

Neues über Transformatoren

E. Reiplinger

Die Geräuschsituation ist dadurch gekennzeichnet, daß die Schalldruckpegel in den letzten Jahren erheblich zurückgegangen sind. Verantwortlich hierfür sind verbesserte Kern- und Kesselkonstruktionen aber auch die Möglichkeit, aufgrund erhöhter Eisenverlustbewertung, die Kerninduktionen zu senken.

Im einzelnen werden heute folgende Maßnahmen zur Geräuschminderung durchgeführt:

Bild 1

Maßnahme	ΔL_{WA} dB
Kesselverkleidung mit Schalldämmwänden	4 bis 7
körperschallisolierte Aufstellung des Aktivteils im Kessel	1 bis 2
Senkung der magnetischen Flußdichte	2 bis 2,5 je 0,1 T
Verwendung von Hi-B-Blech anstelle von normalem kornorientierten Blech	3 bis 4
Schachtelung des Eisenkerns nach dem step-lap-Verfahren	3 bis 5

ΔL_{WA} Minderung des A-Schalleistungspegels durch die betreffende Maßnahme. Bei Anwendung mehrerer Maßnahmen addieren sich die betreffenden Minderungen.

1. Induktionssenkung

Eine Induktionsabsenkung von 0,1 T bewirkt je nach der Ausgangsinduktion eine Geräuschminderung von 2 - 2,5 dB, wobei die größere Kernmasse bereits berücksichtigt ist. Ihre Wirtschaftlichkeit ist nur bei hohen Verlustbewertungen gegeben. Grenzen bilden oft die Transportmöglichkeiten.

2. Verwendung von Hi-B-Blechen

Der Einsatz von Hi-B-Blech anstelle von normalem kornorientiertem Blech brachte eine Minderung von 3 - 4 dB. Dieses Blech ist heute bei Großtransformatoren Stand der Technik.

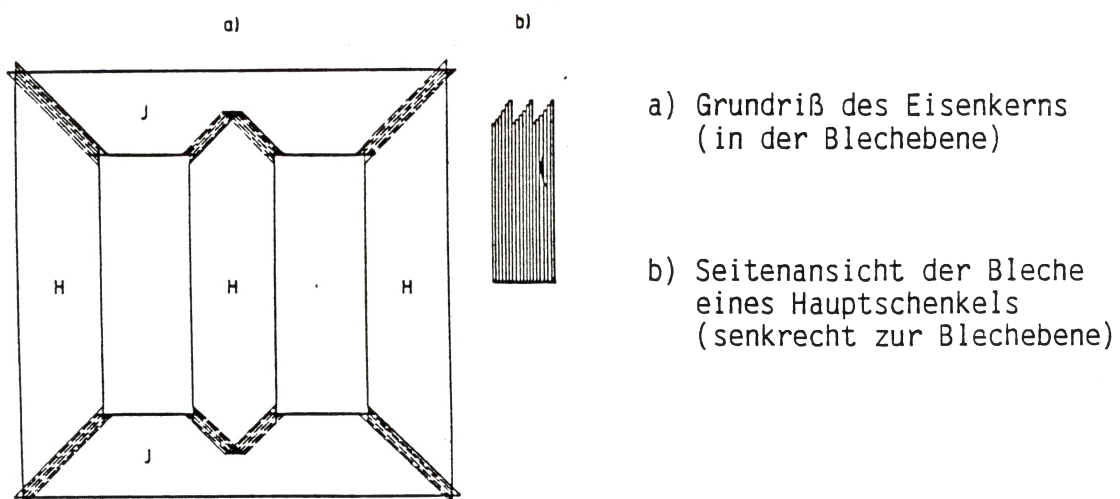
3. Fünf-Schenkel-Kern

Fünf-Schenkel-Kerne sind bei Brückenmittelstückausführungen ca. 4 dB leiser als Drei-Schenkel-Kerne.

