Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 45 (1954)

Heft: 14

Artikel: Die neue Kapillardüsen-Beregnungsanlage des SEV für Spannungsprüfungen und ihre Anwendungen

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061183

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

45. Jahrgang Nr. 14 Samstag, 10. Juli 1954

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Die neue Kapillardüsen-Beregnungsanlage des SEV für Spannungsprüfungen und ihre Anwendung

Mitgeteilt von der *Materialprüfanstalt des SEV*

[Vom Schweiz. Elektrotechnischen Komitee (CES) genehmigter Bericht]

621.317.32 : 621.647.2 : 532.525

In der Arbeit werden Prüfbestimmungen für die Spannungsprüfung unter Regen von Freiluftisolatoren erwähnt und diskutiert. Konstruktion und Handhabung der von der Materialprüfanstalt des SEV entwickelten Kapillardüsen-Beregnungsanlage werden in ausführlicher Art beschrieben, so dass es jedem Laboratorium möglich sein sollte, auf Grund dieser Arbeit eine im Prinzip ähnliche Anlage zu bauen und mit ihr zu arbeiten. Abschliessend werden Resultate von Vergleichsmessungen mit früheren und mit der neuen Beregnungsanlage angegeben.

Dans cet exposé, les prescriptions relatives aux essais de rigidité diélectrique sous pluie artificielle d'isolateurs pour installations en plein air sont mentionnées et discutées. La construction et le fonctionnement de l'installation à gicleurs capillaires mise au point par la Station d'essai des matériaux de l'ASE est décrite en détail, de manière à permettre à chaque laboratoire d'essais de construire et d'utiliser une installation basée sur le même principe. Pour terminer, des résultats obtenus lors de mesures comparatives avec d'anciennes installations et avec la nouvelle sont indiqués.

1. Gründe für den Bau der Anlage

Die Isolationsfestigkeit von Freileitungs- und Freiluftstations-Isolatoren wird unter Regen beträchtlich herabgesetzt. Die Spannungsprüfung unter Regen ist daher ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung dieses Materials. Die Prüfung hat in der Schweiz unter Einhaltung folgender Bedingungen, die den Empfehlungen der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) entsprechen, zu erfolgen:

1. Der spezifische Widerstand des verwendeten Wassers soll 9000...11 000 Ωcm betragen.
2. Das Prüfobjekt ist mit einer Intensität von 3 mm/min zu beregnen [1]).
3. Der Regen hat unter einem Einfallwinkel von 40...50° auf das Prüfobjekt zu fallen.
4. Das Prüfobjekt ist während 5 min vorzuberegnen.

Ergänzend ist beizufügen, dass unter der Intensität von 3 mm/min offenbar die Intensität der Vertikalkomponente des künstlichen Regens zu verstehen ist, wie ja auch in der Meteorologie immer nur die Vertikalkomponente gemessen wird.

Die Prüfbestimmungen bedürfen zweier auf neuen Erkenntnissen beruhender Korrekturen. Erstens ist es notwendig, bei der vorgeschriebenen Regenintensität von 3 mm/min eine Toleranz von ± 10 % zuzulassen, da es kaum je eine Beregnungsanlage geben wird, die eine genaue Einhaltung von 3 mm/min über die ganze Beregnungsfläche und während der ganzen Versuchsdauer zulässt.

Zweitens erweist es sich als notwendig, statt der Vertikalkomponente die Horizontalkomponente des einfallenden Regens zu messen und deren Intensität auf 2,2 mm/min ± 10 % festzulegen. Dies ergibt sich aus folgenden Überlegungen:

Die Bedingung, dass die Wasserstrahlen unter 40...50° auf das Prüfobjekt einfallen sollen, lässt sich nur schwer verwirklichen. Normalerweise wird der Regen mit Einzeldüsen erzeugt, welche das Wasser kegelförmig in Tropfen verschiedenster Grösse ausspritzen. Dabei ergeben Streudüsen einen breiten Wasserkegel, Kapillardüsen einen wesentlich schmäleren. In beiden Fällen fliegen im Wasserstrahl die grossen Tropfen mit ihrem relativ geringeren Luftwiderstand flacher als die kleinen, die stark abfallen. Bei der visuellen Beurteilung des Einfallwinkels richtet sich das Auge nach der Flugbahn der grösseren Tropfen, was zur Einstellung eines zu steilen Regens führt. Dies äussert sich in der Tatsache, dass ein nach Vertikalkomponente und visuell beurteiltem Winkel eingestellter Strahl stets eine Horizontalkomponente aufweist, die kleiner ist als die Vertikalkomponente. Diese Erscheinung wird verstärkt, wenn für die Beregnung grösserer Objekte mehrere Strahlen übereinander angeordnet werden. So wurde bei der Beregnung eines Prüfobjektes von 2 m Höhe mit Streudüsen eine Horizontalkomponente gemessen, deren Mittelwert oben 3 mm/min, unten dagegen nur noch 0,5 mm/min betrug. Die Beregnung mit Kapillardüsen ergab entsprechend 2,8 und 1,5 mm/min. In beiden Fällen war der Regen mit der üblichen Sorgfalt aus 40...50° Einfall und 3 mm/min vertikale Intensität eingestellt worden.

Die bisherige Praxis der Einstellung und Messung des Regens ergibt somit in weiten Grenzen streuende Horizontalkomponenten. Eine grosse Streuung wird übrigens durch die Art, wie der Regen in den Vorschriften definiert ist, zugelassen.

[1]) Der vorliegende Bericht basiert auf einer im folgenden dargelegten Änderung dieser Bestimmung.

Bei der für die Vertikalkomponente nötigen Toleranz von ± 10 % und dem Bereich des Einfallwinkels von 40...50° errechnet sich für die Horizontalkomponente eine Streuung zwischen 2,27 und 3,92 mm/min. Dieser beträchtliche Spielraum steht einer steten Reproduzierbarkeit um so mehr entgegen, als die Streuungen der Horizontalkomponente das Messergebnis viel stärker beeinflussen als die Streuungen der Vertikalkomponente. Dies folgt aus dem Umstand, dass die Prüfobjekte in der Regel eine kleine Grundrissfläche, aber eine grosse Aufrissfläche besitzen, die Menge des von der Aufrissfläche aufgefangenen Wassers jedoch nur von der Horizontalkomponente abhängt.

Es wäre nun naheliegend, in Zukunft auf die Messung beider Komponenten überzugehen und in Anlehnung an die Praxis der Vergangenheit eine Regenintensität von vertikal 3 mm/min und horizontal ca. 2,2 mm/min (Mittelwert von 2,8 und 1,5 mm/min) vorzuschreiben. Da aber die Einstellung beider Komponenten mehr Arbeit gibt als die Einstellung einer Komponente und die visuelle Beurteilung des Einfallwinkels, wird empfohlen, in Zukunft den Regen auf eine Intensität der Horizontalkomponente von 2,2 mm/min ± 10 % und auf einen Einfallwinkel von 40...50° einzustellen. Die Vertikalkomponente wird dabei nicht mehr gemessen. In Befolgung dieser Empfehlung basiert der folgende Bericht auf diesen Bedingungen.

Die Prüfbedingungen sind aber auch nach diesen Änderungen nicht hinreichend. Das Messergebnis wird nämlich auch durch die Grösse der Tropfen und den dem Wasserstrahl innewohnenden Impuls (Masse mal Geschwindigkeit) beeinflusst. Um den Einfluss dieser Grössen, deren Festlegung und Kontrolle praktisch unmöglich ist, auszuschalten, d. h. um vergleichbare und reproduzierbare Messresultate zu erhalten, müssen die Prüfungen in sämtlichen Versuchslokalen mit einer im Prinzip gleich konstruierten Beregnungsanlage vorgenommen werden. Diese Forderung ruft nach der Festlegung einer Standard-Beregnungsanlage, die derart beschaffen sein muss, dass mit ihr die verlangte Niederschlagsintensität und der vorgeschriebene Einfallwinkel in der ganzen Beregnungsebene während der ganzen Beregnungsdauer eingehalten werden können.

