

Strömungstechnische Beiträge zum Windschutzproblem

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung, Braunschweig-Völkenrode

Unter „Windschutz“ versteht man den Schutz des fruchtbaren Bodens gegen die schädlichen Wirkungen des Windes. Diese bestehen hauptsächlich in der Verwehung der obersten Bodenschicht (Winderosion), wobei Pflanzen freigelegt oder verschüttet werden können, und in der übermäßigen Verdunstung der Bodenfeuchtigkeit.

Meist steht die Aufgabe des Windschutzes in engem Zusammenhang mit der ebenso wichtigen Aufgabe, den Boden gegen Erosion durch Wasser zu schützen, das heißt gegen die Wegspülung des Bodens durch ungehindert einwirkende Niederschläge.

In manchen Ländern stellen diese Aufgaben, nachdem man sie Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte lang nicht erkannt und folglich nicht beachtet hatte, ernste Probleme der Volkswirtschaft dar [12]. Obwohl Deutschland nicht zu diesen Ländern zählt, gibt es auch bei uns seit einiger Zeit mancherlei Warnzeichen [9, 24].

In richtiger Erkenntnis dieser Sachlage hat das Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen die Anregung zu grundsätzlichen Untersuchungen auf dem Windschutzgebiet gegeben und unter anderem auch die Mittel für die Versuche, über die im folgenden kurz berichtet wird, zur Verfügung gestellt.

Wer den Versuch macht, sich an Hand der Literatur über das Windschutzproblem zu orientieren, stellt bald fest, daß sich verschiedene Wissenschaftsgebiete mit diesem Problem befassen und bereits beachtliche Beiträge zu seiner Klärung geleistet haben. Was von meteorologischer Seite hierzu erarbeitet worden ist, hat eine gründliche Zusammenfassung in dem bekannten, jetzt in dritter Auflage vorliegenden Buch von R. Geiger [10] gefunden; dort ist auch eine umfangreiche Liste der einschlägigen Einzelarbeiten zusammengestellt. Daß auch die Geographie an diesem Problem ernstlich interessiert ist, zeigt Heft 2 von Band V (1951) der Zeitschrift „Erdkunde“, in dem „die Problematik der Heckenlandschaft“ [25] von verschiedenen Standpunkten aus behandelt wird. Eine sorgfältige Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von Windschutzpflanzungen hat der Geograph H. Lautenschach an anderer Stelle [15] gegeben. Von den Untersuchungen der Agrarmeteorologen, die ja wohl das entscheidende Wort bei dem Windschutzproblem mitzureden haben, seien nur die von W. Kreuzt [13] genannt, ebenso aus dem Bereich der Forstwissenschaft die Arbeiten von M. Woelfle [26].

Im vorliegenden Bericht soll nur die strömungstechnische Seite des Windschutzproblems behandelt werden. Es geht also um die Frage, welche Veränderung der Windverhältnisse in Bodennähe durch natürliche oder künstliche Hindernisse (Hecken, Waldstreifen, Zäune) erreichbar ist, bis zu welchen Entfernungen solche Hindernisse wirksam sind, wie sie die Verdunstung in ihrem Wirkungsbereich beeinflussen und anderes mehr.

In der umfangreichen Literatur zum Windschutzproblem sind bisher nur relativ wenig strömungstechnische Beiträge zu finden. Zu nennen sind hier besonders die Arbeiten des Dänen Nøkkentved [7, 8], des Schweizer Forstwissenschaftlers Nägeli [17, 18], des Engländers Bagnold [1, 2] und des Amerikaners Chepil [5, 6]. Nøkkentved hat die ersten Windkanalversuche an Modellhecken durchgeführt und deren Ergebnisse mit entsprechenden Großversuchen im freien Gelände verglichen. Nägeli hat die Windverhältnisse im Bereich von Waldstreifen sehr sorgfältig vermessen und allgemeine Gesetzmäßigkeiten daraus abgeleitet. Bagnold studierte sowohl im Windkanal als auch im Freien die Bewegung des Wüstensandes durch Wind. Chepil veröffentlichte ganze Serien von Arbeiten über die Winderosion, deren Auswertung für deutsche Verhältnisse sicherlich noch manche wertvolle Fingerzeige liefern könnte.

1. Versuchstechnik

Strömungstechnische Versuche zum Windschutzproblem können entweder im Freien oder im Windkanal ausgeführt werden. Im Freien kann man sowohl natürliche Hindernisse (Hecken, Waldstreifen) als auch künstliche Zäune vermessen. Im Windkanal kann es sich immer nur um verhältnismäßig kleine künstliche Modelle handeln.

Da der Versuch im Freien wegen der schwankenden Windverhältnisse langwierig und kostspielig ist und außerdem wegen der Nichtbeeinflussbarkeit der Daten kaum zu systematischen Ergebnissen führen kann, ist der Wunsch nach systematischen Modellversuchen, die jederzeit leicht nachprüfbar (reproduzierbar) sind, verständlich. Hier taucht aber sofort die Frage nach der Zuverlässigkeit des Modellversuchs oder der Übertragbarkeit der Modellversuchsergebnisse auf die Wirklichkeit auf. Der Modellversuch spielt in anderen Gebieten der Strömungstechnik eine bedeutende Rolle, zum Beispiel im Schiffbau und im Flugzeugbau. Man hat für diese Gebiete längst gelernt, nach welchen Regeln Modellversuche anzustellen und auszuwerten, das heißt auf die Großausführung zu übertragen sind [22]. Unter den Kennzahlen, die dabei zu beachten sind, kommt im vorliegenden Fall nur die Reynolds'sche Kennzahl

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

(ν = Geschwindigkeit, l = charakteristische Länge, ρ = Dichte des Mediums, μ = Zähigkeit des Mediums, $\nu = \mu/\rho$ = kinematische Zähigkeit) in Betracht. Das Reynolds'sche Modellgesetz verlangt, daß außer der geometrischen Ähnlichkeit zwischen Modell und Großausführung die Zahl R in beiden Fällen gleich groß sei. Ist diese Bedingung erfüllt, so verändern sich die Trägheits- und die Reibungskräfte beim Übergang vom Modell zur Großausführung im gleichen Verhältnis.

Betrachten wir unser Problem (Strömung längs einer Ebene mit Hindernis) als ein Nachlaufproblem [23] hinter diesem Hindernis, so dürfte die Hindernishöhe H als die charakteristische Länge in die Zahl R eingehen. Da wir ρ und μ im Modell- und im Großversuch gleich groß annehmen dürfen, kommt es hier nur auf das Produkt $v \cdot H$ an. Ein Vergleich ergibt etwa

im Großversuch: $v = 10 \text{ m/s}$, $H = 2 \text{ m}$; $v \cdot H = 20 \text{ m}^2/\text{s}$;

im Modellversuch: $v = 40 \text{ m/s}$, $H = 0,03 \text{ m}$; $v \cdot H = 1,2 \text{ m}^2/\text{s}$.

Man erkennt, daß es nicht leicht möglich ist, für gleiche Reynolds'sche Zahl im Modellversuch und in der Großausführung zu sorgen.

Wenn das Hindernis aus einer scharfkantigen Fläche (etwa einer Mauer im Freien, einem Blechstreifen im Modell) besteht, so ist bekannt, daß die Widerstandsbeizahl von der Reynolds'schen Zahl praktisch unabhängig ist [23]. Dementsprechend wird sich auch der Nachlauf (Geschwindigkeitsverhältnisse in Lee des Hindernisses) verhalten.

Zeigt das Hindernis eine merkliche Abrundung an der Oberkante (Krümmungsradius etwa $> 1/4 H$), so ist damit zu rechnen, daß der Ablösungspunkt der Strömung sich mit der Reynolds'schen Zahl verändert und dadurch ein Einfluß der Reynolds'schen Zahl auftritt.

Natürliche Hecken und Waldstreifen sind nun an ihrer Oberkante weder scharfkantig noch abgerundet, so daß es schwierig erscheint, über den zu erwartenden Einfluß der Kennzahl etwas auszusagen. Es wird notwendig sein, sich durch Vergleichsversuche im Freien und im Windkanal Klarheit zu verschaffen.

