

Öl- und gasisolierte Durchführungen - ein wichtiges Bauteil der Wandler

-Ing. HTL H.-J. Jeske, Emil Haefely & Cie AG, Basel, Technik und Fertigung Durchführungen

Inhalt

- 1. Durchführungs- Vielfalt**
- 2. Entwicklung und Bauarten**
- 3. Prinzipien und Unterschiede der elektrischen Feldsteuerung**
- 4. Allgemeine Gegenüberstellung**
- 5. Durchführungen in den verschiedenen Wandlerkonstruktionen**
- 6. Produktions-Einblicke**
- 7. Zuverlässigkeit und Qualitätsmerkmale**
- 8. Lebensdauer**

1. Durchführungen: Begriffserklärung im Steno-styl - Strom isoliert durch Wand führen -

Wie so oft verstecken sich hinter einfachen Worten komplexe und vielseitige Dinge.

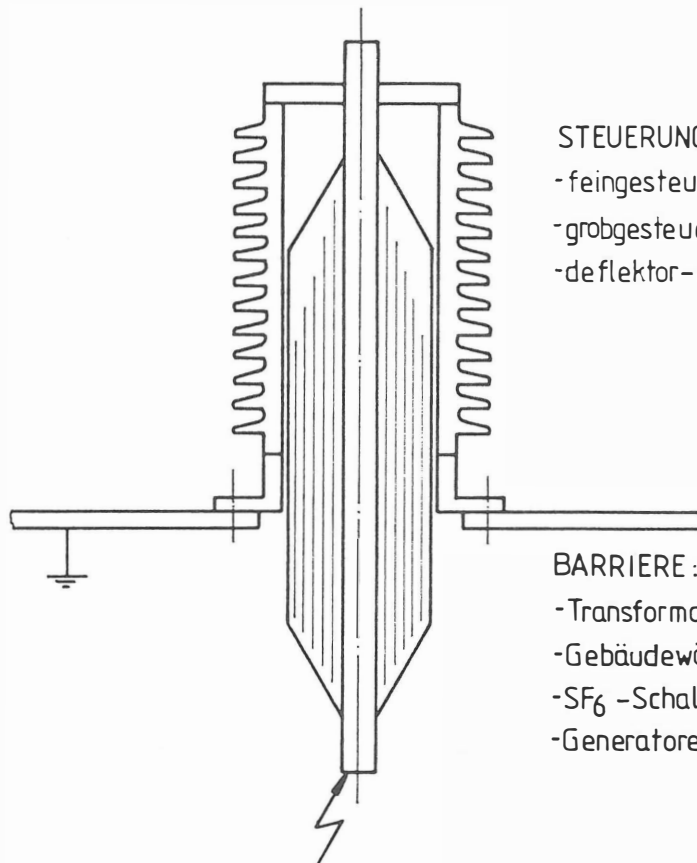
Bei den Durchführungen ist dies die vielseitige Anwendung, Isoliermaterialien Ströme, Spannungen und Medien.

MEDIUM 1:

- Luft
- Öl
- SF₆-Gas

MEDIUM 2:

- Luft
- Öl
- SF₆-Gas
- Stickstoff



DIELEKTRIKUM:

- ölprägniertes Papier
- harzprägniertes Papier
- Hartpapier
- SF₆ - Gas
- Kunststoff - Folien

STEUERUNG:

- feingesteuert
- grobgesteuert
- deflektor-gesteuert

BARRIERE:

- Transformatortank
- Gebäudewände
- SF₆ - Schaltanlagen
- Generatoren - Gehäuse

STROMLEITER:

- Cu-Stäbe
- Cu-Kabel
- Al -Rohre
- etc.

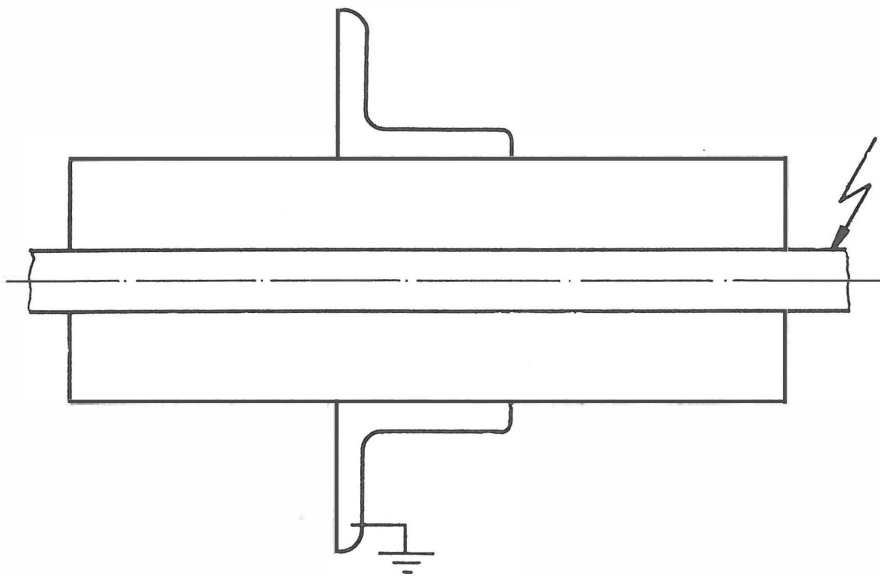
Ströme von 100 - 40 000 A

Spannungen von 15 - 765 KV

2. Entwicklungen und Bauarten

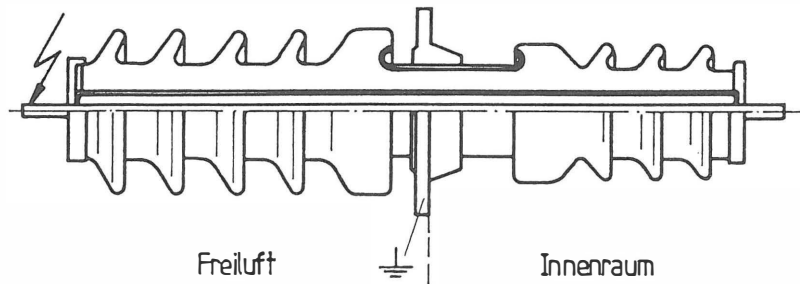
Hier sollen nur einige Hochspannungsdurchführungen so vorgestellt werden, dass wir möglichst rasch zu den heute üblichen Bauarten für Messwandler kommen

a) Einfache Rohrdurchführungen



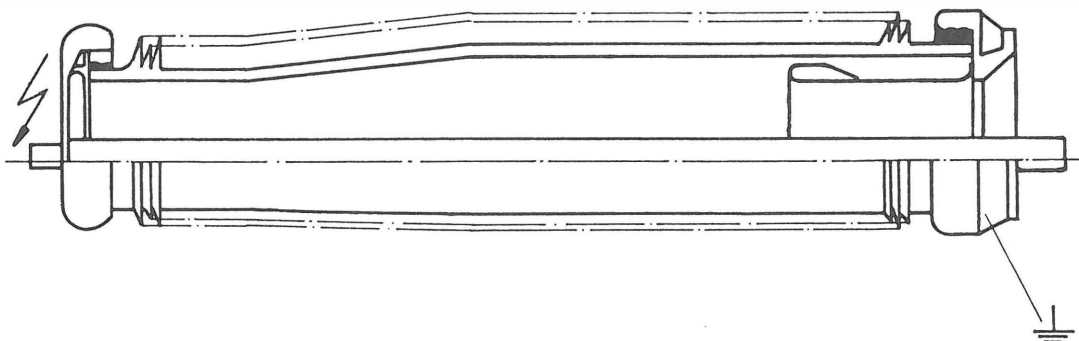
Alle Rohrdurchführungen werden am scharfkantigen Flanschrand stark auf Durchschlag und Gleit-Überschlag beansprucht.

