

Überwachung von Transformatoren

K. Feser

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
Universität Stuttgart

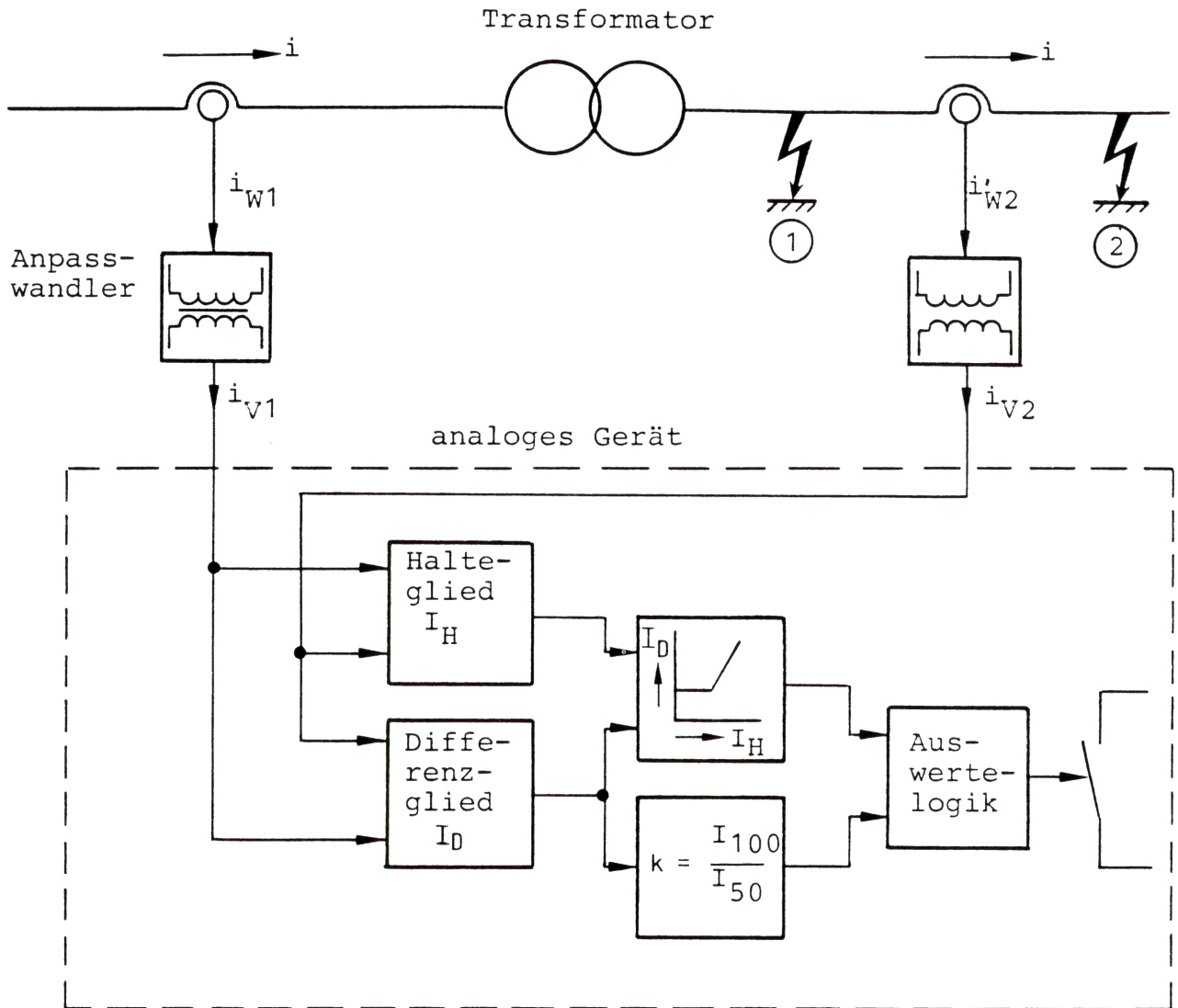
Inhaltsübersicht:

- o Schutzeinrichtungen (schneller Schutz)
 - Vergleichsschutz (Differentialschutz)
 - Überstromzeitschutz
 - Erdschlußdifferentialschutz
 - Übererregungsschutz
 - Buchholzschutz
- o Betriebsführungseinrichtungen
 - Betriebsdiagramm mit thermischem Abbild
 - Lebensdauerverbrauch
 - Steuerung und Regelung von Stufenschalter und Lüfter
 - Schalterversagerschutz
 - Registrierung der Abschaltströme
- o Überwachungseinrichtungen (langsamer Schutz)
 - Wicklungsaufbau
 - Isolationssysteme