Diese Bedingungen wurden von den bisher bekannten Beregnungsanlagen nicht erfüllt. Die mit ihnen durchgeführten Prüfungen zeitigten stark streuende Resultate. Im Jahre 1942 in schweizerischen Versuchslokalen an derselben Isolatorenkette durchgeführte Vergleichsversuche [2]) ergaben eine Streuung der Überschlagspannung von + 20 und − 19 % gegenüber dem Mittelwert, während gleichzeitig die bei der Trockenprüfung ermittelten Abweichungen vom Mittelwert nur + 4 und − 2 % betrugen.

Dieses unbefriedigende Resultat gab den Anstoss zur Entwicklung der im folgenden beschriebenen Kapillardüsen-Beregnungsanlage des SEV. Die Entwicklungsarbeiten wurden eingeleitet durch eine Untersuchung der verschiedenen Beregnungsanlagen, die in den bekannten Hochspannungslaboratorien in Betrieb standen. Darunter befanden sich einige Ausführungen von Streudüsen verschiedener Hersteller, Zweistrahldüsen und Verteilrechen. Mit keiner dieser Einrichtungen konnte aber auch nur annähernd ein Regen für Prüfobjekte üblicher

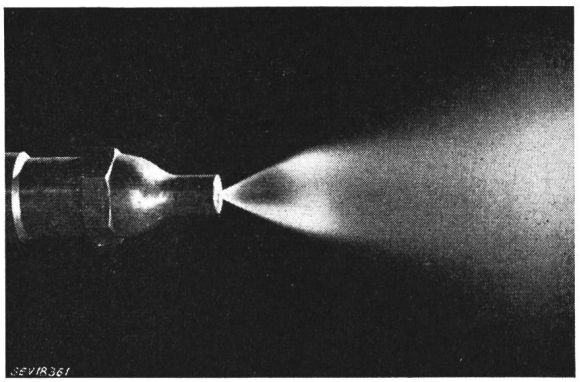

Fig. 1
Streudüse

Grösse erzeugt werden, der hinsichtlich Regenintensität und Einfallwinkel den vorgeschriebenen Bedingungen entsprach. Vor allem zeigten Streu- oder Wirbeldüsen (Fig. 1), die das Wasser in schraubenförmigen Kanälen durchfliesst und kegelförmig verlässt, ein Auftreffen auf dem Prüfobjekt von Regentropfen verschiedenster Grösse, unter verschiedensten Winkeln. Die Niederschlagsintensität ist dabei örtlich ungleichmässig und erfährt im Verlaufe der Zeit spontane Änderungen. Ferner genügt die Reichweite der Streudüsen für die Beregnung von Höchstspannungsmaterial nicht.

Es wurde auch überlegt, ob ein vertikal fallender Regen durch Luftströmung so abgelenkt werden könnte, dass der vorgeschriebene Einfallwinkel gewährleistet ist. Diese Art der Erzeugung künstlichen Regens würde zwar die Verhältnisse in der Natur am genauesten nachahmen, erfordert aber eine verhältnismässig grosse und komplizierte Prüfeinrichtung. Um auch Freiluftmaterial bei den höchsten Spannungen prüfen zu können, ist ein ausreichender Abstand zwischen Beregnungsanlage und Prüfobjekt nötig, was bei dieser Beregnungsart einen sehr leistungsfähigen Windkanal erfordert. Dieser Aufwand steht aber mit der Forderung nach möglichster Einfachheit in Widerspruch.

Ferner ist schon vorgeschlagen worden, die Regentropfen senkrecht fallen zu lassen und das Prüfobjekt schräg unter 45° aufzustellen. Diese Lösung würde eine einheitliche Tropfengrösse, eine gleichmässige Beregnung und einen einwandfreien Einfallwinkel ermöglichen, hat jedoch zwei wesentliche Nachteile. Erstens ist bei grossen Objekten die Schrägstellung mit Schwierigkeiten verbunden. Zweitens tropft das aufgefallene Wasser von Schirm zu Schirm vom Prüfobjekt weg, während bei senkrechtem Stand und 45°-Beregnung das Wasser dem Prüfobjekt entlang fliesst. Die erwähnte Methode vermag deshalb die im Betrieb vorkommenden Benetzungsverhältnisse nicht so gut wiederzugeben wie die 45°-Beregnung bei senkrecht stehendem Objekt.

[2]) siehe Abschnitt 4.

2. Die neue Kapillardüsen-Beregnungsanlage

a) Düse und Düsenträger

Nachdem sich Streudüsen für die Erzeugung künstlichen Regens als ungeeignet erwiesen, war es naheliegend, konzentrierte Wasserstrahlen und deren natürliche Auflösung in Tropfen näher zu untersuchen. Die günstigsten Resultate ergab die in Fig. 2 dargestellte Kapillardüse. Diese Düse erlaubt eine mechanisch sehr genaue Herstellung, bewährt sich hinsichtlich Reproduzierbarkeit des Strahlverlaufes und ergibt eine natürliche Tropfengrösse und eine bedeutend kleinere Streuung des Einfallwinkels als die Streudüsen.

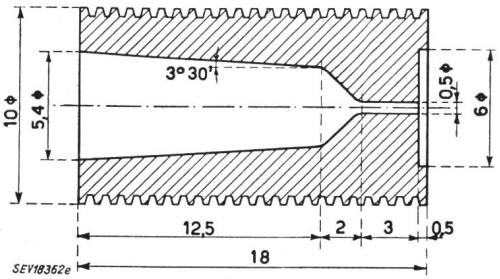

Fig. 2
Kapillardüse
Masse in mm

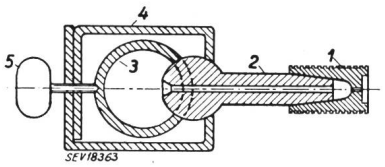

Fig. 3
Einstellvorrichtung für Kapillardüsen
1 Kapillardüse
2 Düsenträger mit Kugelsitz
3 Verteilrohr
4 Klemmbügel
5 Feststellschraube

Vorteilhafterweise wird die Düse in einem Kugelgelenk befestigt, damit sich der Wasserstrahl sowohl nach der Seite wie auch nach oben und unten richten lässt. Fig. 3 zeigt die getroffene Lösung; die Kapillardüse *1* sitzt mittels konischen Schiebesitzes, der leichtes Auswechseln gestattet, auf einem Düsenträger *2*, dessen Kugelgelenk durch einen Klemmbügel *4* und eine Feststellschraube *5* an das Verteilrohr *3* gepresst wird. Durch Lösen der Feststellschraube *5* wird der Düsenträger freigegeben, und die Richtung des Wasserstrahles lässt sich in den nötigen Grenzen einstellen.

Bei der Herstellung der Düsen ist bei dieser Konstruktion des Düsenträgers besonders darauf zu achten, dass sie genau rotationssymmetrisch und unter sich gleich ausfallen, da sich der Wasserstrahl sonst beim Drehen (zur Verbesserung des Schiebesitzes) oder Auswechseln der Düsen (bei Verstopfung einer Düse) ändert. Der Sitz zwischen Verteilrohr und Kugelkopf ist sorgfältig einzuschleifen, damit er im Betrieb dicht ist. Zur Ausschaltung einzelner Düsen können diese vom Düsenträger abgenommen und durch eine Verschlusskappe ersetzt werden.

b) Der Strahl einer Düse

Fig. 4 zeigt die Seitenansicht des von einer Düse erzeugten Wasserstrahles. Im folgenden sollen der Durchfluss durch eine Düse, die Reichweite des Wasserstrahles und die Niederschlagsverteilung in einem Vertikalschnitt in der Prüfebene näher untersucht werden.

