

R e s u l t a t e  
v o n   Ü b e r s p a n n u n g s m e s s u n g e n  
i n  
S c h w e i z e r   H o c h s p a n n u n g s a n l a g e n

Von Prof.Dr.K. B e r g e r, Zürich

Versuchsleiter der FKH

(Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen)

Vortrag auf der 25.Tagung der "Studiengesellschaft für  
Höchstspannungsanlagen e.V." in Konstanz am 17.Juni 1953



Resultate von Überspannungsmessungen in Schweizer

Hochspannungsanlagen

Bei den in den letzten Jahren in schweizerischen Anlagen durchgeführten Überspannungsuntersuchungen handelt es sich um Anlagenversuche, bei denen festgestellt werden sollte, inwieweit ein Gewitterschutz wirksam ist, d.h. inwieweit Überschläge mit Hilfe von Ableitern verhindert werden. Es geht somit um das Problem der praktischen Koordination zwischen Überspannungsschutz und Isolation der Anlage. Wir haben in der Schweiz im Jahre 1948 Regeln für den Schutz der Anlagen durch moderne Überspannungsableiter in Kraft gesetzt. Die Ableiter sind bei uns ohne Ausnahme Ventilableiter, also solche mit spannungsabhängigem Widerstand; wir benutzen praktisch keine Rohrableiter.

Warum sind solche Versuche in Anlagen nötig? Man könnte sagen, daß durch Prüfung der Ableiter und der Isolation der Anlage das Problem doch eigentlich gelöst ist. In erster Linie ja, in zweiter Linie vielleicht nicht ganz, denn es gibt in den Anlagen doch ziemlich verzwickte Vorgänge. Wenn z.B. eine Welle eintrifft, so ist ja die Anlage in erster Linie ein Stück Kapazität; in zweiter Linie sind es verschiedene Leitungsstücke mit allen möglichen örtlichen Komplikationen, die eben nun bedingen, daß die Spannung in der Anlage selbst an verschiedenen Punkten nicht dieselbe ist. Sie kann kurzzeitig an allen Punkten höher werden, die nicht unmittelbar beim Ableiter liegen, und es ist vielleicht in vielen Fällen einfacher zu messen, als zu rechnen. Nebenbei gibt natürlich diese Messung auch eine Prüfung der fertigen Anlage auf ihre Spannungsfestigkeit, die wir ja gelegentlich vermissen, da wir sie mit Wechselspannung mit gutem Grund nicht messen.

Die nachstehenden Ausführungen über die Kontrolle des Überspannungsschutzes bringen keine Theorie, sondern geben nur Meßresultate, die mehr oder weniger zwanglos zusammengestellt sind. Die schweizerischen Regeln für Überspannungsschutz und Koordination beruhen auf der "50%-Spannung", im Gegensatz zu den Vorschlägen, die international heute gemacht werden. Es ist vielleicht gut, bei den wenigen auf diesem Gebiet üblichen Begriffen kurz zu verweilen, trotzdem diese größtenteils bekannt sein dürften:

In Bild 6 ist die Häufigkeit eines Überschlages eines Isolators dargestellt über der Höhe der Stoßspannung. Die "Überschlagspannung" ist ja leider nicht ein genau festliegender Wert. Man kann nicht sagen, ein Isolator hat 100 kV Überschlagspannung in dem Sinne, daß er dann bei 101 kV immer und bei 99 kV nie überschlägt; es ist vielmehr ein Streuband vorhanden, das mehrere Prozent der Spannung beträgt. Bei einer gewissen Stoßspannung bekommt man z.B. in der Hälfte aller Anwendungen Überschläge; bei einer kleineren Spannung entstehen dann prozentual weniger, bei größerer Spannung mehr als 50% Überschläge. Diese Beobachtung stellt man am besten dar als Häufigkeitskurve: Prozentsatz der Überschläge über der angelegten Spannung. So ist in der linken Kurve des Bildes 6 z.B. auch eine 50%-Spannung ersichtlich, das ist der Wert bei halber Höhe; 50% aller Stoßspannungen führen hier zum Überschlag, die anderen 50% nicht. Bei größerer Spannung werden mehr Überschläge entstehen.

Man spricht von einer "100%-Ansprechspannung" dort, wo die Häufigkeitskurve die obere Grenze 100% erreicht. Das ist die sichere Überschlagspannung eines Isolators oder die sichere Ansprechspannung eines Ableiters. Ebenso kann man eine untere Grenze, die "Null-Prozent-Spannung", festlegen; das ist eine Spannung, bei der keine oder doch sehr wenige Überschläge entstehen, vielleicht bei nur 5% aller Stöße. Diese Spannung nennt man die "Haltespannung". Genau genommen geht es nicht um Null und 100%, sondern um Annäherungen, z.B. 5 oder 10% bzw. 90 oder 95%. Die "100%-Ansprechspannung" ist natürlich

wichtig beim Schutz, während die Haltespannung bei der Isolation wichtig ist. Nun benötigt man zwischen Schutz und Isolation ein Intervall. Die schweizerischen Regeln basieren auf den "50%-Spannungen" und ihrem Abstand. Man kann natürlich auch zwischen Haltespannung der Isolation und 100%-Ansprechspannung des Schutzes dimensionieren.

Die große Frage ist natürlich die Größe des Intervalls. Schutztechnisch möchte man es möglichst groß haben, wirtschaftlich kann man es nicht beliebig erhöhen, sondern muß möglichst drücken. Den Ableiter kann man nicht beliebig tief setzen wegen seiner Betriebssicherheit, die Isolation nicht beliebig hoch wegen ihrer Kosten. Diese Koordination ist deshalb eine stark wirtschaftliche Angelegenheit.

Welche Gesichtspunkte sind hierbei von Bedeutung?

1) Höhe über dem Meer

Die Ableiter sind heute alle praktisch luftdicht geschlossen. Ihre Ansprechspannung ist fast nicht von der Luftdichte der Atmosphäre abhängig. Ganz anders ist die Luftisolation, die mit der Luftdichte schwankt, so daß man z.B. in 1000 m Höhe über dem Meer etwa 11...12% weniger Überschlagspannung hat. Sofern man, wie in den schweizerischen Regeln, den Unterschied  $\Delta$  50% etwa 25% des oberen Wertes macht, so hat man in 1000 m Höhe über dem Meer schon etwa 12% weniger.

2) Anzahl der Isolatoren

Es ist die 50%-Spannung eines Isolators nicht von gleicher Höhe wie die 50%-Spannung z.B. von 100 parallelgeschalteten Isolatoren, die unter sich absolut gleich sind. Denn sobald diese Überschlagspannung ein Wahrscheinlichkeitswert ist, hat die Anzahl der Isolatoren, die zugleich Gelegenheit zum Überschlag erhalten, einen Einfluß auf die Höhe der Überschlagspannung.

3) Polaritätsunterschiede

4) Betriebsbedingte Streuungen,

Regen, Nebel, Schmutz u.ä.

Bild 7 zeigt zunächst die Zahlenwerte, die in der Schweiz für die beiden Niveaus (50%-Spannung des Schutzes und der Luftisolation) angenommen wurden. Über der Nennspannung ist aufgetragen als Kurve 1 die Höhe der Isolation in Luft, d.h. die 50%-Spannung eines der unter sich gleich angenommenen Isolatoren der Anlage, und als Kurve 2 die Pegelhöhe des Schutzes, ebenfalls als 50%-Spannung.

#### Meßeinrichtung

-----

Die Bilder 8...12 geben die bei den Versuchen eingesetzte fahrbare Meßeinrichtung wieder, mit der in irgendeiner Anlage gemessen werden kann.

Bild 8 zeigt den Meßwagen, der seit 1939 in Betrieb ist; er hat 3 Doppel-Oszillographen mit kalter Kathode, also 6 Kathodenstrahlen, mit denen normalerweise 6 Spannungen gegen Erde oder auch die Spannungen über einem Schalter, als Differenzspannung der gegen Erde geschalteten Teiler, aufgezeichnet werden.

Bild 9 zeigt einen der/drei Oszillographen, wie er im Wagen eingebaut ist. Man kann sagen, das ist ja ein furchtbarer Apparat. Nach heutigen Begriffen ist er sehr schwer. Es ist aber zu bedenken, daß er schon aus den Jahren 1938/1939 stammt. Heute könnte man es wohl wieder besser machen.

Bild 10 zeigt den fahrbereiten Stoßgenerator. Vorn links befindet sich die Kabine aus Leichtmetall, rechts ein Holzgestell mit 8 Kondensatoren zu je 1  $\mu$ F und für je 80 kV-Ladespannung; Leerlaufspannung somit 640 kV, Energieinhalt etwa 26 kWs. Vorn in der Kabine befindet sich die Ladeeinrichtung, hinten sind die Funkenstrecken untergebracht.

Bild 11 zeigt den Wagen aufgebockt (im Wallis) in der Nähe einer Hochspannungsleitung, die gestoßen wurde. Für das Stoßen kann der hintere Teil des Wagens gegen Erde isoliert werden, indem die Hinterachse weggefahren und der Wagen auf einen Holzbock gestützt wird. Links, im Hintergrund des Bildes, ist der Oszillographenwagen sichtbar.

Bild 12 zeigt einen Durchblick durch den Stoßwagen mit Funkenstrecken und Durchführungen der Kondensatoren; selbstverständlich ist die Marx-Schaltung angewendet.

#### Untersuchungen und Ergebnisse

-----

Bild 13 zeigt eine 50 kV-Anlage, die gestoßen wurde. Der Stoß wird bei  $M_1$  in die Anlage hineingeschickt. Die Leitung kann nachgeahmt werden mit ohmschen Widerständen, die die Wellenwiderstände ersetzen; man bekommt so das entsprechende Verhalten wie bei einer Welle, die aus sehr großem Abstand auf die Anlage zuläuft. Die stark gezeichnete Sammelschiene wird gestoßen. An der Sammelschiene sind einige Apparate angeschlossen: Stromwandler, Schalter, Trenner, auch einige Kabelstücke. Leistungstransformator und Spannungswandler werden in der Regel nicht gestoßen. Die Meßstellen  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  liegen in verschiedenen Punkten der gestoßenen Anlage.

Bilder 14 und 15 zeigen die Spannungsverläufe in verschiedenen Punkten der Anlage, wobei Ableiter z.T. nur am Anfang, z.T. an 2 Orten, nämlich beim Eingang und in einem weiteren Leitungsfeld, angeschlossen waren.

Im Bild 14 oben hat der Stoß-Spannungsverlauf eine Höhe, die den Ableiter noch nicht zum Ansprechen bringt. Der Unterschied der Spannungen der 4 Punkte ist vernachlässigbar klein. Dies wird aber anders, wenn die Ableiter ansprechen. Beim Ableiter  $M_1$  ist die Spannung immer relativ klein. Es ist einfach die Ableiter-Klemmenspannung, zuerst Ansprechspannung, dann Restspannung. Diese Spannung bleibt immer etwa gleich, während an den anderen Punkten  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  die Spannung wesentlich größere Spitzen aufweist, und darauf kommt es hierbei an. Während die Ansprechspannung an den Ableitern 160...180 kV beträgt, ergeben sich an den anderen Meßpunkten in derselben Anlage Spitzen von etwa 270 kV bis vielleicht 280 kV, Halbwertdauer höchstens 3  $\mu$ s. Aber die Frage ist eben, wie hoch darf diese Spitze kurzer Dauer sein, damit dort nicht bereits ein Überschlag der Isolation erfolgt?

Im Bild 15 ist auch der Einfluß von Kabelstücken berücksichtigt. Im Prinzip liegt dieser Fall jedoch gleich. Dieses Bild zeigt ziemlich große Spitzen, trotzdem ein Kabel in einem Leitungsfeld liegt, so daß der Anstieg dort, wie bekannt ist, flacher erfolgt.

Bilder 16...21 zeigen die Spannungsverläufe in einer 16 kV-Anlage. Ableiter sind vorhanden beim Eingang und evtl. auch am Ende der Anlage, also 1 Satz oder 2 Sätze. Gemessen werden die Spannungen am Eingang, in der Mitte und am Ende. Die obere und untere Kurve in jedem Bild unterscheiden sich dadurch, daß die Ableiter-Erde aus dem zweiten Geschoß, wo die Anlage steht, im oberen Bild bis zum Erdboden getrennt geführt ist; es besteht also eine lange Erdungsleitung bis zur gemeinsamen 16 kV-Erde. Im unteren Bild ist der Ableiter auf möglichst kurzem Wege mit dem Eisengerüst, d.h. mit der Stationserdung verbunden.

Folgende Spannungsunterschiede wurden gemessen:

a) 1 Satz Ableiter am Eingang der Anlage

Bild 16: Die Spannungsspitze beträgt am Eingang mit Ableiter an der Betriebserde 96 kV, mit Ableiter an der Schutz-erde 83 kV.

Bild 17: In der Mitte der Anlage gemessen mit Ableiter an der Betriebserde 116 kV, mit Ableiter an der Schutz-erde 107 kV.

Bild 18: Am Ende der Anlage gemessen mit Ableiter an der Betriebserde 114 kV, an der Schutz-erde 105 kV, also ebenfalls merkliche Höhe.

b) Je 1 Satz Ableiter am Eingang und Ende der Anlage (beide Ableiter entweder an Betriebserde oder an Schutz-erde)

Bild 19: Beim Ableiter am Eingang ist die Spannung wieder tief, 84 kV (Betriebserde) oder 79 kV (Schutz-erde).

Bild 20: Spannung in der Mitte, das ist in größter Entfernung von den Ableitern, 105 kV (Betriebserde) und 87 kV (Schutzerde). Es sind immer kurze Spitzen vorhanden. Die Halbwertdauer der überlagerten Spitze über der Restspannung ist von der Größenordnung 1  $\mu$ s.

Bild 21: Spannung beim Ableiter am Ende gemessen 101 kV (Betriebserde) und 77 kV (Schutzerde). Im letzteren Fall ist sie sehr klein; da die Ableiter unmittelbar am Eisengerüst geerdet sind, ist effektiv am Ableiter nur die Spannung zwischen diesen Klemmen vorhanden und nicht noch ein Spannungsabfall der Erdleitung eingeschlossen.

Eine nächste Versuchsreihe betrifft eine sehr ausgedehnte 16 kV-Anlage in Thalwil am Zürich-See, die systematisch untersucht wurde bezüglich des Einflusses der Vermaschung einer Schaltanlage, der größten Länge, indem die Anlage künstlich so geschaltet wurde, daß in ihr große Leitungslängen entstehen, ferner bezüglich der Schutzwirkung vorgeschalteter Kabel vor der Anlage sowie von Ventilableitern. Der Stoß auf die Anlage erfolgt über die Freileitungs-Einführung, wobei die Anlage durch Schließen sämtlicher Trenner vermascht werden kann. Das ergibt ungefähr 200 m gesamte Leitungslänge innerhalb der Anlage, längs den Hochspannungsschienen gemessen.

Bild 22 zeigt das Schema mit Stoß auf die Anlage über Kabeleinführung, wobei das Kabel im Minimum etwa 18 m und im Maximum etwa 480 m lang war. Die 3 Sammelschienen sind hier im Prinzip in Reihe geschaltet. Unten dann der weitere Fall des Stoßes auf eine Freileitung, wobei die Freileitung über Kabel in die Station führt. Die Messung erfolgt immer in der Anlage, so daß man sieht, was passiert, wenn ein Ableitersatz am Anfang der Anlage eingebaut ist oder am Ende, oder an mehreren Orten zugleich.

Bild 23 zeigt ein weiteres Schema der Anlage mit recht vielen Feldern, Transformatoren- und Leitungsfelder sowie Eigenbedarf.

An Stelle einer Freileitungseinführung ist der Stoßgenerator angeschlossen; die Meßstellen  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  sind in der Anlage verteilt,  $M_2$  ungefähr in der Mitte der Reihenschaltung,  $M_3$  am Ende der möglichst langen Anlage.

In allen folgenden Bildern ist die Spannungshöhe dargestellt über der Wellenhöhe, die in die Anlage hineingeschickt wird. Sie geht höchstens bis etwa 500 kV. In diesen Bildern bedeutet  $U_p$  stets die Restspannung, also die Spannung am Ventilwiderstand, und  $U_s$  die Spitzenspannung beim Ansprechen, die ja bekanntlich auch mitbedingt sein kann durch den spannungsabhängigen Widerstand. Die schrägen Linien deuten durch ihre Länge die Halbwertdauer der überlagerten Spitzen an. Die Restspannung dauert, solange der Strom fließt; die Spitze dauert viel kürzer. Die oberen Darstellungen betreffen positive, die unteren negative Spannungen.

In Bild 24 erkennt man das Verhalten der gesamten vermaschten Anlage mit einem Ableiter am Eingang:  $M_1$ ,  $M_2$  und  $M_3$ . Man sieht sofort, daß die Restspannung am Ableiter immer etwa gleich bleibt, denn sie hängt ja nur wenig vom Stoßstrom in den Ableitern ab; die Spitzenspannungen gehen aber beträchtlich höher. Bei  $M_1$ , am Ort des Ableiters, ist sie am kleinsten, bei  $M_2$  und  $M_3$  ist sie merklich größer.

Bild 25 betrifft ebenfalls die ganze Anlage, jetzt mit 100 m Längenausdehnung durch Reihenschaltung der 3 Sammelschienen. Ableiter befinden sich wie zuvor am Eingang. Messung erfolgt wieder in  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ . Die Unterschiede der Spannungen gehen auf mindestens 40...50% zwischen  $M_1$  und  $M_3$  und es ist durchaus nicht so, daß die Spannung in  $M_3$  nur sehr kurz dauert, denn aus den Pfeilen ergeben sich 4...8  $\mu$ s. In der 16 kV-Anlage entstehen Spannungen von etwa 130 kV Scheitelwert.

