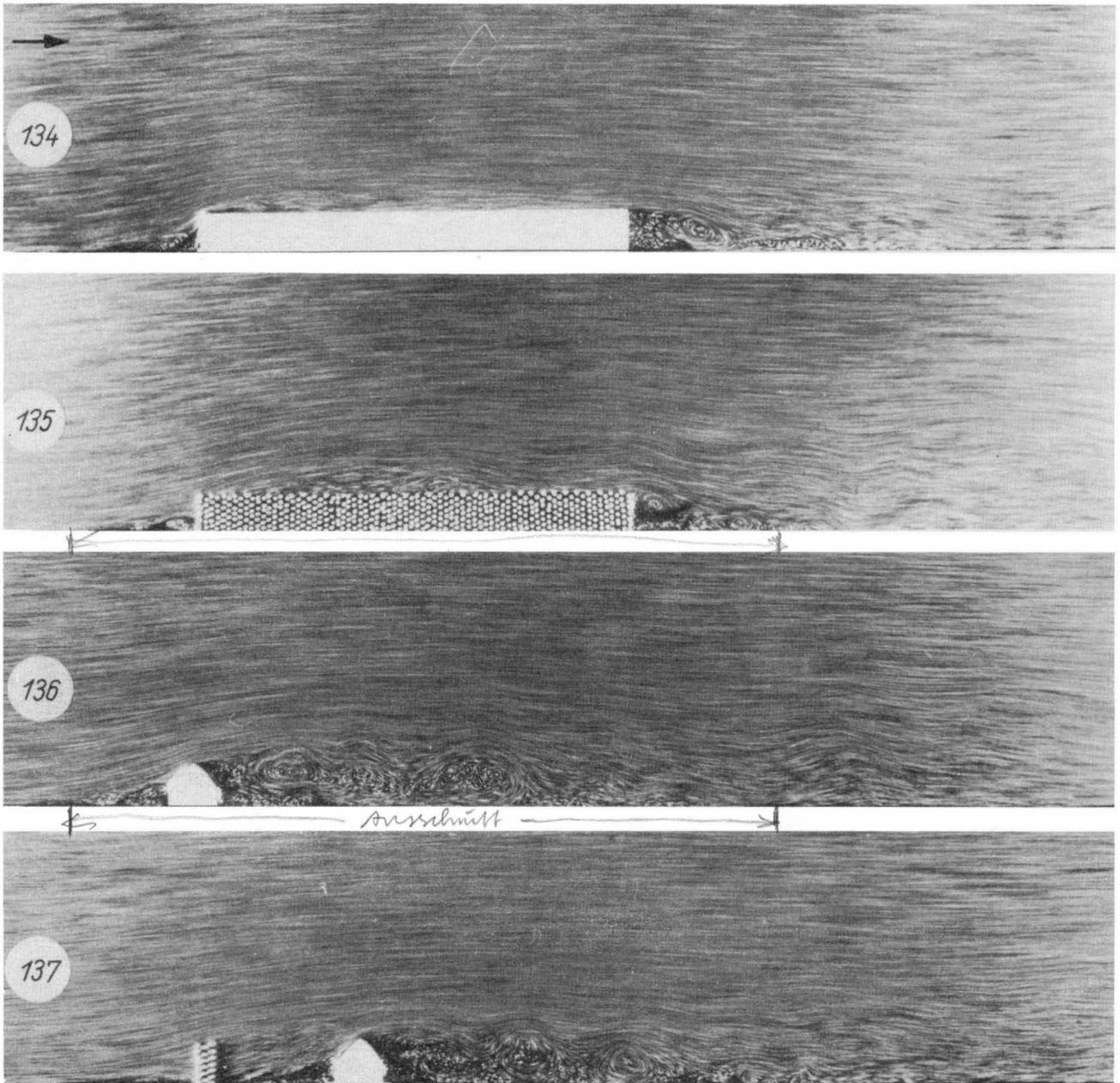
## VI. Strömungsaufnahmen in einem Wasserkanal

In der Strömungstechnik ist es seit langer Zeit üblich, neben den quantitativen Modellversuchen, an die hohe Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit gestellt werden, auch anschauliche Versuche durchzuführen, die nur den Zweck verfolgen, dem Betrachter einen grundsätzlichen Einblick in das Wesen des untersuchten Strömungsvorganges zu verschaffen. Solche qualitativen Versuche kann man sowohl in Luft (Rauchkanäle) als auch in Wasser ausführen. Im letzteren Falle macht man die Strömung an der Oberfläche des Wassers durch aufgestreutes Aluminiumpulver oder dergl. sichtbar [76], wobei man sich in der Regel auf zweidimensionale oder ebene Strömungen beschränkt. Lichtbilder der auf diese Weise hergestellten Strömungszustände sind in vielen Büchern der Strömungslehre zu finden.

Auch die bekannten, in der Aerodynamischen Versuchsanstalt in Göttingen entstandenen Strömungsfilm verdanken ihre Entstehung einem solchen kleinen Wasserkanal. In Zusammenarbeit mit dem Institut für den wissenschaftlichen Film, Göttingen, wurde von den Verfassern in letzter Zeit ein Film „Windschutz. Darstellung der Strömung“ fertiggestellt, der einen guten Einblick in die Vorgänge bei der Umströmung von Windhindernissen vermittelt. Auch bei der Herstellung dieses Filmes wurde ein Wasserkanal verwendet.

Man weiß, in welcher Weise die Strömungsgesetze von den physikalischen Eigenschaften (Dichte, Zähigkeit, Kompressibilität) des strömenden Mediums abhängen [51]. Es ergeben sich bei genauerer Betrachtung (siehe auch Seite 7/8) verschiedene





**Bild 128 bis 137.** Im Wasserkanal aufgenommene Strömungsbilder zur qualitativen Beurteilung des Einflusses verschiedener Hindernisse.

- Bild 128. Undurchlässiges Hindernis.
- Bild 129. Durchlässiges Hindernis.
- Bild 130. Zwei undurchlässige Hindernisse, Abstand voneinander  $15 H$ .
- Bild 131. Zwei durchlässige Hindernisse, Abstand voneinander  $15 H$ .
- Bild 132. Undurchlässiges Hindernis, mittlerer Breite (Tiefe).
- Bild 133. Durchlässiges Hindernis, mittlerer Breite (Tiefe).
- Bild 134. Undurchlässiges Hindernis, grosser Tiefe.
- Bild 135. Durchlässiges Hindernis, grosser Tiefe.
- Bild 136. Überströmung eines Hauses.
- Bild 137. Überströmung eines Hauses mit davor stehender Hecke.