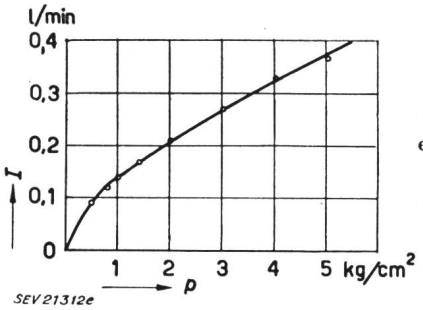

Fig. 5
Durchfluss *I* durch eine Düse von 0,5 mm Öffnungsdurchmesser in Funktion des Überdruckes *p*

Der *Durchfluss I* durch eine Düse hängt vom Überdruck *p* ab. Fig. 5 zeigt den funktionellen Zusammenhang für die hier beschriebene Düse von 0,5 mm Öffnungsdurchmesser.

Wie die Figur zeigt, ändert sich der Kurvenverlauf bei einem Überdruck von ca. 1 kg/cm². Es ist dies das Gebiet, in welchem die Laminarströmung in turbulente Strömung übergeht. Dieses Übergangsgebiet ist im Betrieb zu vermeiden, da bei praktisch gleichbleibendem Druck spontane Änderungen im Strahlverlauf auftreten.

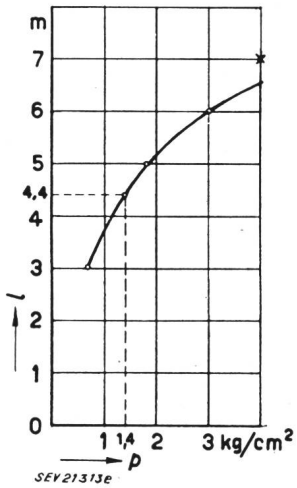

Fig. 6
Reichweite *l* mit einer Düse von 0,5 mm Öffnungsdurchmesser in Funktion des Überdruckes *p*
(* Reichweite für Düse von 0,8 mm Öffnungsdurchmesser bei einem Druck von 4 kg/cm²)

Die *Reichweite l* eines Strahles wird ebenfalls durch den Überdruck *p* bestimmt. Für einen Abstand von 4,4 m zwischen Düse und Prüfobjekt muss der Überdruck z. B. 1,4 kg/cm² betragen, wenn der Strahl unter 45° auf das Prüfobjekt fallen soll.

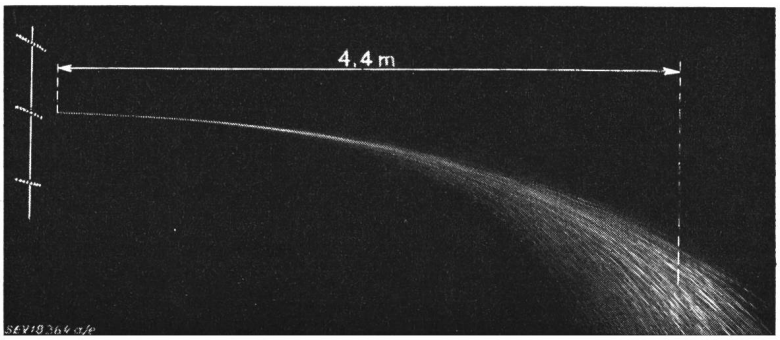

Fig. 4
Strahlverlauf bei 1,4 kg/cm² Überdruck

Fig. 6 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Reichweite und Überdruck. Dabei ist vorausgesetzt, dass der Wasserstrahl horizontal aus der Düse austritt, der Elevationswinkel also 0° beträgt.

Wie die Figur zeigt, ist mit einem Überdruck von 3 kg/cm² eine Reichweite von 6 m möglich. Eine weitere Drucksteigerung erhöht die Reichweite nur noch unwesentlich. Für grössere Reichweiten ist deshalb eine Düse mit grösserem Öffnungsdurchmesser nötig. Für eine Distanz von 7 m ist z. B. ein Öffnungsdurchmesser von 0,8 mm erforderlich, wobei der Druck 4 kg/cm² betragen muss.

Zur Abklärung der *Niederschlagsverteilung* wird beim Prüfobjekt die Horizontalkomponente des Regens über einen Vertikalschnitt ausgemessen. Fig. 7*a* zeigt beispielsweise die im Abstand von 4,4 m bei einem Überdruck von 1,4 kg/cm² ermittelte Verteilung. Die graphische Darstellung der Horizontalkomponente als Funktion des Ortes ergibt eine Hügelfläche mit glockenförmigen Horizontalschnitten und einem Vertikalschnitt durch die Symmetrieachse, der erst linear ansteigt und dann nach unten exponentiell abnimmt. Die Kuppe des Hügels entspricht der maximalen Intensität von ca. 2,2 mm/min. Die

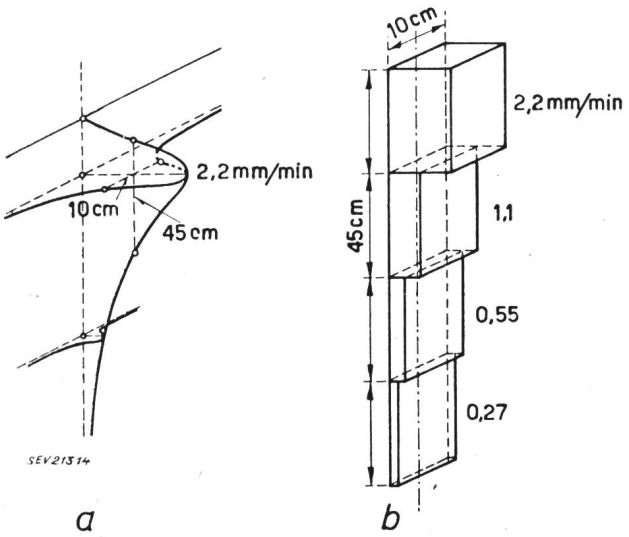

Fig. 7
Horizontalkomponente der Niederschlagsintensität einer Düse im Abstand von 4,4 m auf einer vertikalen Schnittebene
a örtlicher Verlauf
b Ersatztreppe

Halbwertsbreite des Hügels beträgt ca. 10 cm, die Halbwertshöhe ca. 45 cm. Sein Rauminhalt stellt die gesamte Wassermenge dar, die pro Minute auf die Messebene fällt.

Der Hügel wird für die weiteren Überlegungen zweckmässigerweise durch eine Treppe mit gleichem Rauminhalt ersetzt. Bei einer Breite von 10 cm und Stufenlängen von 45 cm weist diese Treppe exponentiell abnehmende Stufenhöhen von 2,2, 1,1, 0,55 und 0,27 mm/min auf (Fig. 7*b*). Die Wahl der Treppenbreite und Stufenlänge ist an und für sich willkürlich. Eine grössere Breite bzw. Länge ergäbe lediglich niedrigere Stufenhöhen, weil das Volumen unverändert sein muss. Die Verwendung solcher Treppen erleichtert die Superposition bei der Verwendung einer grösseren Anzahl Düsen.

Die Strahlbreite der Kapillardüsen ist gering. Sie lässt sich auch durch Vergrösserung des Abstandes zwischen Düse und Prüfobjekt praktisch nicht erhöhen. Diese Tatsache ist folgendermassen zu erklären. Beim blossen Hinausschieben der Prüfebene wird der Strahl breiter; bei der nachfolgenden Druckvergrösserung zwecks Nachregulierung des Winkels wird des grösseren Anfangsimpulses wegen der Strahl jedoch konzentrierter, so dass die Strahlbreite ungefähr konstant bleibt. Für die Strahlhöhe gelten die gleichen Überlegungen. Hier nimmt aber beim Hinausschieben die Strahlauflösung viel stärker zu, so dass die nachfolgende Drucksteigerung sie nicht mehr zu kompensieren vermag. Mit grösserer Reichweite erhöht sich deshalb die Strahlhöhe beträchtlich, d. h. mit grösserer Distanz können höhere Objekte mit einer einzigen Düse beregnet werden, sofern die Breite eines Strahles für das Objekt genügt. Zur Erzeugung eines breiteren Regens sind mehrere Düsen erforderlich. Eine Verbreiterung des Strahles wäre auch durch Drallgebung möglich. Die Drallgebung vergrössert aber die Streuung des Einfallwinkels und erschwert seine Beurteilung.