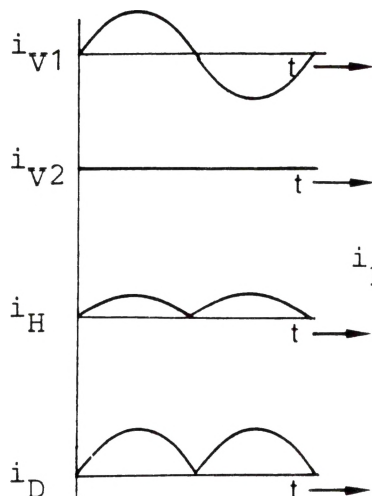
Vergleichsschutz (Differentialschutz)

- o wichtigster Fehlerschutz eines Transformators
(neben dem Buchholzschutz)
- o in Zukunft: digital mit Mikroprozessorschaltungen
- o neue verbesserte Algorithmen, die folgende Probleme lösen:
 - Auslösung auch bei stromschwachen Fehlern
z.B. an der Tertiärwicklung
 - Stabilisierung des Schutzes bei Stromwandlersättigung
und außenliegendem Kurzschluß
 - Erkennen und Stabilisierung von Einschaltströmen
(Rusherkenning, Anteil an 2. Harmonischer im
Einschaltstrom moderner Transformatoren klein)

Transformatorvergleichsschutz (Stand der Technik)

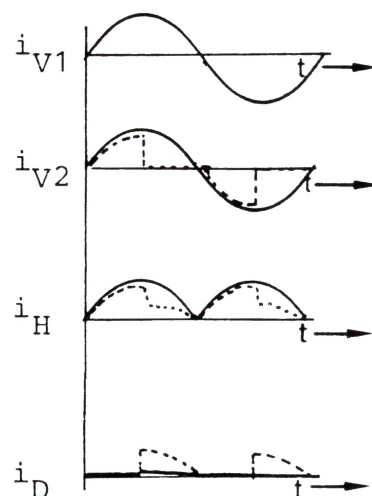


- ① - Innerer Fehler ($i_D = \sum_1^2 i_i \neq 0$) (Einschaltstromstoß)
 ② - Äußerer Fehler ($i_D = \sum_1^2 i_i = 0$) (Wandlersättigung)