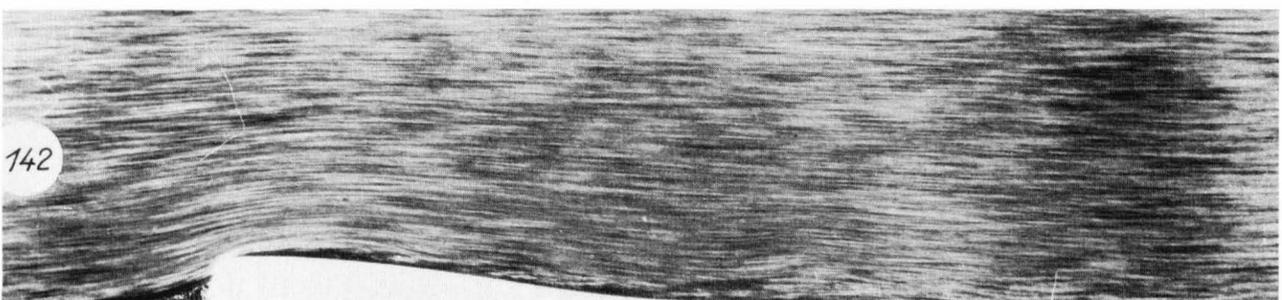
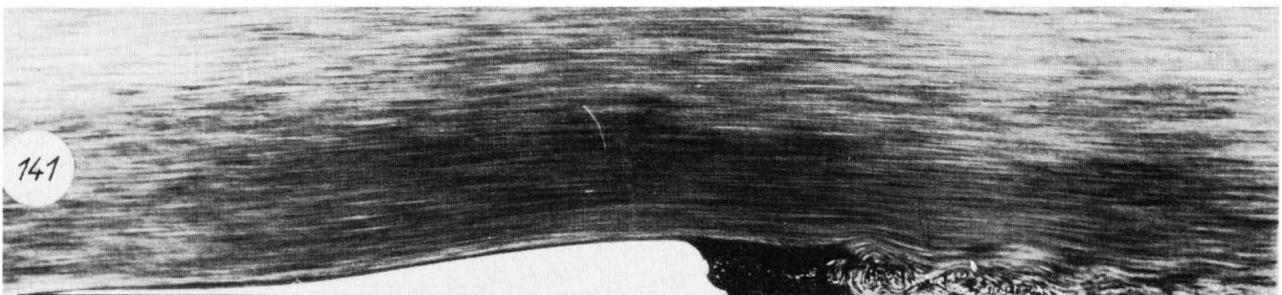
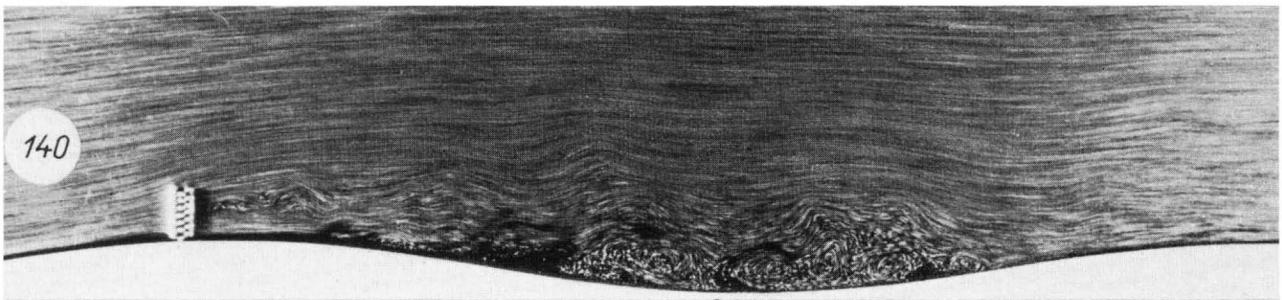
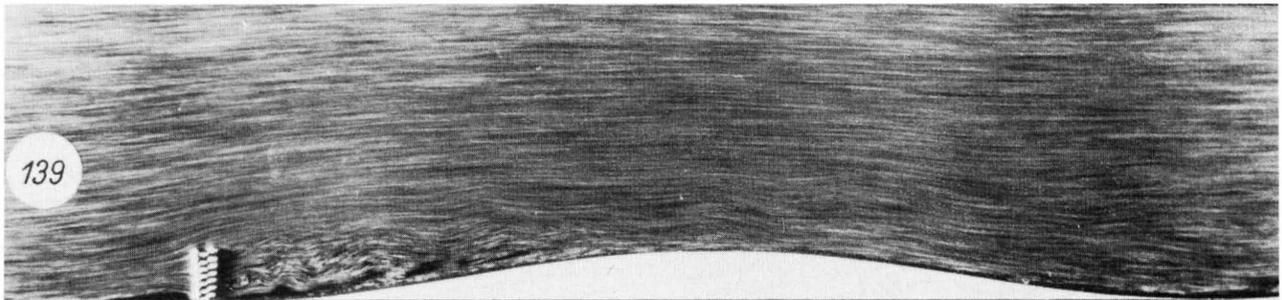
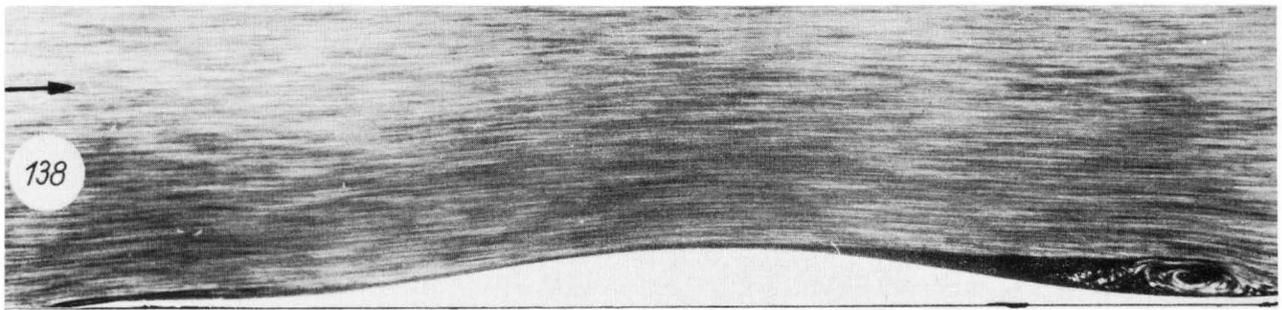
Kennzahlen, die für zwei Strömungszustände – außer der geometrischen Ähnlichkeit der Modelle – übereinstimmen müssen, wenn die Ergebnisse des einen

auf den anderen übertragbar sein sollen. In unserem Falle spielt die *Reynoldssche* Zahl eine entscheidende Rolle. In **Zahlentafel 6** sind deshalb deren Zahlenwerte in der freien Natur, in einem mittelgroßen Windkanal üblicher Abmessungen und in dem uns zur Verfügung stehenden kleinen Wasserkanal einander gegenüber gestellt.

**Zahlentafel 6.**

| Vorgang in   | Windgeschwindigkeit $v$ cm/s | Heckenhöhe $H$ cm | Kinematische Zähigkeit $\nu$ cm <sup>2</sup> /s | <i>Reynoldssche</i> Zahl $Re$ |
|--------------|------------------------------|-------------------|---|-------------------------------|
| Natur        | 2000                         | 300               | 0,15  | $4 \cdot 10^6$                |
| Wind-Kanal   | 4000                         | 3                 | 0,15  | $8 \cdot 10^4$                |
| Wasser-Kanal | 15                           | 3                 | 0,01  | $4,5 \cdot 10^3$              |

Man sieht, daß keine Übereinstimmung erreichbar ist, da weder die Modellgrößen noch die Strömungsgeschwindigkeiten so stark vergrößert werden können. Das bedeutet, daß die im Wasserkanal gewonnenen Strömungsbilder nur für qualitative Aussagen herangezogen werden dürfen.



**Bild 138 bis 142.** Im Wasserkanal aufgenommene Strömungsbilder über Bodenwellen mit und ohne Hindernissen.

Bild 138. Überströmung einer Bodenwelle.

Bild 139. Durchlässiges Hindernis in der Senke einer Bodenwelle.

Bild 140. Durchlässiges Hindernis auf der Kuppe einer Bodenwelle.

Bild 141 und 142. Überströmung einer unsymmetrischen Bodenerhebung (Düne).

Die hier wiedergegebenen Aufnahmen wurden im Wasserkanal des *Instituts für Landtechnische Grundlagenforschung* in der Forschungsanstalt für Landwirtschaft gemacht [78]. Dieser Wasserkanal wurde nach bekannten Vorbildern gebaut.

In die eigentliche, durch parallele Wände begrenzte „Meßstrecke“ des mit Wasser gefüllten Kanals werden die Hindernismodelle an einer Wand eingebaut. Durch entsprechende Einsatzstücke kann auch ein nicht ebener Boden hergestellt werden.

Die mit Alu-Bronze-Pulver bestreute Oberfläche des Wassers wird fotografiert und somit die Bewegungsvorgänge beim Umströmen des Hindernisses festgehalten.

Die Strömung des Wassers längs einer irgendwie gestalteten Wand mit darauf stehenden Hindernismodellen kann (bei Umkippen des Bildes um 90°) als Strömung des Windes über einen geometrisch ähnlich gestalteten Boden mit Hindernissen gedeutet werden. Dabei wird ein Einfluß der gegenüberliegenden Wand als vernachlässigbar angesehen, was sicher zulässig ist, wenn die Hindernishöhe nicht mehr als 1/4 der Kanalbreite beträgt. — Wir betrachten nun der Reihe nach die Strömungsbilder.

Ein undurchlässiges Hindernis (Mauer, **Bild 128**) bewirkt auf der Luvseite einen starken Stau und auf der Leeseite heftige Wirbel, Rückströmung und ein baldiges Wiederanlegen des von der Mauer nach oben gelenkten Windes an den Boden.

Ein durchlässiges Hindernis (Hecke, **Bild 129**) hat nur geringe Luvwirkung, bremst aber auf der Leeseite die Windgeschwindigkeit am Boden recht gleichmäßig ab. Aus den Strömungsbildern allein kann man dieses Ergebnis nicht gewinnen, man muß die im Abschnitt II mitgeteilten Messungen heranziehen. Die Reichweite eines durchlässigen Hindernisses ist größer als die eines undurchlässigen. **Bild 130** zeigt das Zusammenwirken zweier undurchlässiger Hindernisse im Abstand  $15 H$  ( $H$  = Heckenhöhe). **Bild 131** zeigt das Zusammenwirken zweier durchlässiger Hindernisse im Abstand  $15 H$  voneinander. Die Schutzwirkung ist offenbar recht gut.