Es sei noch erwähnt, dass durch Elevation, die sich praktisch im Bereich von ± 20° bewegen könnte, Reichweite und Einfallwinkel nur unwesentlich geändert werden. Die Strahlbreite wird nur wenig, die Strahlhöhe dagegen stark vergrössert, und zwar beim Aufwärts-, wie auch beim Abwärtsrichten.

c) Das Etagen-System

Je nach der Grösse des Prüfobjektes ist nun eine bestimmte Zahl von Düsen derart miteinander zu kombinieren, dass ihre Strahlen in der ganzen Ebene des Prüfobjektes einen möglichst gleichmässigen Regen mit der gewünschten Horizontal-Intensität von 2,2 mm/min erzeugen. Aus den obigen Ausführungen geht hervor, dass die Strahlen in der Prüfebene in seitlichen Abständen von ca. 10 cm

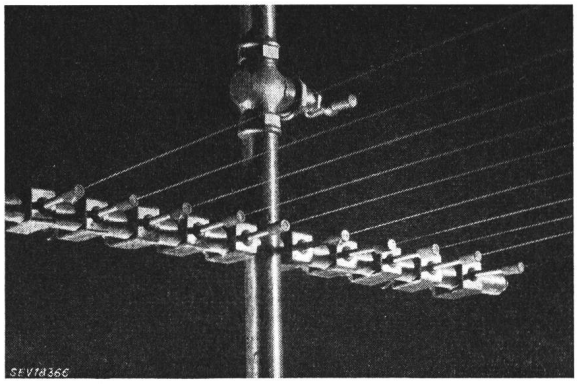

Fig. 8
Verteilrohr mit Einstellvorrichtungen und Düsen (Etage)

und in vertikalen Abständen von ca. 45 cm eintreffen müssen, woraus sich ergibt, dass die Düsen in seitlichen Abständen von ca. 10 cm und in vertikalen Abständen von ca. 45 cm anzuordnen sind. Bei fächerartiger Spreizung der Strahlen lassen sich die seitlichen Abstände der Düsen jedoch verringern, während die Einhaltung der vertikalen Abstände

von 45 cm des gleichmässigen Einfallwinkels wegen nötig ist.

Bei der ausgeführten Anlage sind die Düsen in einem Etagensystem angeordnet, das aus einem vertikalen Zuleitungsrohr besteht, in dem im Abstand von 45 cm horizontale Verteilrohre ein-

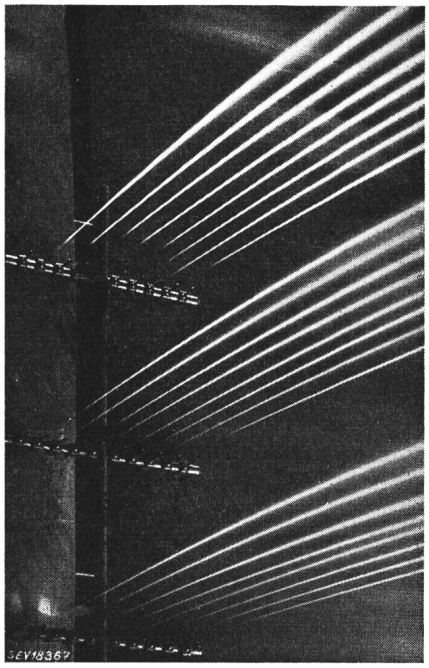

Fig. 9
Düsenstrahlen von drei Etagen

gebaut sind (Fig. 8 und 9), auf denen die Düsen mittels ihrer Einstellvorrichtung im Abstand von 5 cm befestigt sind. Entsprechend den obigen Ausführungen bedingt dies seitliche Spreizung der Strahlen, damit diese in der Prüfebene im gewünschten Abstand von ca. 10 cm eintreffen. Für ein Verteilrohr mit seinen Düsen hat sich die Bezeichnung «Etage» eingeführt.

Mit einem derartigen aus 6 Etagen zu je 10 Düsen bestehenden System kann, wie noch gezeigt wird, ein Prüfobjekt von maximal 100 cm Breite und 270 cm Höhe mit einer Horizontalintensität von 2,2 mm/min beregnet werden. Bei breiteren Prüfobjekten sind mehrere Etagensysteme nebeneinander, bei höheren Prüflingen übereinander anzuordnen. Beim Zusammenbau von mehr als 6 Etagen zu *einem* System ist jedoch des statischen Wasserdrucks wegen, der die Reichweite der Strahlen ungleich beeinflusst, die Unterteilung des Systems in mehrere Druckzonen nötig. Der Unterschied in der Reichweite der Strahlen aus verschiedenen Etagen ist besonders bei geringem Druck auffällig. Es ist aber auch der handlichen Abmessungen wegen kaum ratsam, mehr Düsen in einer Etage oder mehr Etagen in einem System anzuordnen.

Bei Spannungsprüfungen unter Regen zeigt sich eine Erscheinung, die es nötig macht, die verschiedenen Etagen eines Systems mit Abschirmgittern auszustatten. Die Strahlauflösung im Wechselfeld erfolgt nämlich nicht mehr in gleicher Weise wie im spannungslosen Fall. Die Erscheinung ist dadurch charakterisiert, dass der Wasserstrahl im elektrischen Feld auf grössere Längen konzentriert zusammenhält. Bei der Auflösung entstehen grössere Wassertropfen und der Strahlverlauf wird flacher. Damit ändert die Niederschlagsintensität am Prüfobjekt. Dieser Effekt lässt sich dadurch in genügen-

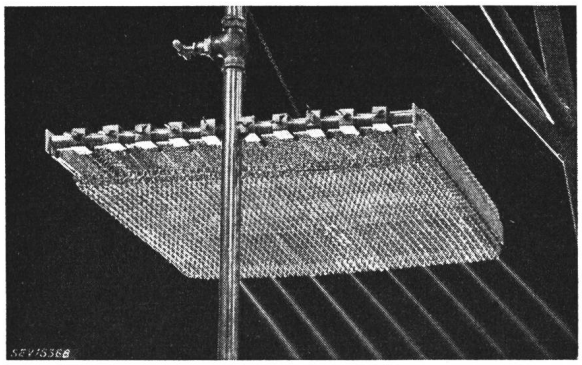

Fig. 10
Abschirmung der Düsenstrahlen
Gitterlänge 60 cm

dem Masse eliminieren, dass etwa die ersten 60 cm des Wasserstrahles durch ein geerdetes Drahtgitter abgeschirmt werden. Am Ende dieses Gebietes ist die Auflösung in Tropfen praktisch vollendet. Fig. 10 zeigt die Abschirmung einer Etage. Das elektrische Feld des Prüflings kann aber noch die *Flugbahn* der Tropfen beeinflussen. Dieser Erscheinung, die von der Anordnung der Prüfanlage abhängt, ist bei der Einstellung des Regens Rechnung zu tragen.

d) Die ganze Anlage

Die ganze Anlage ist in Fig. 11 skizziert. Sie besteht aus dem Gerüst mit dem Etagen-System, einer Zieleinrichtung zum Richten der Strahlen, den Messinstrumenten und der Speiseanlage.