Bild 26 gilt wieder für die lange Anlage mit 100 m Leitungslänge, jedoch mit einem Ableiter am Ende der Anlage statt am Anfang. Die Beanspruchung wird wesentlich größer. Der Unterschied ist wieder mehr als 50%; die Spannung ist

jetzt am größten beim Eingang ( $M_1$ ), da der Punkt noch ungeschützt ist.

Bild 27: Zur Schaltung der Anlage nach dem vorangegangenen Bild 26 mit einem Ableiter am Anfang der Anlage kommt jetzt ein Ableiter am Ende hinzu (Meßstellen  $M_1$  und  $M_3$ ). Natürlich sind nun in  $M_1$  und  $M_3$  die Spannungen tief und bei  $M_2$  etwas höher. Die Kurven sind ganz bedeutend günstiger, die Spannungen bleiben durchweg, auch in der Mitte, unterhalb 100 kV. Man darf also offenbar mit den Ableitern nicht zu sparsam sein.

Bild 28 betrifft eine kurze Anlage mit nur 30 m Leitungslänge, Ableiter am Eingang. Der Unterschied ist bei steilen Wellen bereits ganz wesentlich. Er beträgt zwischen  $M_1$  und  $M_2$ , den beiden Meßstellen in 30 m Abstand, 40 und sogar 50% Spitzenspannung. Diese hat kürzere Dauer, weil die Ausdehnung klein ist.

Bild 29 zeigt den Einfluß der Kabel am Ende der vermaschten Anlage mit insgesamt 200 m Leitungslänge, Ableiter am Eingang. Das Wesentliche ist hier die Spannung am Kabelende,  $M_4$ : diese Spannung ist leider höher als die vor dem Kabel. Das ist sehr schade, sofern man z.B. in  $M_4$  einen Transformator anschließt. Die Kabellänge betrug 120 m; die Unterschiede können schon sehr merklich werden.

Bild 30 gilt für ein 480 m langes Kabel vor der Anlage mit 100 m Leitungslänge und Ableiter am Eingang. Dieses Kabel schluckt soviel Ladung, daß man auf 100 m Sammelschienenlänge keine wesentlichen Spannungsunterschiede mehr bekommt. Das ist ein interessantes Resultat; theoretisch würde man vielleicht einen etwas schlimmeren Verlauf voraussagen.

Bild 31 zeigt den gleichen Fall wie Bild 30, jedoch hat das Kabel vor der Station jetzt nur eine Länge von 18 m. Der Spannungsunterschied am Eingang (beim Ableiter) und am Ende der 100 m langen Station ist beträchtlich groß. Der Schutzwert dieser kleinen Kabellänge ist ganz unbedeutend.

Diese kurz skizzierten Versuche sind bei den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich (E.K.Z.) gemacht worden. Die Messungen erfolgten durch die Forschungskommission für Hochspannungsfragen, die unter dem Patronat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins und Verbandes der Schweizer Elektrizitätswerke steht, und die zum Zweck hat, Überspannungsvorgänge in den Anlagen zu untersuchen.

Eine weitere Serie von Versuchen wurde an einer 150 kV-Leitung mit Holzstangen ohne Erdseil durchgeführt, weil in den angeschlossenen Stationen schwere Blitzstörungen aufgetreten waren. Es war zu untersuchen, ob mit einer Schutzstrecke mit 2 Erdseilen und vorgeschalteter Schutzfunkenstrecke die Überspannung in der 150 kV-Anlage in mäßigen Grenzen gehalten werden kann. Zu diesem Zweck wurden auf die Holzstrecke Wellen bis 600 kV gesandt und in der Anlage die ankommenden Überspannungen gemessen.

Bild 32 zeigt die Schutzstrecke von etwa 2,5 km Länge mit Schutzfunkenstrecke und die Anlage. Die Frage war, ob die Dämpfung auf der Schutzstrecke so groß wird, daß in der Anlage gefährliche Überspannungen nicht mehr auftreten.

Im Bild 32 erfolgt durch den Stoßgenerator beim Mast Nr. 227 der Stoß auf die Leitung (diese ist hier beim Abspannmast geöffnet) zur 150 kV-Unterstation. Die dort ankommende Spannung  $U_E$  wird entweder am Anfang der Anlage an einer Hilfs sammelschiene ( $M_1$ ) oder an den Hauptsammelschienen ( $M_2$ ) gemessen. Transformatoren und Spannungswandler werden bei solchen Versuchen vorsichtigerweise abgetrennt, die Stromwandler und alle Schalter bleiben natürlich angeschlossen. Die in die Schutzstrecke einlaufende Spannung  $U_A$  wird am Anfang dieser Schutzstrecke, d.h. bei dem, dem "Sender" (Stoßgenerator) benachbarten Mast gemessen. Die Endspannung  $U_E$  wird mit oder ohne 150 kV-Ableiter an verschiedenen Punkten der Anlage ( $M_1, M_2$ ) festgestellt.

Bild 33 zeigt den Abspannmast, bei dem die Leitung geöffnet wurde. Auf einer Bühne konnten 1, 2 oder 3 Leiterseile zum Stoßen angeschlossen werden. Dabei befindet sich der Stoß-

generator-Wagen sowie eine Drosselspule, um statt der möglichst steilen auch flache Wellen zu erzeugen.

Die Versuchsergebnisse sind in den Bildern 34...36 dargestellt.

Bild 34 zeigt den Fall der ankommenden Welle in der Station mit einer Schutzfunkenstrecke von 760 mm Schlagweite oder 300 mm, letztere, um stark überschießende Wellen erzeugen zu können. Da nicht genügend Spannung zur Verfügung stand, mußte die Schutzfunkenstrecke reduziert werden. Die Station war durch Anschluß einer zweiten 150 kV-Leitung als "Durchgangstation" geschaltet. Die gesendete Spannung  $U_A$  und die ankommende Spannung  $U_E$  sind sehr ähnlich, wenn kein Ansprechen einer Funkenstrecke erfolgt. Die Front ist etwas verflacht, aber nicht sehr viel, wie die Oszillogramm-Reihe 1 zeigt. Die Reihe 2 gibt das Messergebnis mit höherer Spannung wieder. Auffallend ist hier die Einsattelung in der Front der ankommenden Welle, die als Einfluß der Koronaverluste aufgeklärt werden konnte. Die Versuche wurden bei sehr schlechtem Wetter im November gemacht; die Korona-Spannung war bis auf etwa 300 kV Scheitelwert abgesunken, bei besserem Wetter ging sie bis gegen 500 kV herauf. Das verursachte die Unterschiede in der Front.

Die Oszillogramm-Reihe 3 zeigt eine stark überschießende Spannung; sie springt auf und fällt sofort zusammen. Diese Spannung ist nun in der Anlage ganz merklich niedriger als beim Sender. Sie wird gedämpft infolge ihrer kurzen Dauer, während bei der Reihe 2 der Endwert noch praktisch derselbe ist wie die gesendete Spannung, etwa 500 kV.

Bild 35 gilt für die Kopfstation, mit Abschlußwiderstand unendlich. Oben ist wieder der Fall dargestellt, wenn keine Funkenstrecke zum Ansprechen kommt. Durch die Reflexion wird eine größte Spannung bis etwas über 1 Million V erreicht. Die Oszillogramme der Reihe 3 entsprechen wieder einer kürzeren Welle, die abgeschnitten wird. Die ankommende Spannung zeigt eine enorme Lücke in der Front, offenbar wieder infolge der Koronaverluste. Die Reihe 4 zeigt ebenfalls diese Koronaverluste. Positive und negative Polarität verhalten sich ähnlich. Von einer bestimmten Spannung an tritt die Koronadämpfung ganz we-

sentlich in Erscheinung.

Bild 36 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse dieser Versuchsreihe. Wenn verschiedene Wellenhöhen  $U_A$  auf die Holzstrecken gesendet werden (beim Blitzeinschlag sind Wellenhöhen möglich bis zum Überschlag der Holzstrecken-Leitung, also bei 10 m Holzstrecke etwa 4 Millionen V), dann werden in der Station die hier als Ordinaten dargestellten Wellenhöhen  $U_E$  gemessen. In der Kopfstation entsteht bei kleiner Wellenhöhe, wo keine Schutzfunkenstrecke anspricht, praktisch eine Verdoppelung, denn die Dämpfung der vollen Welle auf der 2,5 km Schutzstreckenlänge ist recht klein. Bei 500 kV Wellenhöhe, die über die Leitung heranläuft, werden etwa 1000 kV in der Anlage erhalten. Bei größeren Spannungswellen geht nun die Anlagespannung nicht herauf, sondern herunter. Bei etwa 750 kV ergibt sich bereits eine kleinere Spannung, die Kurve fällt. Der Wert, der eben ohne Ansprechen der Schutzfunkenstrecke hereinläuft, verursacht die schlimmste Überspannung in der Station, praktisch noch annähernd Verdoppelung. Wenn aber die Schutzfunkenstrecke einmal anspricht, dann wird die Dämpfung kurz dauernder Stöße viel größer und die Spannung geht zuerst relativ und dann auch absolut herunter. Auch bei der 300 mm Schutzfunkenstrecke ist es ähnlich, dort steigt die Spannung anfangs noch etwas, aber nicht wesentlich, um nachher zu sinken. Je höher die zulaufende Blitzwelle, um so besser schützt die Anordnung. Die Spannung von 1000 kV ist aber zu hoch; der Schutz ist für die Kopfstation nicht hinreichend, für die Durchgangsstation wäre er schon genügend.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden an der 130 kV-Leitung Vernayaz-Puidoux unserer Bundesbahn Dämpfung und Reflexion der Wellen gemessen. Durch die gesendete Welle und das Echo, das hier nach etwa 400  $\mu$ s, d.h. nach etwa 120 km Hin- und Rückweg zurückkommt, kann die Dämpfung für verschiedene Stoßdauer gemessen werden.

Bild 37 zeigt die Dämpfung einer Welle von 15  $\mu$ s Halbwertdauer. Sie fällt nach etwa 100  $\mu$ s, d.h. nach etwa 30 km Hin- und Rückweg auf 50% ihres Anfangswertes. Die Messungen sind

bei Spannungen unterhalb der Koronaspannung gemacht.

Bild 38 betrifft eine länger dauernde Welle mit 53  $\mu$ s Halbwertdauer. Hier dauert es bedeutend länger, nämlich 200  $\mu$ s, bis die Spannung auf die Hälfte herabsinkt; diese Zeit entspricht etwa 60 km Leitungslänge. Solche Dämpfungen sind somit stark abhängig von der Halbwertdauer der Wellen. Außerdem kommen andere Faktoren herein, vor allem durch die Kopplung mit den Nachbarseilen. Es bilden sich bei Drehstromleitungen Komponenten-Wellen, Nullkomponenten mit Rückstrom im Erdboden und symmetrische Komponenten mit Rückstrom auf den nicht gestoßenen Phasen. Die Dämpfung der Wellenkomponenten ist daher sehr verschieden. Die Erdrückleitung verursacht eine sehr große Dämpfung. Dementsprechend ist dann auch die Geschwindigkeit der Welle mit Erdrückleitung etwas kleiner als jene der Komponenten-Wellen auf den Nachbarseilen. Das bewirkt recht unerwartete Unterschiede und Verformungen der Welle.

Eingangs wurde bereits der Unterschied der Überschlagspannung einer Anzahl paralleler Isolatoren gegenüber der von Einzelisolatoren erwähnt. Es haben z.B. 50 Stück zugleich gestoßene Isolatoren eine geringere Überschlagspannung als jeder einzelne von ihnen. Genauer gesagt: die "50%-Spannung" der Vielzahl sinkt. In etwas geringerem Maße gilt dies auch für die sogenannte "Haltespannung" sowie für die "100%-Spannung". Die Bilder 39 und 40 erläutern diese zunächst merkwürdige Einzelheit.

Bild 39 zeigt die Ansprechspannung kleiner Kugelfunkenstrecken mit nur 0,5 mm Schlagweite, und zwar bis 6 Kugelpaare parallel. Die Ansprechspannung geht in Funktion der Anzahl der Funkenstrecken herunter. Mit negativer Stoßspannung ergibt Kurve 3 das Maximum und Kurve 4 das Minimum der Ansprechspannung. Kurve 1 gilt für negative Gleichspannung. Auch der Mittelwert der Kurve geht herunter.

Bild 40 zeigt die entsprechende Erscheinung für Isolatoren, nämlich 1...42 Stück Hängeelemente in einer Massenprüfung. Die 50%-Überschlagspannung sinkt von 146 kV auf 126 kV bei

positivem Stoß, d. s. 14% Änderung. Für negativen Stoß ergibt sich ein Absinken der 50%-Überschlagsspannung um 11% von 130 kV auf 116 kV. Die Werte bleiben immer noch etwas über dem Scheitelwert der 50 Hz-Überschlagsspannung, aber sie nähern sich ganz beträchtlich diesem Wert, mindestens der negative Wert im vorliegenden Fall. Die 50%-Überschlagsspannung ist leider eine Funktion auch von der Anzahl der zugleich gestoßenen Isolatoren.

Nachstehend sollen noch kurz die Schaltüberspannungen betrachtet werden. Die atmosphärischen Überspannungen sind bekanntlich bei kleinen und mittleren Betriebsspannungen wichtig, während bei großen Spannungen von 150 und 220 kV die Schaltüberspannungen bereits eine ganz merkliche Rolle spielen. Die Meßeinrichtung zur Ermittlung der Schaltüberspannungen ist sehr einfach: Man mißt mit kapazitiven Teilern die Spannung beidseitig des Schalters am abgeschalteten Objekt, sei es ein Transformator oder eine offene Leitung, oder am Netz.

Bild 41 zeigt das Verhalten eines üblichen Druckluftschalters ohne Widerstand beim Ausschalten einer großen Induktivität, nämlich eines leerlaufenden Transformators. Die Spannung läuft sehr viele Male an, um jeweils bald wieder auf Null zusammenzubrechen, bis sie schließlich in einer gedämpften Schwingung in den Zustand des ausgeschalteten Transformators einschwingt. Der Anstieg der Spannung entspricht einer unterbrochenen Schaltstrecke, der Zusammenbruch einer erneuten Zündung dieser Schaltstrecke. Da der Anstieg viel langsamer erfolgt als der Zusammenbruch, ist er gut sichtbar, der Zusammenbruch hingegen kaum. Das obere Oszillogramm gibt den Spannungsverlauf am Transformator, wo das Zündspiel bei irgendeinem Momentanwert der Wechselspannung beginnt, um schließlich gegen die Nulllinie oder gegen eine konstante Restspannung auszuspringen.

Das untere Oszillogramm zeigt den zugehörigen Spannungsverlauf über der Schaltstrecke; es handelt sich hier um die wiederkehrende Spannung am Schalter. Sie beginnt mit Null, durchläuft das Zündspiel und geht über die Eigenschwingung des Transformators (oberes Oszillogramm) in die normale Wechselspannung des Netzes über.

Bild 42 betrifft im Gegensatz zu Bild 41 einen Druckluftschalter mit eingebautem Schalterwiderstand und Schutzfunkenstrecke. Das obere Oszillogramm zeigt wieder die Spannung am Transformator über der Abschaltdauer, das untere die wiederkehrende Spannung am Schalter. Das Zündspiel beginnt genau wie in Bild 41 mit Rückzündungen wachsender Amplitude. Von einem gewissen Zündspannungswert an nehmen die Amplituden jedoch nicht mehr zu, da sie von der im Schalter eingebauten Schutzfunkenstrecke begrenzt werden. Die Zündungen sind dabei vom Hauptkontakt des Schalters an diese Schutzfunkenstrecke verlagert, wobei der mit dieser in Reihe geschaltete Strombegrenzungswiderstand die Lichtbogenlöschung an der Schutzfunkenstrecke begünstigt.

Die Bilder 41 und 42 stellen relativ schwierige Fälle dar, da sie bei  $16 \frac{2}{3}$  Hz gemessen sind, das heißt im Bahnnetz, wo diese Art Überspannungen bekanntlich größer werden als im 50 Hz-Industrie-Netz.

Die Kurve, die durch Verbinden aller Zündspannungswerte entsteht, zeigt das Tempo der Verfestigung der Schaltstrecke an. Die Unterbrechung solch kleiner Ströme ist physikalisch ganz anders bedingt als jene bei der Löschung starker Kurzschlußlichtbogen. Im großen und ganzen stimmt es im vorliegenden Fall mit der Verfestigung der öffnenden Kontaktstrecke in kalter Luft ungefähr überein. Ist diese Zündspannungskurve bekannt, so kann die größte Überspannung auf einfache Weise berechnet werden. Sie hängt vom Tempo der Verfestigung der Schaltstrecke ab.

Würden keine Rückzündungen im Schalter erfolgen, sondern würde irgend ein Momentanwert des Leerlaufstromes plötzlich und definitiv unterbrochen, so entstünden - genau wie beim plötzlichen Unterbrechen eines Gleichstromes - sehr hohe Schaltüberspannungen. Beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme müssen Rückzündungen zugelassen werden, ganz im Gegensatz zum Fall der Abschaltung leerlaufender Leitungen, wo das Ausbleiben solcher Rückzündungen sehr erwünscht ist.