Hinzu kommt, daß unser Problem kein reines Nachlaufproblem darstellt. Da die Hindernisse auf einem Boden stehen, spielt der Grenzschichtverlauf längs dieses Bodens ebenfalls

eine wesentliche Rolle. In der freien Natur haben wir es wohl immer mit einer voll entwickelten, turbulenten Grenzschicht zu tun, deren Höhe weit über die der Hecken und Waldstreifen hinausgeht [10, 21]. Im Windkanal haben wir dagegen eine — meist auch turbulente — Grenzschicht, aber im Anfangsstadium ihrer Entwicklung, so daß die Hindernishöhe die Grenzschichthöhe übertrifft. Um diesen Übelstand zu beseitigen, müßte man einen Windkanal mit sehr langer Meßstrecke haben.

Die Turbulenz der freien Luftströmung ist nicht immer von gleicher Größe. Gewisse Messungen im Freien scheinen anzudeuten, daß der Wirkungsbereich einer Windschutzhecke um so geringer ist, je größer die Turbulenz ist. Es wäre also erwünscht, für Modellmessungen einen Windkanal veränderlicher Turbulenz zu besitzen.

Der Umstand, daß das Windschutzproblem — strömungstechnisch gesehen — eine Kombination einer Nachlauf- mit einer Grenzschichtströmung darstellt, erklärt die Schwierigkeiten einer theoretischen Behandlung und die Unsicherheit hinsichtlich der Übertragung der Modellversuchsergebnisse auf die freie Natur. Sorgfältige Vergleichsmessungen sind daher unerlässlich.

Die bisher auf Grund unserer Modellversuche und der Messungen von Nokkentved [7, 8] und Nägeli [17, 18] möglichen Vergleiche haben ergeben, daß man die im Modellversuch ($H = 30$ mm) bei x/H gemessenen Geschwindigkeitsprofile in der freien Natur ($H = 2$ bis 20 m) bei rund $0,5 x/H$ vorfindet. Dieses Ergebnis darf aber nur als vorläufige Faustregel Verwendung finden. Es kann sein, daß der Umrechnungsfaktor nicht konstant $= 0,5$ ist, sondern noch vom Verhältnis der mit H gebildeten Reynolds'schen Zahlen abhängt, so daß er für Hecken von 2 m Höhe etwas größer ist als für Waldstreifen von 20 m Höhe.

Da gleichmäßige Windschutzobjekte genügender Länge in der Natur selten sind und die weiter zu stellenden Versuchsbedingungen (keine Störung durch benachbarte Hindernisse, senkrechte Anblasung) die Auswahl erschweren, werden die erforderlichen Vergleichsversuche noch längere Zeit auf sich warten lassen.

Die im Folgenden beschriebenen Modellversuche dürfen trotzdem in ihren qualitativen Ergebnissen als zuverlässig gelten; sollen sie auf die freie Natur übertragen werden, so genügt es bis auf weiteres, die angegebenen Werte x/H zu halbieren.

2. Messungen der Geschwindigkeitsprofile

Im Windkanal des Instituts für Strömungsmechanik¹⁾ der TH Braunschweig wurde eine große Zahl von Messungen der Geschwindigkeitsprofile im Bereich von Modellhecken durchgeführt. In die Versuchsstrecke wurde ein rechteckiger, oben offener Kasten von $2,5$ m Länge und $0,60$ m Breite eingebaut. Der Boden war im allgemeinen eben und glatt (lasierter Holzboden); es wurden aber auch leicht gewellte und raue Böden benutzt, um den Einfluß von Bodenwellen und Bodenrauigkeit festzustellen.

¹⁾ Dem Leiter des Instituts, Prof. Dr. H. Schlichting, sei auch an dieser Stelle für die Überlassung des Windkanals und die Herabsetzung der Benutzungsgebühren im Interesse der Sache gedankt.

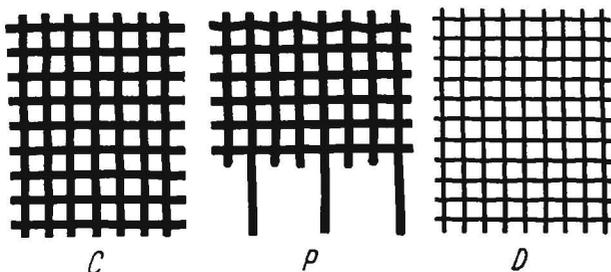


Abb. 1: Ausschnitte der durchlässigen Modellhecken in Originalgröße

Der Wind strich in Richtung der Längsachse des Kastens parallel über den Boden hin. Die benutzte Windgeschwindigkeit betrug im allgemeinen 40 m/s.

Als Modellhecken wurden Drahtgewebe und Blechstreifen benutzt, deren Höhe in der Regel 30 mm betrug und die von der rechten zur linken Wand durchliefen, so daß eine ebene Strömung entstand (abgesehen von den Randzonen an den seitlichen Wänden). Abbildung 1 zeigt die Modellhecken C, P und D in natürlicher Größe.

Die Geschwindigkeiten wurden mit einem Prandtl-Rohr von 4 mm Durchmesser gemessen, das an einem Verschiebegerät montiert war und von oben her in die Meßstrecke eingeführt wurde. Im allgemeinen wurden die Geschwindigkeitsprofile nur in der Symmetrieebene, das heißt in der Mitte zwischen den seitlichen Wänden gemessen. Zur Ablesung der Drücke wurde ein Prandtl-Manometer benutzt.

Abbildung 2 bringt einen Ausschnitt aus der Fülle der Meßergebnisse²⁾. Über dem Boden sind an den jeweiligen Meßstellen die Geschwindigkeitsprofile aufgetragen. Die auf der Abszisse angegebenen Werte bedeuten die Längskoordinate x der Meßstelle (in Einheiten der Heckenhöhe H). Die Modellhecken stehen bei den in Abbildung 2 zusammengestellten Versuchen bei $30 H$ und sind schematisch angedeutet. Als Ordinate dient die Höhe über dem Boden (ebenfalls in Einheiten der Heckenhöhe H). Die Geschwindigkeiten sind im Verhältnis zur ungestörten Geschwindigkeit angegeben, die aus dem Gesamtdruck in der Düsenkammer des Windkanals ermittelt wurde. Die Geschwindigkeitsprofile laufen daher alle nach oben osymptotisch in den Wert 1 .

Die oberste Meßreihe in Abbildung 2 wurde ohne Heckenmodell gewonnen und zeigt, wie durch das Anwachsen der Grenzschicht das Geschwindigkeitsprofil allmählich verändert wird. Bei etwa $50 H$ erreicht die vom Boden ausgehende Störung ungefähr die Höhe $1 H$. In der freien Natur liegen die Hecken mit ihrer vollen Höhe sicherlich immer innerhalb dieses gestörten Gebietes. Leider war die Meßstrecke im Windkanal nicht lang genug, um die Heckenmodelle auch bei $60 H$ oder $100 H$ aufzubauen und dann noch um weitere $50 H$ dahinter Messungen auszuführen.

Die weiteren Meßreihen zeigen den Einfluß eines undurchlässigen Hindernisses (Mauer) und dreier Heckenmodelle mit verschiedener Durchlässigkeit entsprechend Abbildung 1. Beim undurchlässigen Hindernis ergeben sich zunächst (bei $31 H$ bis $45 H$) Rückströmungen oder negative Geschwindigkeiten, die mit unserer Apparatur nicht ohne weiteres gemessen werden konnten; die Kurven sind daher abgebrochen gezeichnet. In größerer Entfernung (bei $50 H$ und $60 H$) treten aber wieder positive Geschwindigkeiten in Bodennähe auf. Bei den durchlässigen Hindernissen treten keine Rückströmungen auf; die Windgeschwindigkeiten sind hinter den Hindernissen stark herabgesetzt und steigen dann langsamer wieder an als bei dem undurchlässigen Hindernis. Bei $50 H$ ist eine deutliche Überlegenheit des Heckenmodells C gegenüber dem undurchlässigen Hindernis erkennbar.

Bei der Hecke P (Pappelallee) zeigt sich zunächst der Einfluß der verschiedenen Durchlässigkeit im unteren Drittel (nur Baumstämme) gegenüber den oberen beiden Dritteln, die der Durchlässigkeit der Hecke C entsprechen. Mit wachsender Entfernung vollzieht sich ein Ausgleich, der bei $50 H$, das heißt also in einer Entfernung von 20 facher Heckenhöhe ziemlich vollendet ist. Die weiteren Profile ähneln dann den entsprechenden für Hecke D, die merklich durchlässiger ist als Hecke C. Ein Vergleich der Kurven untereinander zeigt deutlich, daß die Durchlässigkeit der Hecke C die günstigsten Verhältnisse liefert. Die geometrische Durchlässigkeit (offene Fläche : Gesamtfläche) beträgt

0,48 für Hecke C,
0,62 für Hecke P,
0,65 für Hecke D.