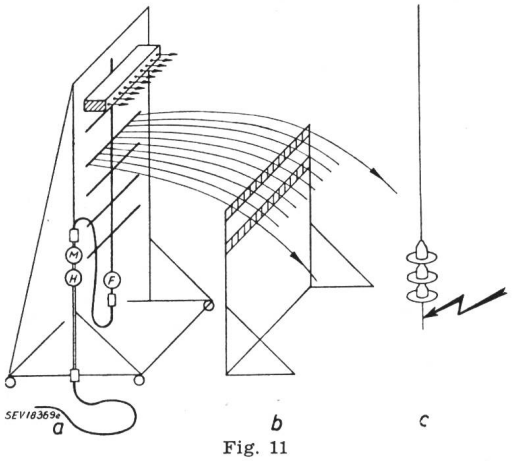

Fig. 11
Ganze Anlage
Von links nach rechts:
Rechengerüst mit Rechen; Zieleinrichtung; Prüfobjekt
H Regulierhahn, *F* Filter, *M* Manometer

Das *Gerüst* dient zur Aufhängung des Etagen-Systems. Fig. 12 zeigt die gewählte Konstruktion. Das Gerüst wird vorteilhafterweise fahrbar gemacht und soll für normale Ansprüche mindestens so hoch sein, dass die oberste Etage des Etagen-Systems bis 6 m über Boden gehoben werden kann. Das Etagen-

System muss am Gerüst in einem Schlitten geführt und in der Höhe beliebig verstellbar sein. Es empfiehlt sich deshalb, es wie bei der hier beschriebenen Anlage mittels eines Drahtseiles, das über zuoberst am Gerüst befestigte Rollen läuft, aufzuhängen, und das Drahtseil an einer Winde mit Handkurbel und Verriegelung oder Bremse aufzuwinden. Auf der Rückseite des Gerüstes ist eine Leiter angebracht, die beim Richten der Strahlen

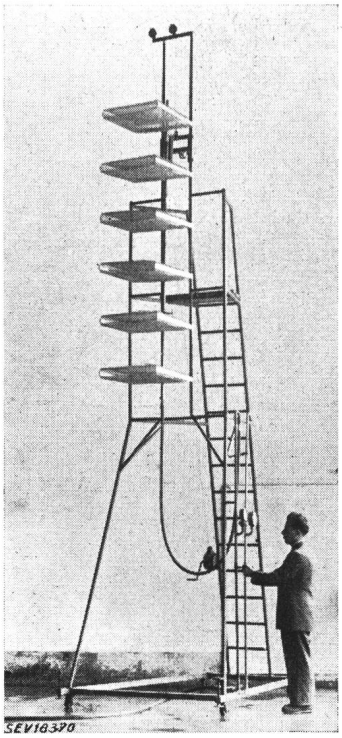

Fig. 12
Gerüst mit Etagen-System

benützt wird, da es unerlässlich ist, dass bei dieser Arbeit sich das Auge des Beobachters unmittelbar hinter der Düse befindet. Am Gerüst sind ferner ein Hahn *H* zur Regulierung des Druckes, ein Filter *F* und ein Manometer *M* eingebaut. Das Filter ist unerlässlich, da ein Verschmutzen der Düsen verhindert werden muss. Aus diesem Grunde sind auch sämtliche Teile des Etagen-Systems aus nicht rostendem Material hergestellt. Die Zuführung des Wassers an das Gerüst erfolgt über einen Schlauch. Da die zu benetzende Fläche in Ausnahmefällen nicht in der Vertikalebene liegt, sondern gegen sie geneigt sein kann (konische Stützer), sollte die Konstruktion es gestatten, dem System die nötige Neigung zu geben. Es sei darauf hingewiesen, dass auch bei Neigung des Etagen-Systems die Düsen horizontal einzustellen sind, da die Neigung ja nur eine Staffelung der Etagen in Richtung der Strahlenachse bezweckt und der Einfallwinkel von 45° einzuhalten ist.

Die *Zieleinrichtung* zum Einstellen der Wasserstrahlen besteht aus einem etwa 3 m hohen Rahmen, in welchem im Abstand von 45 cm Querlatten oder Drähte angebracht sind, auf denen zweckmässigerweise eine gut erkenntliche Dezimeter-Teilung aufgetragen ist. Da sich das Etagen-System am Gerüst in der Höhe beliebig verstellen lässt, ist es nicht nötig, die Zieleinrichtung verstellbar zu bauen. Sie wird etwa in der Mitte zwischen der Düsenebene und dem Prüfobjekt aufgestellt, da in diesem Gebiet der Querschnitt der Strahlen noch nicht zu gross ist.

Die *Messung der Niederschlagsintensität* am Aufstellungsort des Prüfobjektes kann nicht nach der in der Meteorologie üblichen Methode erfolgen.

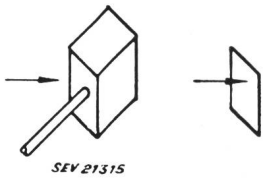

Fig. 13
Gefäss zur Messung der Horizontalkomponente

Wie früher gesagt wurde, hat die Horizontalkomponente des Regens 2,2 mm/min zu betragen, bei einem visuell beurteilten Einfallwinkel von 45°. Dieser Winkel wird vorteilhafterweise durch Vergleich mit einer 45°-Equerre kontrolliert. Die Messung der Horizontalkomponente erfolgt in der einfachsten Art mit einem Gefäss von der Form eines schiefwinkligen Parallelepipeds, das an einem Stab befestigt ist und in der Ebene des Prüfobjektes in den Beregnungsbezirken der einzelnen Etagen (45 cm Höhe) während einer bestimmten Zeit gleichmässig herumgeführt wird (Öffnungsebene des Gefässes senkrecht zur Horizontalen), so dass die mittlere Regenmenge des betreffenden Bezirkes gemessen wird. Das Gefäss ist in Fig. 13 skizziert. Für die hier beschriebene Anlage wurde eine Öffnung von 5 dm^2 gewählt. Bei einer Beobachtungsdauer von 30 s beträgt der Sollwert der aufgefangenen Wassermenge für die vorgeschriebene Intensität 55 cm^3.

Die *Messung des Widerstandes* des verwendeten Normalwassers wird im einfachsten Fall in einem zylindrischen Glasgefäss mit Wechselstrom ausgeführt. Im vorliegenden Fall betragen der Querschnitt des Rohres 8,4 cm^2 und der Abstand der kolbenförmigen Elektroden 1,68 cm. Für den spezifischen Widerstand von 10 000 Ωcm und die verwendete Spannung von 20 V ergibt sich ein Strom von 10 mA. Das Messinstrument kann direkt in Ωcm geeicht werden. Eine andere Lösung besteht darin, einen Apparat zur Messung des Wasserwiderstandes anschliessend an das Manometer in die Leitung einzubauen, wobei das zugehörige Ohmmeter den Widerstandswert kontinuierlich anzeigt.

Die Speiseanlage hat das für die Beregnung nötige Wasser zu liefern. Die Prüfbestimmungen verlangen einen spezifischen Widerstand des Wassers von 9000...11 000 Ωcm. Da der spezifische Widerstand des Leitungswassers zu gering ist, muss es mit Wasser von höherem spezifischem Widerstand im rechten Verhältnis gemischt werden. Dazu wird destilliertes Wasser oder gesammeltes Regenwasser verwendet. Die Mischung (Normalwasser) wird der Beregnungsanlage über eine Pumpe zugeführt. Falls für die Beregnung wegen ungünstiger Wasserverhältnisse sehr viel destilliertes Wasser benötigt wird, empfiehlt es sich, das Normalwasser aufzufangen, zu filtrieren und neu zu verwenden.

e) Der Regen eines Düsensystems mehrerer Etagen

Im Abschnitt 2*b* wurde dargelegt, dass die graphische Darstellung der Horizontalkomponente der Niederschlagsintensität in Funktion des Ortes eine Hügelfläche ergibt, die für die hier nötigen Überlegungen zweckmässigerweise durch eine Treppenfläche ersetzt wird. Im folgenden wird gezeigt, wie durch Superposition der Ersatztreppen ein Überblick über die Intensitätsverhältnisse in einem mit mehreren Etagen hergestellten Regen gewonnen werden kann.