b) Rohrdurchführungen mit Flanschulst und innerem Metallbelag



Der Flanschrand wird durch den metallisierten Erdbelag mit integrierten Radien verbessert. Im Bereich des möglichen Gleitfunkenesinsatzes reduziert der grosse Durchmesser des Flanschulstes die Oberflächenfeldstärke. Da auch der Innendurchmesser des Isolators metallisiert und an Hochspannung liegt, ergibt sich ein Einstoffdielektrikum und keine Reihenschaltung z.B. von Luft und Porzellan.

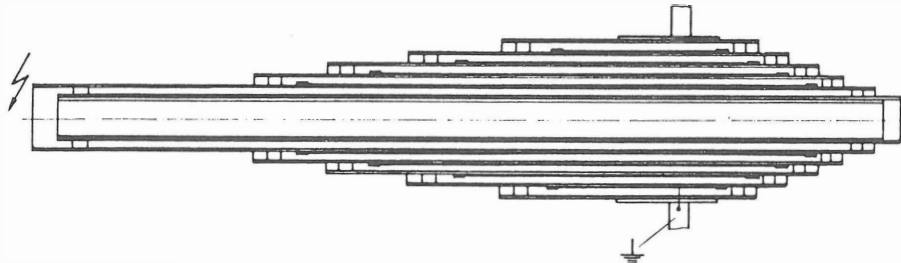
c) Deflektor-Durchführung



Der metallisierte Erdbelag aus b) kann durch einen Metall-Deflektor ersetzt werden und in das Isoliermedium eingebaut werden. Dadurch wird die Konstruktion flexibler, leichter herstellbar und besser optimierbar.

d) grobgesteuerte kapazitive Durchführung

Bei konsequenter Weiterführung der vorausgehenden Durchführungen können Deflektoren innerhalb von Isoliermedien **einzel**n oder mehrere ineinander gebaut werden. Letzteres unterteilt die Spannungen im umgekehrten Verhältnis der Kapazitäten - und die "kapazitiv" gesteuerte Durchführung ist geboren.



Die Lagenränder sind heute meist kreisförmige Ringe mit Halbleiter-Band eingewickelt. Z.B. für 245 kV werden zwischen 4-8 Steuerbeläge verwendet.

e) feingesteuerte kapazitive Durchführung



Feingesteuerte Durchführungen bringen die beste axiale und radiale Feldsteuerung und damit minimale Abmessungen und grosse Sicherheit.

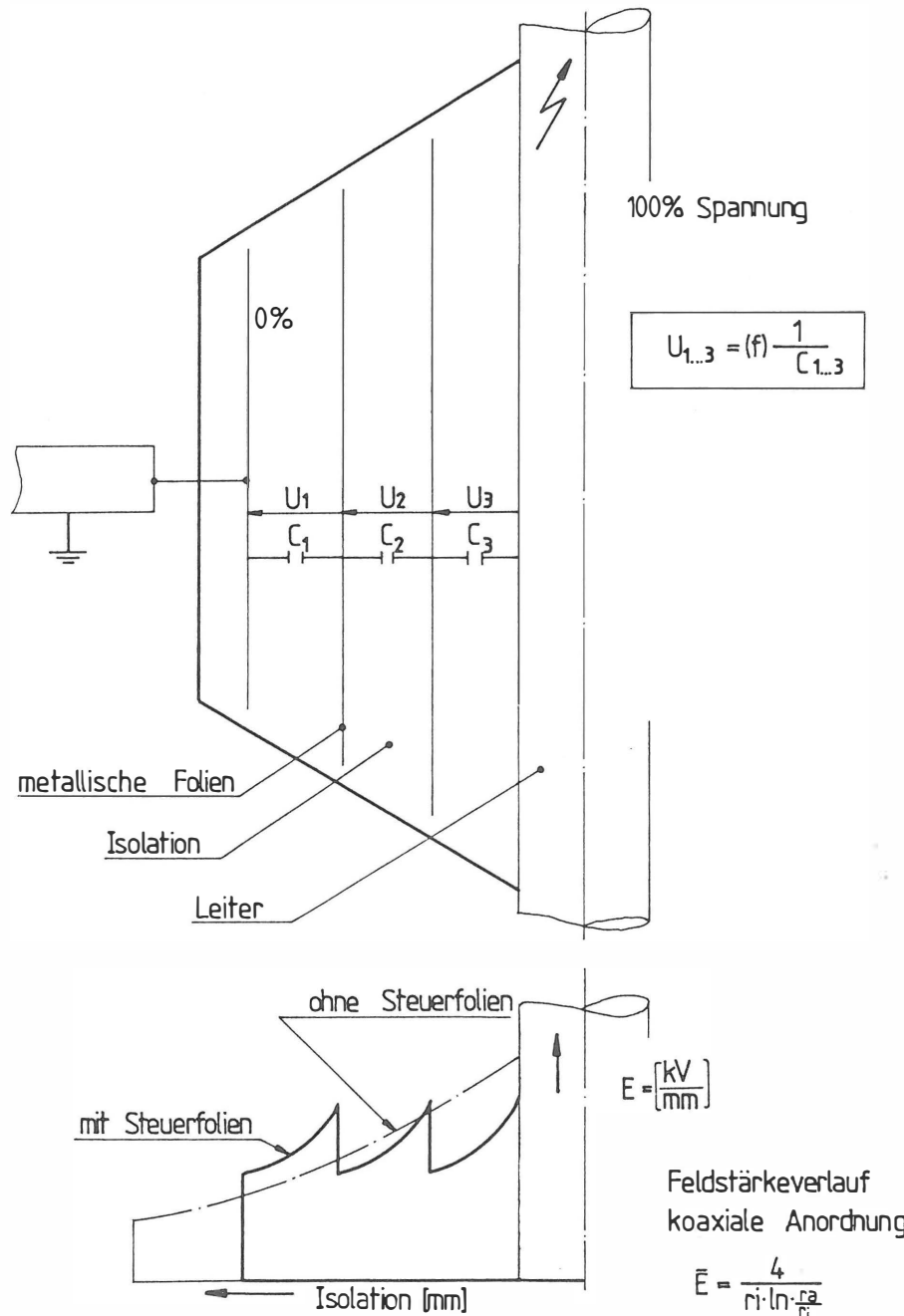
Z. B. für 245 kV werden zwischen 40-60 Steuerbeläge verwendet.,

In öl- und gasisolierten Wandlern werden heute erfolgreich diese 3 verschiedenen Durchführungs-Bauarten eingesetzt.