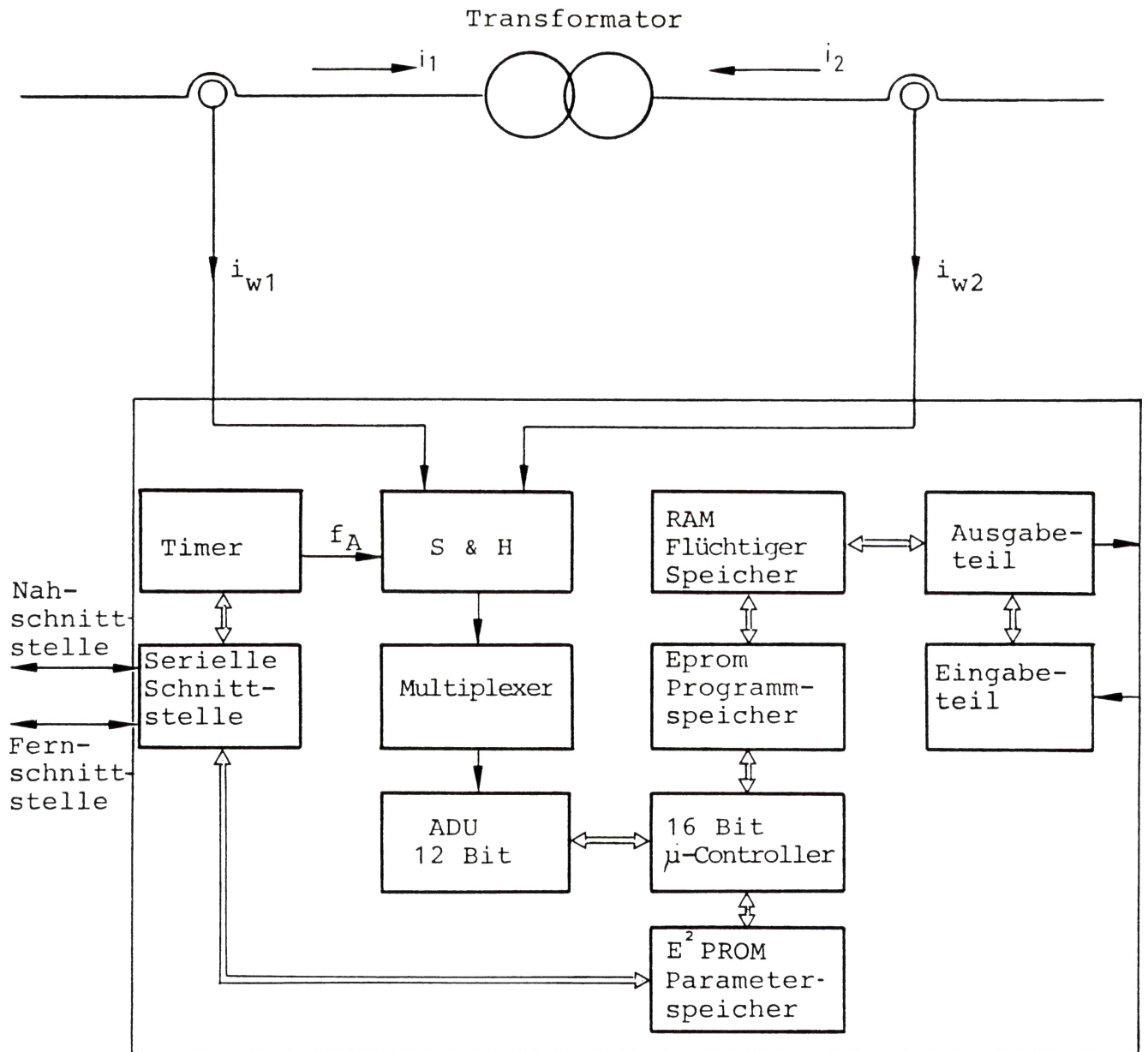


$$i_H = \frac{|i_{V1}| + |i_{V2}|}{2}$$

$$i_D = |i_{V1} - i_{V2}|$$



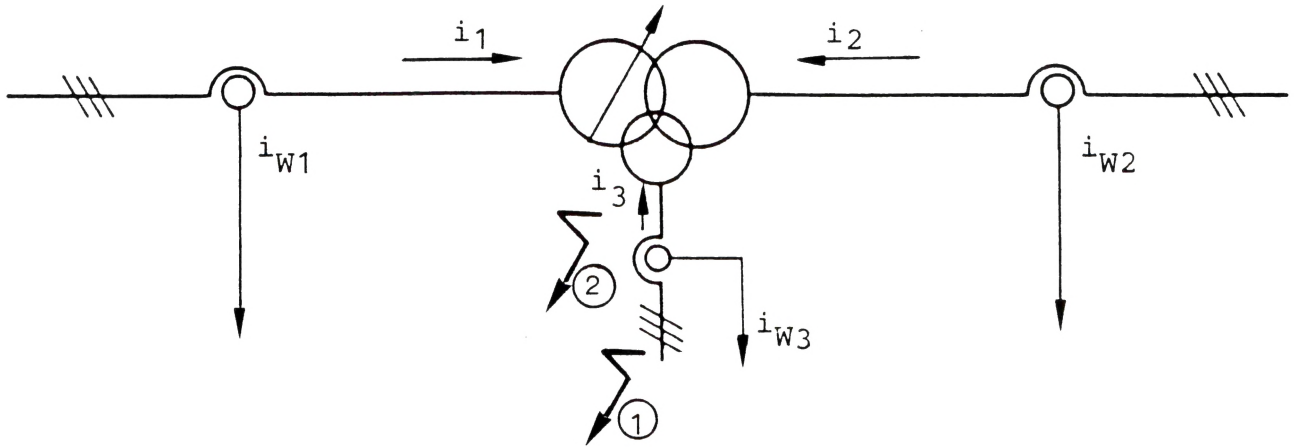
Blockschaltbild: Digitaler Vergleichsschutz



Algorithmus

- Einstellung der Auslösekennlinie in der Zustandsebene
- Auslöseentscheid mit Deltazeiger oder Normalzeiger