4. Step-lap-Kerne

Die Schachtelung des Eisenkernes nach dem step-lap-Verfahren (s. Bild 2) führt zu einer Geräuschminderung von 3 - 5 dB, wobei die größten Minderungen bei mittleren Induktionen (1,4 - 1,5 T) erreicht werden.

Bild 2



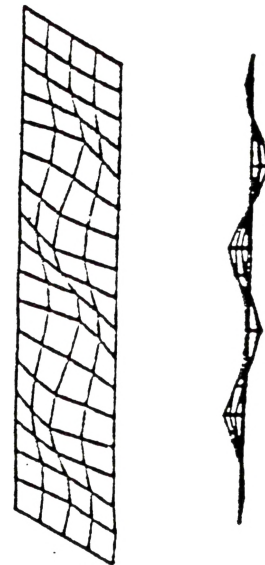
Dreischenkliger Eisenkern eines Drehstromtransformators in step-lap-Ausführung mit Staffelung der Stoßstellen von Hauptschenkeln und Jochen.

Vielfach werden die Aktiv-Teile im Kessel körperschall-isoliert aufgestellt. In besonderen Fällen werden auch noch Kesselverkleidungen mit stark gedämpften Stahlblechen (Sandwichplatten) eingesetzt.

Grundlegende Untersuchungen über das Schwingungsverhalten der Kessel führte dazu, daß Kessel heutiger Konstruktion für die vorkommenden Transformatorfrequenzen resonanzfrei sind. Diese Untersuchungen wurden mit der sogenannten Modalanalyse durchgeführt (s. Bild 3), die es ermöglicht das Resonanzverhalten des Kessels sichtbar zu machen.