Ein undurchlässiges Hindernis größerer Tiefe (**Bild 132**) zeigt kurz hinter der Hinterkante das Einfallen des Windes auf den Boden, während ein durchlässiges Hindernis gleicher Tiefe (Waldstreifen) eine weitreichendere Bremswirkung zeigt (**Bild 133**).

Hinter einem undurchlässigen Hindernis großer Tiefe (**Bild 134**) erreicht die volle Strömung sehr bald wieder den Boden. Fast das gleiche Bild (**Bild 135**) zeigt das „durchlässige“ Hindernis großer Tiefe (Wald). Ein solches dichtes Hindernis ist praktisch undurchlässig und hat, genau wie das undurchlässige Hindernis, keine weitreichende Schutzwirkung. Vergleicht man **Bild 128**, **Bild 132** und **Bild 134**, so erkennt man deutlich, wie der Wind umso schneller wieder am Boden anliegt, je tiefer das undurchlässige Hindernis ist.

**Bild 136** zeigt die Umströmung eines Hauses mit dem weit leewärts reichenden Wirbelgebiet. Eine Hecke vor dem Haus (**Bild 137**) verringert den Druck auf das Haus und das Wirbelgebiet auf der Leeseite des Hauses.

In **Bild 138** streicht der Wind über eine Bodenwelle. Man erkennt an der Zusammendrängung der Stromlinien die höhere Geschwindigkeit auf der Anhöhe und die Ablösung der Strömung vom Boden hinter der Anhöhe. Eine Hecke im Tal vor der Anhöhe (**Bild 139**) zeigt eine wesentlich geringere Wirkung als eine Hecke auf dem Berg (**Bild 140**).

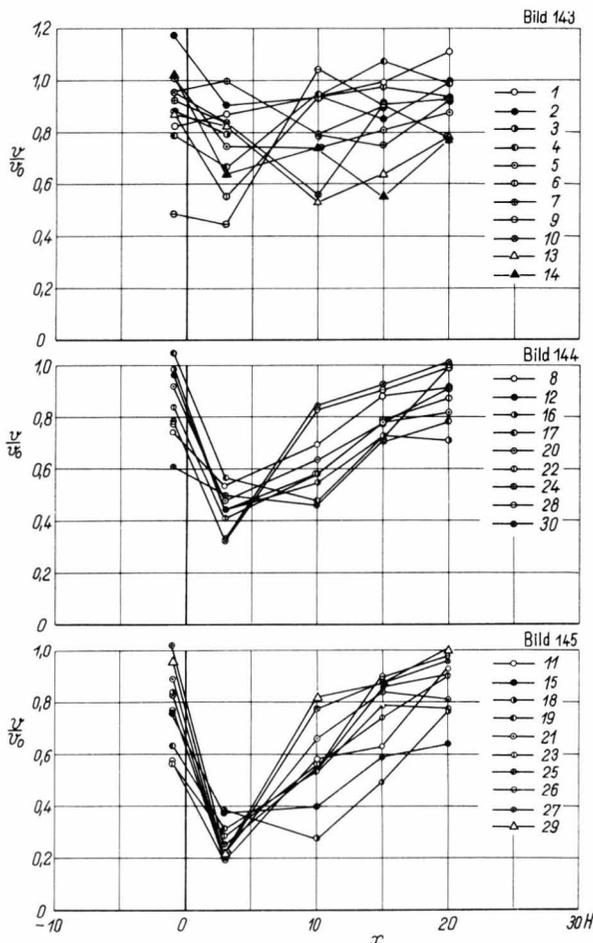
Eine unsymmetrische Bodenwelle (Düne am Meer) wird vom Winde überstrichen, in **Bild 141** vom Land her, in **Bild 142** von der See her. Man erkennt in **Bild 141** die starke Ablösung am Dünenkamm und das fast windstille Gebiet in der „Kuhle“. In **Bild 142** sieht man vor dem Kamm einen starken Stau, am Kamm eine große Geschwindigkeitserhöhung und auf der Leeseite ein Anliegen der Strömung.

Da, wie oben schon auseinandergesetzt wurde, die *Reynoldsschen* Zahlen und die Turbulenzverhältnisse in dem benutzten Wasserkanal nicht denen der freien Natur entsprechen, können diese Strömungsbilder nicht zu quantitativer Auswertung herangezogen werden. Für qualitative Vergleiche und zur Erzielung anschaulicher Erkenntnisse sind sie jedoch wertvoll.

## VII. Vergleich zwischen Modell- und Freilandversuchen

In Bild 143 bis 150 sind sämtliche uns bekannt gewordenen Freilandmessungen im gleichen Maßstab dargestellt.

**Bild 143 bis 145** enthalten zunächst übereinander in drei Gruppen die Ergebnisse der dänischen Messungen von *Nøkkentved* [40] an 30 verschiedenen lebenden Hecken. Bei den lebenden Hecken besteht eine gewisse Schwierigkeit darin, ein brauchbares Maß für ihre Durchlässigkeit anzugeben. Es ist jedenfalls nicht möglich, ein einfaches Flächenver-



**Bild 143 bis 145.** Die prozentuale Windgeschwindigkeit hinter lebenden Hecken nach *Nøkkentved* mit den in [40] angegebenen Versuchsnummern.

$\varphi$  wirksame Durchlässigkeit  
 Bild 143:  $\varphi = 0,6$  bis  $1,0$  (Gruppe IV und V)  
 Bild 144:  $\varphi = 0,4$  bis  $0,6$  (Gruppe III)  
 Bild 145:  $\varphi = 0,2$  bis  $0,4$  (Gruppe II).

hältnis wie bei den Heckenmodellen (vgl. Bild 4 bis 7) als Maß der Durchlässigkeit zu verwenden. Wenn man die Meßergebnisse hinter verschiedenen durchlässigen Hecken betrachtet und sie mit entsprechenden Ergebnissen von Modellversuchen (z.B. Bild 29 bis 32) vergleicht, so erkennt man unschwer, daß die Durchlässigkeit der Hindernisse in einem Abstand von rund  $5H$  auf der Leeseite den stärksten Einfluß auf die Windgeschwindigkeit ausübt. Man könnte deshalb aus der gemessenen Geschwindigkeitskurve nachträglich eine „wirksame“ Durchlässigkeit des untersuchten Hindernisses ableiten. Das Verhältnis

$$\varphi = \frac{v_{x=5H}}{v_0}$$

worin  $v_{x=5H}$  die mittlere Geschwindigkeit im Abstand  $5H$  auf der Leeseite in  $1,5$  m Höhe und  $v_0$  die mittlere Geschwindigkeit an ungestörter Stelle in  $1,5$  m Höhe ist, könnte dabei als maßgebend betrachtet werden. Da dieses  $\varphi$  ein rein empirisches Maß ist und selbstverständlich keine große Genauigkeit besitzen kann, empfiehlt sich zunächst nur eine grobe Unterteilung nach dem Schema in **Zahlentafel 7**.

**Zahlentafel 7.**

| Gruppe | $\varphi$   | Durchlässigkeit     | Windschutzwirkung |
|--------|-------------|---------------------|-------------------|
| I      | 0,0 bis 0,2 | undurchlässig       | gering            |
| II     | 0,2 " 0,4   | schwach durchlässig | sehr gut          |
| III    | 0,4 " 0,6   | durchlässig         | gut               |
| IV     | 0,6 " 0,8   | stark durchlässig   | gering            |
| V      | 0,8 " 1,0   | voll durchlässig    | verschwindend     |

Wenn wir dieses Verfahren auf die dänischen Messungen an 30 Einzelhecken [40] anwenden, so gehören zu

Gruppe I: keine Hecke;

Gruppe II: die Hecken Nr. 11, 15, 18, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 29 (s. Bild 145);

Gruppe III: die Hecken Nr. 8, 12, 16, 17, 20, 22, 24, 28, 30 (s. Bild 144);

Gruppe IV: die Hecken Nr. 3, 4, 5, 6, 9, 10, 13, 14 (s. Bild 143);

Gruppe V: die Hecken Nr. 1, 2, 7 (s. Bild 143).