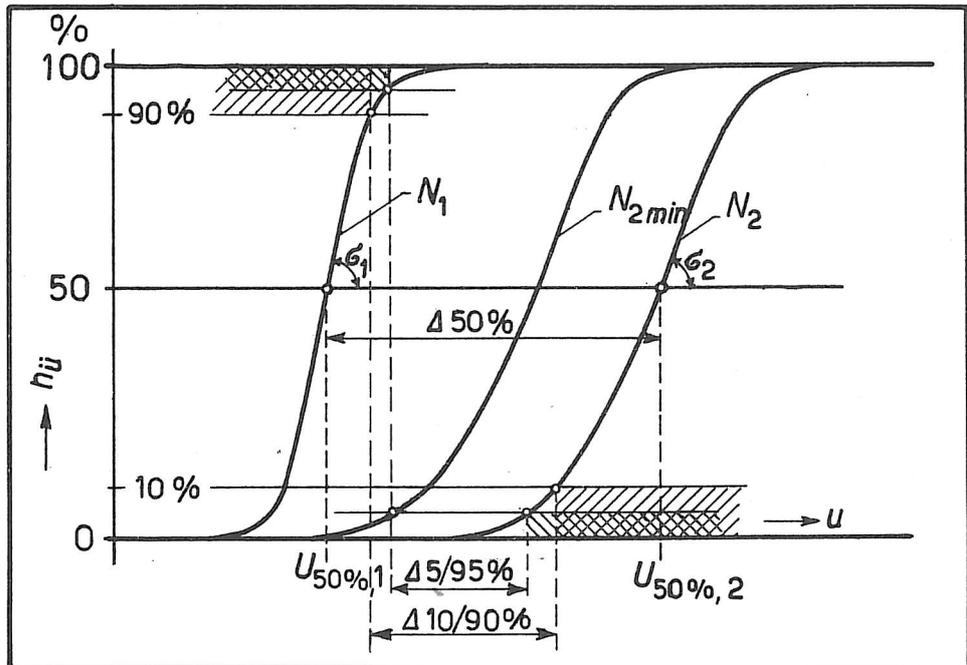
Die Aufstellungen in den Bildern 43 und 44 enthalten die Überspannungen beim Abschalten leerlaufender Transformatoren mit ganz verschiedenen Schaltern und Transformatoren (Bild 43) bzw. beim Abschalten leerlaufender Leitungen, ebenfalls mit verschiedenen Schaltern und Leitungen (Bild 44). Wir haben diese Ergebnisse zusammengestellt für das Fachkollegium für Schalter der Internationalen Elektrotechnischen Kommission, um einen Anhaltspunkt zu bekommen, mit welchen Überspannungen beim Schalten mit den uns zur Verfügung stehenden Schaltern etwa zu rechnen ist.

Diese Versuche sind zu einem Teil von der Forschungskommission, zum anderen Teil von schweizerischen Firmen im Ausland gemacht worden, nämlich in Frankreich, Schweden und Amerika, wo große Leitungslängen zur Verfügung stehen, die wir in der Schweiz nicht haben. Dargestellt ist der Überspannungsfaktor, d.h. das Verhältnis der Überspannung zur normalen Phasenspannung.

Natürlich ist auch bei uns die Diskussion um den Schalterwiderstand neuerdings lebhaft. Einerseits möchten wir gern einen Schalter haben, der überspannungsfrei schaltet; andererseits können wir uns auch noch erinnern, daß der Schalterwiderstand seinerzeit beim Ölschalter nicht befriedigt hat. Im Grunde hätten wir lieber einen Schalter ohne Widerstand, aber ebenso auch ohne Überspannungen.

Zum Schluß noch ein Wort über das Wesentliche dieser Netzversuche. Ich möchte nochmals hervorheben: wir wollen durch derartige Versuche einfach kontrollieren, was in der Anlage passiert. Es werden dabei alle Einflüsse erfaßt, die sonst vielleicht vergessen werden oder die sehr kompliziert berechnet werden müssen. Es ist, wie der Herr Vorsitzende gesagt hat, vielleicht eine Aufgabe des Kathodenstrahl-Oszillographen, gelegentlich auch dort zu helfen, wo man zwar rechnen kann, wo aber die Rechnung sehr umständlich und zeitraubend wird. Mit dem Oszillographen hat man die Messung dann billiger in kurzer Zeit. Außerdem prüft man die Anlage und hat die Sicherheit, daß sie samt Schutz in Ordnung ist. Der Betriebsleiter sollte dann bei demselben Zustand der Isolation eigentlich nichts mehr von Überspannungen befürchten müssen.

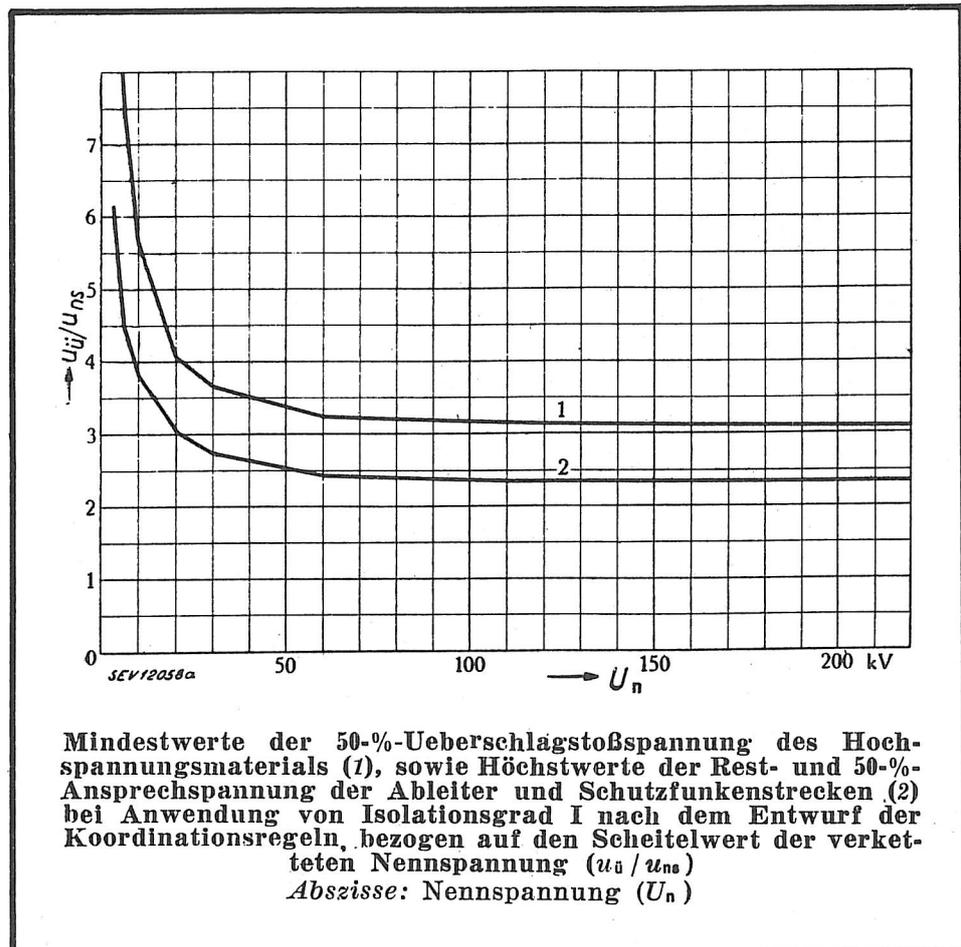
B i l d e r 6 b i s 44



### Koordination des Überspannungsschutzes

- a auf Grund der 50% - Spannung
- b auf Grund der 5/95%-bezw. 10/90%-Spannung

Bild 6.



Mindestwerte der 50%-Überschlagstoßspannung des Hochspannungsmaterials (1), sowie Höchstwerte der Rest- und 50%-Ansprechspannung der Ableiter und Schutzfunkenstrecken (2) bei Anwendung von Isolationsgrad I nach dem Entwurf der Koordinationsregeln, bezogen auf den Scheitelwert der verketteten Nennspannung ( $u_{\bar{u}} / u_{ns}$ )

Abszisse: Nennspannung ( $U_n$ )

Bild 7.

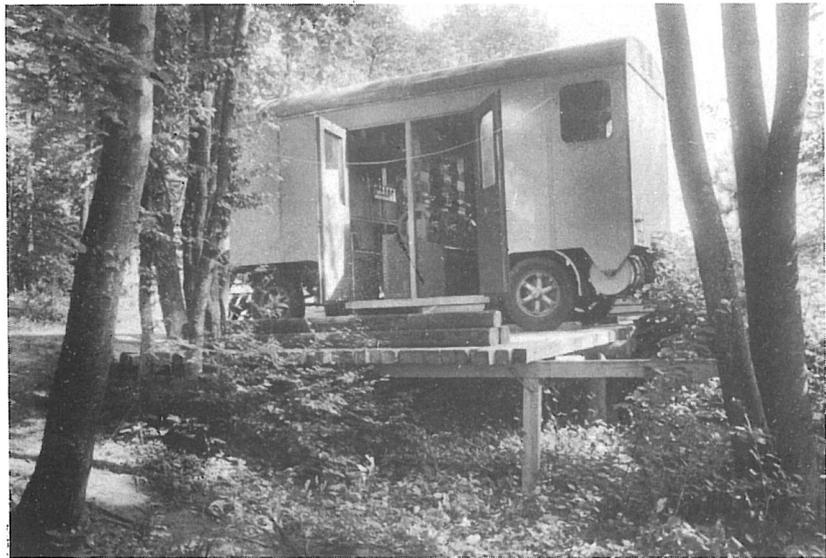


Bild 8. Meßwagen.

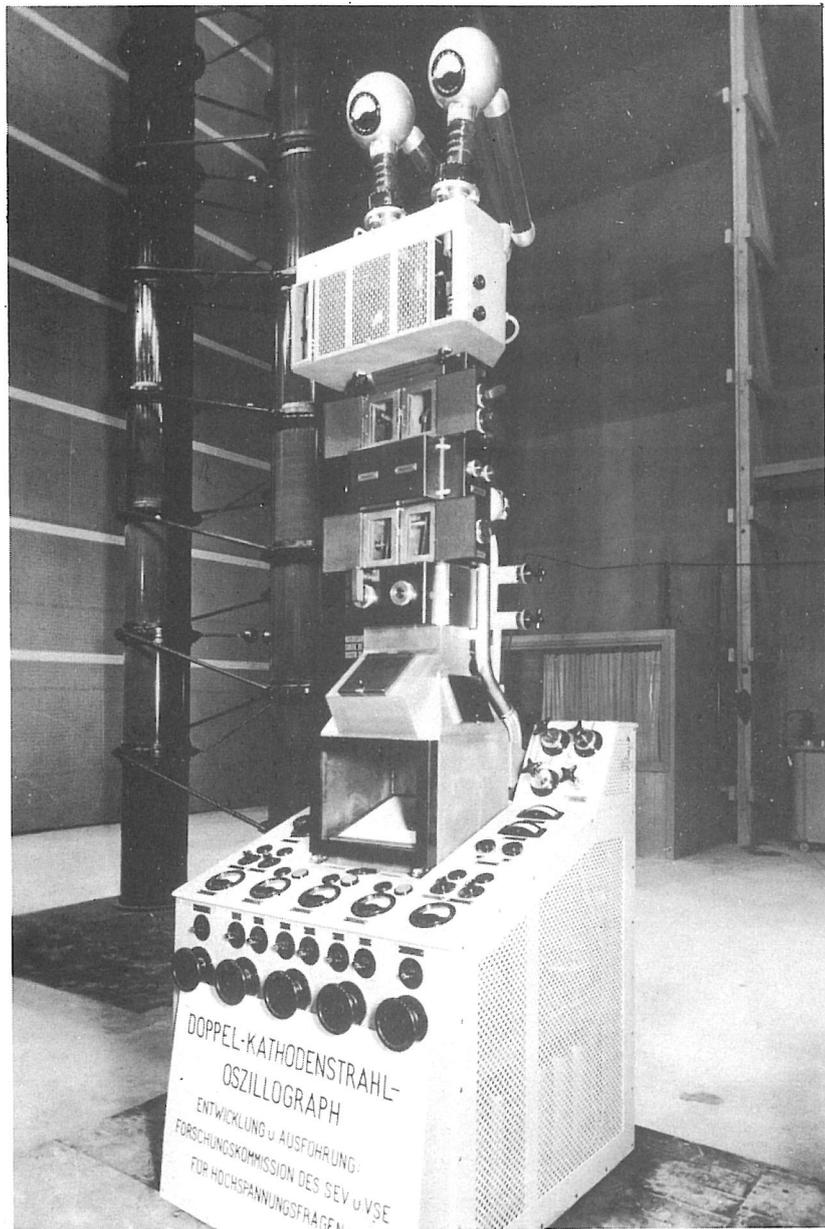


Bild 9. Doppel-Kathodenstrahl-Oszillograph.

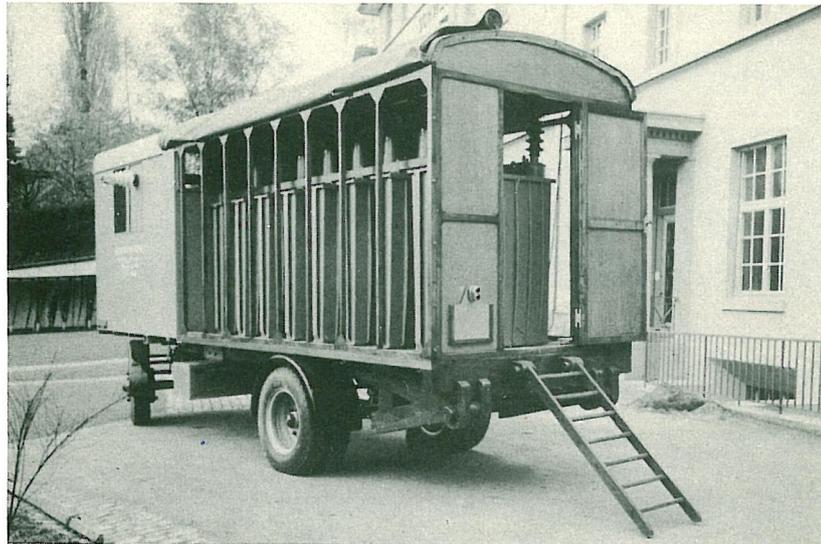


Bild 10. Fahrbarer Stoßgenerator.

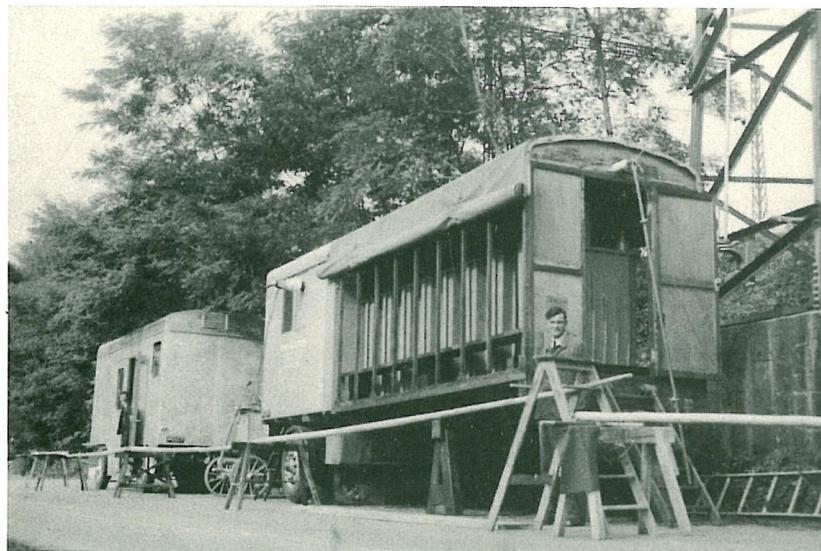


Bild 11. Stoßwagen aufgebockt.

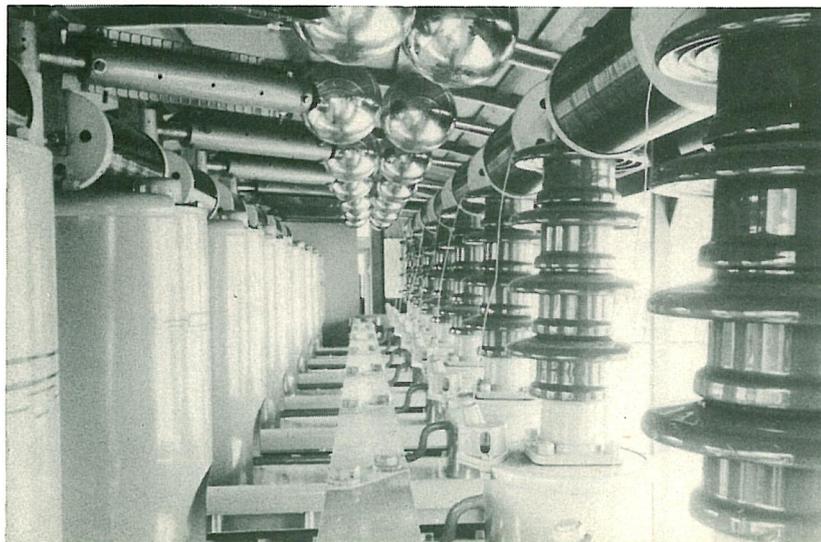


Bild 12. Durchblick durch den Stoßwagen;  
Funkenstrecken und Durchführungen  
der Kondensatoren.