Mittlere Horizontalintensität eines Feldes paralleler Strahlen — Tabelle I

	Intensitätsbeiträge aus der 1. Düsenetage mm/min	Intensitätsbeiträge aus der 2. Düsenetage mm/min	Intensitätsbeiträge aus der 3. Düsenetage mm/min	Intensitätsbeiträge aus der 4. Düsenetage mm/min	Intensitätsbeiträge aus der 5. Düsenetage mm/min	Intensitätsbeiträge aus der 6. Düsenetage mm/min	Resultierende Intensität in den verschiedenen Höhenbezirken mm/min
1. Höhenbezirk	2,2	—	—	—	—	—	2,2
2. Höhenbezirk	1,1	2,2	—	—	—	—	3,3
3. Höhenbezirk	0,55	1,1	2,2	—	—	—	3,85
4. Höhenbezirk	0,27	0,55	1,1	2,2	—	—	4,12
5. Höhenbezirk	0,13	0,27	0,55	1,1	2,2	—	4,25
6. Höhenbezirk	0,06	0,13	0,27	0,55	1,1	2,2	4,31

Mittlere Horizontalintensität eines Feldes mit gleichmässiger Niederschlagsintensität — Tabelle II

	Intensitätsbeiträge aus der 1. Düsenetage (Strahlabstand 10 cm) mm/min	Intensitätsbeiträge aus der 2. Düsenetage (Strahlabstand 20 cm) mm/min	Intensitätsbeiträge aus der 3. Düsenetage (Strahlabstand 20 cm) mm/min	Intensitätsbeiträge aus der 4. Düsenetage (Strahlabstand 20 cm) mm/min	Resultierende Intensität in verschiedenen Höhenbezirken	
					Theoretische Werte Horizontalkomponente mm/min	Gemessene Werte Horizontalkompon. mm/min
1. Höhenbezirk	2,2	—	—	—	2,2	2,1
2. Höhenbezirk	1,1	1,1	—	—	2,2	2,2
3. Höhenbezirk	0.55	0,55	1,1	—	2,2	2,1
4. Höhenbezirk	0,27	0,27	0,55	1,1	2,2	2,2

Vorerst soll als rein theoretische Überlegung die Intensitätsverteilung in einem *gleichmässigen Feld paralleler Strahlen* untersucht werden. Ein solches Feld möge z. B. aus 60 Strahlen bestehen, die in 6 Etagen zu je 10 Düsen verteilt sind. Die vertikalen Abstände der Düsen betragen 45 cm; die seitlichen Abstände sollen in Anschluss an die Darlegungen in Abschnitt 2*b* gleich der Halbwertsbreite, also zu 10 cm gewählt werden. Die Strahlen sollen horizontal austreten und unter sich genau parallel sein.

Um sich ein Bild über die Intensitätsverteilung des mit diesem System hergestellten Regens zu machen, reiht man 6mal je 10 Ersatztreppen von 10 cm Breite (entsprechend dem Strahlabstand) und 45 cm Stufenlänge (entsprechend dem Etagenabstand) aneinander und überlagert diese 6 Ersatzsysteme in Höhenabständen von 45 cm. Tabelle I zeigt die daraus für die einzelnen Höhenbezirke resultierende mittlere Horizontalintensität. Der obere Rand einer Ersatztreppe liegt im Raume ca. 1 m tiefer als die zugehörige Düse.

Wie die Tabelle I zeigt, erreicht die resultierende Intensität im 4. Höhenbezirk ungefähr den doppelten Wert gegenüber dem 1. Höhenbezirk. Sie bleibt vom 4. Höhenbezirk an praktisch konstant. In den obersten 3 Bezirken lässt sich ein homogener Regen mit einem gleichmässigen Feld paralleler Strahlen jedoch nicht erzielen.

Ein *Feld mit gleichmässiger Niederschlagsintensität* lässt sich nur erreichen, wenn in den unteren Etagen der Strahlabstand [3]) vergrössert wird. Dies kann unter Beibehaltung des Düsenabstandes [3]) durch seitliches Spreizen der Strahlen erfolgen. (Diese Spreizung ist nicht identisch mit der Spreizung nach Abschnitt 2*c*, welche nötig ist, weil zwecks Verschmälerung des Etagen-Systems trotz 10 cm Strahlabstand nur 5 cm Düsenabstand gewählt wurde.) Es soll nun ein Feld superponiert werden, bei dem die Strahlenabstände in der 2., 3. und 4. Etage verdoppelt sind. Wird der Strahlabstand verdoppelt, so ist zweckmässigerweise auch die Breite der Ersatztreppe zu verdoppeln. Da der gesamte Wasserstrom einer Düse unverändert bleibt, sind die Stufenhöhen zu halbieren. Die Superposition für 4 Etagen ist in der Tabelle II durchgeführt. Das Ergebnis zeigt, dass sich auf diese Art am Prüfort eine gleichmässige Niederschlagsintensität von

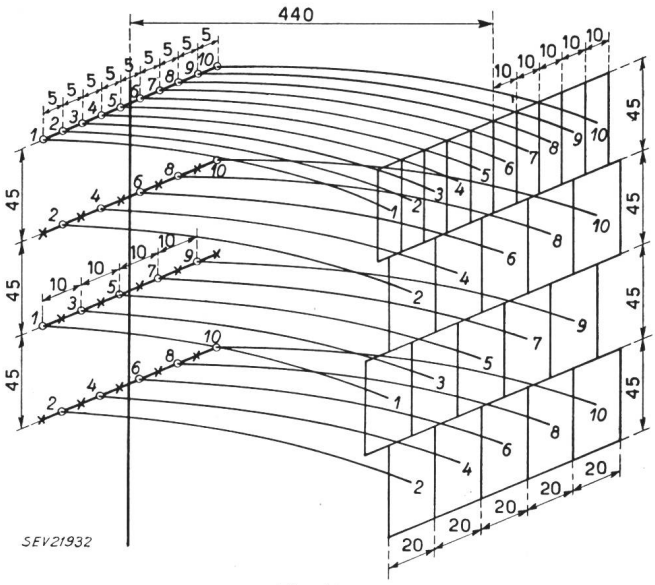

Fig. 14
Darstellung der durch Tabelle II gegebenen Einstellung des Regens
Masse in cm
Entsprechend den Ausführungen im Text sind die Strahlabstände in den 3 unteren Etagen verdoppelt und die Strahlen gegeneinander versetzt.

[3]) Strahlabstand ist der Abstand der Strahlmitten in der Prüfebene, Düsenabstand jener der Düsen in der Düsenebene.

2,2 mm/min erreichen lässt. Mit einem aus 6 Etagen zu je 10 Düsen bestehenden System kann auf diese Weise ein Prüfobjekt von maximal 100 cm Breite und 270 cm Höhe vorschriftsgemäss beregnet werden. Zwecks rationeller Verwendung des Normalwassers wird man bei kleineren Objekten das Regenfeld durch Ausserbetriebnahme der nicht benötigten Düsen auf das erforderliche Mass beschränken.

Falls die Horizontalintensität grösser oder kleiner als 2,2 mm/min sein soll, ist der Strahlabstand entsprechend zu ändern. So ist z. B. für eine mittlere Intensität von 3,3 mm/min in der 1. Etage ein Strahlabstand von 10 cm · 2,2/3,3 = 6,6 cm, in den übrigen Etagen von 13,2 cm erforderlich.

Diese Überlegungen, die voraussetzen, dass die Horizontalkomponente der Niederschlagsintensität einer Einzeldüse in der Messebene nach unten exponentiell abnimmt, werden durch die Praxis bestätigt, wie die in Tabelle II angegebenen Messwerte zeigen.

Zur Homogenität der Niederschlagsintensität ist noch folgendes zu bemerken. Das Regenfeld ist nicht eine Superposition von Treppen, sondern von Hügeln. Innerhalb eines Höhenbezirkes können deshalb in waagrechter wie in senkrechter Richtung beträchtliche Unterschiede in der Niederschlagsintensität auftreten. Bei gegebener Hügelform sind die Unterschiede von der Distanz der Strahlen abhängig. Ist der Strahlabstand gleich der Halbwertsbreite von 10 cm, so ist die Intensität in einem Horizontalschnitt praktisch konstant. Dies ist im ersten Höhenbezirk der Fall. In den unteren Etagen betragen die Strahlabstände jedoch 20 cm, weshalb Intensitätsunterschiede von nahezu 2,2 mm/min auftreten. Diese Unterschiede können dadurch gemildert werden, dass die Strahlen zweier Etagen gegeneinander versetzt werden, derart, dass die obere Etage in die Lücken der untern Etage spritzt (Fig. 14). Die Unterschiede in vertikaler Richtung weichen etwa ± 20 % vom Mittelwert ab; sie gehören zur Unvollkommenheit der Anlage.