²⁾ Es ist geplant, die vollständigen Meßreihen demnächst in der Schriftenreihe „Grundlagen der Landtechnik“ zu veröffentlichen.

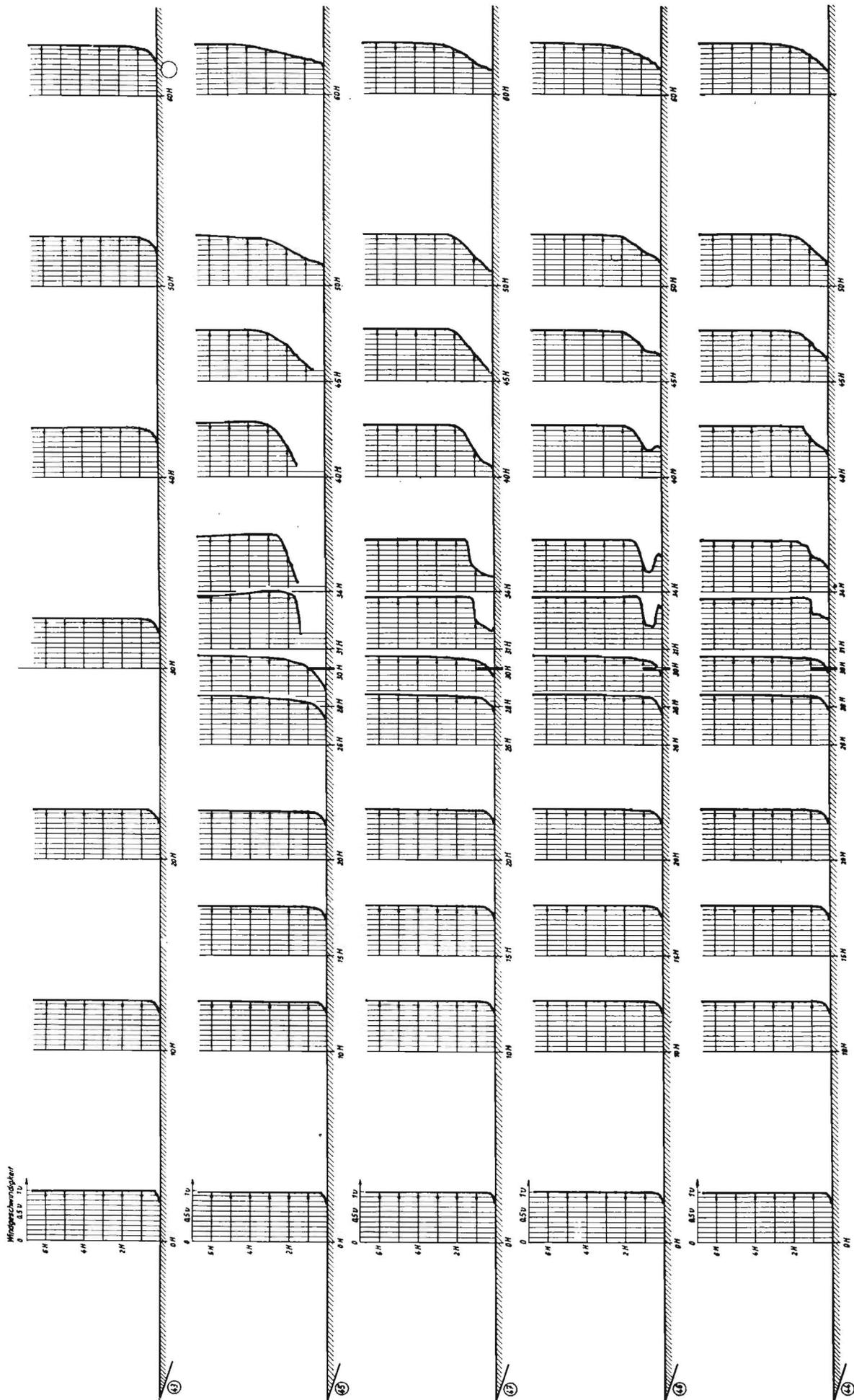


Abb. 2: Geschwindigkeitsprofile im Bereich von Hedden verschiedener Durchlässigkeit ($H = 30 \text{ mm}$, $v = 40 \text{ m/s}$)

Bei den Windkanalversuchen von Nokkentved [7, 8] hatte sich auch eine Modellhecke mit 48 % geometrischer Durchlässigkeit als die günstigste erwiesen. Es ist anzunehmen, daß die Geschwindigkeitsprofile hinter einer Hecke nicht nur von ihrer geometrischen Durchlässigkeit abhängen, sondern auch noch von der absoluten Größe der Löcher. Hierzu liegen aber noch keine Messungen vor.

Um den Geschwindigkeitsverlauf noch deutlicher zu erkennen, wurden aus Abbildung 2 die Geschwindigkeiten in $\frac{1}{6}$ Heckenhöhe und in $\frac{1}{2}$ Heckenhöhe entnommen und in Abbildung 3 dargestellt. In beiden Höhen sind die Verhältnisse recht ähnlich; nur die Hecke P macht verständlicherweise eine Ausnahme. Der Wind, der zwischen den Baumstämmen hindurchbläst, erzeugt hier (in $\frac{1}{6}$ Heckenhöhe) kurz hinter der Hecke sogar eine Erhöhung der Geschwindigkeit (Düsenwirkung). In größerer Entfernung von der Hecke nähert sich die Kurve für Hecke P derjenigen für Hecke D; in größerer Entfernung kommt es also nur auf die mittlere Durchlässigkeit an, die für die Hecken P und D nahezu gleich ist.

Die Kurven für die undurchlässige Hecke A zeigen in Luv die stärkste Heckenwirkung. In Lee steigen die Kurven für Hecke A sehr steil an und überholen alle anderen Kurven für die durchlässigen Hecken. Hieraus ist zu schließen, daß durchlässige Hecken einen größeren Wirkungsbereich haben als undurchlässige. Die schwache Strömung, die durch eine durchlässige Hecke hindurchtritt, beschleunigt sich nur ganz langsam wieder, während die Strömung, die über eine undurchlässige Mauer herüberfällt, in Lee der Mauer starke Wirbel verursacht und bald wieder mit fast unverminderter

Geschwindigkeit den Boden erreicht. Dies geht aus weiteren Messungen, bei denen die Hecken bei 0 H stehen und die Geschwindigkeitsprofile bis 60 H vermessen wurden, noch deutlicher hervor.

Soll die Reichweite der Schutzwirkung einer Hecke bezeichnet werden, so muß man eine klare Definition dafür haben. Wegen der asymptotischen Annäherung der Kurven an die Kurve „ohne Hecke“ ist eine Definition derart, daß die Strecke bis zum Erreichen der unbeeinflussten Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe (etwa $\frac{1}{6}$ H oder auch absolut 1,5 m) als Reichweite bezeichnet wird, unbrauchbar.

Zweckmäßig ist 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 in der Literatur geschieht —, ist jedenfalls sinnlos.

Unsere Messungen haben in der Höhe $\frac{1}{6}$ H folgende Reichweiten nach obiger Definition ergeben:

Undurchlässige Hecke:	A	: 32 H
Durchlässige	C	: 53 H
"	P	: 50 H
"	D	: 50 H.

Bei Anwendung des im vorigen Abschnitt festgestellten Umrechnungsfaktors 0,5 ergäbe sich also für die undurchlässige Hecke eine Reichweite von 16 H, für die durchlässigen Hecken von rd. 25 H.

Die weiteren Untersuchungen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, bezogen sich auf das Zusammenwirken von zwei und drei Hecken in verschiedenem Abstand, auf den Einfluß von Bodenwellen, auf den Vergleich von Hindernissen verschiedener Tiefe (in Windrichtung) und anderes mehr.

3. Winddruckmessungen

In den Dörfern der Eifel ist es vielfach üblich, die Häuser durch Windschutzhecken zu schützen [25]. Deshalb sollten auch einige Versuche über den Winddruck auf ein Haus ohne und mit Schutzhecke durchgeführt werden. Auch hierfür wurde der Windkanal der TH Braunschweig benutzt.