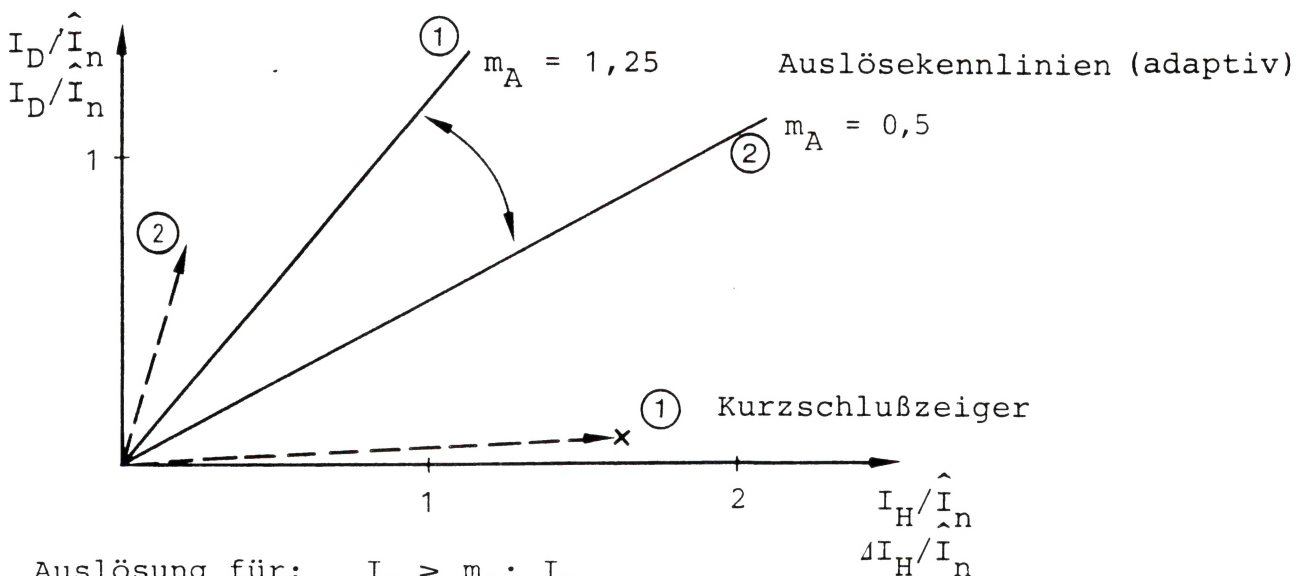
Transformator



	$\frac{i_{V1}}{i_{V1n}}$	$\frac{i_{V3}}{i_{V3n}}$	$\frac{i_{V2}}{i_{V2n}}$	
Äußerer KS ①	max 1,5	15	0,8	$\rightarrow n_{\max} = 15$
Innerer KS ②	max 1,5	0	0,8	$\rightarrow n_{\max} = 1,5$

\rightarrow Kennlinienfaktor n_{\max}	0 - 2	2 - 5	5 - 8	> 8
Auslösesteigung m_A	0,5	0,75	1,0	1,25