1. Deflektor-Durchführung
2. grobgesteuerte Kondensatordurchführung
3. feingesteuerte Kondensatordurchführung

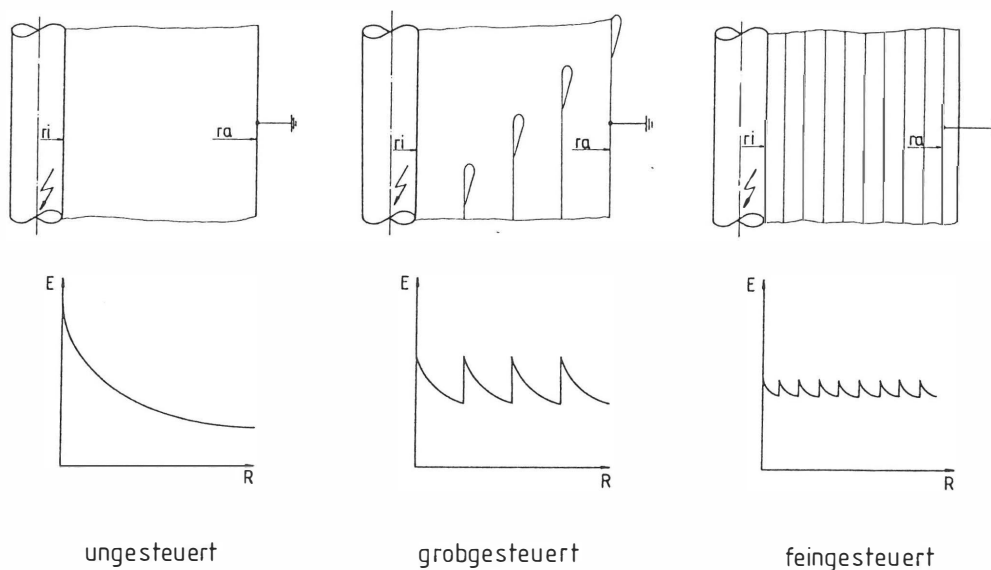
3. Prinzipien und Unterschiede der elektrischen Feldsteuerungen

a) Prinzip der kapazitiven Steuerung



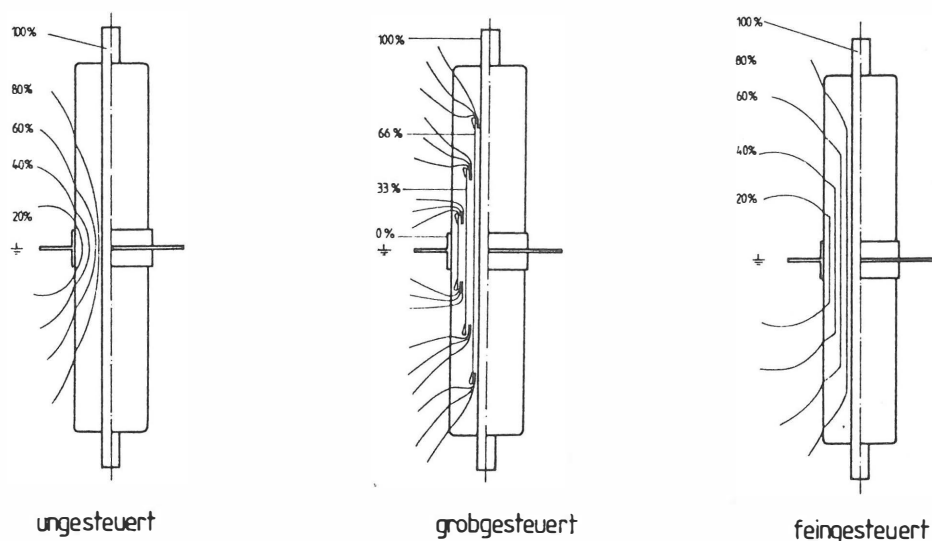
Nach diesen Grundüberlegungen können die 3 üblichen Steuerungs-Arten auf ihre axiale und radiale Feldverteilung angesehen werden.

b) Radialer Verlauf



Da die maximale Feldstärke in der Isolation stark mitentscheidend ist für TE-Einsatz und Alterung, wird klar ersichtlich, dass ungesteuerte Durchführungen sehr viel grössere Isolierdicken haben müssen als feingesteuerte. Grobgesteuerte Durchführungen liegen dazwischen.

c) Axialer Verlauf



Der axiale Feldverlauf zeigt auch wieder bei einer feingesteuerten Durchführung die optimale Verteilung. Dadurch entsteht sehr gutes Verhalten unter allen äusseren Bedingungen, z.B. Regen und Verschmutzung. Auch der Isolator Durchmesser kann klein bleiben, es braucht keine grossen Durchmesser um die axiale Oberflächen-Feldstärken herabzusetzen.

4. Allgemeine Gegenüberstellung

In Tabelle 1 sind noch einige andere Vergleiche sowie Vorteile und Nachteile zusammengestellt.

	Deflektor-Dfg.	Grobgest. Kond.-Dfg.	Feingest. Kond.- Dfg.
Haupteinsatz	- Giessharz-Wandler - gasisierte Wandler	- Öl-Pap. Isol. Wandler	- Öl-Pap. Isol. Wandler
Spannungs- bereich	- bis 420 kV	- bis 765 kV	- bis 765 kV
Vorteile	- einfache Montage - robuste Konstruktion - geringe TE-Streuung durch genaue Fertigung	- herstellbar mit einfachen Maschinen	- CNC-steuerbare Herstellung - genaue Fertigung und damit geringe TE- Streuung - kleine Isolator-Durchm. - gut berechenbar - sehr gute axiale und radiale Spannungs- verteilung
Nachteile	- sehr grosse Isolatordurchmesser - örtliche axiale und radiale hohe Feldstärken	- Isolatordurchmesser gross - örtliche axiale und radiale hohe Feld- stärken - TE-Einsatz streut häufiger in gleichen Serien wegen Fertigungsstreuung	- aufwendige (teure) Wickelmaschine notwendig
Kosten- betrachtungen	- bei hohen Spannungen übertrifft der Isolator- preis den billigeren Deflektor - bei kleinen Spannungen bis ca. 110kV und bei Gasisolation rentabel	- zeitaufwendige Fertigung = teuer	- hoher Maschinen- Kostensatz wird durch kurze Fertigungszeit kompensiert