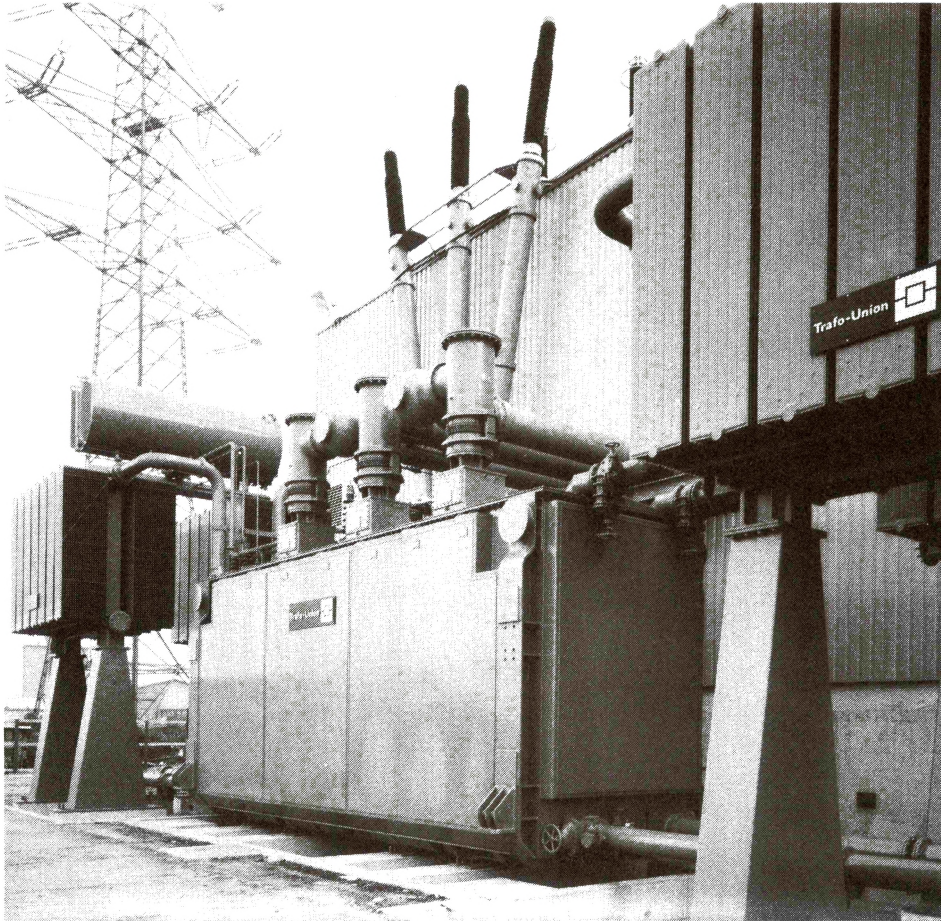
Bild 3

100 Hz-Schwingung eines Kesselseitenwandfeldes bei 50 Hz-Betrieb.
(Erzwungene Schwingung)



Die geringen Schalldruckpegel der Transformatoren erfordern auch kleine Geräusche für die Kühlanlage. Für Luft-Kühlanlagen mit Ventilatoren wird dies erreicht durch langsam laufende Ventilatoren mit großem Durchmesser und durch Schalldämpfer. Vielfach werden auch Radiatorenbatterien anstelle von Preßluftkühlanlagen eingesetzt (s. Bild 4).

Bild 4

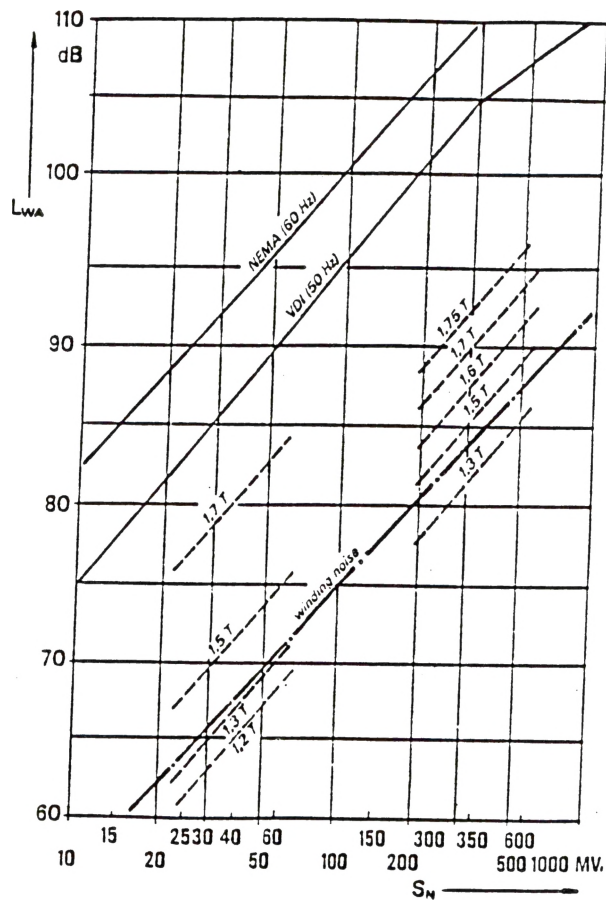


Extrem geräuscharmer 300-MVA-Netzkuppltransformator, 245 kV mit SF₆-Anschluß. A-Schalleistungspegel 76 dB.

Geräuschbestimmend für den Transformator ist in erster Linie das Leerlaufgeräusch, das durch die magnetostriktiven Kernschwingungen hervorgerufen wird.

Bei Transformatoren mit abgesenkter Induktion mit Kernen in step-lap-Ausführung sind bei Vollastbetrieb die magnetodynamisch bedingten Wicklungsgeräusche nicht mehr zu vernachlässigen. Sie liegen dann auf etwa der gleichen Höhe wie das Kerngeräusch (s. Blatt 5). Die Frequenz dieser Geräusche ist fast ausschließlich die doppelte Netzfrequenz. Ihre Größe wächst mit 12 dB pro Stromverdoppelung (s. Bild 6).