3. Das Einstellen der Anlage

Die erstmalige Einstellung der Anlage für eine bestimmte Beregnung gibt ziemlich viel Arbeit. Dagegen kann die einmal eingestellte Anlage ohne Verstellung zur Prüfung ganzer Serien von Prüfobjekten mit ähnlichen Abmessungen verwendet werden. Bei der Wiederinbetriebnahme sind nur der Druck des Wassers auf den Sollwert einzuregulieren und für Etagensystem und Prüfobjekt der richtige Abstand und die richtigen Höhen einzustellen. Immerhin ist es ratsam, die Durchflussmenge einzelner Düsen von Zeit zu Zeit nachzuprüfen.

Bei der erstmaligen Einstellung der Beregnungsanlage empfiehlt sich folgendes Vorgehen:

1. Die für das Prüfobjekt benötigten Düsen und Etagen werden entsprechend den Darlegungen in Abschnitt 2*e* bestimmt und in Betrieb gesetzt.
2. Unter Verwendung der Zieleinrichtung werden die Strahlen horizontal eingestellt und seitlich gerichtet.
3. Die Durchflussmenge jeder einzelnen Düse wird auf Gleichheit kontrolliert.
4. Der Einfallwinkel wird durch Regulierung des Wasserdrucks auf den visuell beurteilten Wert von 45° gebracht.
5. In der Beregnungsebene (ohne Prüfobjekt) wird mit dem Parallelepiped die Horizontalkomponente des Regens gemessen, deren mittlere Intensität in den einzelnen Messbezirken 2...2,4 mm/min betragen soll. Abweichungen werden durch Änderung des Strahlabstandes korrigiert.
6. Die Strahlabschirmung wird montiert.
7. Die Zieleinrichtung wird entfernt und das Prüfobjekt in die Objektebene gebracht.
8. Das Etagensystem wird in die richtige Höhe gebracht und der Druck der Höhenänderung entsprechend nachreguliert (0,1 kg/cm² pro m).
9. Die Anlage wird von Leitungswasser auf Normalwasser umgestellt.
10. Die Anlage wird geerdet.

Diese Darlegungen mögen durch die folgenden Hinweise ergänzt werden. Für das Ausrichten der Strahlen wird die Zieleinrichtung zweckmässigerweise genau in die Mitte zwischen Düsen- und Objektebene gestellt, damit der Zusammenhang zwischen den Koordinaten der Zieleinrichtung und jenen in der Objektebene einfach wird. Da bei einem Überdruck von z. B. 1,4 kg/cm² die Strahlen in einer Entfernung von 2,2 m (Hälfte der Reichweite von 4,4 m) um 15 cm abfallen, ist es vorteilhaft, das Etagensystem gegenüber der Zieleinrichtung um 15 cm zu erhöhen. Durch Ausrichten der Strahlen auf die ihrer Etage zugeordnete Höhenkoordinate der Zieleinrichtung lässt sich ein horizontaler Strahlaustritt erreichen (Elevation 0°). Anschliessend werden die Strahlen seitlich derart gespreizt, dass sie in der Prüfebene in den gewünschten seitlichen Abständen eintreffen (z. B. 10 cm in der obersten und 20 cm in den übrigen Etagen für eine Horizontalintensität von 2,2 mm/min).

Bei der Kontrolle der Niederschlagsintensität in der Objektebene lässt sich die in diese Ebene verschobene Zieleinrichtung wiederum vorteilhaft verwenden. Sie dient hier zur Unterteilung der Objektebene in Höhenbezirke von 45 cm Höhe. In diesen Bezirken soll das Mittel der Horizontalkomponente 2,2 mm/min ± 10 % betragen. Mit der Messung und allfällig nötigen Korrekturen des Regens ist immer im obersten Bezirk zu beginnen.

4. Vergleichsmessungen mit früheren Beregnungsanlagen und mit der neuen Anlage

Wie schon in Abschnitt 1 ausgeführt ist, wurde im Jahre 1942 in schweizerischen Versuchslokalen an derselben Isolatorenkette die Überschlagspannung unter Regen gemessen, damit ein Überblick über die Streuung gewonnen werden konnte. Gemessen wurde an einer Kette aus 3 Vollkernisolatoren VK 4 ohne Schutzarmatur die Überschlagspannung trocken und unter Regen. Der Regen wurde sorgfältig auf

Vertikalkomponente der Regenintensität von 3 mm/min,
visuell beurteilten Einfallwinkel von 45° und
spezifischen Widerstand des Wassers von 10 000 Ωcm

einreguliert. Tabelle III zeigt eine Zusammenstellung der in den 7 beteiligten Hochspannungslaboratorien ermittelten Messresultate.

Messresultate 1942 Tabelle III

Laboratorium	Trocken		Regen (Düse des betr. Laboratoriums)		Regen (Düse PFL)	
	Mittelwert kV	% [1]	Mittelwert kV	% [1]	Mittelwert kV	% [1]
A	418	99	272	95	253	90
B	419	99	264	93	—	—
	415	**98**	232	**81**	—	—
	418	99	255	90	—	—
	430	102	—	—	277	99
C	440	**104**	315	111	306	**109**
D	428	101	296	104	299	107
E	—	—	277	97	284	101
F	418	99	332	117	—	—
	442	**104**	342	**120**	—	—
G	415	98	278	98	—	—
	423	100	—	—	264	**94**
	433	102	269	94	—	—
Mittelwerte	**425**	**100**	**285**	**100**	**280**	**100**

[1]) % vom Mittelwert einer Versuchsart

Die Tabelle enthält Resultate aus drei verschiedenen Messarten:

1. Überschlagspannung trocken.
2. Überschlagspannung bei Beregnung mit den in den verschiedenen Laboratorien vorhandenen Düsen.
3. Überschlagspannung bei Beregnung mit einer bestimmten Düsenart (PFL).

Für jede Messart sind Mittelwerte der in den einzelnen Laboratorien durchgeführten Messreihen und ihr prozentuales Verhältnis zum Mittelwert der betreffenden Messart angegeben.

Wie die Tabelle zeigt, liegen die Messwerte für die Trockenprüfung zwischen 98 % und 104 %, was eine Differenz von 6 % ergibt.

Die Messwerte der Überschlagspannung bei Beregnung mit den in den verschiedenen Laboratorien vorhandenen Düsen liegen zwischen 81 % und 120 %, was auf eine Differenz von 39 % führt.

Die Messwerte der Überschlagspannung bei Beregnung mit überall denselben Düsen (PFL) streuen nur zwischen 94 % und 109 %, womit die Differenz auf 15 % zurückgeht.

Diese Messergebnisse liessen vermuten, dass die grosse Streuung auf ungleiche Beregnung zurückzuführen war. Diese Vermutung führte zu näheren Untersuchungen und schliesslich zur Entwicklung der hier beschriebenen Anlage.

Nachdem die neue Beregnungsanlage des SEV sich seit einigen Jahren bewährt hat, wurden die 1942 durchgeführten Versuche im Jahre 1953 in den verschiedenen Laboratorien mit den dort vorhandenen SEV-Beregnungsanlagen wiederholt, um abzuklären, ob die Streuung den Erwartungen gemäss heute geringer sei. Die Messungen wurden an drei Vollkernisolatoren VK 4 aus den in der vorliegenden Arbeit geschilderten Gründen unter folgenden Bedingungen ausgeführt.

Horizontalkomponente der Regenintensität
2,2 mm/min ± 10 %,
Einfallwinkel ca. 45°,
Widerstand des verwendeten Wassers 10 000 Ωcm.

Die Resultate der im Jahre 1953 durchgeführten Messungen sind in Tabelle IV wiedergegeben.

Die Messwerte für die Trockenprüfung liegen zwischen 94 % und 104,5 % mit einer Differenz von 10,5 %.