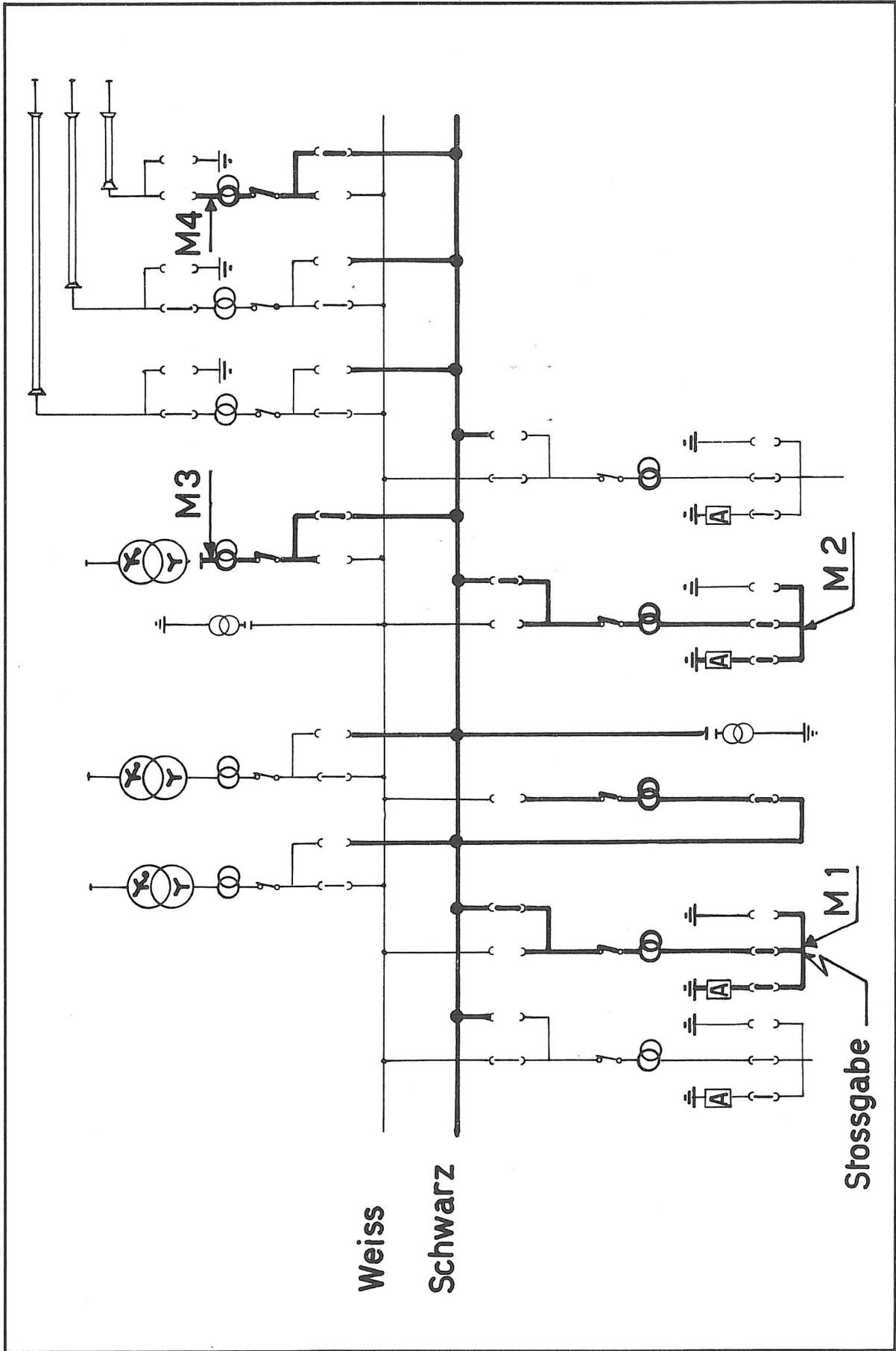


Bild 13. 50 kV-Anlage mit Stoßgabe und Meßstellen.

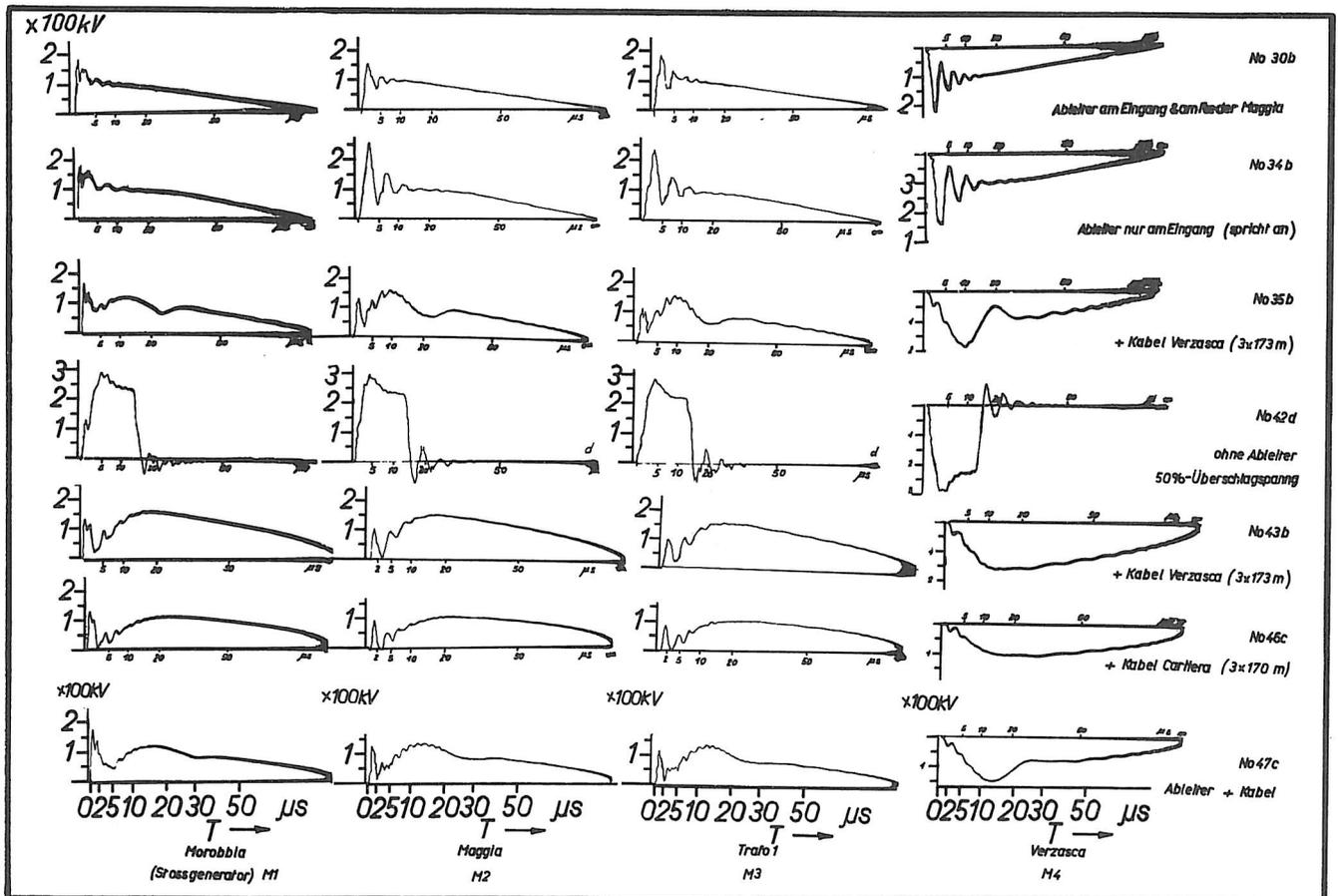
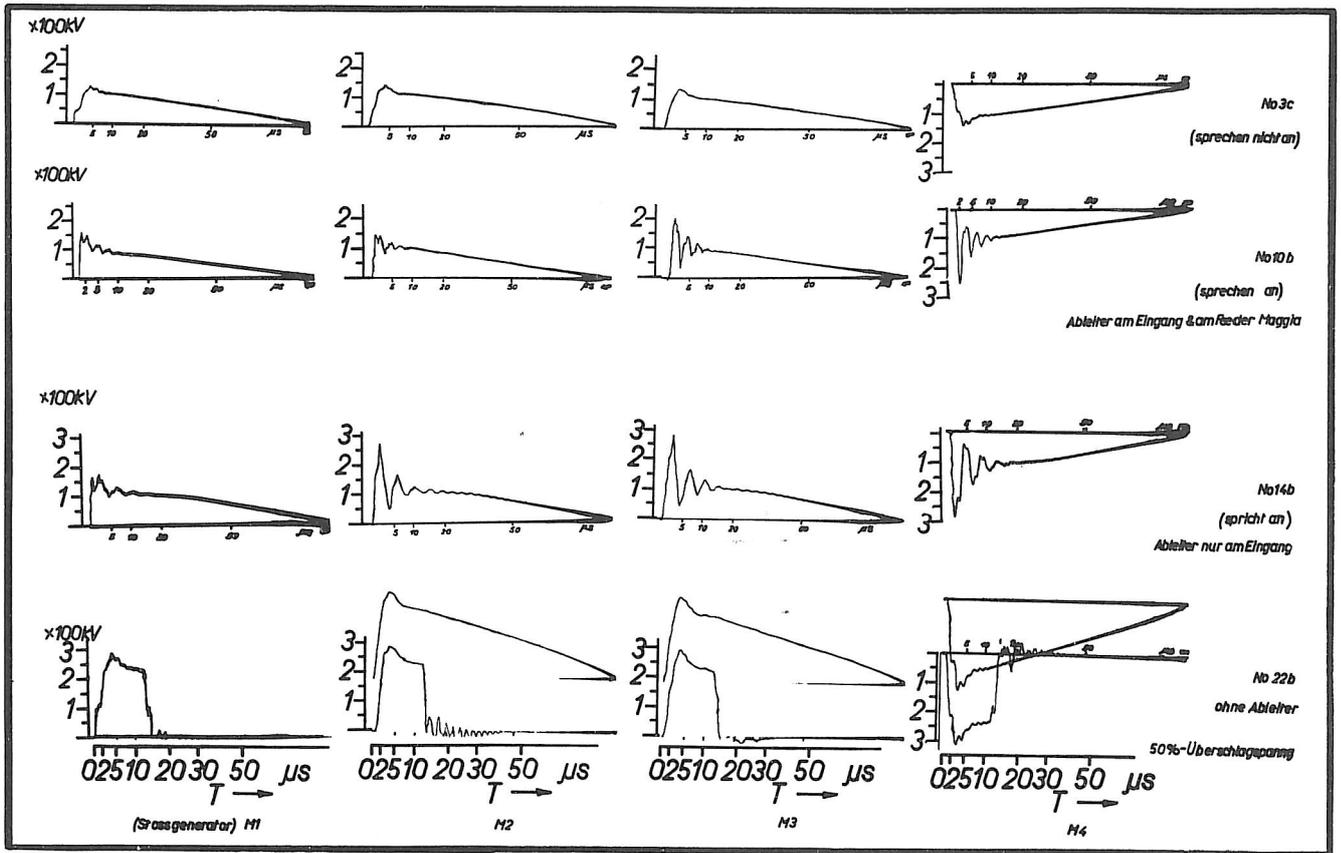


Bild 14 u.15.  
 50 kV-Anlage, Verteilung der Überspannungen,  
 Sammelschiene "schwarz" (oben),  
 Sammelschiene "weiß", mit Kabel (unten).

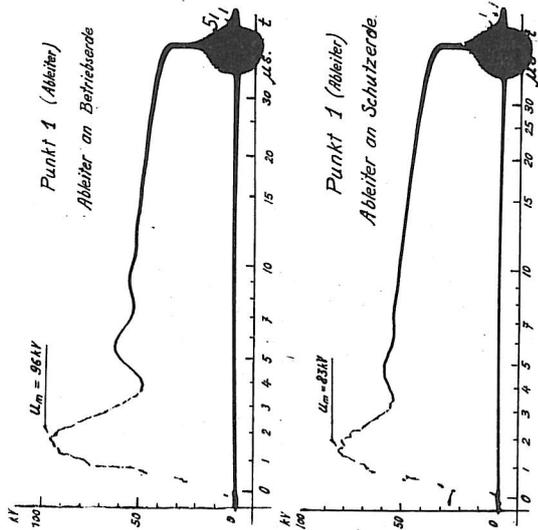


Bild 16. Eingang der Anlage.

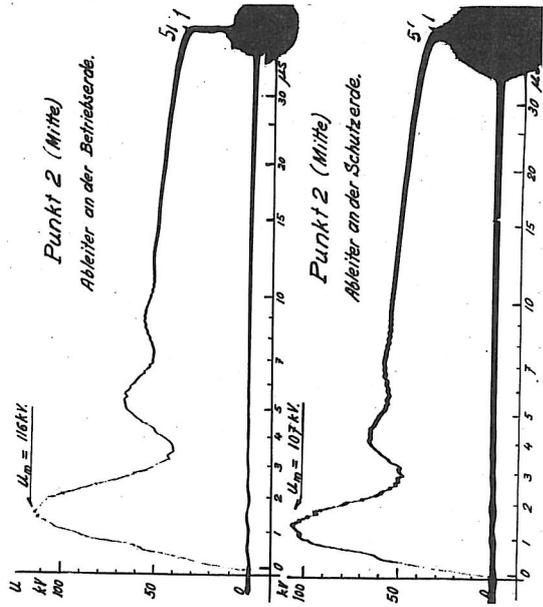


Bild 17. Mitte der Anlage.

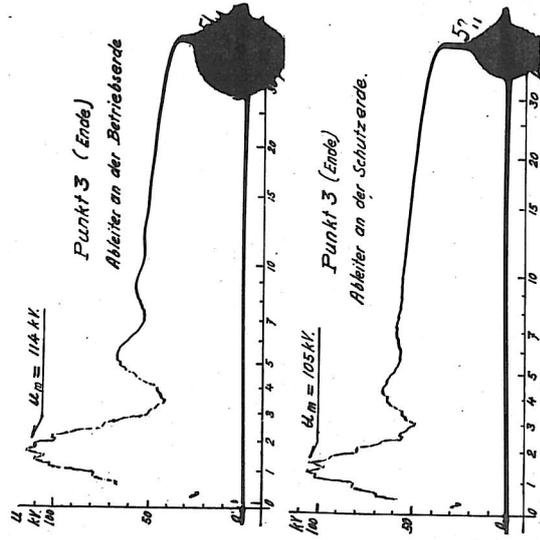


Bild 18. Ende der Anlage.

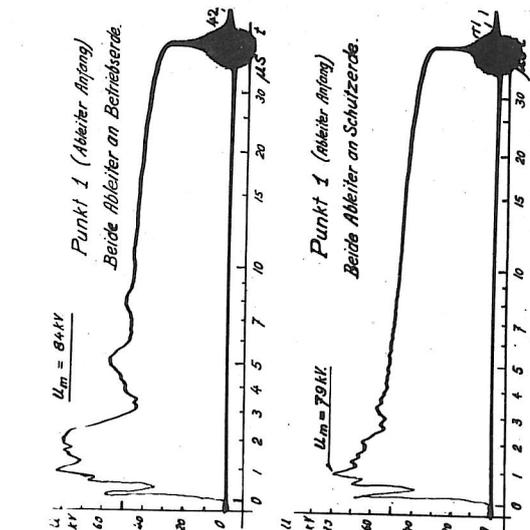


Bild 19. Eingang der Anlage.

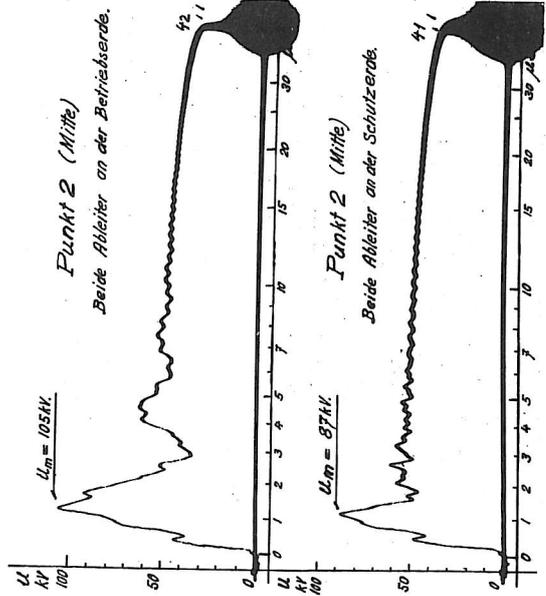


Bild 20. Mitte der Anlage.

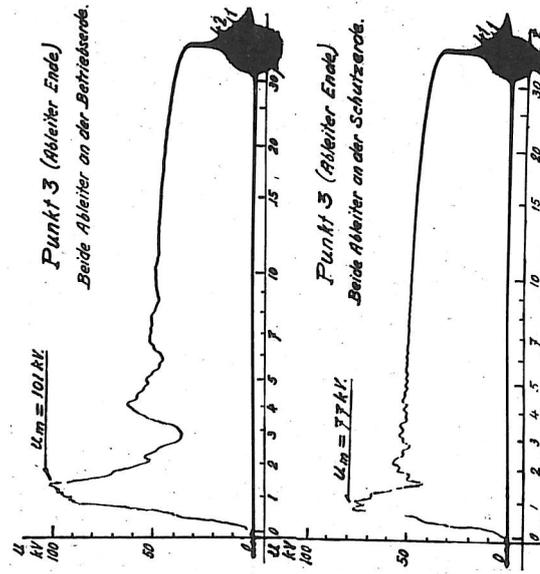


Bild 21. Ende der Anlage.