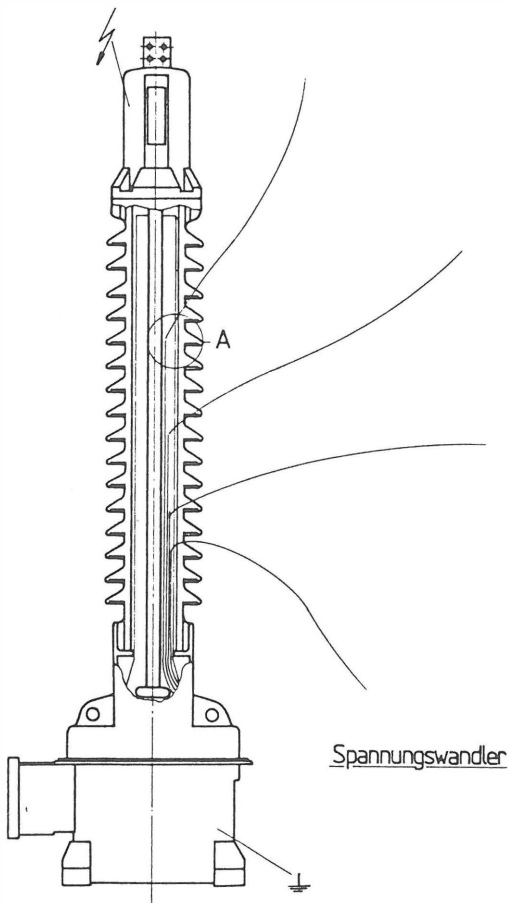
Tabelle 1: Allgemeine Gegenüberstellung

5. Durchführungen in den verschiedenen Wandlerkonstruktionen

Mit den vorangegangenen Erläuterungen haben wir uns in die Hochspannungs-anwendung d.h. Um $> 69 \text{ kV}$ begeben. Es ist auch klar, dass fast jede induktive Messwandler-Bauart eine Durchführung bzw. einen Durchführungsteil braucht, um die Ströme isoliert von Hochspannung gegen Erde zu führen. Wie schon früher ausgeführt, werden dazu hauptsächlich 3 Durchführungsbauarten eingesetzt. Nachfolgend einige Ausführungsbeispiele in denen **feingesteuerte kapazitive Öl-Papier-Durchführungen** dargestellt sind.

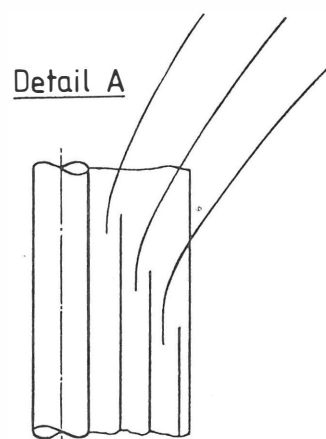
5.1 Ölisolierte Wandler

a) Spannungs- und Stromwandler in Topf-Bauweise

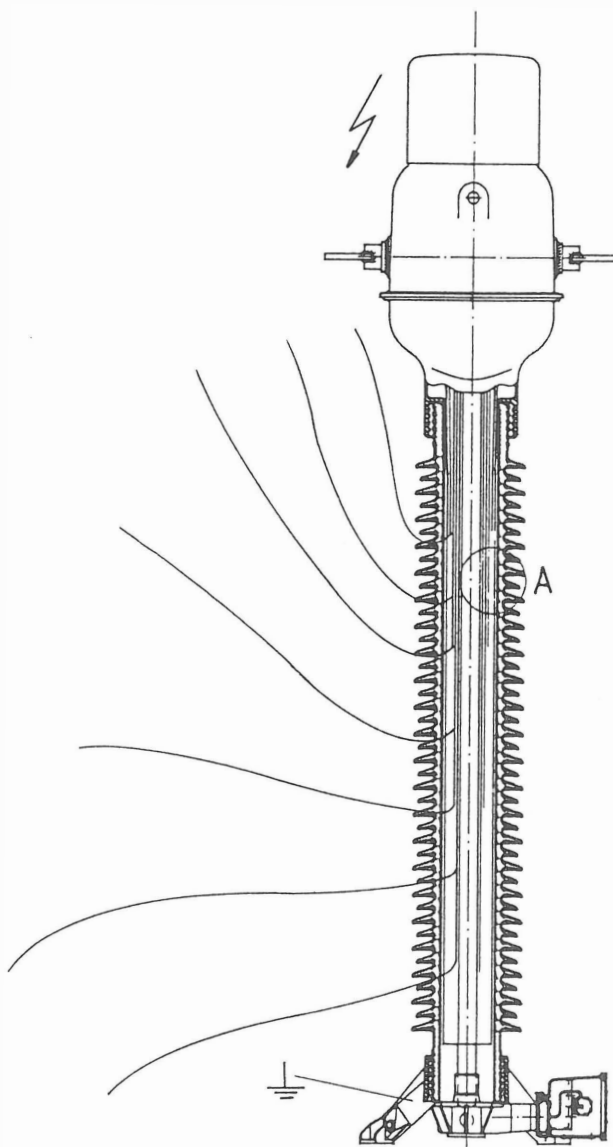


Hauptmerkmal für die Bauart ist:

- dass die Hochspannung im Innern der Durchführung anliegt,
- die äusserste Steuerfolie ist auf Erde und fast immer verbunden über ein Abschirmgitter inkl. Belag zum Gehäuse und Erde,
- die Equipotentiallinien an den Lagenrändern "fließen" weicher aus der Steuerung heraus, d.h. die Feldstärken an den Lagenrändern müssen weniger beachtet werden bei der Dimensionierung.



b) **Stromwandler in Kopfbauweise**

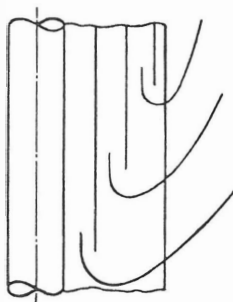


Hier ist interessant, dass:

- die Hochspannung am Aussendurchmesser der Durchführung anliegt,
- die äusserste Steuerfolie ist auf Hochspannung, angelenkt über Schirmgitter inkl. Belag an das Gehäuse und die Hochspannung angelenkt,
- deutlich sichtbar ist, wie die Equipotentiallinien an den Steuerfolienrändern stärker abbiegen, so dass hier die Feldstärken beim Design anders dimensioniert werden müssen.

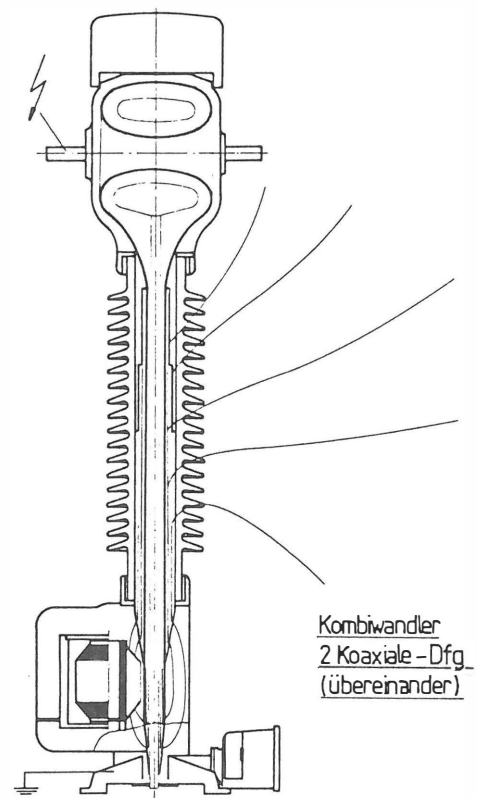
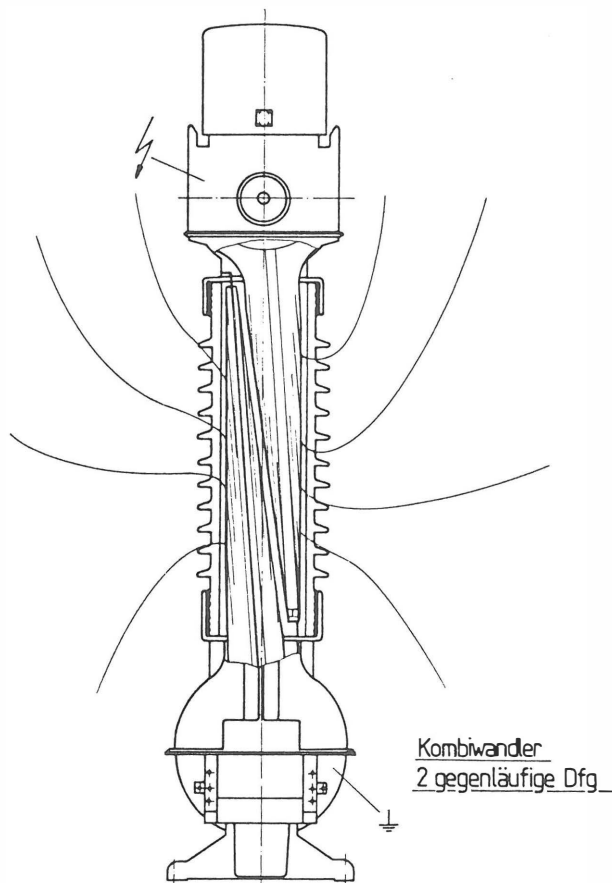
Stromwandler