Auf dem vorher schon beschriebenen Holzboden stand — in einer Entfernung von 1,00 m von der abgeschrägten Vorderkante des Bodens und in der Mitte zwischen den Wänden — das in Messing ausgeführte Modell eines Hauses. Der Grundriß des Hauses war quadratisch mit 5 cm Seitenlänge. Die Höhe betrug ebenfalls 5 cm. Aufriß und Seitenriß sind aus Abbildung 4 zu ersehen. Das Hausmodell trug an den im Bild gekennzeichneten 20 Stellen Anbohrungen zur Druckmessung. Durch eine Verdrehung des Modells um 180° konnten die Druckmeßstellen auf die Gegenseiten gebracht und dadurch bei jedem Versuch an 40 Stellen Drücke gemessen werden. Die Druckleitungen wurden nach unten herausgeführt und konnten nacheinander an ein Prandtl-Manometer angeschlossen werden. Die Modellhecke hatte eine Höhe von 5 cm und eine Breite von 10 cm. Sie bestand aus einem Drahtgewebe mit einer geometrischen Durchlässigkeit von 48 % (Hecke C).

In Abbildung 4 sind einige Ergebnisse der Winddruckmessungen übereinander dargestellt. Die kleinen Skizzen links zeigen jeweils den Lageplan von Haus und Hecke im Grundriß, Aufriß und Seitenriß. Die beiden zugehörigen Kurvenbilder geben die Druckverteilung auf allen vier Seiten des Hauses an. Die Buchstaben a, b, c und d kennzeichnen im Grundriß die vier Seiten und in den Kurvenbildern die entsprechenden Druckverteilungen. Diese sind für die Breitseiten zu je einer Kurve zusammengezogen, obwohl die Anbohrungen

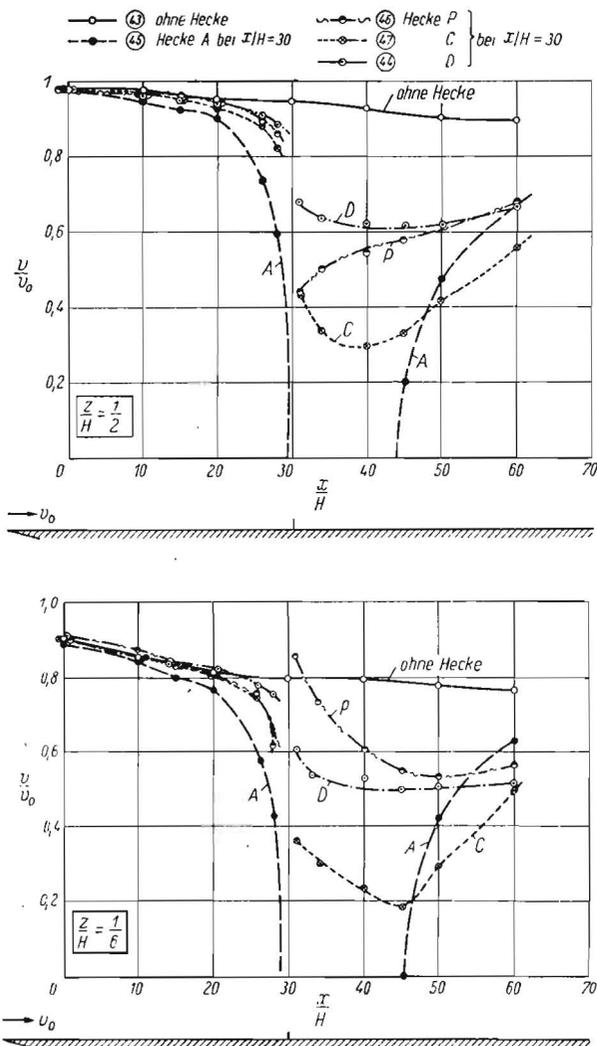


Abb. 3: Geschwindigkeitsverlauf vor und hinter Hecken verschiedener Durchlässigkeit, oben: in der Höhe $\frac{1}{2}$ H über dem Boden, unten: in der Höhe $\frac{1}{6}$ H über dem Boden.

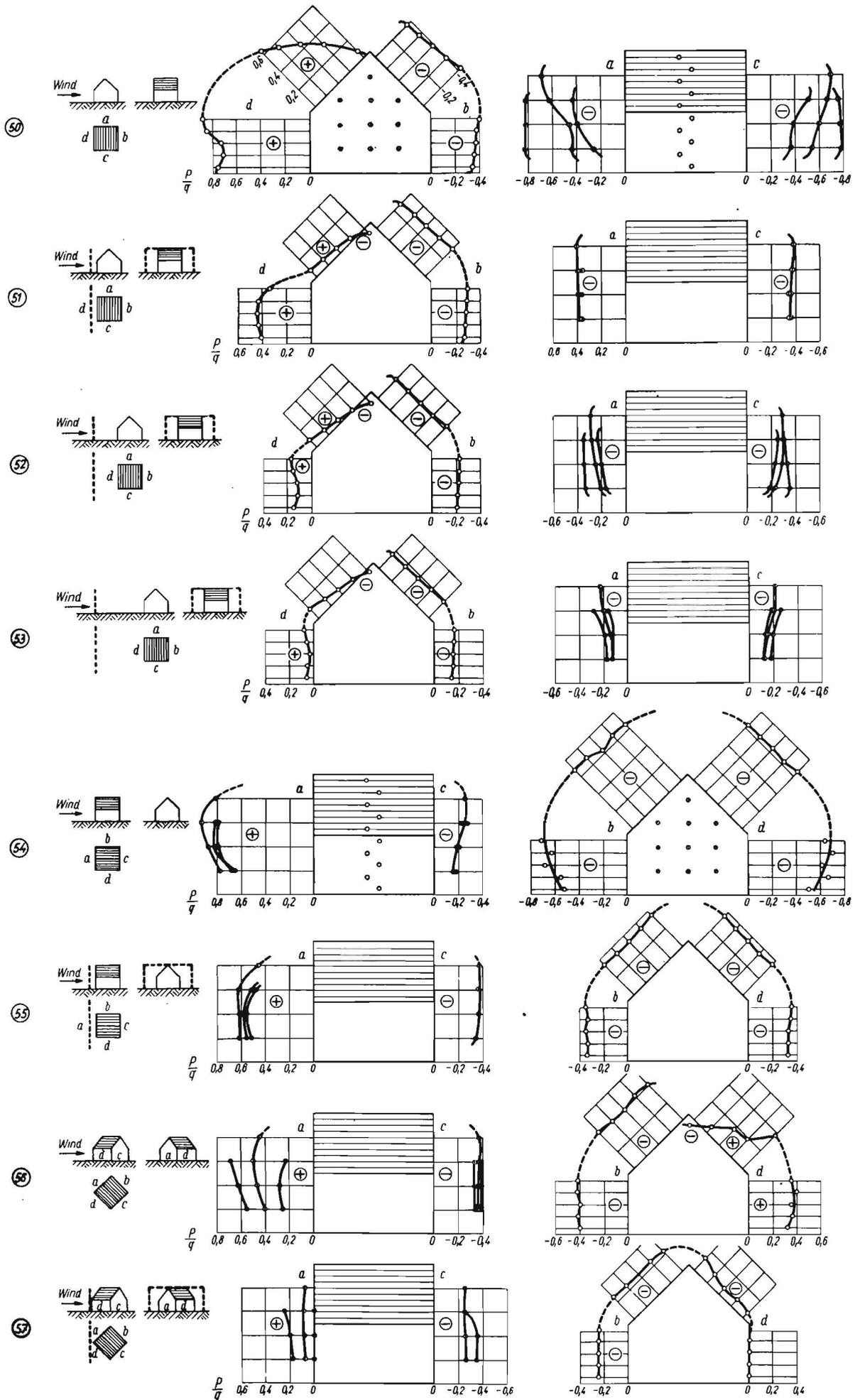


Abb. 4: Winddruck auf ein Haus ohne und mit Schutzhecke bei verschiedener Anblasrichtung

zur Verminderung der gegenseitigen Beeinflussung abwechselnd ein wenig nach links und rechts von der Mittellinie aus versetzt sind. Für die Giebelseiten sind jeweils drei Kurven aufgetragen, wobei die Meßpunkte den Anbohrungen entsprechend verschieden gezeichnet sind.