Man erkennt deutlich, wie sich diese Gruppierung in den Meßergebnissen bei 5 H abzeichnet. Die Streuung der Kurven ist aber sehr groß. Vergleicht man sie außerdem mit den übrigen Freilandmessungen und unseren Modellmessungen, so ist festzustellen, daß die Zahl der Meßpunkte, besonders bei den kleinen Abständen hinter den Hecken, offensichtlich zu gering ist, um den Kurvenverlauf richtig wiederzugeben.

Den dänischen Messungen in Bild 143 bis 145 ist eine Serie entsprechender Messungen des Schweizer W. Nägeli [37] gegenübergestellt (Bild 146). Es handelt sich hier um „ausgeglichene Windkurven von 12 Objekten“, deren Beschaffenheit und Lage in der darunter stehenden Legende angegeben ist. Vergleicht man diese Kurven mit entsprechenden Kurven aus unseren Modellmessungen (z.B. Bild 29 bis 32), so muß man schließen, daß die von Nägeli vermessenen Objekte schwach durchlässig, z.T. sogar fast undurchlässig waren. Vergleicht man die Schweizer mit den dänischen Messungen, so zeigen die ersteren eine bessere Systematik und geringere Streuung. Die Erkenntnis, daß es außerordentlich schwer ist, aus Freilandmessungen sy-

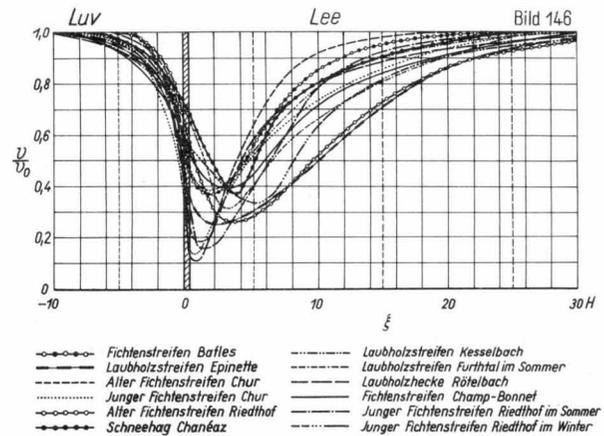


Bild 146. Die prozentuale Windgeschwindigkeit hinter Windschutzstreifen nach Nägeli [37].

stematische Ergebnisse herzuleiten, wird durch die in Bild 143 bis 145 zusammengestellten Kurven nur bestärkt.

Nicht anders ist auch der Eindruck von den Kurvenvergleichen in Bild 147 und 148. Hier sind die dänischen Messungen hinter ziemlich breiten Waldgebieten aufgetragen, und zwar so auf zwei Gruppen verteilt – wie in dem Originalbericht von

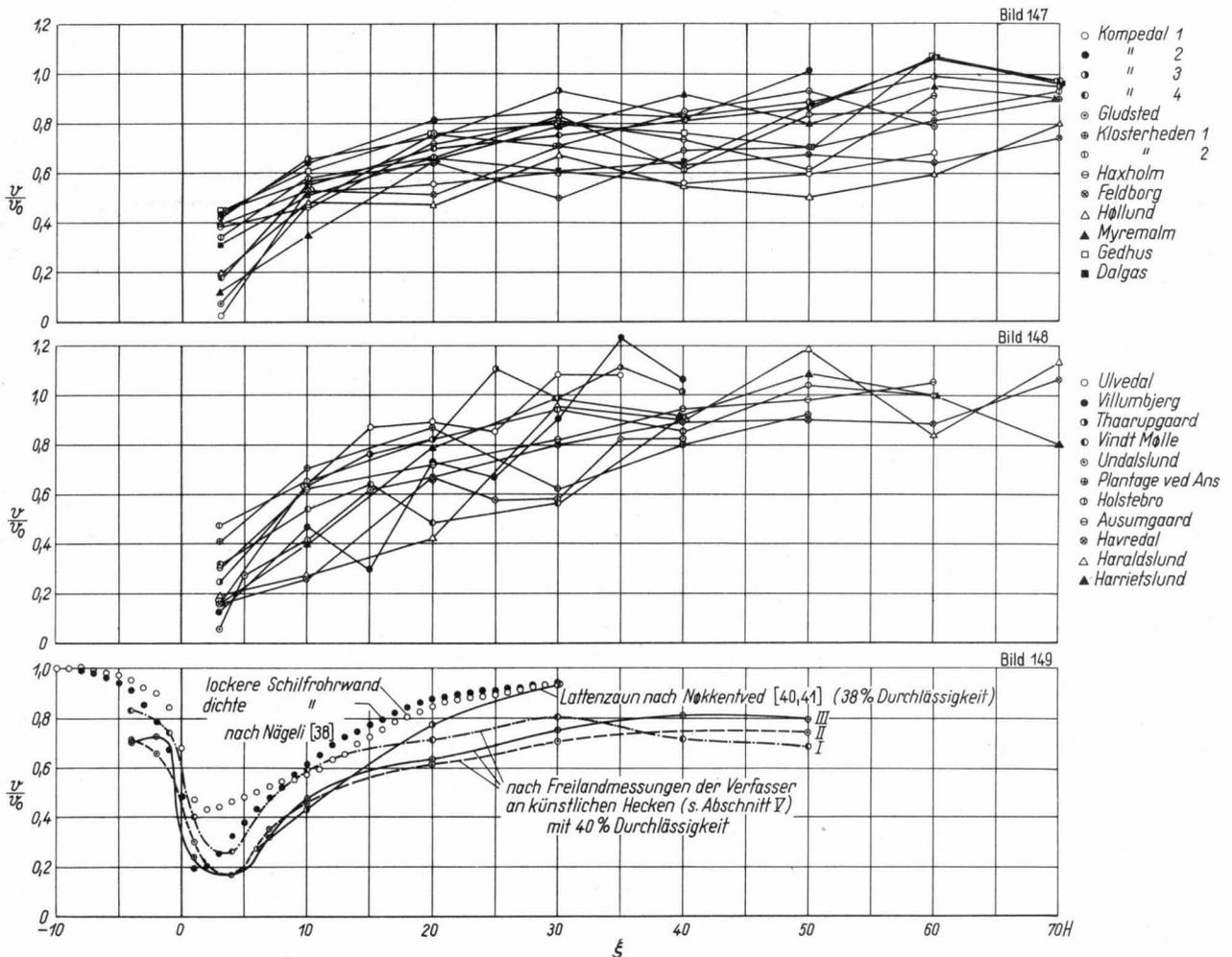
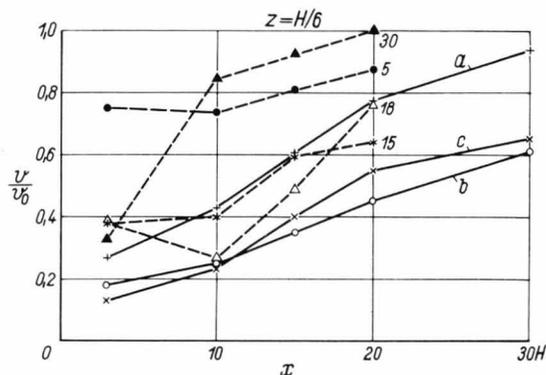


Bild 147 und 148. Die prozentuale Windgeschwindigkeit hinter Waldstreifen nach Nøkkentved [41].

Bild 147. Waldstreifen mit mehr als 2 km Breite. Bild 148. Waldstreifen mit weniger als 2 km Breite.

Bild 149. Vergleich von Freilandmessungen mit verschiedenen Windschutzobjekten.



**Bild 150.** Vergleich von Freiland- und Windkanalmessungen an verschiedenen Windschutzobjekten nach Nøkkentved [40].

- a 3,5 m hoher Bretterzaun im Freien, 38 % Durchlässigkeit
- b } Modellzaun wie a im Windkanal
- c }
- 5 stark durchlässige, 6 m hohe Weidenhecke
- 15 } schwach durchlässige, 4 bzw. 6 m hohe Weissdornhecke
- 18 }
- 30 fast undurchlässige, 4 m hohe Eschenhecke

Nøkkentved [41] –, daß die obere Gruppe sich auf Waldgebiete von mehr als 2 km Breite, die untere Gruppe auf solche von weniger als 2 km Breite bezieht. In der letzteren Gruppe (Bild 148) wird im Mittel die ungestörte Windgeschwindigkeit in geringerem Abstand hinter den Hindernissen wieder erreicht als in der ersteren Gruppe (Bild 147). Die Streuung ist aber wieder sehr groß, z.T. sicherlich auch dadurch bedingt, daß der Boden auf der Lee-seite nicht völlig eben war und die Anblaserichtung nicht genau senkrecht auf der Waldkante stand. Bei allen Freilandmessungen sind überdies zufällige Abweichungen von der ebenen (zweidimensionalen) Strömung möglich.