Detail A



c) **Kombiwandler**

Der Kombiwandler in heute häufiger Bauart hat einen Kopfstromwandler und einen Topfspannungswandler. Wenn die beiden vorhergehenden Ausführungen nebeneinander gestellt werden, können mit geschickter Anordnung und Dimensionierung die beiden Durchführungen sehr dicht zusammengeführt werden. Ziel ist, in der axialen Richtung auf jeder Höhe das möglichst gleiche Spannungsniveau nebeneinander zu haben. Eine interessante Variante ist, die Durchführungen aufeinander zu wickeln, was Montage- und Platzvorteile bringt.



5.2 Gasisolierte Wandler

Diese Wandler benutzen meist das Isoliergas SF₆ als Ersatz für eine Oelpapier- oder Giessharzisolierung. Dadurch bietet sich ein Durchführungsteil in der Deflektor-Technik an, so dass der Vorteil eine

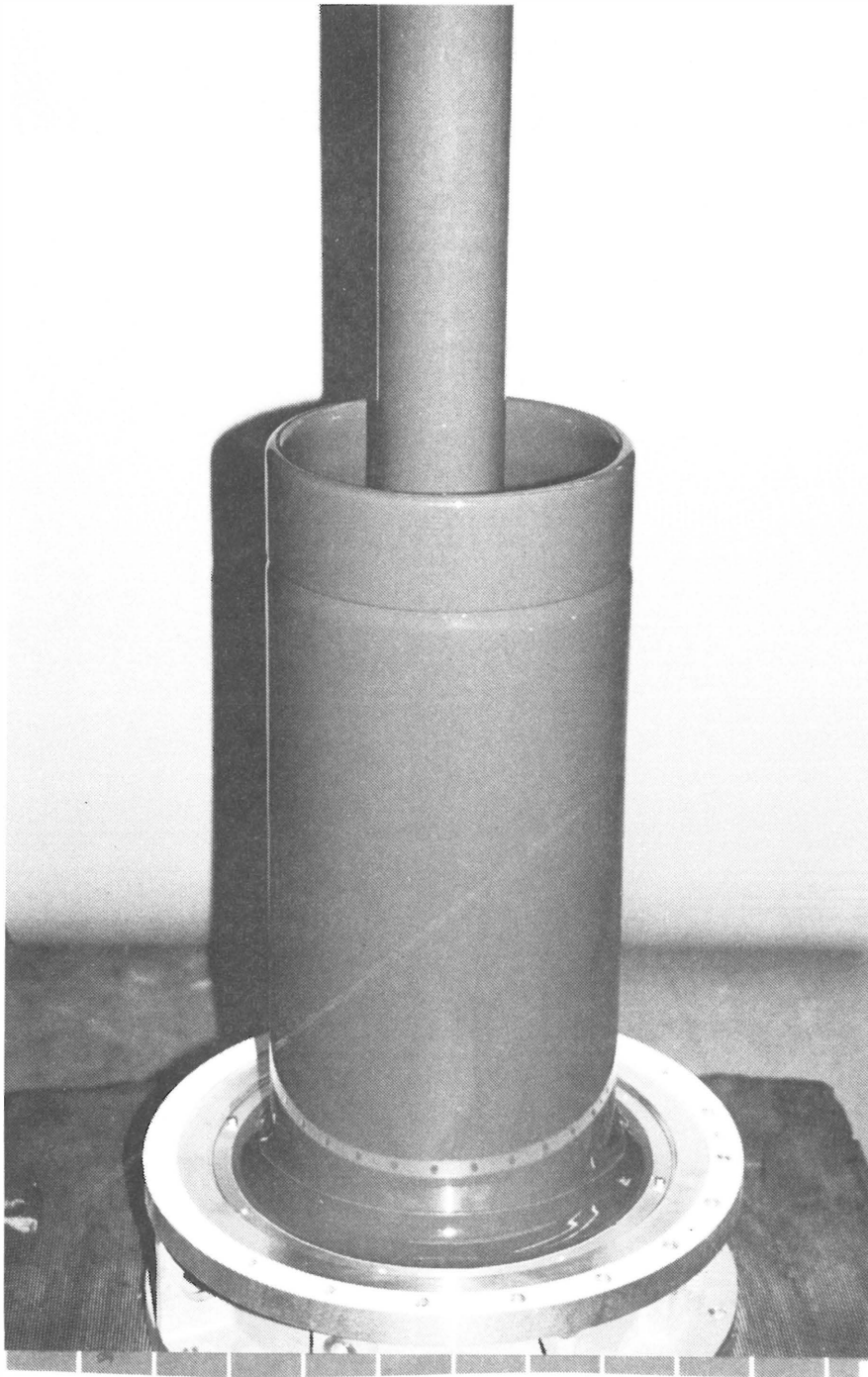
- nicht alternden Isolation
- selbstheilenden Isolation nach einem energiearmen Durchschlag erhalten bleibt.

Meist muss dies aber mit grossen Isolatordurchmessern erkaufte werden, um die Feldstärken am Übergang Isolator/Luft zu reduzieren. Bei hohen Spannungen ≥ 420 kV werden die Isolatorkosten so hoch, dass folienisolierte, feingesteuertekapazitive Durchführungen entwickelt wurden.

Allerdings sind die Materialkosten sowie komplizierte Herstelltechnik wegen schmaler Folienbreiten - woraus ein Wickeln von vielen parallelen Bahnen notwendig wird - so hoch, dass eine Wirtschaftlichkeit schwer zu erreichen ist. Neueste Entwicklungen, gewickelt aus einer Folienbahn kleiner Breite und spezieller Wickeltechnik, könnten eine Wirtschaftlichkeit erreichen.