Sämtliche Drücke sind dimensionslos dargestellt, das heißt die gemessenen Drücke p sind durch den Staudruck $q = \frac{1}{2} \rho v^2$ dividiert (ρ = Luftdichte, v = Windgeschwindigkeit) und die Verhältniszahlen p/q aufgetragen. Die Darstellung wird auf diese Weise unabhängig von der Windgeschwindigkeit des Modellversuchs, die in unserem Falle 40 m/s betrug. Wie schon Eiffel 1914 durch Windkanalversuche an Hausmodellen nachwies, erhält man bei verschiedenen Modellgrößen und Windgeschwindigkeiten praktisch die gleichen Kurven [22].

Alle Druckkräfte sind durch +, alle Saugkräfte durch — bezeichnet; beide werden in der Regel von den Hausseiten aus nach außen aufgetragen, um Überschneidungen zu vermeiden.

Der erste Versuch (ohne Hecke) zeigt, daß auf der dem Winde zugekehrten Breitseite und dem anschließenden Dach ein starker Druck herrscht; er fällt auf dem Dach bis zum First hin ungefähr auf 0 ab. Auf der gegenüberliegenden Breitseite und dem zugehörigen Dach wird ein recht gleichmäßiger Unterdruck gemessen. Auch auf den beiden Giebelseiten herrscht Unterdruck, der kurz hinter der zuerst vom Winde umströmten Ecke am stärksten ist und dann merklich abfällt. Diese Druckverteilung stimmt mit entsprechenden Ergebnissen früherer Versuche [20] gut überein.

Wie diese Druckverteilung durch eine vor dem Hause stehende Hecke verändert wird, zeigen die Ergebnisse der Versuche Nr. 51 bis 53. Die Druck- und Saugkräfte werden durch die Hecke überall deutlich herabgesetzt. Die Verminderung der Druck- und Saugkräfte wächst mit wachsendem Abstand zwischen Haus und Hecke. Das Minimum des Winddrucks, das man zunächst bei kleinstem Abstand des Hauses von der Hecke (Versuch Nr. 51) erwarten sollte, liegt offenbar bei einem Abstand von doppelter Heckenhöhe oder noch darüber. Eine Erklärung des in den Versuchen 50 bis 53 gemessenen Winddruckabfalles ergibt sich zwanglos aus den vorher beschriebenen Geschwindigkeitsmessungen (Abb. 3), wonach die Windgeschwindigkeit hinter einer durchlässigen Hecke ihr Minimum erst in einer gewissen Entfernung hinter der Hecke erreicht.

Die beiden Versuchsreihen Nr. 54 und 55 zeigen die Winddruckverteilung auf das Haus bei Anblasung von der Giebelseite her. Auf der dem Winde zugekehrten Seite herrscht wieder Überdruck, auf allen anderen Seiten dagegen Unterdruck. Auffallend niedrig ist der Unterdruck auf der rückwärtigen Giebelseite. Die vor das Haus gesetzte Hecke verringert den Winddruck auf der vom Winde getroffenen Giebelseite und den beiden Breitseiten; auf der rückwärtigen Giebelseite ist der Unterdruck im Versuch Nr. 55 (mit Hecke) jedoch größer als in Versuch Nr. 54 (ohne Hecke).

Die beiden letzten Versuche zeigen die Winddruckverteilung bei Anblasung des Hauses unter 45°. Die beiden dem Winde zugekehrten Seiten haben jetzt Überdruck, der durch den Einfluß der Hecke stark herabgesetzt wird und auf dem Dach sogar in Unterdruck umschlägt. Bei der Versuchsreihe Nr. 57 wurde nur das Haus gegen den Wind gedreht, während die Hecke senkrecht zum Wind stehen blieb; diese Anordnung war durch die Versuchstechnik bedingt, da nur das Haus auf einer drehbaren Platte stand. Inzwischen wurden auch Versuche ausgeführt, bei denen Haus und Hecke gleichzeitig gegen den Wind gedreht wurden. Die Ergebnisse dieser und anderer Versuche werden in dem bereits erwähnten größeren Versuchsbericht veröffentlicht werden.

4. Verdunstungsmessungen

Von Anfang an bestand der Wunsch, die Geschwindigkeitsmessungen durch Verdunstungsmessungen zu ergänzen. In vielen praktischen Fällen wird die Beeinflussung der Ver-

dunstung durch Hecken wichtiger sein als die Beeinflussung der Windgeschwindigkeiten.

Es zeigt sich, daß es hierüber kaum Vorarbeiten gibt. Außer einer schwer zugänglichen Arbeit von A. K u h n k e [14] konnten keine Messungen des Windeinflusses auf die Verdunstung von Ackerboden festgestellt werden.

Bei unseren Versuchen benutzten wir wieder den schon erwähnten Holzkasten, wobei der Wind von einem Sortiergebläse mit einer Düse von 0,50 m Breite und 0,60 m Höhe erzeugt wurde. Die Geschwindigkeiten lagen zwischen 1,0 und 9,5 m/s. In den Holzboden wurden hintereinander 6 Blechkästen (Länge 0,10 m, Breite 0,25 m, Tiefe 0,04 m) eingelassen. Diese Blechkästen 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 Blechkästen in einer bestimmten Zeit (im allgemeinen 100 min) wurde als Maß der Verdunstung betrachtet und durch Wägung mit einer Genauigkeit von $\frac{1}{10}$ g bestimmt. Bei jedem Versuch wurde die Bodenfeuchtigkeit im Ausgangszustand, die Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur vor und nach dem Versuch bestimmt. Zur Messung der Bodentemperatur fehlte ein geeignetes Thermometer; 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 konstante, das heißt 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 sicherlich wichtig wäre, aber zunächst nicht beabsichtigt war. Wir dürfen annehmen, daß innerhalb der Versuchszeit von 100 min die Feuchtigkeitsänderung noch nicht bis zur Kastentiefe (40 mm) vorgedrungen ist, so daß die geringe Kastentiefe 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 Kästen nicht einfach ist und Anlaß zu Streuungen der Ergebnisse geben kann. Bei den hier mitgeteilten Versuchen handelt es sich um Broitzemer Ackerboden, der fest in die Kästen eingedrückt und mit einem Messer glatt gestrichen wurde.

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

In Abbildung 5 ist eine Reihe von Versuchen dargestellt, und

zwar ist die Verdunstung des vordersten Kastens in $\frac{g}{m^2 \cdot \text{min}}$ über

der Windgeschwindigkeit aufgetragen. Als wesentlicher Parameter erweist sich die Luftfeuchtigkeit; sie ist neben jedem Meßpunkt als Zahl eingetragen. Man sieht, daß man die gestrichelten Linien ohne großen Zwang als Mittellinien einzeichnen kann. 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 zu stark überdecken; sie können aber aus Abbildung 6 übertragen werden. Man erkennt aus Abbildung 5, daß die Verdunstung mit der Windgeschwindigkeit etwas weniger als linear ansteigt, etwa nach dem gleichen Gesetz, das W. N u s s e l t für die Verdunstung einer Wasseroberfläche, über die der Wind streicht, angegeben hat [19]. Jedenfalls kann keine Rede davon sein, daß die Verdunstung mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit ansteige, wie gelegentlich behauptet wurde.

Abbildung 6 zeigt die Abhängigkeit der Verdunstung von der relativen Luftfeuchtigkeit; hier sind aus Abbildung 5 die Meßwerte bei der Windgeschwindigkeit 8 m/s und sämtliche Vergleichswerte zu den Versuchen von Abbildung 5 für die Windgeschwindigkeit 0 eingetragen. Trotz beachtlicher Streuung fügen sich die Meßwerte einem Gesetz, das durch die gestrichelten Kurven angedeutet ist. Dabei ist angenommen, daß bei einer Luftfeuchtigkeit von 100 %, das heißt bei mit Wasserdampf gesättigter Luft keine Verdunstung mehr stattfindet.

Die in den Abbildungen 5 und 6 dargestellten Versuche sollten lediglich dazu dienen, Vergleichswerte für die Verdunstung ohne Heckeneinfluß zu schaffen. Bei den weiteren Versuchen wurden vor und zwischen den Blechkästen eine durchlässige und eine undurchlässige Hecke (Höhe 30 mm) aufgebaut und die Gewichtsverluste in allen sechs Kästen gemessen. Da bei jedem Versuch eine andere Luftfeuchtigkeit und eine andere Lufttemperatur herrschte, sollten diese Einflüsse mit Hilfe der Vergleichsversuche eliminiert werden. Diese Absicht war jedoch noch nicht durchführbar, da die Streuung der Meßwerte offensichtlich zu groß war.