Die Messwerte der Überschlagspannung bei Beregnung mit den Beregnungsanlagen des SEV

Messresultate 1953 Tabelle IV

Laboratorium	Überschlagsspannungen trocken		Überschlagsspannungen unter Regen		Atmosphärische Bedingungen		
	kV [1]	% [2]	kV [3]	% [2]	Relative Feuchtigkeit %	Luftdruck mm Hg	Lufttemperatur °C
B	400	96,5	283	102	65,5	720	19,6
	413	99,5	299	**107,5**	65	721	16,8
	391	**94**	267	96	54	720	20
G	413	99,5	283	102	61	722	22
C	412	99	288	103,5	45	729	21
	411	99	282	101,5	45	722	20
	418	101	274	98,5	51	725	20
F	412	99	—	—	68	727	18,5
	417	100,5	—	—	—	—	—
	—	—	270	97	68	727	18,5
H	426	102,5	278	100	25/68	724/722	18
	—	—	274	98,5	68	722	18
E	421	101,5	280	101	61	744	19
A	434	**104,5**	270	97	54	720	20
	430	103,5	262	**94**	80	734	9,8
Mittelwert	**415**	100 %	**278**	100 %			
Abweichungen		−6 % +4,5 %		−6 % +7,5 %			

[1]) Mittelwert unkorrigiert
[2]) % vom Mittelwert einer Versuchsart
[3]) erster Überschlagswert unkorrigiert

streuen zwischen 94 % und 107,5 %, was eine Differenz von 13,5 % ergibt.

Interessehalber wurde auch festgestellt, in welchem Masse die gemessenen Mittelwerte aller Messungen der Jahre 1942 und 1953 voneinander abweichen. Der Vergleich zeigt Abweichungen von ca. 2 %, wurden doch 1953 für die Überschlagspannung trocken 415 kV (gegenüber 425 kV im Jahre 1942) und für die Überschlagspannung unter Regen 278 kV (285 kV im Jahre 1942) gemessen. Die Tatsache, dass die Messresultate sowohl für die Überschlagspannung trocken wie auch für die Überschlagspannung unter Regen im Jahre 1953 rund 2 % niedriger sind als im Jahre 1942, lässt auf einen Unterschied zwischen den 1942 und 1953 gemessenen Isolatorenketten schliessen, indem möglicherweise die 1942 verwendete Kette um ca. 2 % länger war.

Die so ermittelten Ergebnisse zeigen, dass bei Beregnung mit der neuen Beregnungsanlage wesentlich kleinere Streuungen für die Überschlagspannung unter Regen auftreten und dass bei der hier vorgeschlagenen Art der Einstellung des Regens die gemessenen Mittelwerte mit jenen der früheren Jahre übereinstimmen.

5. Schlussbemerkungen

Abschliessend ist zu bemerken, dass die neue Anlage die an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Sie gestattet eine bessere Einstellung eines homogenen Regens und, was wichtig ist, auch die Aufrechterhaltung der vorgeschriebenen Werte während einer unbeschränkten Versuchsdauer. Die mit der neuen Anlage erzielte Reproduzierbarkeit der Messwerte wird bis heute mit keiner andern Anlage erreicht. Die Bedienung stellt keine besonderen Anforderungen an das Personal. Die Konstruktion ist einfach, und die Anlage kann mit einfachen Mitteln ohne grosse Auslagen gebaut werden.

Anschaffung und Anwendung der hier beschriebenen Kapillardüsen-Beregnungsanlage können deshalb bestens empfohlen werden, namentlich auch deshalb, weil Messresultate, die mit solchen Anlagen in verschiedenen Laboratorien aufgenommen werden, sich tatsächlich vergleichen lassen. Aus diesem Grund wäre eine internationale Verbreitung der Anlage sehr wertvoll.

Stabilität und Blindleistung schwedischer Übertragungen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 25. März 1954 in Zürich,

von *B. G. Rathsman*, Stockholm

621.315.051 : 621.3.016.35 + 621.3.016.25

Bei dem schwedischen Hochspannungsnetz für 380 und 220 kV, das beträchtliche Energiemengen von Nord- nach Südschweden überträgt, ist die Stabilität für die Wirtschaftlichkeit der Übertragung von entscheidender Bedeutung. Um die Übertragungsfähigkeit zu verbessern, wurden verschiedene Massnahmen getroffen. Dabei wurden die besten Erfolge durch Kompensieren der Leitungsreaktanzen mit Hilfe von Seriekondensatoren erzielt. Jede von Norden nach Süden führende 380-kV-Leitung wird bei der vorgesehenen Serienkompensation von 60 % und der Ausführung mit Dreifach-Bündelleitern etwa 1000 MW übertragen können.

La stabilité est d'une importance décisive pour l'économie de la transmission du réseau suédois à 380 et à 220 kV par lequel de grandes quantités d'énergie sont transportées du nord au sud de la Suède. Pour augmenter la capacité de transport plusieurs mesures ont été prises. La plus effective de celles-ci a été la compensation des réactances de ligne à l'aide des condensateurs en série. Après la compensation en série prévue de 60 % et l'installation des conducteurs triple, chaque ligne à 380 kV du nord au sud pourra transmettre environ 1000 MW.

1. Das schwedische Hochspannungsnetz

Die Hauptaufgabe des schwedischen Hochspannungsnetzes im Rahmen der Hochleistungsübertragung besteht darin, die Energie von dem an Wasserkräften besonders reichen Nordschweden nach dem dicht bevölkerten und stark industrialisierten Mittel- und Südschweden zu übertragen.

Um diese Gegebenheiten besser zu illustrieren, sollen einige Zahlen genannt werden. Die gesamte Energieerzeugung des Jahres 1953 betrug 22 500 Millionen kWh, wovon 95 % aus Wasserkrafterzeugung. Davon wurden 7000 Millionen kWh oder 31 % von den nordschwedischen Kraftwerken zu den südschwedischen Verbrauchern übertragen. Der Anteil der fernübertragenen Energie erhöht sich weiterhin und wird 1960 etwa 45 %, nach endgültigem Ausbau aller Wasserkräfte, wenn die Übertragung ihren Höchstwert erreicht, etwa 60 % der Gesamterzeugung betragen. Die Höchstleistung der Nord–Süd-Übertragung betrug im Jahr 1953 1540 MW und dürfte 1960 etwa 3300 MW, im Endstadium etwa 9000 MW erreichen. Gleichzeitig vergrössert sich die Übertragungslänge vor allem deshalb, weil der Ausbau der Wasserkräfte sich immer weiter nach Norden verlagert. Die mittlere Entfernung beträgt zur Zeit 500 km und dürfte 1960 auf 600 km, im Endausbau auf 800 km steigen.

Das jetzige Nord-Süd-Leitungsbündel (Fig. 1) besteht aus sechs 220-kV-Leitungen und zwei 380-kV-Leitungen. Die erste 220-kV-Leitung wurde 1936, die erste 380-kV-Leitung im März 1952 in Betrieb genommen. Für den weiteren Ausbau der Nord–Süd-Übertragung verwenden wir nur noch 380 kV; die dritte Leitung, die jetzt im Bau ist, wird im Herbst 1956 in Betrieb genommen. Eine vierte Leitung wird 1959 benötigt werden. Das bestehende 380-kV-Netz wird auch mit neuen Leitungen in den nördlichen und südlichen Gebieten ergänzt. Beispielsweise wird im Herbst 1954 eine neue Leitung nach Südschweden unter Spannung gesetzt, so dass sich eine zusammenhängende 380-kV-Übertragung von Harsprånget im Norden bis Hälsingborg im Süden auf einer Strecke von 1400 km Länge ergibt.

Die grösseren nordschwedischen Kraftwerke sind unmittelbar an 220 kV und während der letzten Jahre unmittelbar an 380 kV angeschlossen. Dagegen wurden die kleineren Elektrizitätswerke über örtliche Netze, meistens von 130 kV Betriebsspannung, angeschlossen. In den Transformatorenstationen der südlicheren Landesteile wird die Energie