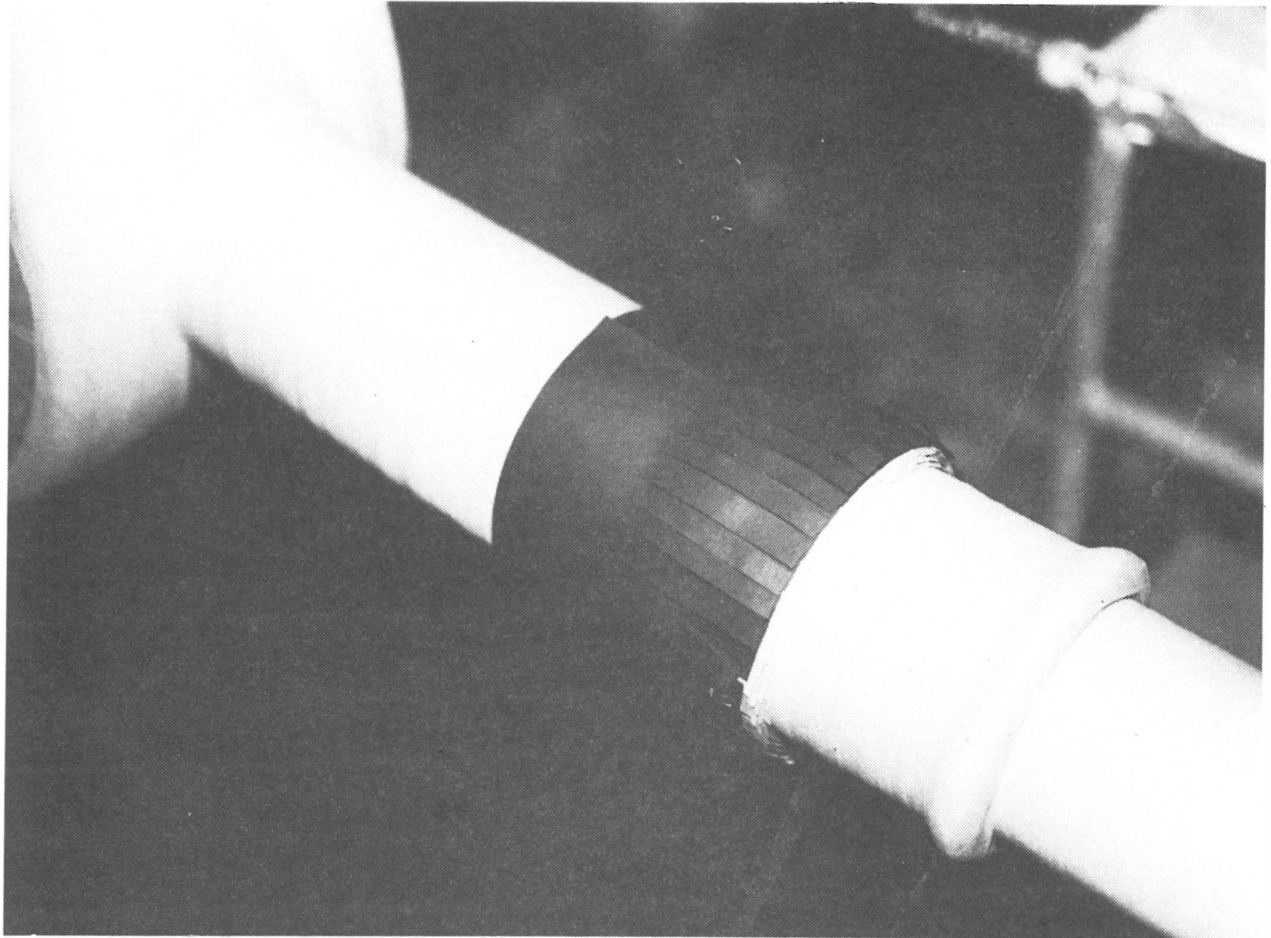
6. Produktions-Einblicke

a) Deflektorsteuerung bei SF6-Wandlern oder Durchführung



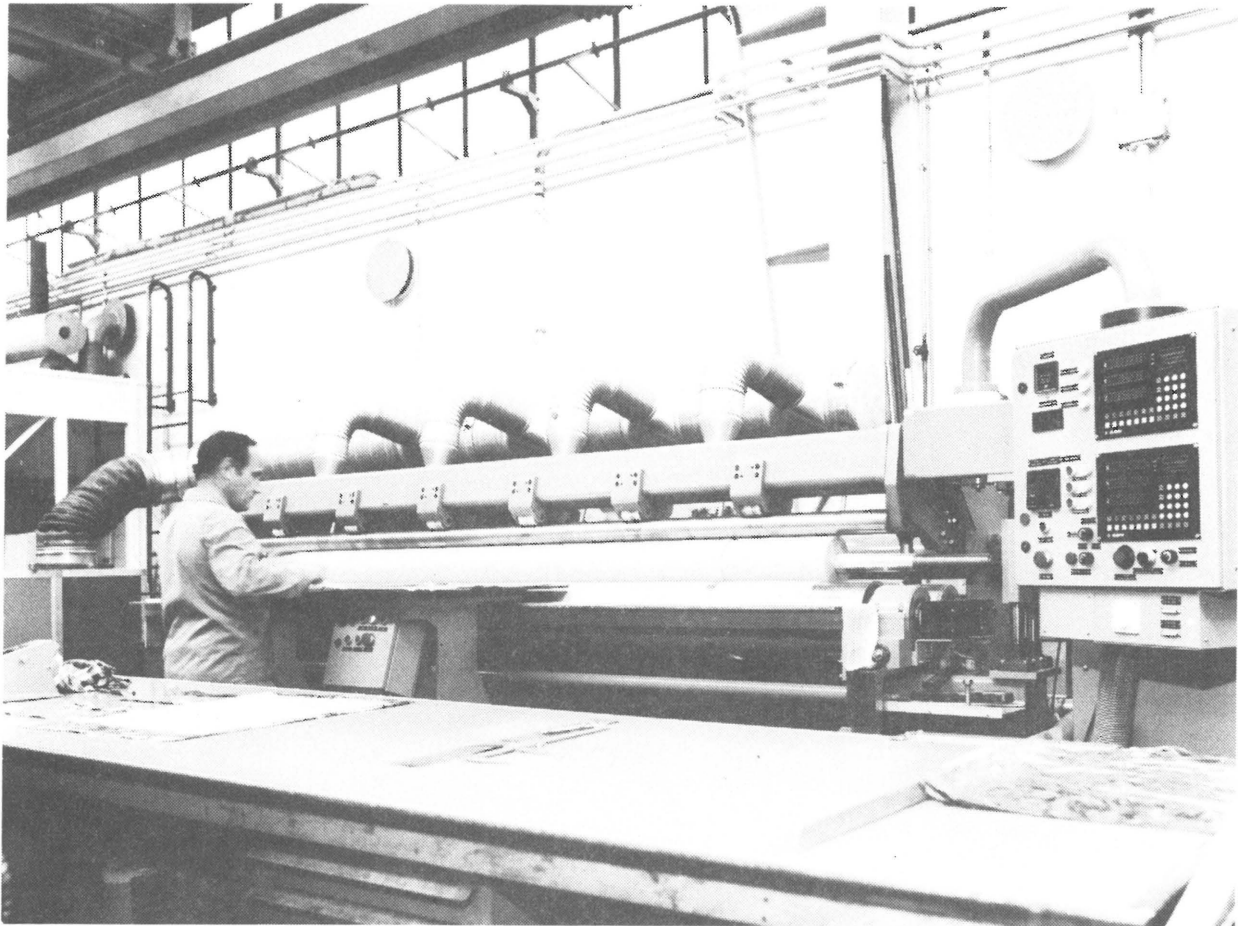
Die Deflektoren sind meistens aus gedrücktem Alu und mit einer Lackierung versehen, die Verbesserungen der elektrischen Festigkeit bringen.