Für die Ermittlung des Heckeneinflusses auf die Verdunstung wurde deshalb ein anderer Weg gewählt. Wie die Abbildung 7 zeigt, wurden mit jedem Heckenmodell vier Versuche durchgeführt, wobei die Hecke jedes Mal an einer anderen Stelle relativ zu den sechs Kästen stand. Jedem Versuch mit Hecke wurde nun ein entsprechender Versuch ohne Hecke zugeordnet und eine „relative Verdunstung“ nach folgender Formel ermittelt:

$$\text{Relative Verdunstung} = \text{Faktor} \cdot \frac{\text{Verdunstung mit Hecke}}{\text{Verdunstung ohne Hecke}}$$

Für die beiden ersten Versuche (Hecke zwischen Kästen 5 und 6 in Abb. 7) wurde der Faktor so bestimmt, daß die relative Verdunstung für Kästen 1 bis 4 im Durchschnitt gleich 1 wurde. Dieser Festsetzung liegt die Annahme zu Grunde, daß die Hecke zwischen den Kästen 5 und 6 die Verdunstung in den Kästen 1 bis 4 nicht wesentlich beeinflussen kann.

Für die beiden weiteren Versuche (Hecke zwischen Kästen 3 und 4) wurde ebenso gefordert, daß die Kästen 1 und 2 keinen Heckeneinfluß zeigen, das heißt, im Durchschnitt die relative Verdunstung 1 aufweisen.

Für die nächsten Versuche (Hecke zwischen Kästen 1 und 2) wurde angenommen, daß im Kasten 1 die aus den beiden vorhergehenden Versuchen für den Kasten unmittelbar vor der Hecke gewonnene mittlere Verdunstung herrscht.

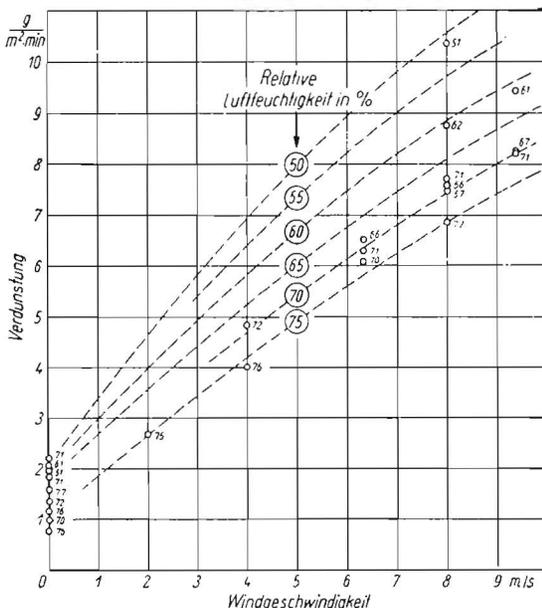


Abb. 5: Verdunstung eines Ackerbodens in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Schließlich wurde für die beiden letzten Versuche (Hecke um 3 Kastenlängen vor dem 1. Kasten, also gewissermaßen zwischen dem (—4). und (—3). Kasten) Anschluß an die vorhergehenden Versuche in der Weise gewonnen, daß Kästen 1 und 2 im Mittel die gleiche relative Verdunstung haben wie Kästen 5 und 6 im jeweils vorhergehenden Versuch.

Dieses Verfahren kann zweifellos nicht endgültig befriedigen, es schaltet aber die aus den schwankenden Versuchsbedingungen herrührenden Streuungen zum großen Teil aus. Abbildung 7 zeigt durch den im allgemeinen ungezwungenen Anschluß der Kurven aneinander, daß das gewählte Verfahren sicherlich qualitativ brauchbar ist. Der große Unterschied, der sich für die durchlässige und die undurchlässige Hecke dabei ergibt, ist so auffallend und eindeutig, daß kaum an seiner Echtheit gezweifelt werden kann. Die durchlässige Hecke bringt in Lee eine merkliche Verminderung der Verdunstung, die undurchlässige Hecke dagegen eine starke Erhöhung. Die gleichmäßige Abbremsung des Windes durch die durchlässige Hecke bewirkt eine Herabsetzung der Verdunstung als Folge der geringeren Geschwindigkeit. Hinter der undurchlässigen Hecke dagegen bewirkt die starke Verwirbelung eine erhöhte Verdunstung, obwohl hier die Geschwindigkeit, wie Abbildung 3 zeigt, nicht größer sondern kleiner ist als im Versuch ohne Hecke.

Es sei ausdrücklich betont, daß die hier mitgeteilten Verdunstungsmessungen nur als vorläufige qualitative Messungen gelten können. Die benutzte Apparatur erfüllte nicht alle Bedingungen, die man an sie stellen müßte. Erwünscht wäre die Wiederholung dieser Messungen in einem eigens hierfür gebauten Windkanal. Daß Vergleichsmessungen mit anderen Böden und bei verschiedener Struktur der Böden wichtige Ergebnisse bringen werden, versteht sich von selbst.

5. Ausblick.

Die in diesem Bericht geschilderten strömungstechnischen Messungen können als Teil eines größeren Programms zur Untersuchung des Windeinflusses auf das Klima in Bodennähe betrachtet werden. Zu untersuchen wären nicht nur die Wind- und Verdunstungsverhältnisse, sondern auch die Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilung in der untersten Bodenschicht, die Verteilung der Kohlensäure innerhalb der Pflanzendecke, die Mitbewegung von Bodenteilchen (Erosion) und Blütenstaub durch den Wind und anderes mehr. Alle diese Untersuchungen könnten in einem Spezialwindkanal mit relativ langer Meßstrecke (etwa 12 m) durchgeführt werden, dessen Klima (Temperatur und Feuchtigkeit der Luft) in gewissem Bereich willkürlich einstellbar sein müßte. Die Geschwindigkeit müßte den in der freien Natur auftretenden

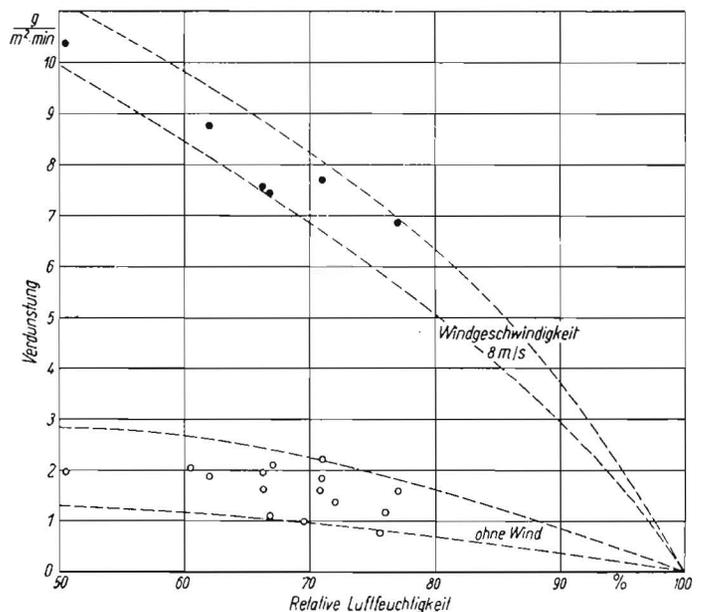


Abb. 6: Verdunstung eines Ackerbodens in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit

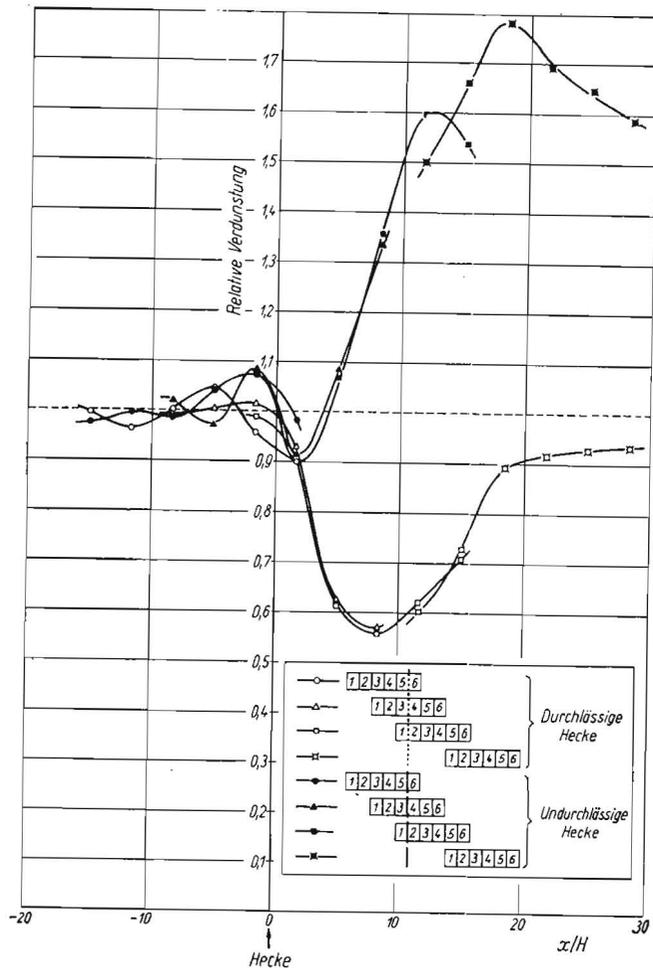


Abb. 7: Beeinflussung der Verdunstung durch eine durchlässige und eine undurchlässige Hecke

Werten entsprechen, also etwa bis 30 m/s reichen und bis zu kleinen Werten herunter regulierbar sein. Wenn der Querschnitt des Kanals groß genug gewählt wird, so daß auch Bodenstücke mit natürlichem Bewuchs darin Platz hätten, würden sich mit einer solchen Versuchseinrichtung sicherlich noch eine ganze Reihe wichtiger biologischer Versuche durchführen lassen.

Zu dem oft gehörten Einwand, daß solche Windkanalversuche nicht genau genug den viel verwickelteren Verhältnissen in der freien Natur entsprechen, ist zu sagen, daß dies kein Nachteil, sondern ein Vorteil ist. Gerade weil man die Versuchsbedingungen im Windkanal (oder allgemeiner: im Laboratorium) idealisieren muß, besteht Aussicht, grundsätzliche Zusammenhänge richtig zu erkennen, die in der freien Natur durch nebensächliche Einflüsse so überlagert werden, daß sie nicht davon getrennt werden können. Hier gilt, was zwei

amerikanische Forscher [27] in diesem Zusammenhang kürzlich geschrieben haben:

„The consensus of those who have worked with wind erosion investigations is that most problems of a fundamental nature may best be studied with an artificial air stream since variables common to the problem may be better controlled in a wind tunnel than in the open.“

Schrifttum:

- [1] Bognold, R. A.: The movement of desert sand. Proc. Roy. Soc. 157 (1936) A, p. 594.
- [2] Bognold, R. A.: The measurement of sand storms. Proc. Roy. Soc. 167 (1938) A, p. 282.
- [3] Blanck, E.: Handbuch der Bodenlehre, Bd. 6, Berlin 1930.
- [4] Blenk, H.: Aerodynamische Untersuchungen zum Windschutzproblem. Umschaudienst der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hannover 1952, Heft 5/6, S. 183.
- [5] Chepil, W. S.: Dynamics of wind erosion. Soil Science 60 (1945) and 61 (1946).
- [6] Chepil, W. S.: Properties of soil which influence wind erosion. Soil Science 69 (1950).
- [7] Flensburg, C. E.: Løevirkningsundersøgelser og Typebestemmelser af Løehegn. Hedeselskabets Tidsskrift (Zeitschrift der Dänischen Heidegesellschaft) 1938, Nr. 4.
- [8] Flensburg, C. E. und Nakkentved, Chr.: Fortsatte Løevirkningsundersøgelser. Hedeselskabets Tidsskrift 1940, Nr. 13.
- [9] Ganssen, R.: Mitteilungen über die Winderosion auf Böden Niedersachsens. Mitt. d. Bundesanst. f. Forst- und Holzwirtschaft 1950, Nr. 14.
- [10] Geiger, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 3. Aufl. Braunschweig 1950.
- [11] Geiger, R.: Der künstliche Windschutz als meteorologisches Problem. Erdkunde 5, 2, S. 106 (1951).
- [12] Ilijin, M.: Besiegte Natur (Original russisch, deutsch von Peter Weibel), Berlin 1951.
- [13] Kreuz, W.: Der Windschutz. Dortmund 1952.
- [14] Kuhnke, A.: Die Abhängigkeit des Pflanzenertrages von der Woserverdunstung. Schr. d. Königsberger Gel. Ges. 13 (1936), Heft 4.
- [15] Lautensach, H.: Feldheckenstudien in Westmекlenburg. Petermanns Geogr. Mitt. 94 (1950), S. 70.
- [16] Van der Linde, R. J.: The problem of the woodplantings between cultivated fields. Arnhem 1951.
- [17] Nägeli, W.: Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windschutzstreifen. Mitt. Schweiz. Anst. f. Forstl. Versuchswesen XXIII, 1, S. 223 (1943).
- [18] Nögeli, W.: Weitere Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windschutzstreifen. Ebenda XXIV, 2, S. 659 (1946).
- [19] Nusselt, W.: Wärmeübergang, Diffusion und Verdunstung. Zeitschr. f. angew. Math. u. Mechanik 10 (1930), S. 105.
- [20] Olsson, Gron R.: Versuche über Winddruck auf Bauwerke. Der Bauingenieur 15 (1934), S. 483.
- [21] Paeschke, W.: Experimentelle Untersuchungen zum Rauheits- und Stabilitätsproblem in der bodennahen Luftschicht. Diss. Gött. 1937; s. a. „Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre“ 24 (1937), S. 163 und Bioklim. Beibl. 1937, S. 155.
- [22] Prandtl, L.: Führer durch die Strömungslehre. 3. Aufl. Braunschweig 1949.
- [23] Schlichting, H.: Grenzschicht-Theorie, Karlsruhe 1951.
- [24] Steckhan, H.: Bodenabtragung durch Wind in Niedersachsen — eine Gefahr für die Landeskultur. Neues Archiv für Niedersachsen 1950, Heft 17, S. 313.
- [25] Troll, C.: Die Problematik der Heckenlandschaft. Erdkunde 5 (1951), Heft 2, S. 105.
- [26] Woelfle, M.: Waldbau und Forstmeteorologie, Neudamm 1939.
- [27] Zingg, A. W. and Chepil, W. S.: Aerodynamics of wind erosion. Agric. Engg. June 1950.

Résumé:

Prof. Dr. phil. H. Blenk: „Strömungstechnische Beiträge zum Windschutzproblem.“

Der vorliegende Beitrag behandelt die strömungstechnische Seite des Windschutzproblems und gibt die Ergebnisse von Modellversuchen im Windkanal wieder. Die Messungen der Geschwindigkeitsprofile lassen u. a. darauf schließen, daß durchlässige Hecken einen größeren Wirkungsbereich haben als undurchlässige. Die schwache Strömung, die durch eine durchlässige Hecke hindurchtritt, beschleunigt sich nur ganz langsam wieder, während die Strömung, die über eine undurchlässige Mauer fällt, in Lee der Mauer starke Wirbel verursacht und bald wieder mit fast unveränderter Geschwindigkeit den Boden erreicht. Versuche über den Winddruck auf ein Haus ohne und mit Schutzhecke zeigen, wie die Druckverteilung durch eine vor dem Haus stehende Hecke verändert wird. Die Druck- und Saugkräfte werden durch die Hecke überall deutlich herabgesetzt. In weiteren Versuchen wird die Winddruckverteilung auf das Haus bei Anblasung von der Giebelseite her und bei Anblasung unter einem Winkel von 45° gezeigt. Bei den Verdunstungsmessungen brachte die durchlässige Hecke in Lee eine merkliche Verminderung der Verdunstung, die undurchlässige dagegen eine starke Erhöhung.