Als dritte Gruppe sind in Bild 149 die Meßergebnisse an künstlichen Hecken hinzugefügt. Es handelt sich dabei um einen von Nøkkentved [40] vermessenen 3,5 m hohen Bretterzaun, um zwei von Nægeli [38] untersuchte 2,2 m hohe Schilfrohwände und um unsere eigenen, in Abschnitt V beschriebenen Freilandmessungen an 2 m hohen durchflochtenen Drahtgeweben. Der Verlauf der Kurven ist ziemlich ähnlich, die beiden Kurven von Nægeli zeigen den durch die verschiedene Durchlässigkeit bedingten Unterschied; die Kurve von Nøkkentved fällt zunächst sehr gut mit unseren eigenen Kurven zusammen, nähert sich bei größeren Entfernungen hinter dem Hindernis aber immer mehr den Kurven von Nægeli. Daß unsere Kurven offensichtlich nicht an den Wert der ungestörten Windgeschwindigkeit heransteigen wollen, liegt – wie schon in Abschnitt V erklärt – sicher daran, daß das Gelände hinter unseren künstlichen Hecken in größerer Entfernung ganz leicht abfiel. Außerdem muß auch immer an die schräge Anblasung gedacht werden (vgl. S. 51/52).

Aus allen Kurven in Bild 143 bis 149 ergibt sich, daß es unmöglich ist, die Reichweite eines Hecken-schutzes durch den Abstand hinter der Hecke zu

definieren, bei dem der Wind seine volle (unge-störte) Stärke wieder erreicht. Da die Kurven in diesem Bereich fast alle sehr flach verlaufen, ist eine verlässliche Festlegung dieses Punktes schwierig, wenn nicht unmöglich. Eine Definition der Reichweite sollte deshalb lieber den Abstand benutzen, bei dem der Wind in einer bestimmten Höhe (z.B. 1,5 m oder auch  $H/4$ ) einen gewissen Prozentsatz (z.B. 80 %) der vollen (unge-störten) Windstärke wieder erreicht.

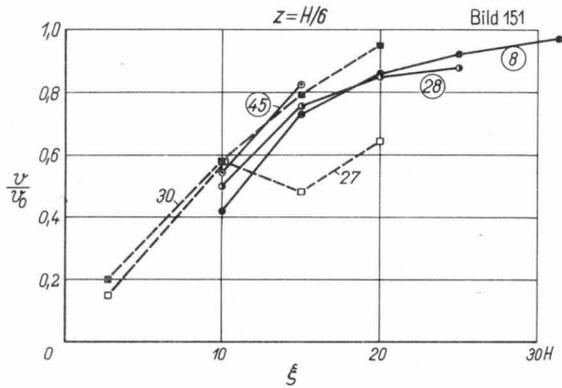
Wenn man nun den Versuch unternimmt, Modell- und Freilandversuche, die einander möglichst gut entsprechen, zu vergleichen, so stellt man in fast allen Fällen fest, daß sich im Modellversuch größere Reichweiten für die Schutzwirkung eines Hindernisses ergeben, als im Freilandversuch. Das hat schon Nøkkentved [40] beim Vergleich der Messungen an Bretterzäunen im Windkanal und im Freien festgestellt und daraus die Folgerung gezogen, man müsse die im Windkanal auf der Leeseite von Hindernissen gemessenen Geschwindigkeiten mit etwa 1,5 multiplizieren, um die in der freien Natur vorkommenden Werte zu erreichen. Dieser Schluß stützt sich auf die in Bild 150 gegenübergestellten Meß-ergebnisse.

Die von uns angestellten Vergleiche, die in Bild 151 bis 153 niedergelegt sind, ergeben stattdessen, daß es besser erscheint, die im Windkanal bei  $x/H$  in Lee eines Hindernisses gemessenen Geschwindigkeiten auf etwa  $\xi/H = 0,5 x/H$  in der freien Natur zu übertragen. Die im Windkanal gemessenen Kurven werden also nicht nach oben proportional erhöht, sondern nach links proportional verkürzt.

In Bild 151 sind unsere Modellversuche 8, 28 und 45 an undurchlässigen Hindernissen zwei dänischen Messungen an lebenden Hecken (3 m hohe Weißdornhecke, 4 m hohe Eschenhecke) gegenübergestellt, wobei die Modellversuchsergebnisse bei auf die Hälfte verkürzten Entfernungen ( $\xi = 0,5 x$ ) aufgetragen wurden. Es ergibt sich so eine recht gute Übereinstimmung zwischen Modell- und Großversuch.

Bild 152 enthält zum Vergleich unsere Versuche 15 und 47 an durchlässigen Modellhecken (Abszissen verkürzt) und die dänischen Messungen an einer 4 m hohen Weißdornhecke. Auch hier kann man eine recht gute Übereinstimmung zwischen Freiland- und Modellversuch feststellen.

Einen weiteren Vergleich zeigt Bild 153. Die Freilandmessung stammt von Nægeli [36] und bezieht sich auf zwei hintereinander liegende Windschutzstreifen in der Rhoneebene. Die gestrichelt eingetragenen Kurven sind unserem Versuch 20 an zwei hintereinander stehenden Modellhecken der Durchlässigkeit C entnommen, und zwar so, daß



**Bild 151.** Vergleich von Windkanalversuchen an undurchlässigen Hindernissen mit Messungen an lebenden Hecken nach Nøkkentved.

Windkanalversuche: Abszisse auf 0,5 verkürzt

Modellversuche der Verfasser:

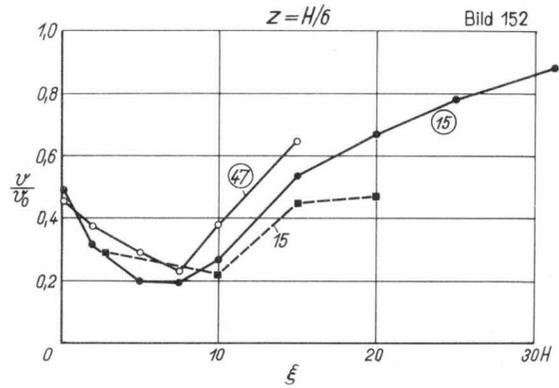
Versuch (8)  
" (28)  
" (45) } 30 mm hohe undurchlässige Modellhecken

Freilandversuche nach Nøkkentved:

Versuch 30 4 m hohe Eschenhecke  
" 27 3 m hohe Weissdornhecke

die Modellhecken zum Vergleich jeweils an das hintere Ende der Windschutzstreifen gerückt sind. Außerdem sind – wie in den beiden vorangehenden Bildern – die Abszissen auf 0,5 verkürzt. Die Übereinstimmung der Modell- und Freilandergebnisse ist recht erfreulich. Die Windminima hinter den Hindernissen stimmen recht gut überein. Daß hinter dem ersten Hindernis der Wiederanstieg der Windgeschwindigkeit im Modellversuch später erfolgt als im Großversuch, hinter dem zweiten Hindernis aber in beiden Fällen ziemlich ähnlich verläuft, kann wohl durch die zu geringe Turbulenz des Luftstrahls im Windkanal erklärt werden. Nachdem der Luftstrahl durch das erste Hindernis stark turbulent gemacht ist, ergibt sich eine bessere Übereinstimmung zwischen Modell- und Freilandversuch hinter dem zweiten Hindernis.

In Bild 153 würde die Übereinstimmung zwischen Modell- und Großversuch noch besser ausfallen, wenn man die Abszissen aus dem Modellversuch noch stärker, etwa auf 0,4 verkürzte. Da die beiden vermessenen Waldstreifen in der Rhoneebene über 20 m hoch sind, die von Nøkkentved untersuchten Hecken aber Höhen zwischen 2 und 8 m haben, muß mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß der Umrechnungsfaktor für die Abszissenverkürzung noch von der Höhe abhängt und bei



**Bild 152.** Vergleich von Windkanalversuchen an durchlässigen Modellen mit Messungen an lebenden Hecken.

Windkanalversuche: Abszisse auf 0,5 verkürzt.