b) **Grobgesteuerte Öl-Papier-Kondensator-Durchführung an einem Stromwandler**



Dies ist häufig eine gemischte Isolation aus Hand- und Maschinenarbeit. Die verarbeiteten Papiere sind schmale Bänder die maschinell überlappt gewickelt werden. Das Befestigen, Anlenken und gute Einbetten der Elektroden ist **reine Handarbeit** und das eigentliche Know-how dieser Fertigung.

c) Feingesteuerte Öl-Papier oder Isolierfolien-Durchführung für Wandler

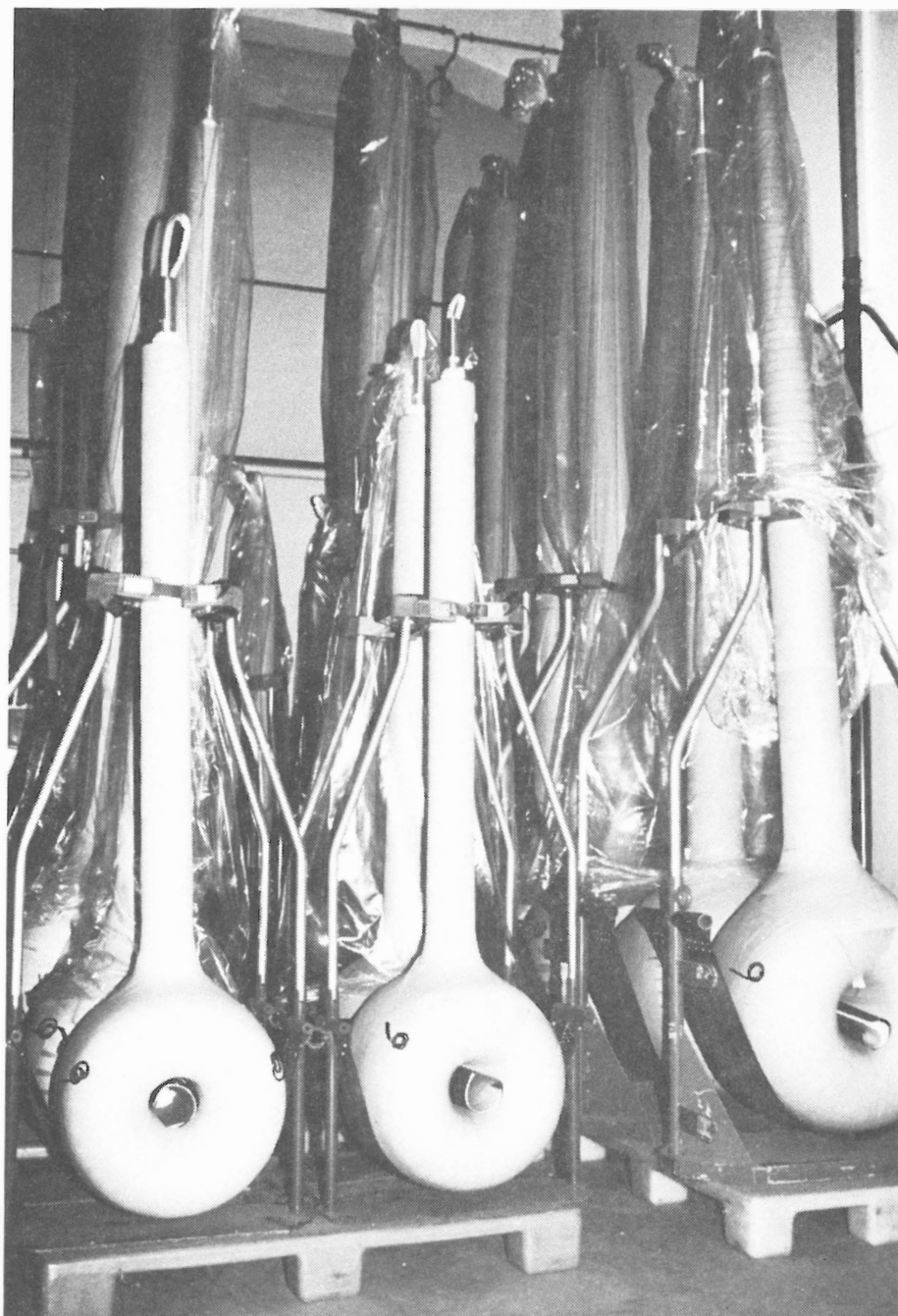


Dies ist eine fast ausschliessliche Maschinenarbeit die CNC-gesteuert sein kann. Papier wird dabei aus breiten endlosen Bahnen gewickelt. Durch heisse Wickelwalzen und hohe Walzendrucke auf das Papier wird die Alufolie in das Papier eingewälzt, die Papierdicke dabei um 20% gestreckt/gepresst und eine Vortrocknung des Papiers erreicht.