Prof. Dr. phil. H. Blenk: „Streamlining and Wind Protection.“

The present contribution deals with streamlining and wind stream technique as far as they concern the problem of protection from wind. It also presents results obtained from experiments made with models in wind tunnels. Measurements of the velocity profile show that pervious hedges are more effective than impervious hedges. The gentle currents that pass through a pervious hedge are only susceptible to a low rate of acceleration, whilst the currents that pass over an impervious wall create strong eddies on the lee side, and, by the time the wind stream has reached the ground, it has once more attained its original velocity. Tests made on the wind pressure on a house show how the pressure distribution is altered by a hedge placed before the house. The pressure and suction forces are perceptibly reduced by the hedge. In further tests the distribution of wind pressure on the house is demonstrated when the wind blows from the gable side of the house and from an angle of 45°. Measurements of the dilution showed that a pervious hedge occasioned a perceptible reduction in dilution on the lee side, whilst an impervious hedge showed a definite increase in dilution.

Prof. Dr. phil. H. Blenk:

«Technique aérodynamique problème posé par la protection contre les vents»

Cet exposé traite de la partie aérodynamique du problème posé par la protection contre le vent et mentionne les résultats obtenus au cours d'essais sur des prototypes placés dans le canal du vent. Les mesures des vitesses permettent en outre de conclure que les haies perméables ont une zone d'efficacité plus grande que celles qui sont absolument hermétiques. Les faibles courants qui pénètrent au travers d'une haie perméable ne reprennent que très lentement de la vitesse, tandis que les courants qui se heurtent à un mur hermétique occasionnent du côté sous le vent forts tourbillons qui parviennent bientôt au sol à une vitesse pratiquement égale. Des essais sur la pression du vent exercée sur une maison sans et avec une haie montrent comment la répartition de la pression est modifiée par la haie. Au cours d'autres essais, on démontre la répartition de la pression du vent sur la maison, le vent soufflant du côté d'un pignon et avec un angle de 45°. Au cours des mesures d'évaporation la haie perméable a montré du côté sous le vent une remarquable diminution, tandis que la haie hermétique a considérablement augmenté l'évaporation.

Dr. phil. H. Blenk, catedrático: «Reseñas de aerodinámica en el problema de la protección del viento.»

La presenta reseña trata de la parte aerodinámica en el problema de la protección del viento, presentándose los resultados conseguidos en ensayos con maquetas en el canal de pruebas. De las mediciones de los perfiles de velocidad se infiere que los setos permeables al viento tienen una eficacia mayor que los obstáculos impermeables, o sea, sólidos. La corriente débil que atraviesa un seto permeable vuelve a acelerarse muy poco a poco, mientras que la corriente que pasa p. e. por encima de un muro impermeable, produce fuertes remolinos a sotavento del obstáculo, volviendo a alcanzar pronto su velocidad primitiva a la altura del suelo. Mediciones de la presión del viento sobre una casa, hechas con y sin seto protector, han demostrado los cambios que se operan en el reparto de las presiones, gracias al seto que hay delante de la casa. Las fuerzas de presión y las de aspiración se reducen notablemente gracias al seto. Otras pruebas hicieron ver el reparto de las presiones sobre una casa, soplando el viento del lado de la fachada o bajo un ángulo de 45°. En las pruebas de vaporación, el seto permeable dió por resultado una reducción notable, mientras que el obstáculo sólido daba lugar a fuertes aumentos.

Rundschau

Die elektronische Farbsortierung von Früchten und Gemüse*)

Die ersten Untersuchungen über die maschinelle Farbsortierung von Früchten wurden in den USA im Jahre 1947 von Prof. Walker an der Kalifornia-Universität in Davis gemacht. Den Anstoß zu den Versuchen gaben Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen über das Einlagern und Verpacken von Zitronen. Zitronen werden unabhängig von ihrem Reifezustand gepflückt, sobald sie die für den Verkauf notwendige Größe erreicht haben. Die endgültige Reife tritt dann während der Einlagerung ein. Dieses Verfahren macht eine vorherige Farbsortierung nach fünf Graden notwendig, die bisher von Hand ausgeführt wurde. Die Kosten der Handsortierung machen aber einen wesentlichen Anteil der gesamten Lagerungs- und Behandlungskosten aus. Aus diesem Grunde erschien es zweckmäßig, eine maschinelle Farbsortierung auf optischer und elektronischer Grundlage zu versuchen.

Die Anforderungen, die an eine solche Sortiermaschine gestellt werden, sind folgende:

1. Die Maschine braucht bei der Sortierung keine größere Genauigkeit als bei der Handsortierung zu erreichen.
2. Die Farbsortierung der Zitronen ist nur ein Arbeitsgang in der großen Reihe der Einlagerungsvorgänge (Pflücken, Aufladen, Entladen, Waschen, Sortieren nach Farbe, nach Qualität, usw.). Eine Unterbrechung dieser Reihenfolge führt zu Stockungen im gesamten Arbeitsprozeß. Die Sortierung muß daher kontinuierlich vor sich gehen.
3. Der Ausnützungsfaktor einer Zitronensortiermaschine liegt bei 30 % im Jahr. Bei dem Entwurf der Maschine wurde daher größerer Wert auf niedrige Betriebskosten als auf niedrige Anschaffungskosten gelegt.
4. Die Zitronen werden auf Förderbändern in die Lagerhäuser mit einer Geschwindigkeit von 40 Stück/sec. eingeliefert. Es erschien zweckmäßig, bei der Sortierung nicht mit dieser Geschwindigkeit zu arbeiten, sondern den Strom der eingehenden Zitronen auf zwei oder drei Sortiermaschinen zu verteilen, um durch den etwaigen Ausfall einer Maschine nicht den ganzen Anlieferungsprozeß ins Stocken zu bringen. Unter diesem Gesichtspunkt erschien eine Sortiergeschwindigkeit von 10—20 Zitronen/sec. angebracht.
5. Die Oberflächenfärbung einer Zitrone ist nicht gleichmäßig. Es genügt jedoch, die durchschnittliche Färbung jeder Zitrone als Kriterium für ihre Reife- und Lagerzeit anzusetzen. Ein foto-elektrisches Sortiergerät muß daher

die gesamte Oberfläche einer Zitrone erfassen und ein Steuersignal in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Färbung geben. Außerdem muß die Maschine nach fünf genau definierten Farbkategorien sortieren, wie sie handelsüblich sind. Eine gröbere Auslese ist nicht angängig, da kleine Mengen überreifer Früchte in der Lagerung eine ganze Abteilung schädigen können.

Nach diesen Forderungen wurde eine Zitronensortiermaschine entworfen und gebaut. In dieser Maschine werden die Früchte über eine konkave Rollbahn zugeführt. Die Rollbahn ordnet die Zitronen in einer Reihe mit der Hauptachse quer zur Förderrichtung an. Die Früchte fallen dann von der Rollbahn herunter und passieren eine optische Vorrichtung, in der die Farbmessung in ungefähr 0,01 sec. erfolgt. Das hierbei ausgelöste foto-elektrische Signal wird in ein Aggregat von Verstärker- und Analysator-Röhren eingeleitet und steuert durch dieses Aggregat die Stellung von vier Leitblechen. Diese Leitbleche führen die einzelnen Früchte in einen von fünf Sortierkanälen, entsprechend den fünf Farbklassen. Hierbei ist von Bedeutung, daß durch die Ausrichtung der

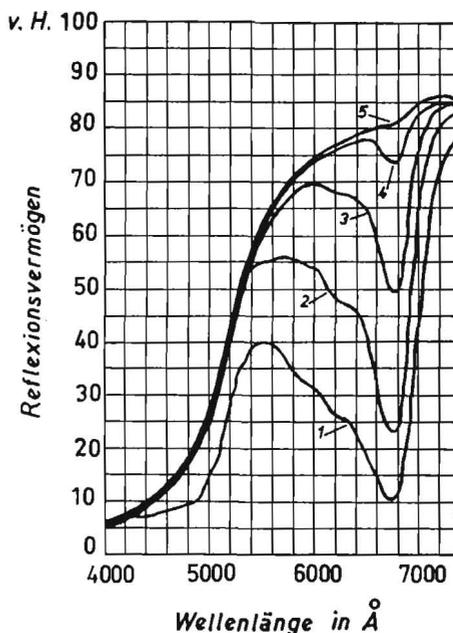


Abb. 1: Reflexionsvermögen von Zitronen bei 5 Reifestufen: 1. dunkel grün; 2. hellgrün; 3. Silber A; 4. Silber B; 5. gelb.

*) J. B. Powers, J. T. Gunn u. F. C. Jacob, Electronic Color Sorting of Fruits and Vegetables, Agricultural Engineering 1953, S. 149 ff. Daraus dieser Auszug.