Modellversuche der Verfasser:

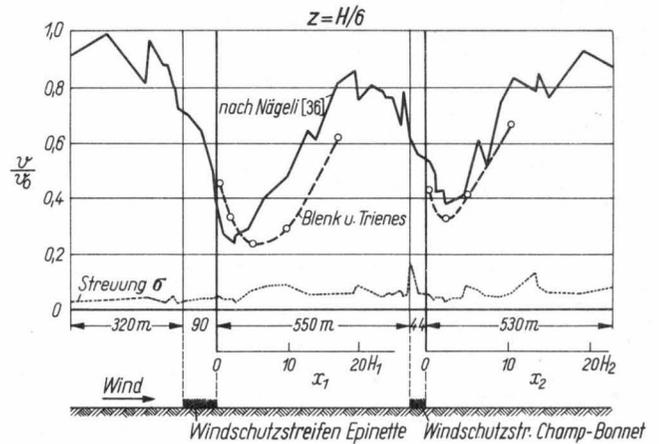
Versuch (15)  
" (47) } 30 mm hohe durchlässige Modellhecken

Freilandversuche nach Nøkkentved:

Versuch 15 4 m hohe Weissdornhecke

einer Höhe von 30 mm den Wert 1, bei einer Höhe von 2 m den Wert 0,5 und bei einer Höhe von 20 m den Wert 0,4 annimmt. Die bislang vorliegenden Versuchsergebnisse reichen jedoch für eine verbindliche Aussage hierüber nicht aus.

Dem Praktiker, der unsere in den Tafeln I bis XVIII und den entsprechenden Bildern enthaltenen Versuchsergebnisse verwenden will, ist jedenfalls zu empfehlen, die Abszissen jeweils auf den halben Wert zu verringern, die Windgeschwindigkeitskurven dann aber unverändert zu übernehmen.



**Bild 153.** Vergleich von Windkanalversuchen an zwei hintereinander stehenden Modellhecken mit Messungen an zwei Waldstreifen nach Nägeli.

Windkanalversuche der Verfasser: Abszisse auf 0,5 verkürzt  
Versuch (20) zwei Modellhecken C im Abstand von 45 H

## VIII. Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse von Windkanalversuchen mitgeteilt, bei denen die Geschwindigkeitsverteilung in Luv und Lee von auf einem Boden stehenden Hindernissen (Modellen von Windschutzhecken) verschiedener Form und Durchlässigkeit gemessen wurde. Weitere Modellmessungen bezogen sich auf die Winddruckverteilung an einem Gebäude, das in verschiedener Lage zu einer Schutzhecke steht, und auf die Bodenverdunstung in der Nähe von Hindernissen. Die Messungen wurden ergänzt durch qualitative Versuche zur Sichtbarmachung der Umströmung von Hindernissen in einem Wasserkanal und durch einige Großversuche an künstlichen Windschutzhecken in der freien Natur.

Der Vergleich unserer Modellversuchsergebnisse mit entsprechenden Ergebnissen von Freilandmessungen, die leider immer noch nur sehr spärlich vorliegen und überdies aus verständlichen Gründen im allgemeinen sehr starke Streuungen aufweisen, hat ergeben, daß man die im Modellversuch bei der relativen Entfernung  $x/H$  hinter dem Hindernis gemessenen Geschwindigkeitsverhältnisse in der freien Natur bei der relativen Entfernung  $\xi/H = 0,5 x/H$  vorfindet.

Unsere Versuche lassen vermuten, daß dieser Umrechnungsfaktor davon abhängig ist, in welchem Maße sich die Turbulenz, die Beschaffenheit der Bodenoberfläche (Rauhigkeit) und das Windprofil in Bodennähe längs der Höhe im Windkanal und im Freien unterscheiden. Bei Verwendung eines genügend langen Windkanals mit rauhem Boden, über dem sich dann ein Windprofil wie im Freien einstellt, darf man auf einen Umrechnungsfaktor von 1 hoffen; d.h. der Windkanal liefert dann unmittelbar übertragbare Ergebnisse.

Wendet man auf unsere Modellversuchsergebnisse den oben genannten Umrechnungsfaktor von 0,5 an, so kann man aus ihnen quantitative Schlüsse ziehen. Im einzelnen seien folgende Ergebnisse festgehalten:

1. Die Tiefenwirkung einer Hecke in Luv und Lee ist ihrer Höhe  $H$  proportional.
2. Auf der Luvseite haben durchlässige Hecken eine sehr geringe Wirkung, während undurchlässige Hecken bis zu etwa  $3 H$  vor der Hecke eine Windverminderung um 10 % aufweisen.
3. Auf der Leeseite hängt der Windgeschwindigkeitsverlauf sehr stark von der Durchlässigkeit der Hecke oder des Hindernisses ab. Hinter undurchlässigen Hindernissen steigt die Windgeschwindigkeit sehr bald wieder an und erreicht die ungestörten Werte schneller als hinter durchlässigen Hindernissen. Die Schutzwirkung der durchlässigen Hindernisse ist also größer als die der undurchlässigen. Am günstigsten ist bei geometrisch klar definierten Hindernissen eine Durchlässigkeit von 40 bis 50 %.
4. Bei einer Baumreihe, deren Belaubung im oberen Mittel ein durchgehendes Hindernis darstellt, wird die Windgeschwindigkeit im unteren Bereich zwischen den Stämmen sogar größer. In größerer Entfernung jedoch liefert eine Baumreihe den gleichen Schutz wie eine Hecke gleicher Gesamtdurchlässigkeit.
5. Ordnet man mehrere undurchlässige Hecken hintereinander an, so ist bei einem Heckenabstand von  $30 H$  eine Verminderung der Windgeschwindigkeit um rund 30 %, bei einem Abstand von  $20 H$  eine Verminderung um rund 50 % zu erwarten.
6. Ein undurchlässiges Hindernis größerer Tiefe (etwa  $2 H$  und mehr), z.B. ein Waldstreifen, zeigt im Lee ein merklich früheres Wiederansteigen der Windgeschwindigkeit als ein undurchlässiges Einzelhindernis, z.B. eine Mauer.
7. Bei schwach welligem Boden (Höhe der Bodenwelle = Höhe der Hecke) ist eine durchlässige Hecke auf der Kuppe oder kurz vor der Kuppe (in Strömungsrichtung gesehen) auf größere Entfernung wirksam als eine entsprechende Hecke in der Senke oder auf dem absteigenden Hang der Bodenwelle.
8. Eine Erhöhung der Luftturbulenz im Windkanal beeinflusst die Modellversuchsergebnisse nur wenig, so daß kaum Aussicht besteht, die festgestellten Unterschiede zwischen Freiland- und Modellversuchen durch die unterschiedliche Turbulenz allein zu erklären.
9. Eine Erhöhung der Bodenrauhigkeit dagegen bringt die Modellversuchsergebnisse in größere Nähe zu den Freilandversuchsergebnissen, sodaß berechnete Hoffnungen besteht, bei künftigen Vergleichsmessungen durch Verwendung rauher Böden im Windkanal bessere Übereinstimmung als