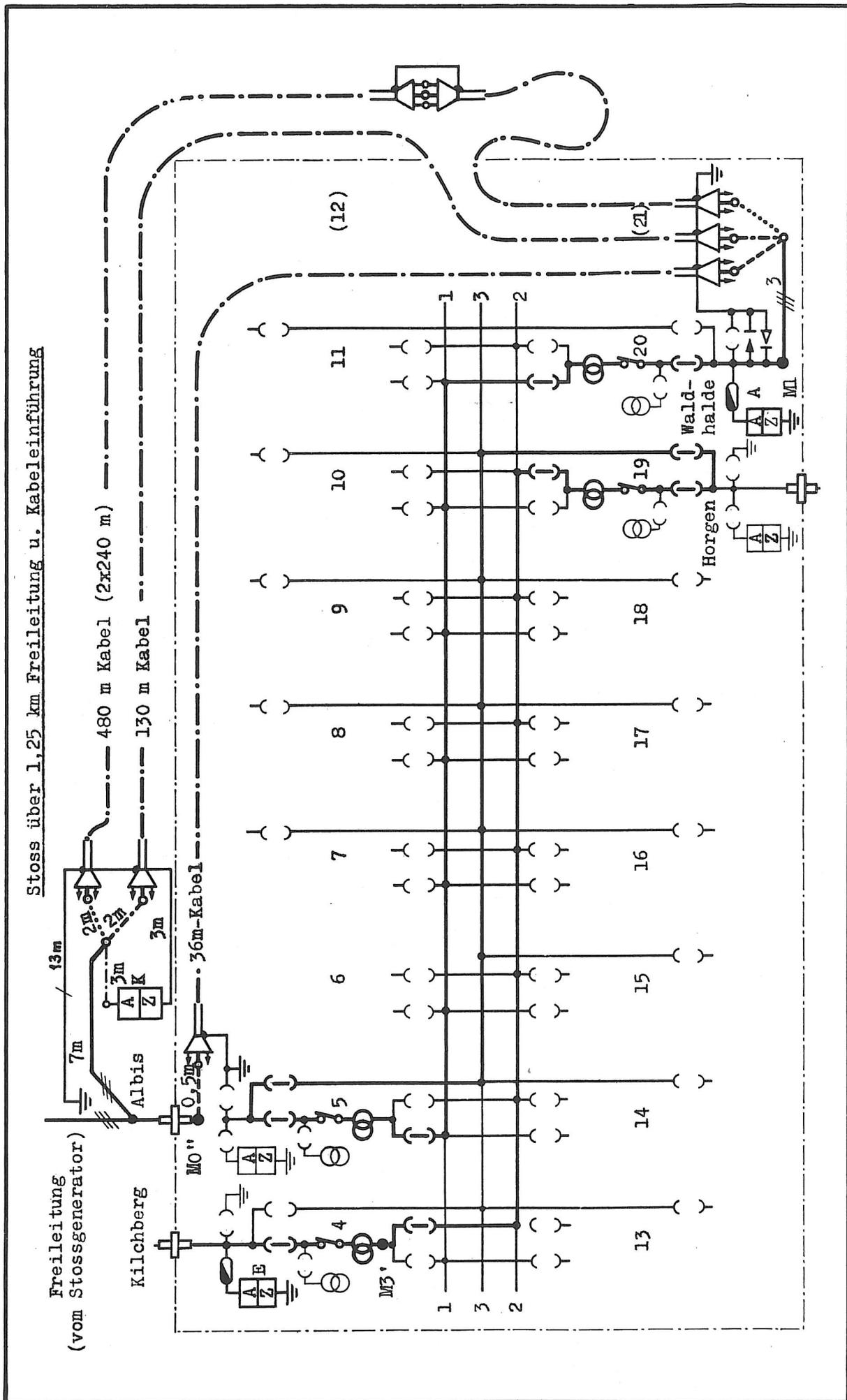


Bild 22. 16 kV-Anlage Thalwil mit Stoßgabe und Meßstellen.

Ganze Anlage vermascht : 200 m  
 mit 6 Ableitersätzen angeschlossen  
 ohne Transformatoren-Kabel

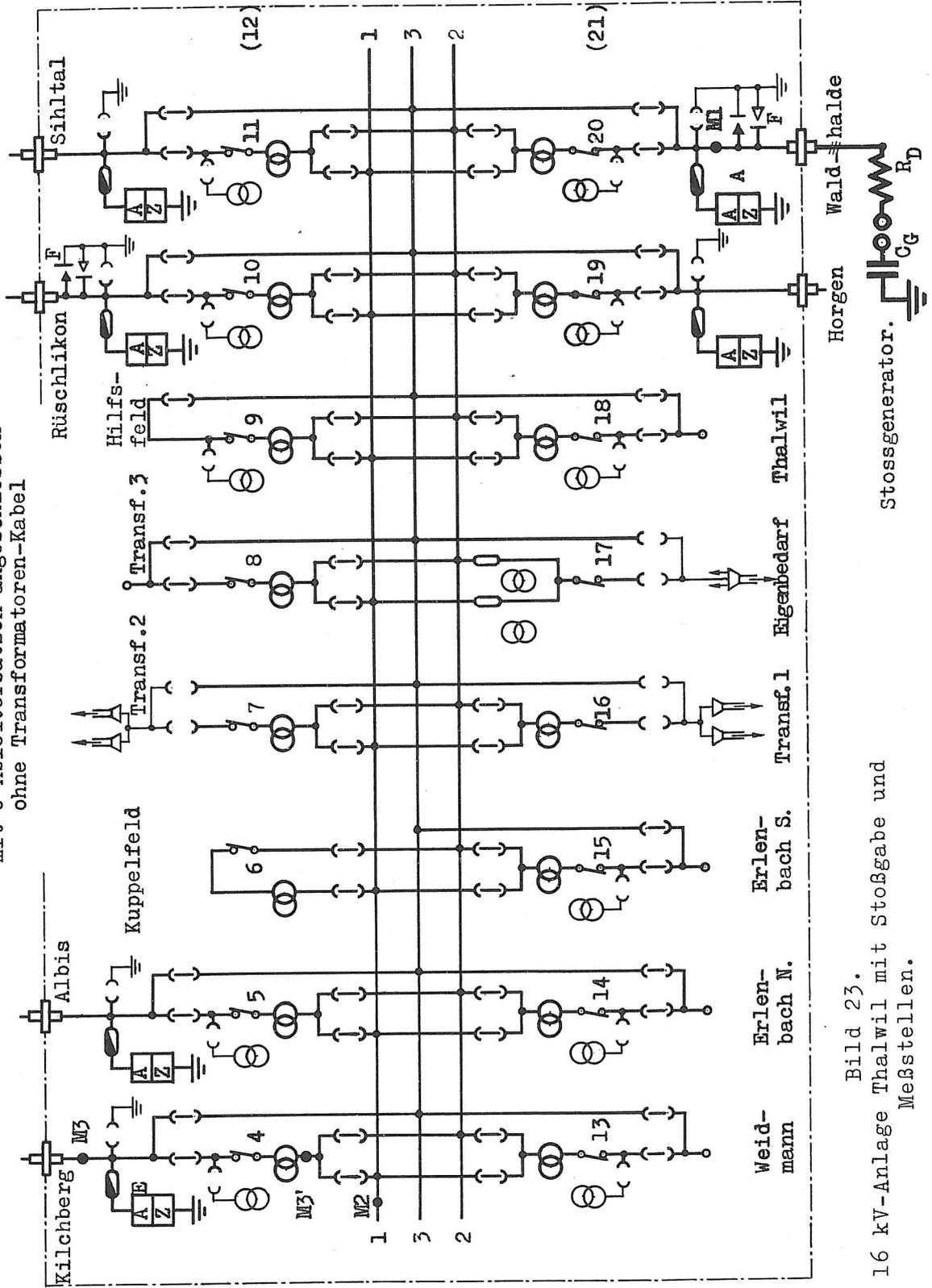


Bild 23.

16 kV-Anlage Thalwil mit Stoßgabe und  
 Meßstellen.

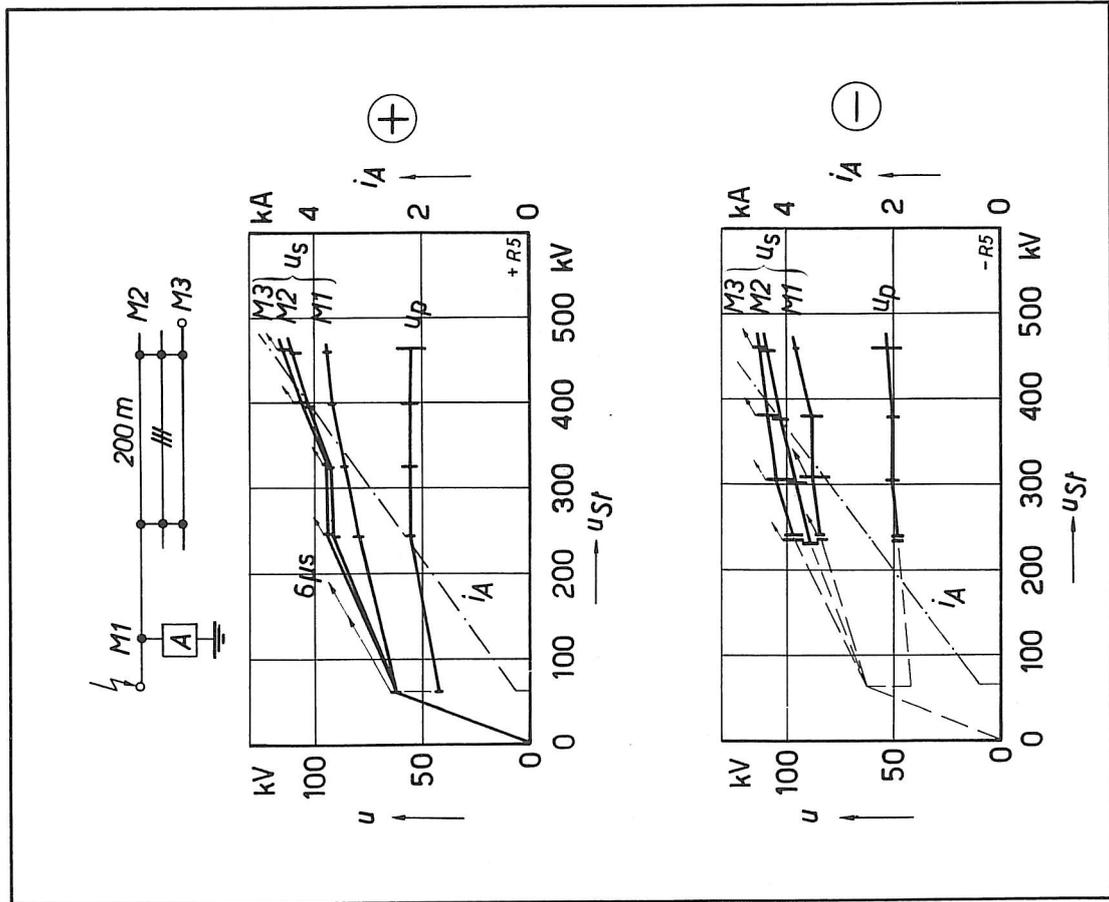
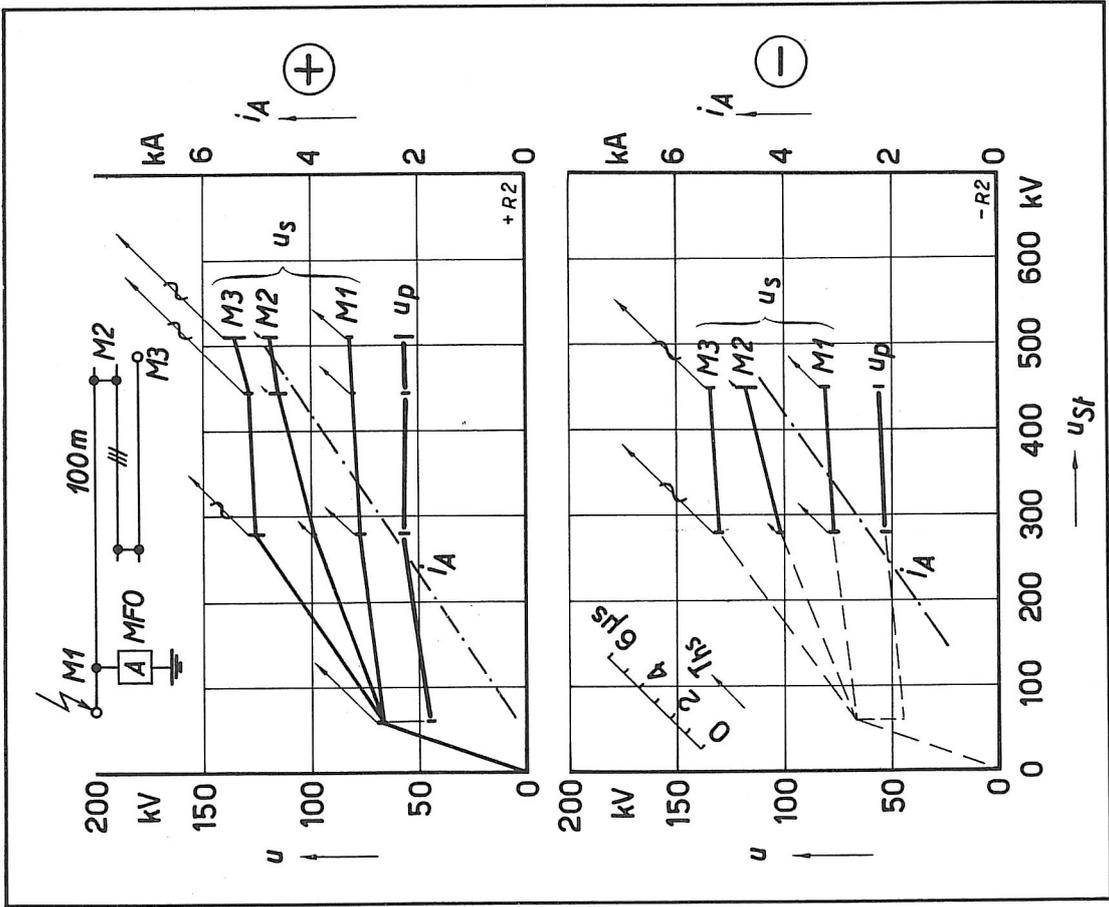


Bild 24. Überspannungen bei 200 m Leitungslänge der vermaschten Anlage; 1 Satz Ableiter am Eingang.



16 kV-Anlage Thalwil

Bild 25. Überspannungen bei 100 m Leitungslänge (Reihenschaltung der 3 Sammelschienen); 1 Satz Ableiter am Eingang.

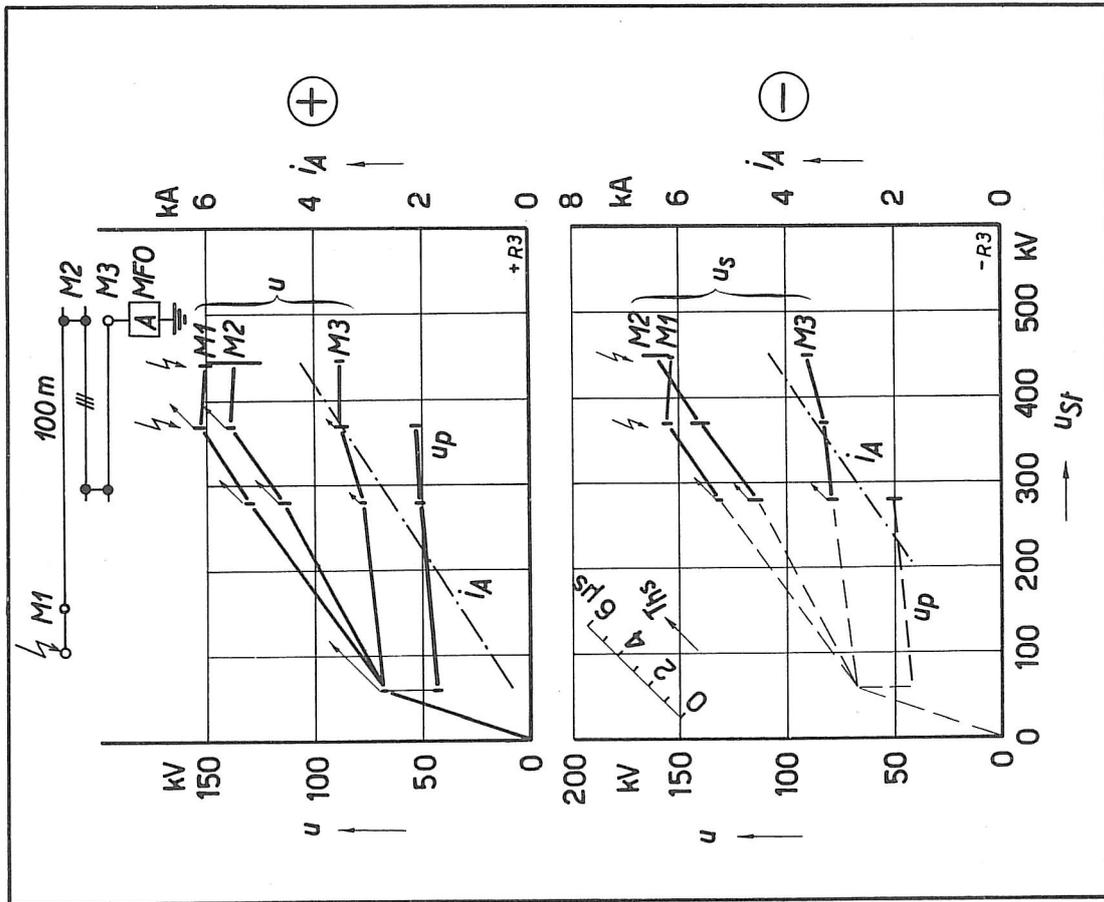
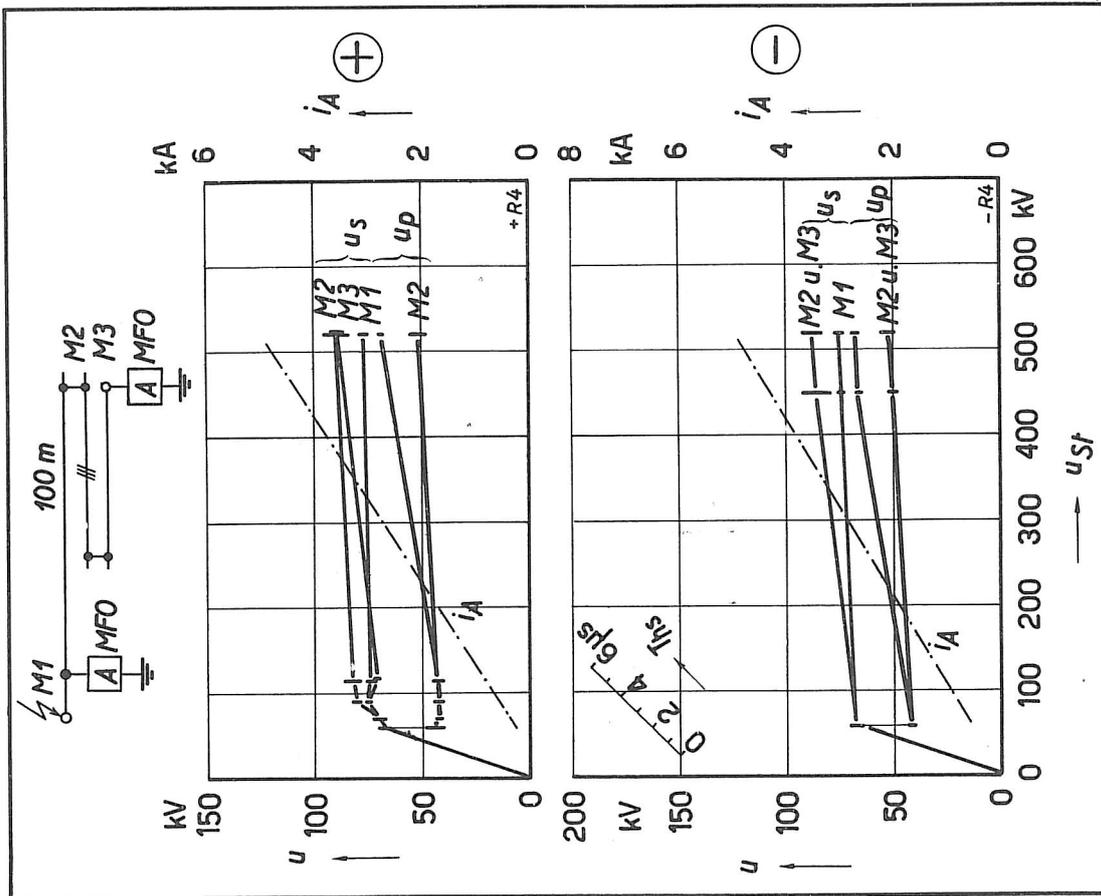