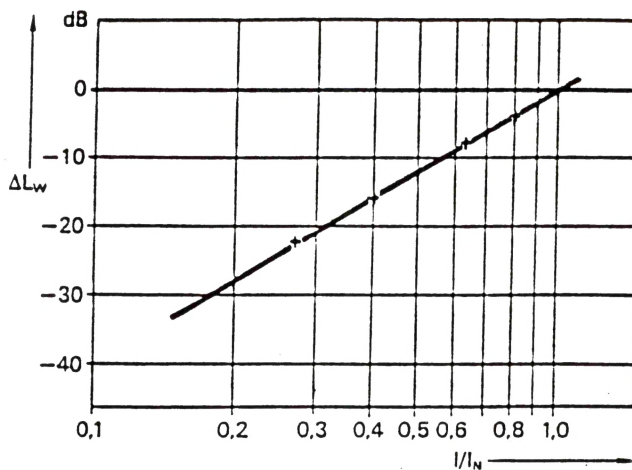
Bild 5



A-SchalleLeistungspegel L_{WA} der Kern- und Wicklungsgeräusche von Leistungstransformatoren in Abhängigkeit von der Transformatorleistung S_N . Netzfrequenz 50 Hz

- : Kerngeräusch bei Normalausführung
- : Kerngeräusch bei geräuscharmer Ausführung
- . - . - : Lastgeräusch (Wicklungsgeräusch)

Bild 6



Änderung des A-SchalleLeistungspegels ΔL_W der Wicklungsgeräusche als Funktion des Stromes I . (I_N = Nennstrom)

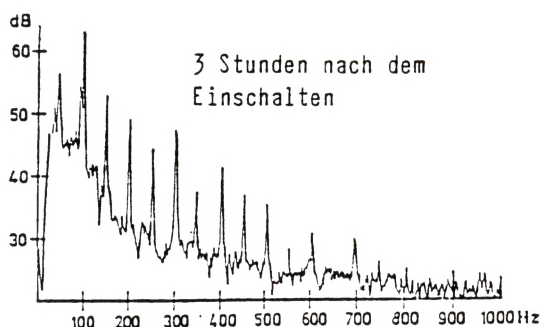
Einschaltverhalten

Leistungstransformatoren mit Kernblechen bester Qualität zeigen insbesondere bei gleichzeitiger Verwendung der step-lap-Schachtelung beim Einschalten im Leerlauf ein ungewöhnliches Geräuschverhalten. Als Folge der niedrigen magnetischen Sättigungsfeldstärke bei entsprechend großer permanenter Induktion dieser Kerne kann der Kern für längere Zeit im Zustand starker Übererregung bleiben. Die A-Schall-druckpegel können beim Einschalten bis zu 20 dB größer sein als im stationären Zustand. Die Pegelüberhöhungen klingen in der Regel nur sehr langsam ab. Es können bis zu 6 Stunden vergehen bis der stationäre Zustand erreicht ist.

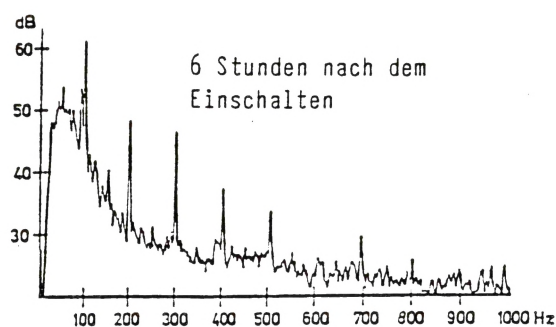
Die beim Einschalten auftretende Gleichflußkomponente bewirkt, daß im Geräuschspektrum neben den geradzahligen Vielfachen der doppelten Netzfrequenz auch die Ungeradzahligen auftreten. Diese Tatsache gibt die Möglichkeit zu erkennen, ob der stationäre Zustand erreicht ist.

Bild 7 zeigt das Schallspektrum eines geräuscharmen 300-MVA-Transformators 3 Stunden nach dem Einschalten. Deutlich sind die ungeradzahligen Oberschwingungen der Netzfrequenz noch zu erkennen. Ihr Pegelanteil beträgt zu diesem Zeitpunkt noch 3 dB. Erst nach weiteren 3 Stunden waren diese Frequenzen im Spektrum nicht mehr vorhanden.