- bisher zu erzielen. Wirkliche Übereinstimmung wird wahrscheinlich erst dann möglich werden, wenn im Modellversuch ausser dem rauhen Boden eine lange Anlaufstrecke vorhanden ist und dadurch das Windgeschwindigkeitsprofil der ungestörten Strömung den Verhältnissen in der freien Natur besser angepaßt werden kann.
10. Die Lochgröße bei gleicher Durchlässigkeit hat keinen merklichen Einfluß, es sei denn, daß die Abmessungen der Löcher die Größenordnung der Heckenhöhe erreicht.
  11. Abrundungen an der Oberkante undurchlässiger und durchlässiger Hindernisse liefern eine Verringerung der Schutzwirkung. Vielleicht kann auch dieser Effekt zur Verringerung der Unterschiede zwischen Freiland- und Modellversuchsergebnissen beitragen.
  12. Ist die Durchlässigkeit eines Hindernisses von unten nach oben nicht konstant, so ist es besser, wenn sie von unten nach oben zunimmt, als umgekehrt.
  13. Hinter Hindernissen ungleicher Höhe (Hecken mit Überhängen) vollzieht sich ziemlich rasch ein Ausgleich der zunächst sehr ungleichen Windverhältnisse.
  14. Eine Hecke auf einem Bahndamm ist dann am wirksamsten, wenn sie oben auf der luvseitigen Kante steht.
  15. Hecke und Knick verhalten sich etwa so, als ob man die Wirkung der Hecke allein und die des Knicks allein superponieren dürfte.
  16. Ein besonderer Einfluß der Nachgiebigkeit einer Modellhecke konnte nicht festgestellt werden.
  17. Eine durchlässige Hecke vor einem Haus setzt den Winddruck auf das Haus merklich herab.
  18. Die größte Wirkung tritt nicht bei kleinstem Abstand zwischen Haus und Hecke auf, sondern bei Abständen von der Größenordnung  $2H$  und mehr ( $H$  = Höhe von Haus und Hecke).
  19. Hinter dem Hause ohne Hecke ist nur ein eng begrenztes Windschutzgebiet.
  20. Eine vor das Haus gesetzte Hecke vergrößert das Windschutzgebiet hinter dem Hause erheblich.
  21. Das von der Hecke allein erzeugte Windschutzgebiet wird durch das hinter der Hecke stehende Haus merklich vermindert.  
Aus den Verdunstungsmessungen, auf deren Vorläufigkeit nochmals ausdrücklich hingewiesen sei, konnten folgende Ergebnisse abgeleitet werden:
  22. Die gleichmässige Abbremsung des Windes durch ein durchlässiges Hindernis bewirkt eine Herabsetzung der Verdunstung hinter der Hecke als Folge der geringeren Geschwindigkeit.
  23. Hinter einer undurchlässigen Hecke bewirkt die starke Verwirbelung eine erhöhte Verdunstung, obgleich die Geschwindigkeit kleiner ist als bei den Versuchen ohne Hecke.
  24. Die Verdunstung beginnt an der Oberfläche des Bodens und schreitet von dort aus langsam zu tieferen Bodenschichten vor.
  25. Die Verdunstungszunahme ist bei kleinen Geschwindigkeiten relativ größer als bei höheren Windgeschwindigkeiten.
  26. Mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit nimmt die Verdunstung ab und zwar ist die Abnahmequote bei höheren Luftfeuchtigkeiten größer als bei niedrigeren relativen Luftfeuchtigkeiten.  
Für die Freilandmessungen und die Strömungsuntersuchungen im Wasserkanal schließlich seien folgende Ergebnisse genannt:
  27. Freilandmessungen an einer künstlichen Hecke mit 40 % geometrischer Durchlässigkeit zeigen einmal, daß Windkanalversuche durchaus einen richtigen Einblick in die grundsätzlichen Gesetze des Windschutzes geben, und zum anderen, daß künstliche Hecken mindestens die gleiche Wirkung haben wie natürliche Hecken.
  28. Strömungsaufnahmen von Heckenmodellen im Wasserkanal vermitteln eine gute Vorstellung von der Luftströmung an natürlichen Hindernissen. Sie können jedoch nur als qualitative Ergänzung zu Messungen herangezogen werden.

## IX. Schrifttum

- [1] *Andersen, P.Chr.*: Laeplantnings-Bogen. 5. Aufl. Viborg 1943.  
*Albertson, M.L.*: siehe unter [66].
- [2] *Bagnold, R.A.*: The Movement of Desert Sand, Proc. Roy. Soc. 157(1936), A, p. 594.
- [3] *Bagnold, R.A.*: The Measurement of Sand Storms. Proc. Roy. Soc. 167(1938), A, p. 282.
- [4] *Baines, W.D. and E.G. Peterson*: An Investigation of Flow through Screens. Transact. of the ASME, July 1951, p.467.
- [5] *Blenk, H.*: Aerodynamische Untersuchungen zum Windschutzproblem. Umschaudienst der Akad. f. Raumforschung und Landesplanung, Hannover 1952, Heft 5/6, S. 183.
- [6] *Blenk, H.*: Strömungstechnische Beiträge zum Windschutzproblem. Landtechn. Forsch. 3(1953), S. 87.
- [7] *Blenk, H. und H. Trienes*: Weitere Untersuchungen zur Saatgutsichtung in horizontalem und vertikalem Wind. In: Grndlgn. d. Landtechn. Heft 2, Düsseldorf 1951, S. 17.
- [8] *Blüthgen, J.*: Das südrussische Schutzpflanzungsvorhaben in landwirtschaftlicher und geographischer Betrachtung. Urania 12(1949), S. 209 und 255.  
*Bringmann, K. und H. Kaiser*: siehe unter [67].  
*Cermak, J.E. and H.J. Koloseus*: siehe unter [68].
- [9] *Chepil, W.S.*: Dynamics of Wind Erosion. Soil Science 60(1945) and 61(1946).
- [10] *Chepil, W.S.*: Properties of Soil which influence Wind Erosion. Soil Science 69(1950).
- [11] *Chepil, W.S. and R.A. Milne*: Wind Erosion of Soil in Relation to Roughness of Surface. Soil Science 52(1941), p. 417.
- [12] *Eiffel, G.*: Nouvelles Recherches sur la Résistance de l'Air et l'Aviation. Paris 1914, S. 286.
- [13] *Flachsbar, O.*: Die Belastung von Bauwerken durch Windkräfte. Kaufmann: Hydromechanik, Bd. II, S. 269. Berlin 1934.  
*Franken, E.*: siehe unter [69].  
*Frankenberger, E.*: siehe unter [70].
- [14] *Ganssen, R.*: Mitteilungen über die Winderosion auf Böden Niedersachsens. Mitt. d. Bundesanst. f. Forst- u. Holzwirtschaft. 1950, Nr. 14.
- [15] *v. Gehren, R.*: Die Bodenverwehungen in Niedersachsen. Neues Archiv für Niedersachsen 1953, S. 111.
- [16] *Geiger, R.*: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 3. Aufl. Braunschweig 1950.
- [17] *Geiger, R.*: Der künstliche Windschutz als meteorologisches Problem. Erdkunde 5(1951), S. 106.
- [18] *Georgii, W.*: Flugmeteorologie. Leipzig 1937.
- [19] *Grosse, B.*: Die Winderosion in Nordwestdeutschland und ihre Bekämpfung. Neues Archiv für Niedersachsen 1950, Heft 17, S. 336.
- [20] *Grosse, B.*: Untersuchungen über die Winderosion in Niedersachsen unter besonderer Berücksichtigung der Cloppenburg Geest und des Hümmelings. Forsch.- u. Sitz.- Ber. d. Ak. f. Raumforschung und Landesplanung, Bd. II, Hannover 1951.
- [21] *Hartke, W.*: Die Heckenlandschaft. Erdkunde 5(1951) 2, S. 132.
- [22] *Iljin, M.*: Besiegte Natur (Original russisch, deutsch von *Peter Weibel*). Berlin 1951.
- [23] *Institut International d'Agriculture*: Protection des Forêts et des Cultures Agricoles contre le Vent. Rom 1933.
- [24] *Jensen, M.*: Laevirkning. Hedeselskabets Tidsskrift 1950, Nr. 5.  
*Jensen, M.*: siehe unter [71].
- [25] *Kaiser, H.*: Die Anwendung des *Reynoldsschen* Ähnlichkeitsgesetzes auf Strömungswiderstände und Ausbreitungsvorgänge in turbulenten Grenzschichten. Meteorol. Rundschau 6(1953) S. 121.  
*Kaiser, H.*: siehe unter [72].
- [26] *Kreutz, W.*: Das Windschutzproblem. Bioklim. Beibl. 1(1938).
- [27] *Kreutz, W.*: Der Windschutz. Dortmund 1952.
- [28] *Kuhlewind, C.*: Die Windschutzplanung für die Neusiedlung Vossenack. In „Typenpläne“ 1951, hrsg. von den Ministerien für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und für Wiederaufbau des Landes Nordrhein-Westfalen, S. 33.
- [29] *Kuhlewind, C.*: Der Windschutz als Mittel der Landeskultur. Mitt. d. Dtsch. Landw.-Ges. 68(1953) S. 1259.  
*Kuhlewind-Bringmann-Kaiser*: siehe unter [73].
- [30] *Kuhnke, A.*: Die Abhängigkeit des Pflanzenertrags von der Wasserverdunstung. Schr. d. Königsberger Geb. Ges. 13(1936) Heft 4.
- [31] *Kuron, H.*: Die physikalische Seite der Bodenerosion, besonders durch Wind. Tonind. Zg. 76(1952) S. 223; ausserdem in „Ber. d. Fachaussch. f. Staubtechn. im VDI“ (1952) Heft 5.
- [32] *Lako, S.*: Untersuchungen über die Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen und über den Einfluss von Hindernissen auf die Windgeschwindigkeit. Mitt. d. Verb. landw. Masch.-Prüf.-Anst. 4(1910) S. 63.
- [33] *Lautensach, H.*: Feldheckenstudien in Westmecklenburg. Petermanns Geogr. Mitt. 94(1950) S. 70.  
*Lettau, H.*: siehe unter [74].
- [34] *Van der Linde, R.J.*: The problem of the woodplantings between cultivated fields. Arnhem 1951.
- [35] *Marquardt, G.*: Die Schleswig-Holsteinische Knicklandschaft. Schr. d. Geogr. Inst. d. Univ. Kiel XIII, Heft 3, Kiel 1950.
- [36] *Nägeli, W.*: Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windschutzstreifen. Mitt. d. Schweiz. Anst. f. Forstl. Versuchswesen XXIII, 1(1943) S. 223.
- [37] *Nägeli, W.*: Weitere Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windschutzstreifen. Ebenda XXIV, 2(1946) S. 659.
- [38] *Nägeli, W.*: Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Schilfrohrwänden. Ebenda XXIX, 1(1953) S. 213.  
*Nägeli, W.*: siehe unter [75].
- [39] Naturschutz und Landschaftspflege in Nordrhein-Westfalen. Fredeburger Schriftenreihe, Ratingen 1951.
- [40] *Nøkkentved, Chr.*: Laevirkningsundersøgelser og Typebestemmelser af Laehegn. Hedeselskabets Tidsskrift (Z. d. Dän. Heideges.) 1938, Nr. 4.
- [41] *Nøkkentved, Chr.*: Fortsatte Laevirkningsundersøgelser. Ebenda 1940, Nr. 13.
- [42] *Nusselt, W.*: Wärmeübergang, Diffusion und Verdunstung. Z. f. angew. Math. und Mech. 10(1930) S. 105.