Bild 26. Überspannungen bei 100 m Leitungslänge; 1 Satz Ableiter am Ende.



16 kV-Anlage Thalwil  
 Bild 27. Überspannungen bei 100 m Leitungslänge; je 1 Satz Ableiter am Eingang und am Ende.

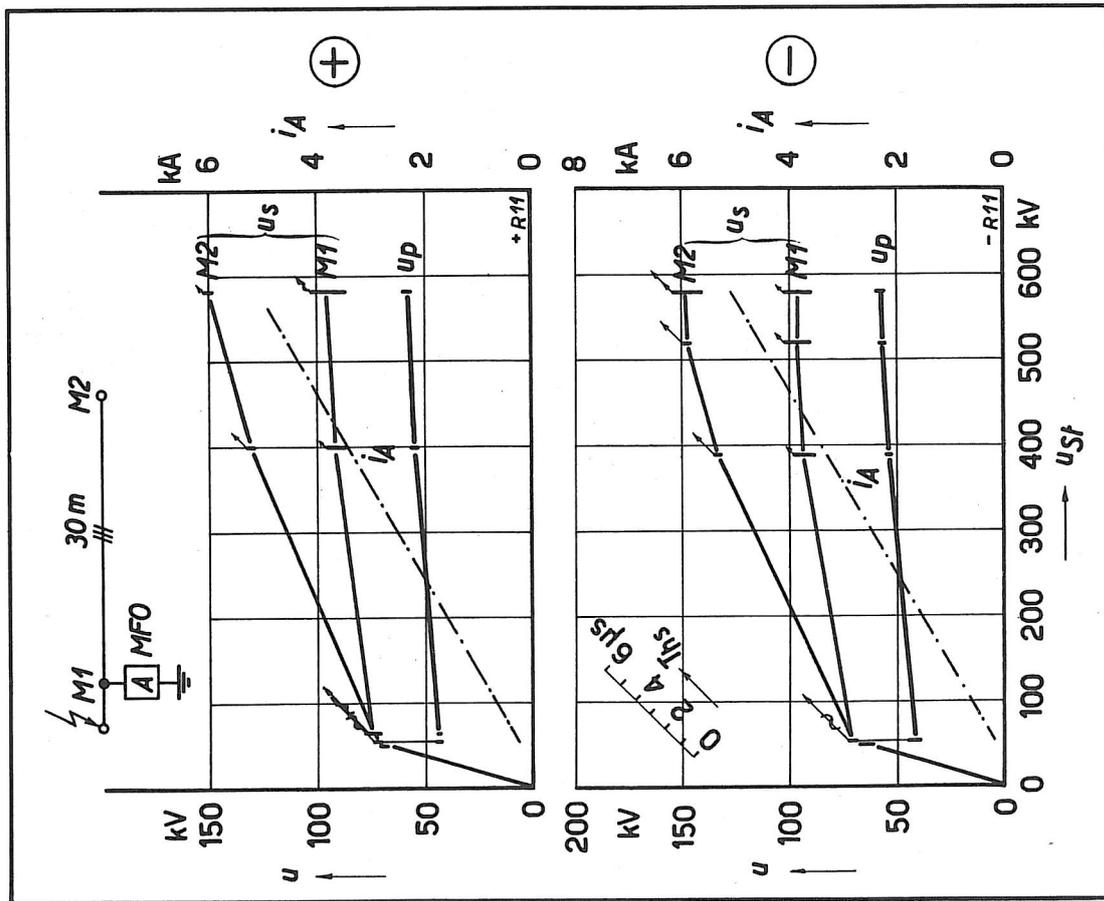
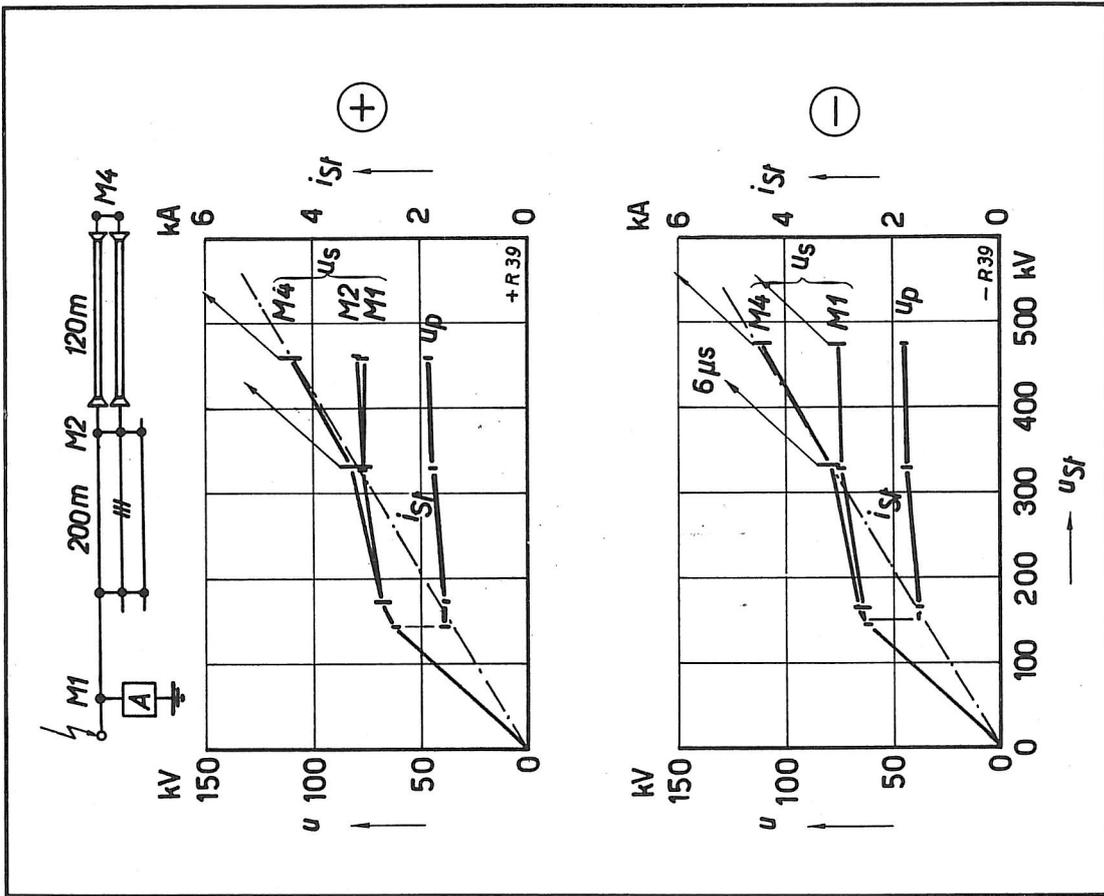


Bild 28. Überspannungen bei 30 m Leitungslänge; 1 Satz Ableiter am Eingang.



16 kV-Anlage Thalwil

Bild 29. Überspannungen bei 200 m Leitungslänge der vermaschten Anlage; 1 Satz Ableiter am Eingang, 120 m Kabellänge am Ende.

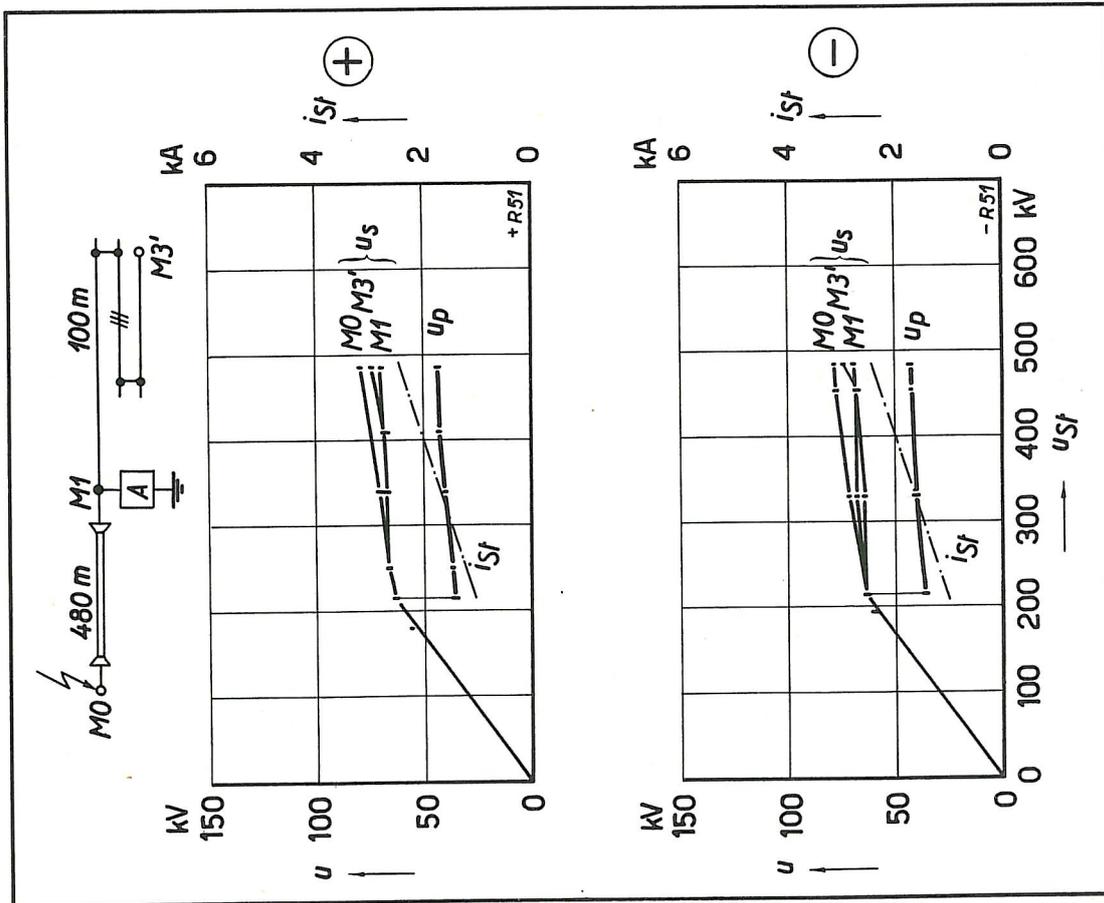


Bild 30. Überspannungen bei 100 m Leitungslänge; 1 Satz Ableiter am Eingang, 480 m Kabellänge vor der Anlage.

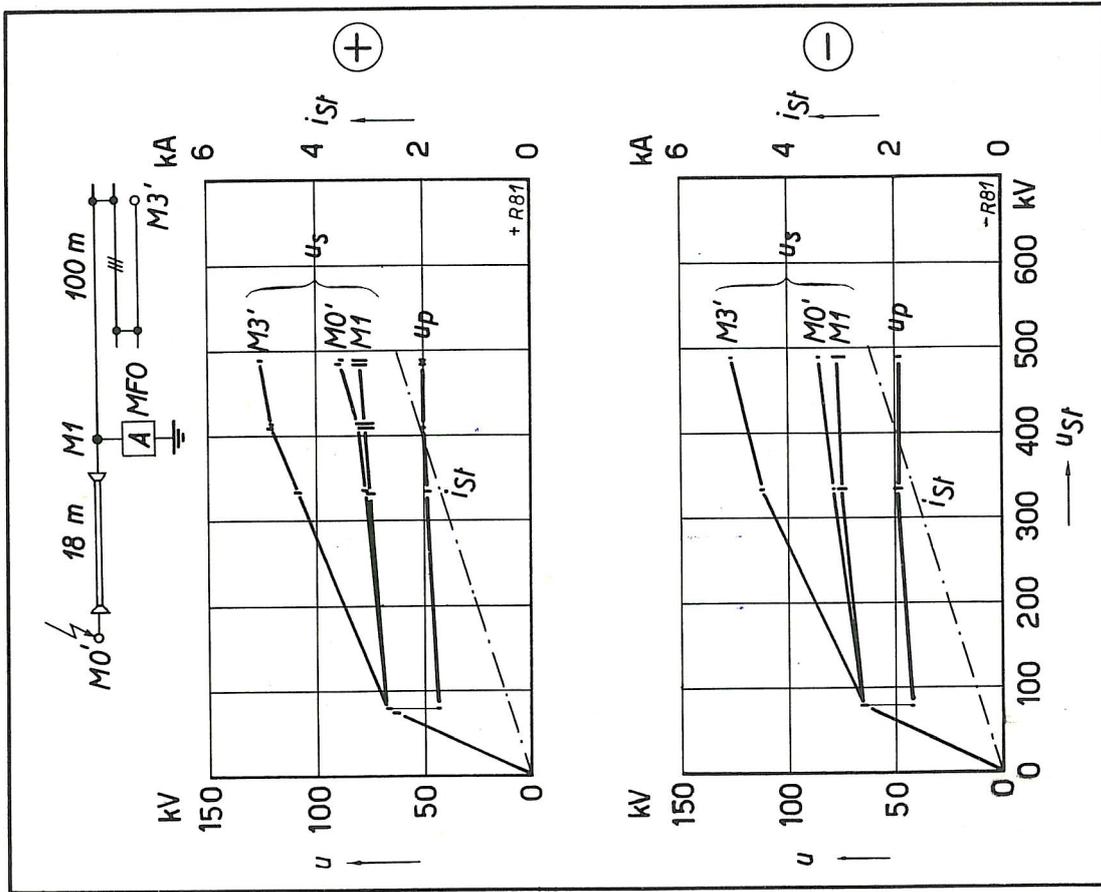


Bild 31. Überspannungen bei 100 m Leitungslänge; 1 Satz Ableiter am Eingang, 18 m Kabellänge vor der Anlage.