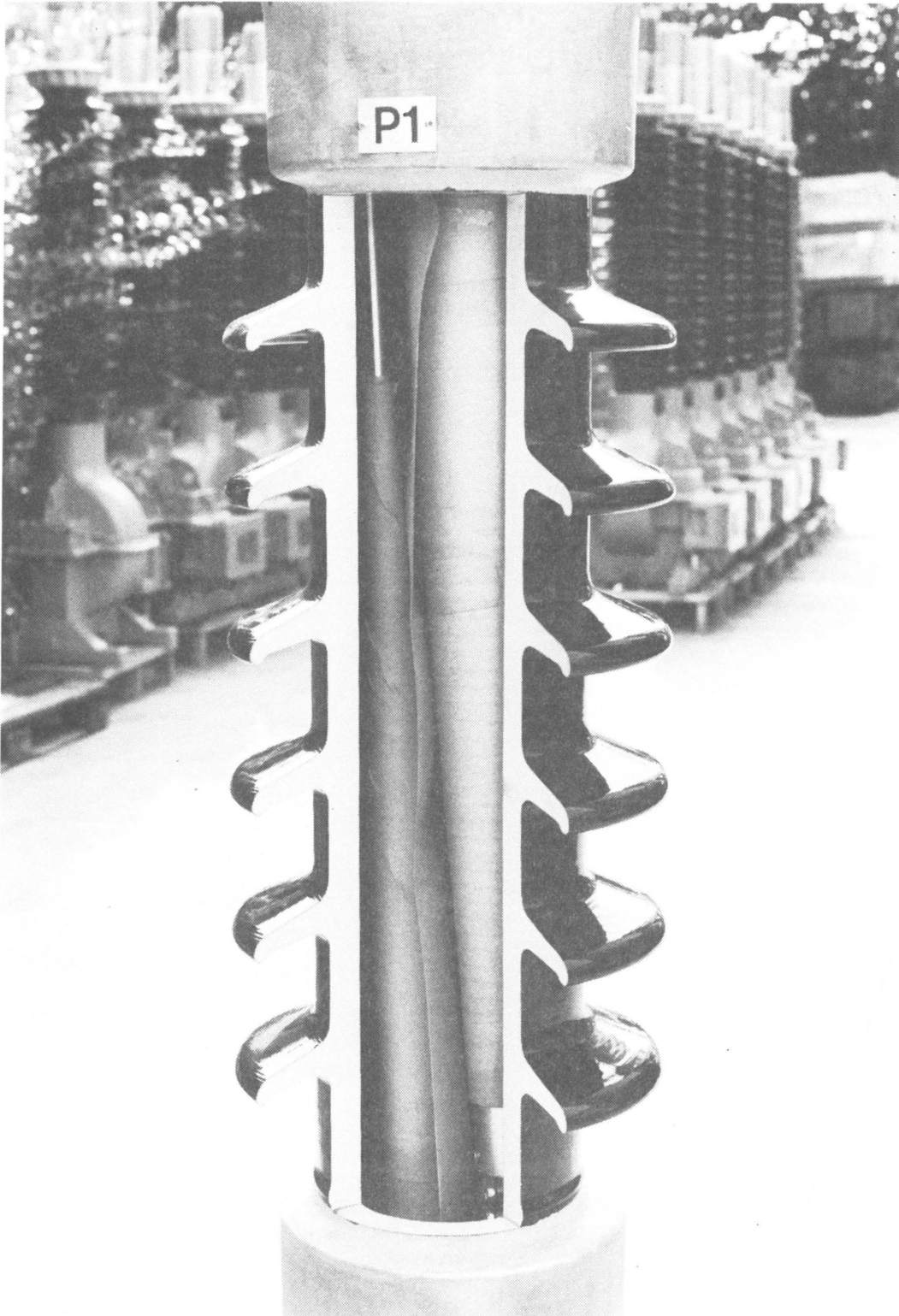
Bei Verwendung von Kunststoff-Folien statt Papier, müssen mehrere schmale Bahnen parallel gewickelt werden. Der Grund dafür ist, dass Isolierfolien bisher nur bis zur einer Breite von ca. 1,2m hergestellt werden können.

Das Einlegen der Steuer-Alufolien - bei Kunststoff-Folien oder Papier gleich - wird noch teilweise von Hand gemacht. Bei vorhandener CNC-Steuerung aber so kontrolliert, dass die axiale und radiale Position zwangsweise vorgegeben wird.

Durchführung am Kopfstromwandler



Messgruppe 2 Durchführungen gegenläufig



7. Zuverlässigkeit und Qualitätsmerkmale

Wichtige Kenngrößen für Qualität und Zuverlässigkeit des Dielektrikums sind

- $\tan\delta$ - Wert
- Teil-Entladungs-Freiheit
- Stossspannungsfestigkeit

Die Durchführung eines Wandlers beinhaltet allein mindestens die Hälfte der Papiermenge, entsprechend wichtig ist die Durchführungsqualität. Leider kann die Durchführung bei vielen Konstruktionen nicht separat geprüft werden. Bei Konstruktionen in denen die Durchführungen maschinell und separat hergestellt werden - und gleiche Auslegungen auch für Trafodurchführungen eingesetzt werden - kennt man die obigen Qualitätsmerkmale sehr gut. Dies gibt eine gleichbleibende Qualität und hohe Betriebssicherheit, was sehr wichtig ist, da die Durchführung immer im Isolator untergebracht ist und dessen Schadensfolgen bekannt sind.

a) Nachfolgend eine Übersicht über TE und $\tan\delta$ - Werte die erreicht werden, verglichen mit Vorschriften

	Durchführung nach IEC 137	typische Werte von Haefely Trafodurchfg. feingesteuert	Strom- + Spgs.- Wandler nach IEC 185 + 186 (neue draft)	typische Werte von Haefely Stromwandlern + Spgs.- Wandlern
$\tan\delta$ bei $U_m/\sqrt{3}$ [%]	< 7	< 2,5	< 5	< 2,5
TE-Grenzen [pC]	bis 0,866 U_m < 10	bis U-Prüfung < 2 = Grundpegel	bis U_m < 10	bis U_m < 2 = Grundpegel

Tabelle 2 : TE- und $\tan\delta$ Vergleich

b) Stossspannungsfestigkeit

Von den feingesteuerten Öl-Papier Trafodurchführungen gibt es diverse Stossspannungsversuche, von denen die folgenden 2 interessanten Versuche den Grad der Zuverlässigkeit unterstreichen:

- 600 abgeschnittene Stösse

Eine für $U_m = 420 \text{ kV}$ gebaute Durchführung wurde mit 600 abgeschnittenen Blitzstößen von 1000 kV und einer Kadenz von 1/Min. geprüft. Die Durchführung hat die Prüfung nicht nur dielektrisch bestanden, sondern auch Gasanalyse-Vergleiche von vor und nach der Prüfung zeigten keinerlei Fehler an.

- abgeschnittene Steilstösse

Öl-Papier Durchführungen wurden während der Typenprüfungen zusätzlich mit abgeschnittenen Steilstößen geprüft.

Anstieg in $480 \text{ kV}/\mu\text{s}$ - abgeschnitten in der Front - Zusammenbruch mit $900 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

Auch hier zeigten die dielektrischen Nachmessungen und Gasanalyse- vergleiche keine Beschädigungen an.

8. Lebensdauer

In unserem heutigen Thema ist die Durchführung nur ein Bestandteil vom ganzen Wandler. Auch hieraus Lebensdauerversuchen und Betriebserfahrung bei Haefely seit 1918, die in die gesamten Wandler einfließen.

a) Öl-Papier-Dielektrikum

Wichtige Einflussfaktoren für die Lebensdauer sind unter anderem:

- der $\tan\delta$ -Anstieg bei hohen Betriebstemperaturen und als Funktion der Zeit
- absolute TE-Freiheit bei Betriebsspannung (auch nach kurzfristigen Überspannungen)
- gleichmässige und niedrige axiale und radiale Feldstärken

Betriebserfahrungen und viele Zeitraffer-Lebensdauerversuche zeigen, dass mindestens 30 Jahre Lebensdauer unter normalen Bedingungen sicher erreicht werden.

b) Gasisolation

Der Durchführungsteil des Wandlers in der Deflektor-Technik ist mit seiner reinen SF₆-Isolation keiner Alterung unterworfen. Eventueller kleiner Feuchtigkeits-Anstieg während der Jahre setzt zwar den Taupunkt etwas herab, hat aber keinen weiteren Einfluss, denn der Druck bleibt erhalten, da über Druckwächter kontrolliert.

Bei Durchführungen mit Kunststoff-Folien ist mit der Auslegung -"TE-frei bis zur Prüfspannung" sowie vorhandener Betriebserfahrung, eine gleich hohe Lebensdauer zu erwarten wie bei dem Öl-Papier-Dielektrikum.