- [43] *Olbrich, A.*: Windschutzpflanzungen. Hannover 1949.
- [44] *Olsson, Gran R.*: Versuche über Winddruck auf Bauwerke. Bau-Ingenieur 15(1934) S. 483.
- [45] *Paeschke, W.*: Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeits- und Stabilitätsproblem in der bodennahen Luftschicht. Diss. Göttingen 1937; Auszug daraus unter gleichem Titel in „Beitr. zur Physik der freien Atmosphäre“ 24(1937) S. 163.
- [46] *Paeschke, W.*: Mikroklimatische Untersuchungen innerhalb und dicht über verschiedenartigem Bestand. Bioklim. Beibl. 1937, Heft 4, S. 155.
- [47] *Prandtl, L.*: Führer durch die Strömungslehre. 3. Aufl. Braunschweig 1949.
- [48] *Prandtl, L.* und *A. Betz*: Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt in Göttingen. III. Lieferung, S. 157. München 1927.
- [49] *Prandtl, L.* und *W. Tollmien*: Die Windverteilung über dem Erdboden, errechnet aus den Gesetzen der Rohrströmung. Z. f. Geophysik 1(1924/25) S. 47.  
*Prandtl, L.* und *O. Tietjens*: siehe unter [76].
- [50] *Rider, N.E.*: The effect of a hedge on the flow of air. Quarterly Journal of the Royal Meteorol. Soc. 78 (1952) p. 97.
- [51] *Schlichting, H.*: Grenzschicht-Theorie. Karlsruhe 1951.
- [52] *Schoenichen, W.*: Lebende Windschutzanlagen. Petermanns Geogr. Mitt. 90(1944) S. 273.
- [53] *Schubach, K.*: Verdunstungs- und Wasserhaushaltsuntersuchungen an verschiedenen Böden. Ber. d. dtsh. Wetterdienstes in der US-Zone 1952, Nr. 35.
- [54] *Steckhan, H.*: Bodenabtragung durch Wind in Niedersachsen - eine Gefahr für die Landeskultur. Neues Archiv für Niedersachsen 1950, Heft 17, S. 313.
- [55] *Stoekeler, J.H.* and *R.A. Williams*: Windbreaks and shelterbelts. Trees, The Yearbook of Agriculture 1949, Washington D.C.  
*Sutton, O.G.*: siehe unter [77].
- [56] *Thiel, E.*: Staubstürme in Südostrussland. Petermanns Geogr. Mitt. 90(1944) S. 238.  
*Trienes, H.*: siehe unter [78].
- [57] *Troll, C.*: Die Problematik der Heckenlandschaft. Erdkunde 5(1951) Heft 2, S. 105.
- [58] *Uhlig, S.*: Die Messung der Bodenverdunstung. Z. f. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde 60(1953) S. 168.  
*Uhlig, S.*: siehe unter [79].  
*Van der Linde, R.J.*: siehe unter [34].  
*Van Eimern, J.*: siehe unter [80].
- [59] *Walter, W.*: Dünenstudien im Schwanheimer Wald bei Frankfurt. Rhein-Mainische Forsch. Heft 28, Frankfurt/M. 1950.
- [60] *Walter, W.*: Neue morphologisch-physikalische Erkenntnisse über Flugsand und Dünen. Ebenda, Heft 31, Frankfurt/M. 1951.
- [61] *Wendt, H.*: Der Einfluss der Hecken auf den landwirtschaftlichen Ertrag. Erdkunde 5(1951) Heft 2, S. 115.
- [62] *Woelfle, M.*: Waldbau und Forstmeteorologie. Neudamm 1939.
- [63] *Woodruff, N.P.* and *A.W. Zingg*: Wind tunnel studies of shelterbelts models. Journal of Forestry 1953, p. 173.
- [64] *Zingg, A.W.*: A study of the movement of surface wind. Agric. Engng. 30(1949) 1, p. 11.  
*Zingg, A.W.*: siehe unter [81].
- [65] *Zingg, A.W.* and *W.S. Chepil*: Aerodynamics of wind erosion. Agric. Engng. June 1950.  
*Zingg, A.W.* and *N.P. Woodruff*: siehe unter [82].
- \*
- [66] *Albertson, M.L.*: Analysis of evaporation as a boundary layer phenomenon. Diss. State University of Iowa, 1948.
- [67] *Bringmann, K.* und *H. Kaiser*: Maisstreifen als Windschutz. Meteorologische Untersuchungen und Ertragsfeststellungen auf dem Gut Grafenthal (Sinstden) bei Goch/Niederrhein. Z. f. Acker- und Pflanzenbau 99(1955) S. 321.
- [68] *Cermak, J.E.* and *H.J. Koloseus*: Lake Hefner model studies of wind structure and evaporation. Part I and Part II. Navy depart. bureau of ships electronics divisions. Contract No. NObsr-57053, Nov. 1953 and July 1954.
- [69] *Franken, E.*: Haben die Knicks des norddeutschen Flachlandes einen Einfluss auf den landwirtschaftlichen Ertrag? Wasser und Boden 5(1953) S. 312.
- [70] *Frankenberger, E.*: Untersuchungen über den Vertikal-austausch in den unteren Dekametern der Atmosphäre. Ann. Meteorol. 4(1951) S. 358.
- [71] *Jensen, M.*: Shelter Effect. Danish Techn. Press, Copenhagen 1954.
- [72] *Kaiser, H.*: Über die Strömungsverhältnisse im Bergland. Meteorolog. Rundschau 7(1954) Heft 11/12, S. 214.
- [73] *Kuhlewind-Bringmann-Kaiser*: Richtlinien für Windschutz. 1. Teil. DLG-Verlag. Frankfurt/M. 1955.
- [74] *Lettau, H.*: Atmosphärische Turbulenz. Akadem. Verlagsges., Leipzig 1939.
- [75] *Nägeli, W.*: Die Windbremsung durch einen grösseren Waldkomplex. Ber. d. 11. Kongr. d. intern. Verbandes forstl. Forsch. Anst. Tipografia L'impronta, Firenze 1954, S. 240.
- [76] *Prandtl, L.* und *O. Tietjens*: Hydro- und Aeromechanik. 2. Bd. Berlin 1931.
- [77] *Sutton, O.G.*: Micrometeorology. Mc Graw-Hill Book Comp. New York, Toronto, London 1953.
- [78] *Trienes, H.*: Strömungsbilder von der Windführung in Landmaschinen. In: Grndlgn. d. Landtechn. Heft 3. Düsseldorf 1952.
- [79] *Uhlig, S.*: Die Auswirkungen von Windschutzhindernissen auf das Klima der bodennahen Luftschicht. Landw. Jb. für Bayern 32(1955) S. 90.
- [80] *Van Eimern, J.*: Über Schwankungen der Windschutzwirkung von Hecken und Baumreihen. Meteorol. Rdsch. 8(1955) S. 122.
- [81] *Zingg, A.W.*: Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material. Proceedings of the fifth hydraulics conference, Bulletin 34, State Univ. of Iowa Studies in engng. 1953, S. 111.
- [82] *Zingg, A.W.* and *N.P. Woodruff*: Calibration of a portable wind tunnel for the simple determination of roughness and drag of field surfaces. Agron. Journ. Vol. 43 (April 1951) Nr. 4, S. 191.