16 kV-Anlage Thalwil

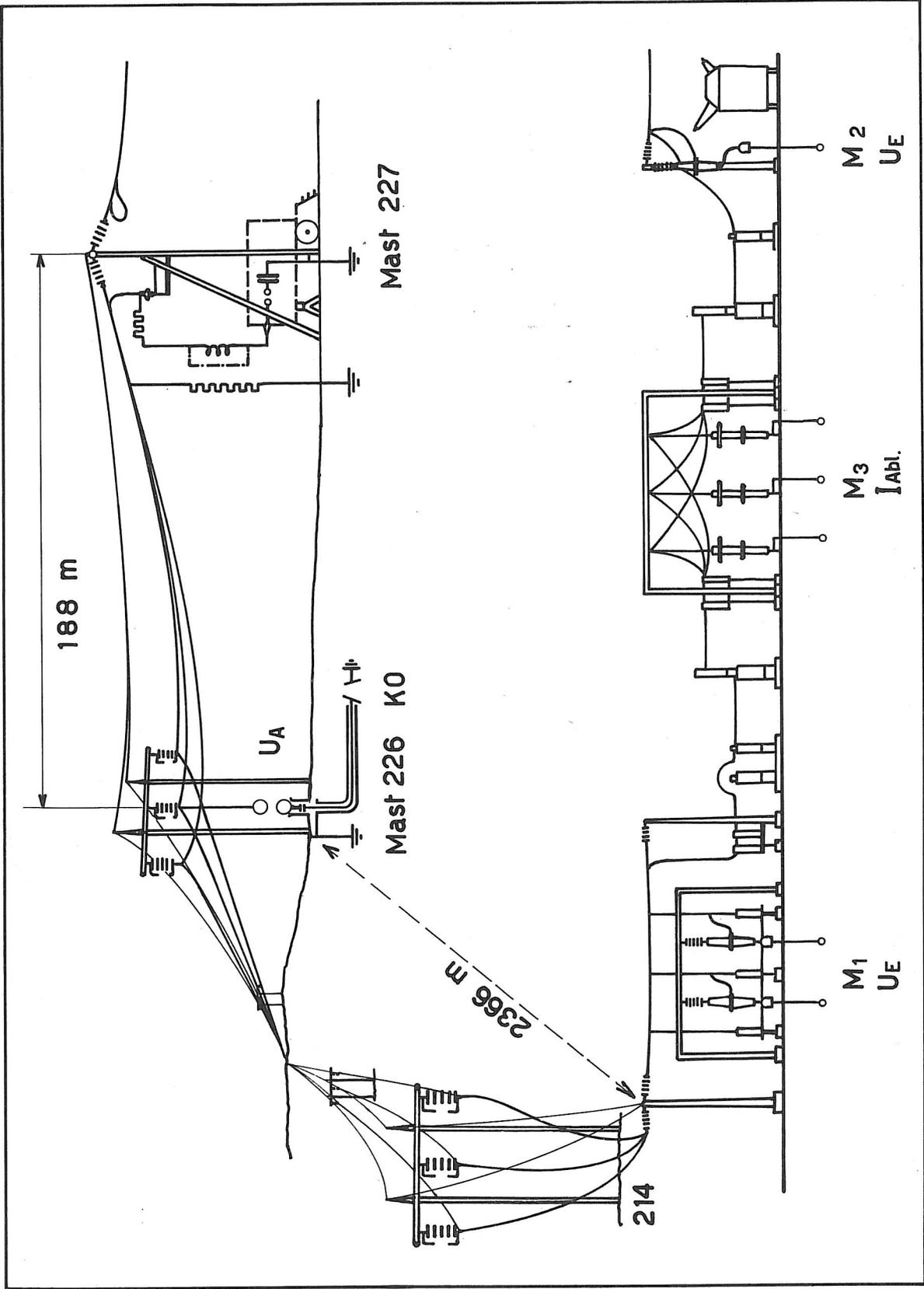


Bild 32. 150 kV-Anlage mit Freileitungs-Schutzstrecke.



Bild 33. 150 kV-Leitung; Abspannmast mit geöffneter Leitung und Schaltbühne, Stoßwagen und Drosselspule.

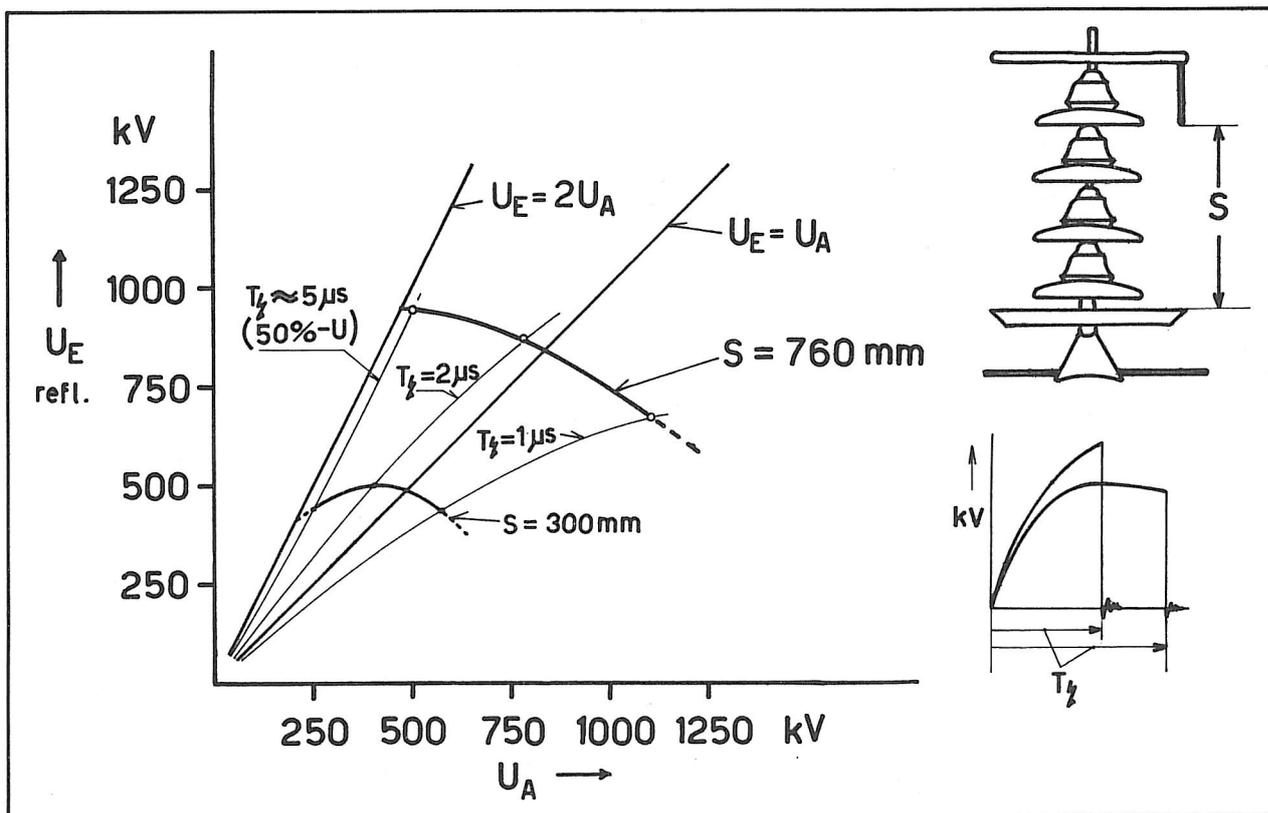


Bild 36. 150 kV-Anlage  
Gesamtergebnis der Überspannungsuntersuchungen.

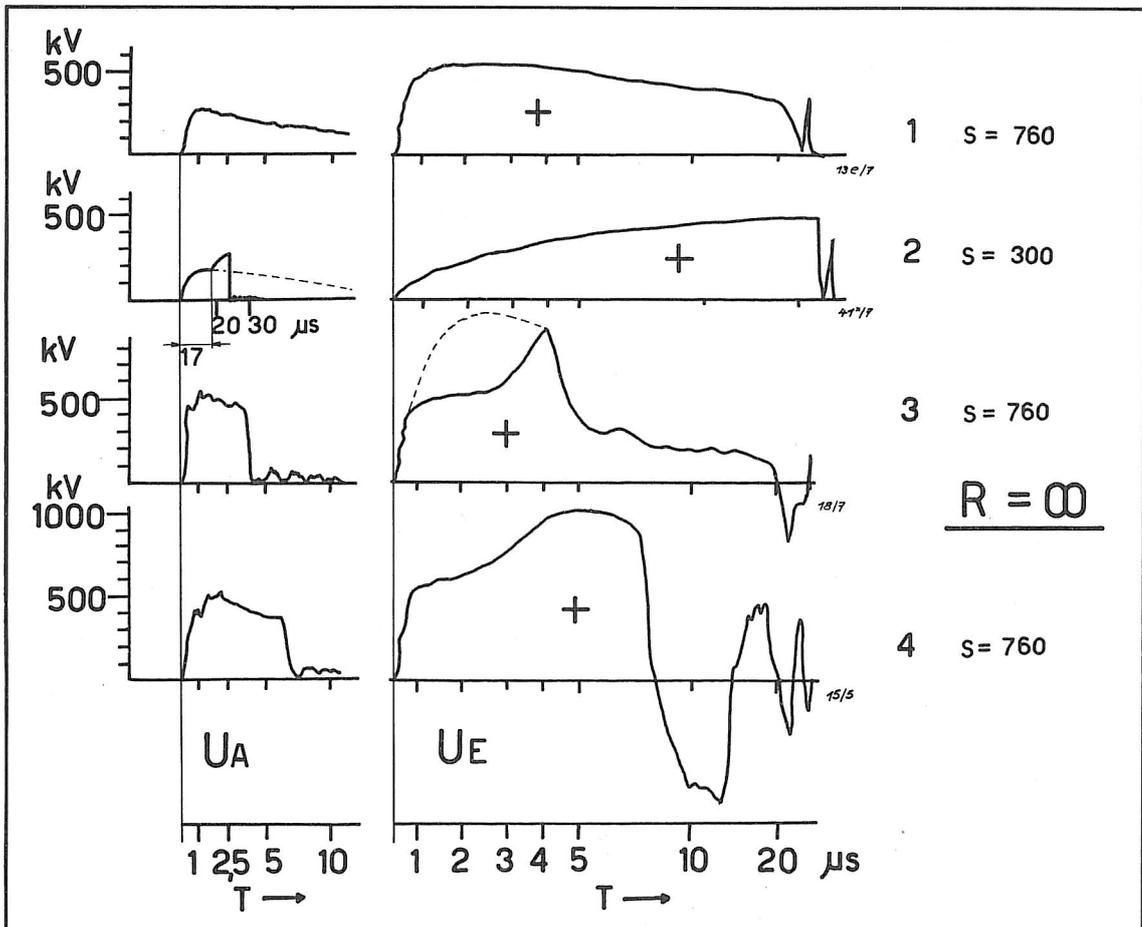
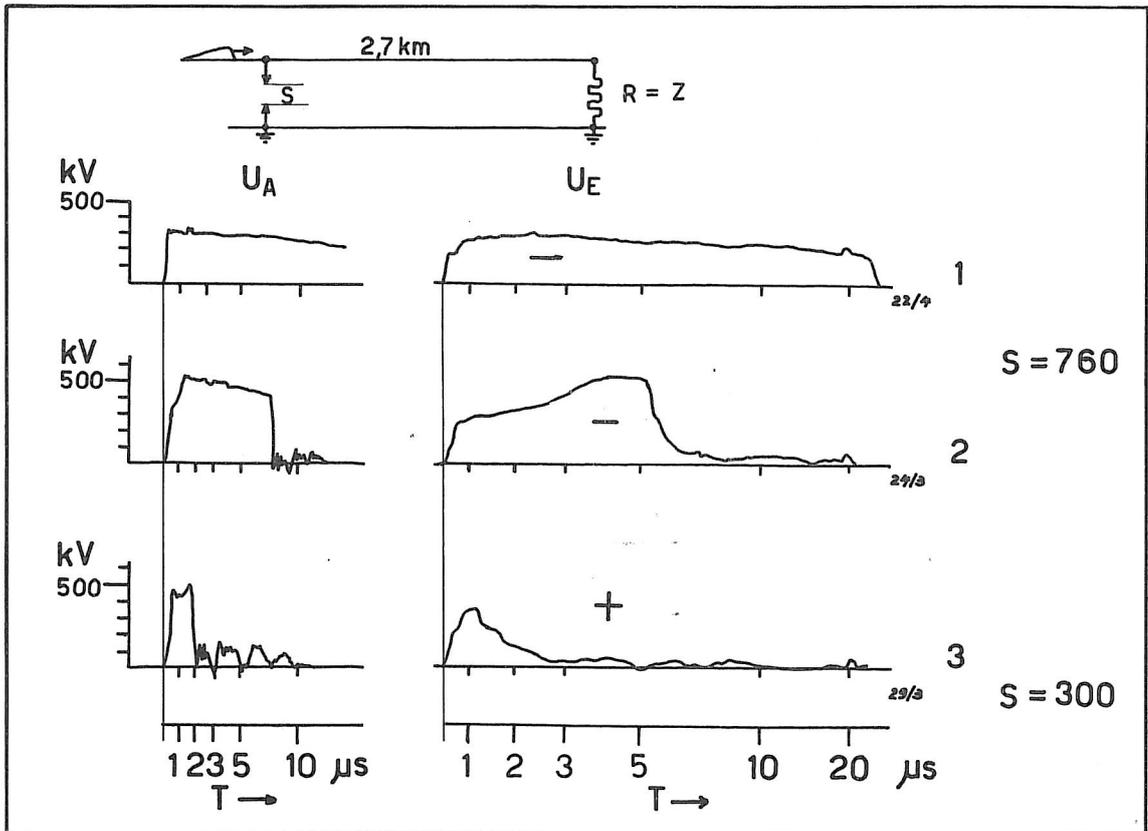


Bild 34 u. 35.  
 150 kV-Anlage  
 Überspannungen bei Schaltung der Anlage als  
 Durchgangsstation (oben),  
 Kopfstation (unten).

## Dämpfung von Wanderwellen

gemessen durch ihre Reflexionen

Stoß zweiphasig  $\pm 110 \dots 200 \text{ kV}$

$15 \mu\text{s}$  Halbwertdauer

Erdung in Puidoux u. Vernayaz

1. Strecke Bois-Noir - Puidoux
2. " " - Vernayaz gemessen in Bois-Noir
3. " " - " " Vernayaz
4. " La Balma - " " " "

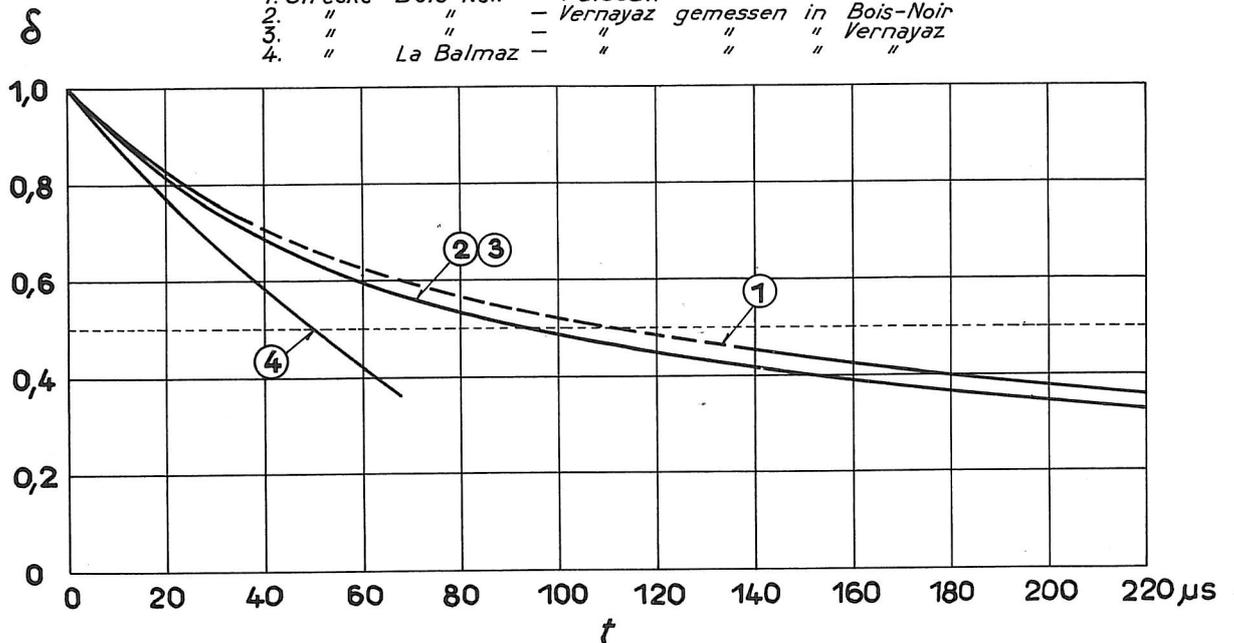


Bild 37. 130 kV-Leitung. Dämpfung einer Welle von  $15 \mu\text{s}$  Halbwertdauer.

## Dämpfung von Wanderwellen

gemessen durch ihre Reflexionen

Stoß zweiphasig  $\pm 110 \text{ kV}$

$53 \mu\text{s}$  Halbwertdauer

Erdung in Puidoux u. Vernayaz

1. Strecke Bois-Noir - Puidoux
2. " " - Vernayaz gemessen in Bois-Noir
3. " " - " " Vernayaz
4. " La Balma - " " " "

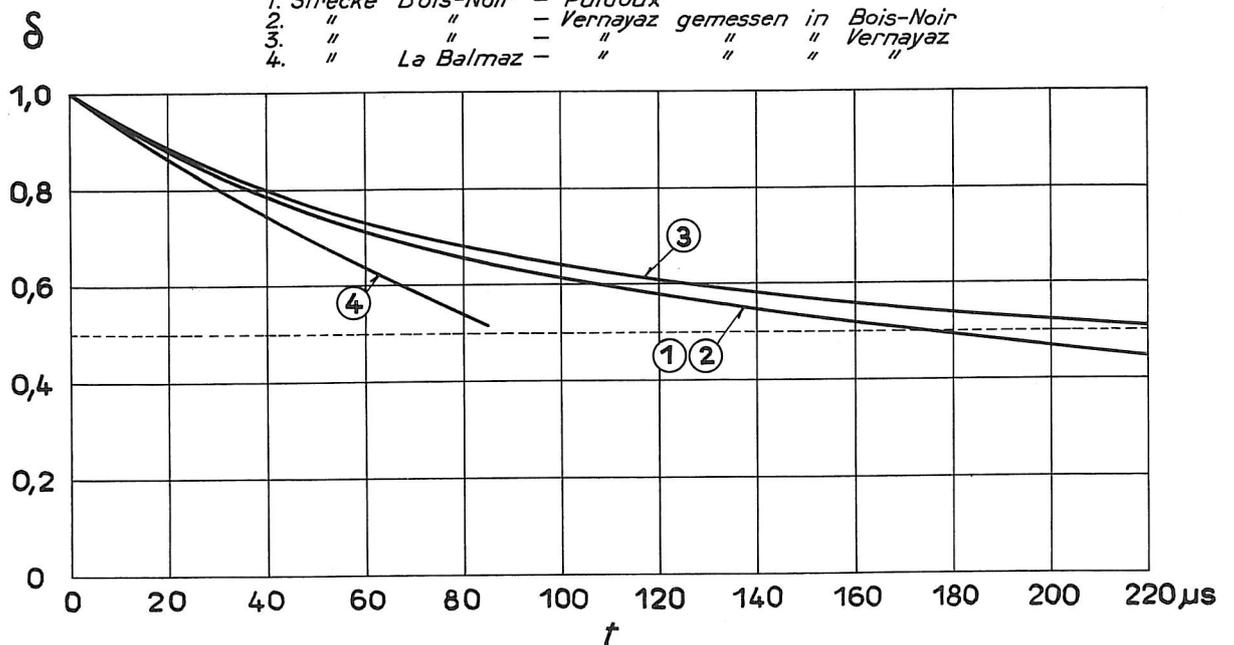


Bild 38. 130 kV-Leitung. Dämpfung einer Welle von  $53 \mu\text{s}$  Halbwertdauer.