Bild 7



50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	700	800	900	Hz
57	63	53	49	46	47	37	41	37	25	29	37	30	23	23	dB



50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	700	800	900	Hz
62	62	48	46	37	36	26	29	26	26						dB

Schalldruckspektren eines 300-MVA-Transformators

Besondere Probleme können beim Einschalten dann auftreten, wenn zuvor Wicklungswiderstandsmessungen mit Gleichstrom wie z.B. nach Erwärmungsmessungen durchgeführt wurden. Selbst nach längerer Zeit sind die remanenten Kerninduktionen noch so groß, daß beim Einschalten Schiefplastverhältnisse auftreten können, die nur durch Wiederholtes Ein- und Ausschalten behoben werden können. Transformatoren dieser Art sollten deshalb nur in entmagnetisiertem Zustand das Herstellerwerk verlassen.

Geräuschmessung

Seit 5 Jahren ist die verbindliche Kenngröße für das Transformatorgeräusch der Schalleistungspegel, in dem neben dem zu messenden Schalldruckpegel auch die Größe der Fläche, von der der Schall ausgeht, enthalten ist.

Die Schalleistung ist eine wichtige Größe zum Bestimmen des Schalldruckpegels beim Anlieger (s. Bild 8). Die Messung erfolgt nach DIN 45 635 Teil 30.

Bild 8

L_{pA_s}	=	$L_{WA} + K_Q$	-	$(\Delta L_s + \Delta L_L + \Delta L_B + \Delta L_D + \Delta L_G + \Delta L_Z + \Delta L_M)$
Empfänger (Schallimmission)		Quelle (Schallemmission)		Ausbreitung

Bezeichnungen:

L_{pA_s}	A-Schalldruckpegel am Immissionsort (Abstand s vom Transformator)
L_{WA}	A-Schalleistungspegel des Transformators
K_Q	Richtwirkungsmaß
ΔL_s	Abstandsmaß
ΔL_L	Luftabsorptionsmaß
ΔL_B	Bodendämpfungsmaß
ΔL_D	Bewuchsdämpfungsmaß
ΔL_G	Bebauungsdämpfungsmaß
ΔL_Z	Abschirmmaß
ΔL_M	Witterungsdämpfungsmaß

Alle Größen sind in dB einzusetzen.

Berechnung des A-Schalldruckpegels beim Empfänger (Anlieger bzw. an der Grundstücksgrenze) im Abstand s vom Transformator.

Neue Meßverfahren

Messen des Schalldruckpegels bei hohem Umgebungspegel.

Folgende Verfahren werden eingesetzt:

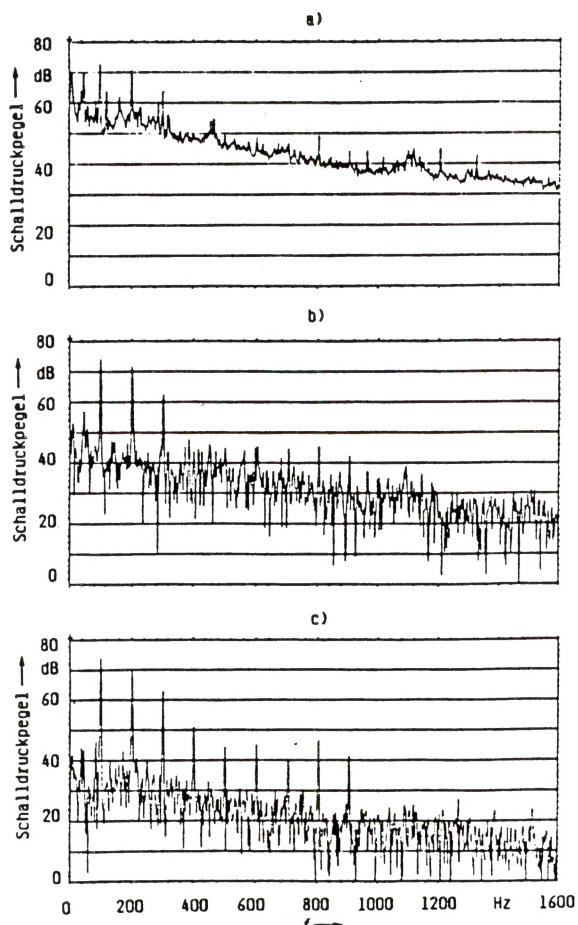
1. Schmalbandanalyse

Die Schmalbandanalyse läßt sich mit Erfolg einsetzen, wenn der Transformatorpegel in der Nähe des Umgebungspegels liegt und keine Störer mit den diskreten Transformatorfrequenzen vorhanden sind. Das Verfahren ist nur geeignet zur Bestimmung der Transformatorgeräusche ohne Ventilatoren.

2. Zeitmittelungsverfahren

Bei dem Zeitmittelungsverfahren werden mehrere zeitliche Verläufe eines aus Nutz- und Störsignal bestehenden Schalldruckes aufgenommen und gemittelt. Das Zeitmittelungsverfahren kann auch dann noch eingesetzt werden, wenn der Umgebungspegel bis zu 10 dB über dem Transformatorgeräusch liegt (s. Bild 9). Auch bei diesem Verfahren dürfen keine Störer mit exakt gleichen Frequenzanteilen wie in dem Transformatorspektrum vorhanden sein. Geräusche von Luftkühlanlagen werden nicht erfaßt.

Bild 9



Anwendung des Zeitmittelungsverfahrens bei einem 40-MVA-Transformator.

Spektren mit unterschiedlicher Mittelungsanzahl

a) $n = 1$

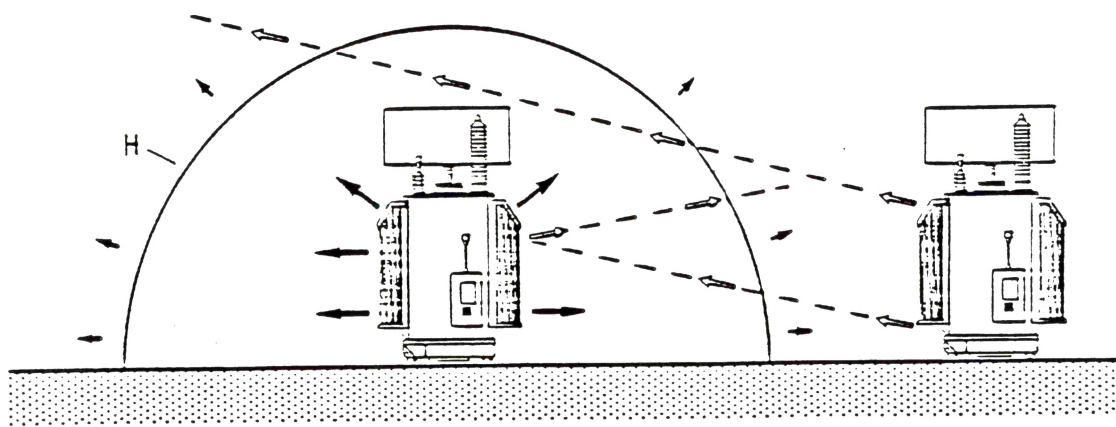
b) $n = 10$

c) $n = 200$

3. Schallintensitätsmeßverfahren

Das Schallintensitätsmeßverfahren beruht auf der Messung der durch eine Hüllfläche um den Transformator tretenden Schallenergie. Da diese Größe vektoriell gemessen wird, heben sich die Anteile der Störer beim Ein- und Austritt in bzw. aus der Hüllfläche auf (s. Bild 10). Diese Meßmethode erlaubt auch dann Messungen, wenn im Störschall die gleichen Frequenzen wie in dem zu messenden Schall enthalten sind. Ventilatorgeräusche sind zugelassen. Zu beachten ist, daß die Schallintensität bei Messungen im Nahfeld zu 2 bis 4 dB niedrigeren A-Schalleistungspegeln führt, als der für gleichen Abstand aus den A-Schalldruckpegeln errechnete Wert.