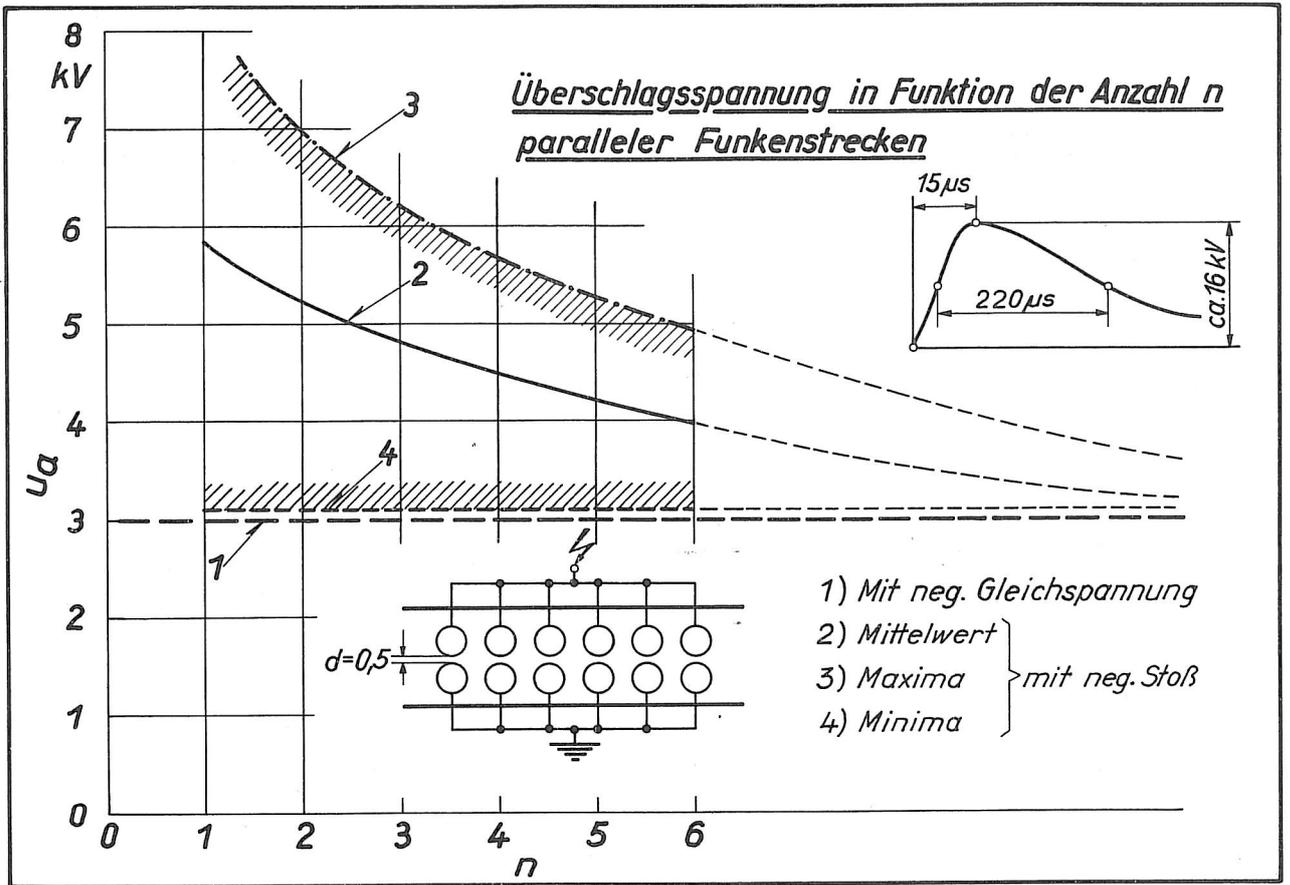


Bild 39.

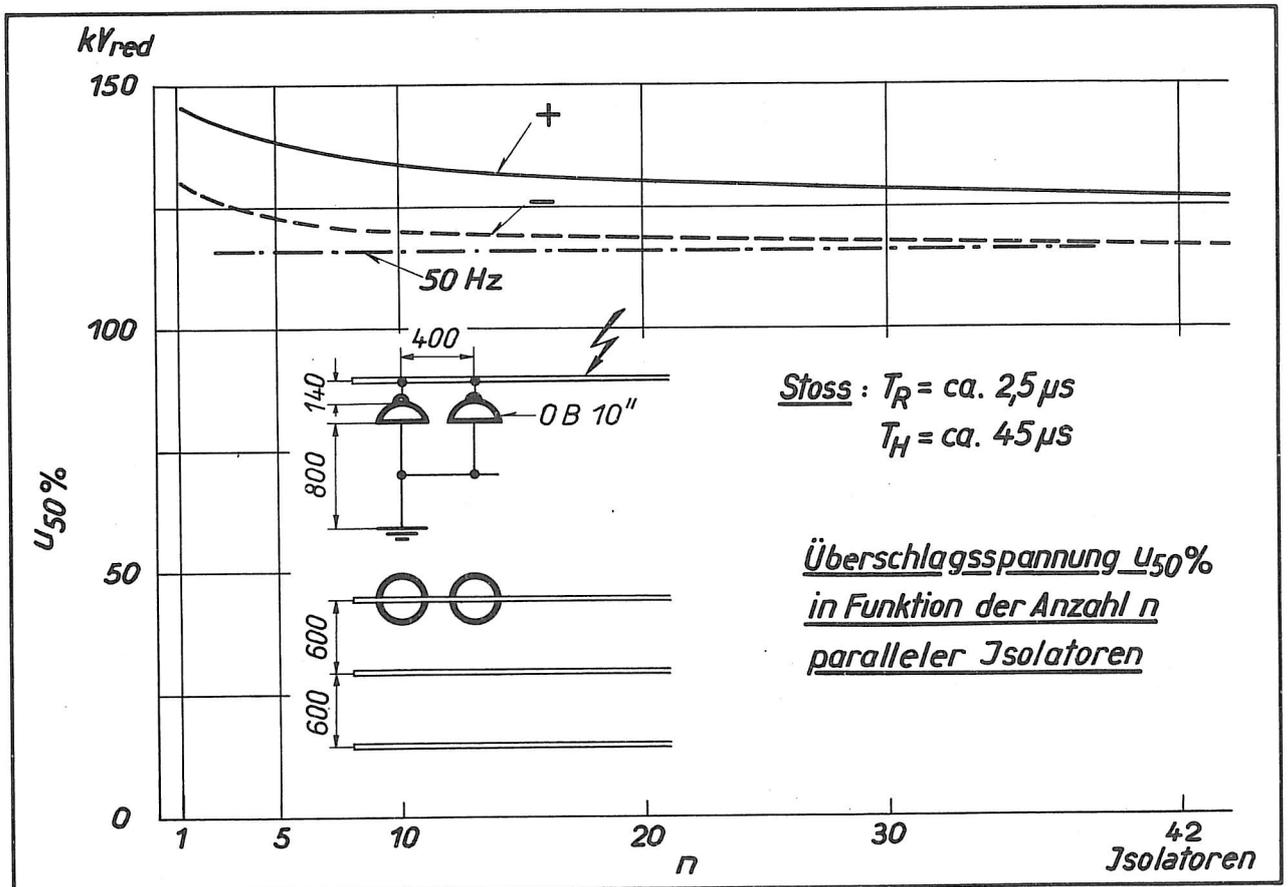


Bild 40.

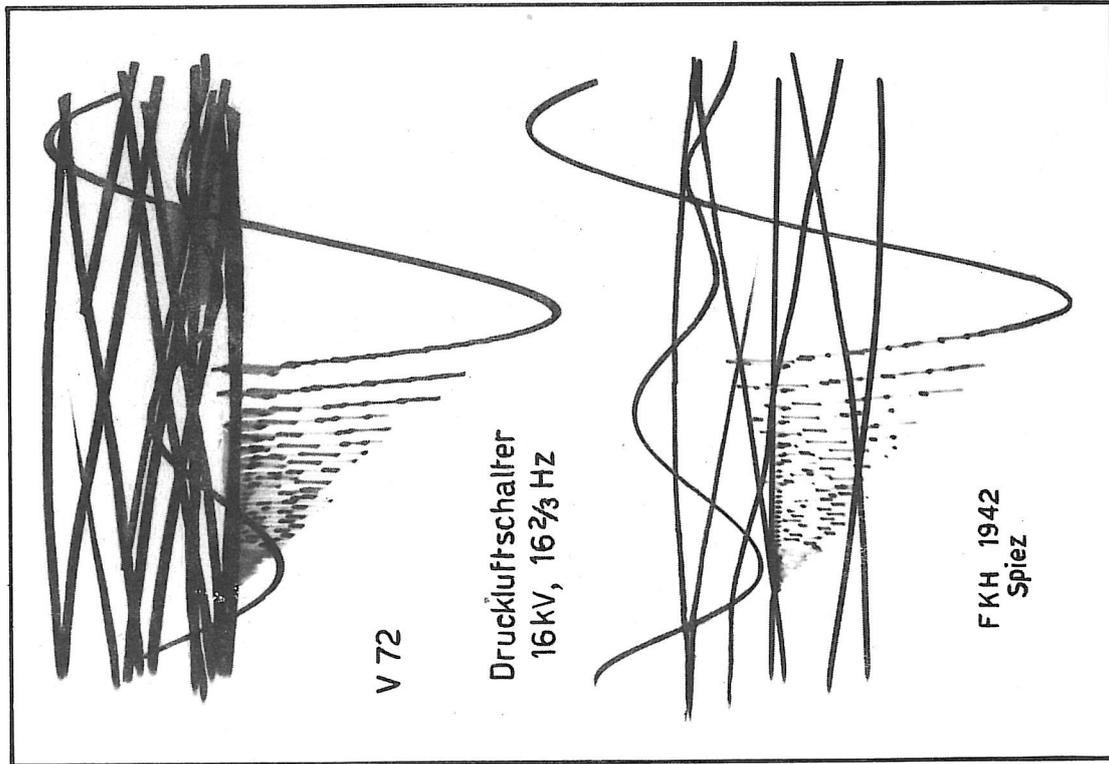


Bild 41. Abschalten eines leerlaufenden Transformators mit einem Druckluftschalter ohne Widerstand.

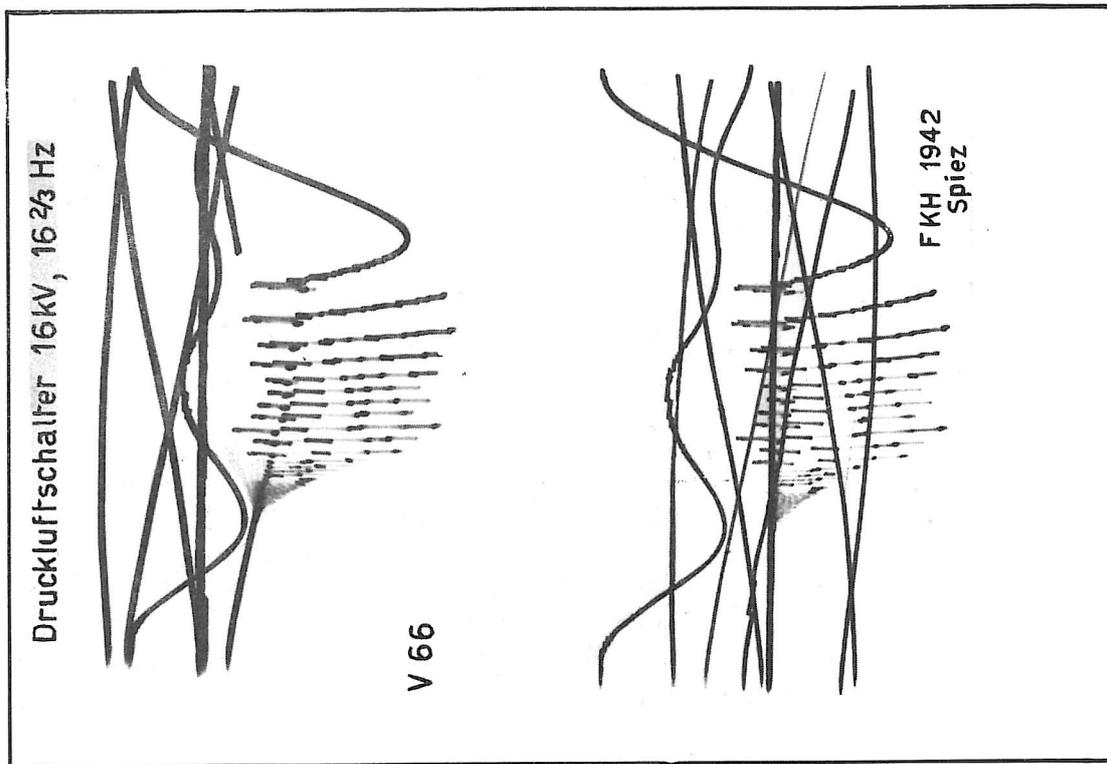


Bild 42. Abschalten eines leerlaufenden Transformators mit einem Druckluftschalter mit Widerstand und Schutzfunkenstrecke.



Fig.	Netzdaten				Schalter			Leerlaufende Leitung			Max. Überspannungsfaktor k		Prinzipschema					
	Ort	Netz	Nullpunkt geerdet oder isoliert	Frequenz Hz	Kurzschlussleistung MVA	Nennspannung kV	Typ	Parallelwiderstand Ω	Abschaltleistung MVA	Baujahr	Speisende Transformatoren	Betriebsspannung kV		Länge km	Leerstrom A	Anzahl Abschaltungen	Speise- und leitungsseitig	Graphische Darstellung: ◊ speise- ▲ leitungsseitig
16	Siebnen	Leitung Töss Grynau	isoliert	50		150	Kesselschalter	—	600	1925	16,5 MVA 50/150 kV	140	48		7	2,8 4,5	2,2 2,3	
17	Bickligen	Leitung Bern	direkt	50		150	Kesselschalter Ölstrahlschalter	—	800 1500	1930 1940	3 x 15 MVA 50/150 kV	138	24,5		6	2,3	2,3 2,4	
18	Coulee Dam		direkt	60	6800	220	Druckluftschalter	variabler Widerstand	6000	1951		235 / √3	160	62 115 156	4	1,0	1,0	
19	Fontenay		direkt	50	2000	220	Druckluftschalter	mit und ohne Parallelwiderstand	3500/5000	1945/1950		220	136 314 474 828	45 116 195 412	4	1,1 1,2 1,3 1,6	1,1 1,2 1,3 1,6	
20	Falou		direkt	50	2000	220	Ölarmers Schalter	—	5000			220	19,5 143 240	8 55 92	2	2,2 2,1 2,0	2,2 2,1 2,0	
21	Fontenay		direkt	50		220	Ölstrahlschalter	—	5000			220	18 214 420	3,5 63 102	1	— 1,65 1,85	1,10 1,80 2,05	
22	St. Johann	Leitung Malhinz	Löschspule	16 <sup>2</sup> /3		110	Ölstrahlschalter	—				110	35,7 15,7	60...78	8	1,6	1,6	
23	Stadsforsen		direkt Löschspule direkt Löschspule	50	320	220	Druckluftschalter	variabler Widerstand	5000	1951	60 MVA 9,8/132/220 kV	220	72 480	27 36/0 190 280/0	4	1,0 1,9 1,4 1,3 1,2 1,6 2,0 2,0	1,1 1,1 1,0 1,2 1,2 1,6 2,0 2,0	

Legende der graphischen Darstellung:  
min. Wert max. Wert   
arithmetischer Mittelwert

4)  $k = \frac{I_{max}}{220 \sqrt{2}}$ ; mit einer Phase geerdet  
5) mit Serie-Kondensator, Mitte Leitung  
6) mit Serie-Kondensator, mit einer Phase geerdet  
7) ohne Serie-Kondensator, mit einer Phase geerdet

1) 1 Leiter von 160 km, einphasige Versuche  
2) 2 Leiter von 160 km, einphasige Versuche  
3) 3 Leiter von 160 km, einphasige Versuche

Bild 44. Überspannungen bei Abschaltversuchen bei leerlaufender Leitungen in Hochspannungsnetzen