Bild 10



Schallausbreitung von Nutz- und Störschall
bei nebeneinander stehenden Transformatoren

- ➡ zu messender Transformatorschall
- ⇨ Störschall
- H Meßhüllfläche

Geräuschminderung durch Anti-Schall

Eine interessante Methode zur Geräuschminderung bei bereits installierten Transformatoren wird z.Zt. als Zukunftsprojekt diskutiert, bei der versucht wird, den Transformatorschall durch Antischall, der von Lautsprechern erzeugt wird, zu reduzieren. Die Problematik liegt in der Großflächigkeit der Schallquelle, die eine Vielzahl von Lautsprechern erforderlich macht. Jeder Lautsprecher benötigt für sich ein kompliziertes Regelsystem, bei dem eine Beeinflussung vom Nachbarlautsprecher berücksichtigt werden muß. Theoretische und experimentelle Untersuchungen werden von uns in Zusammenarbeit mit der Universität in Cambridge durchgeführt (s. Bild 11).

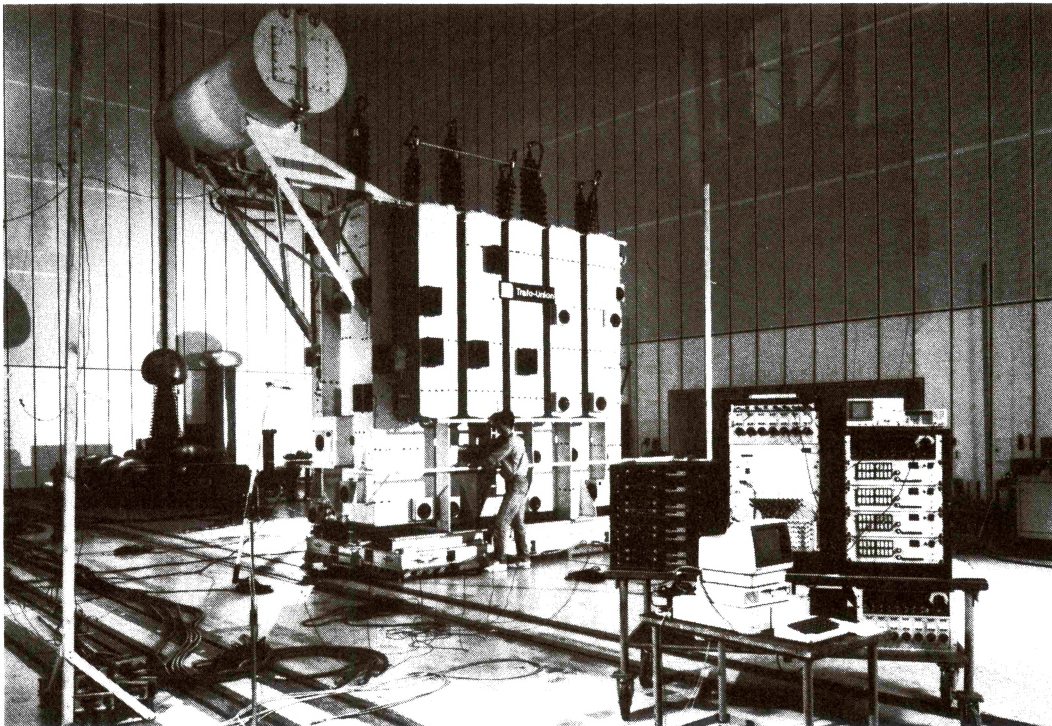


Bild 11 Messaufbau zur Untersuchung von Antischall an
Netztransformatoren im Größttrafo-Prüffeld der
Transformatorenfabrik Nürnberg der Siemens AG