Zustandsebene

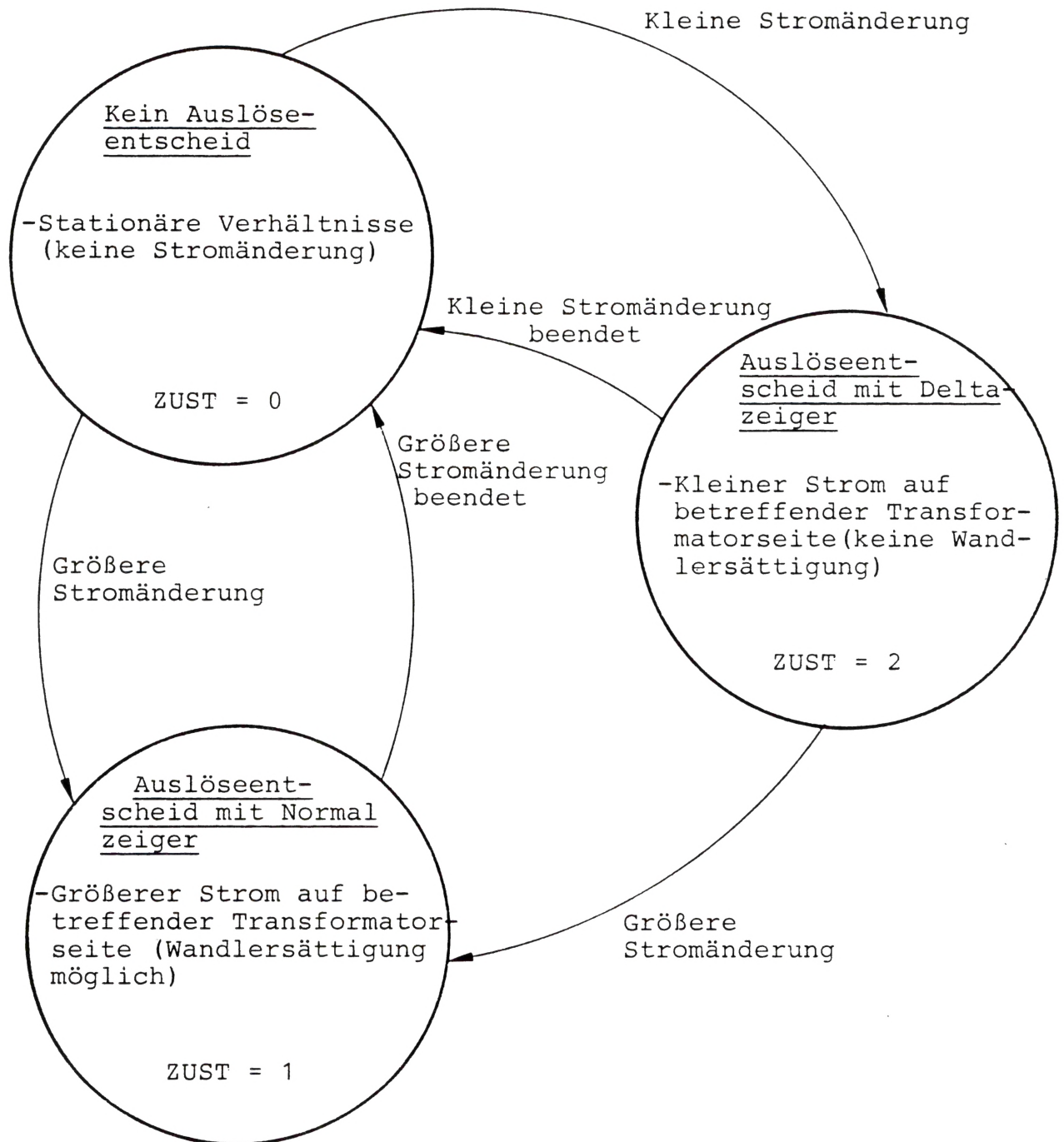


Auslösung für: $I_D > m_A \cdot I_H$

$$\Delta I_D > m_A \cdot \Delta I_H$$

$$\text{Deltagröße: } \Delta I_D = I_D(t_1) - I_D(t_2)$$

Zustandsdiagramm



Verbesserung der Ruserkennung durch die Berechnung der
50 Hz und 100 Hz Komponente der Feldstärke in den
Transformatorschenkeln

→ Einschaltvorgang läßt sich in den Feldstärken eindeutig erkennen.

Bisher: Stabilisierungsfaktor $k_I = \frac{I_{100}}{I_{50}}$ Jetzt: $k_H = \frac{H_{100}}{H_{50}}$

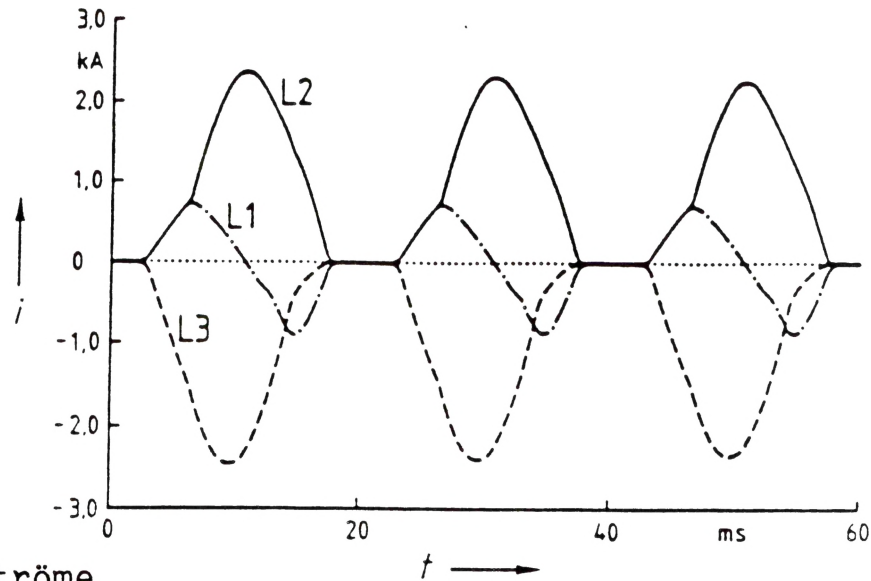
Schutzauslösung wird blockiert, wenn $k > 20 \%$.

Algorithmus

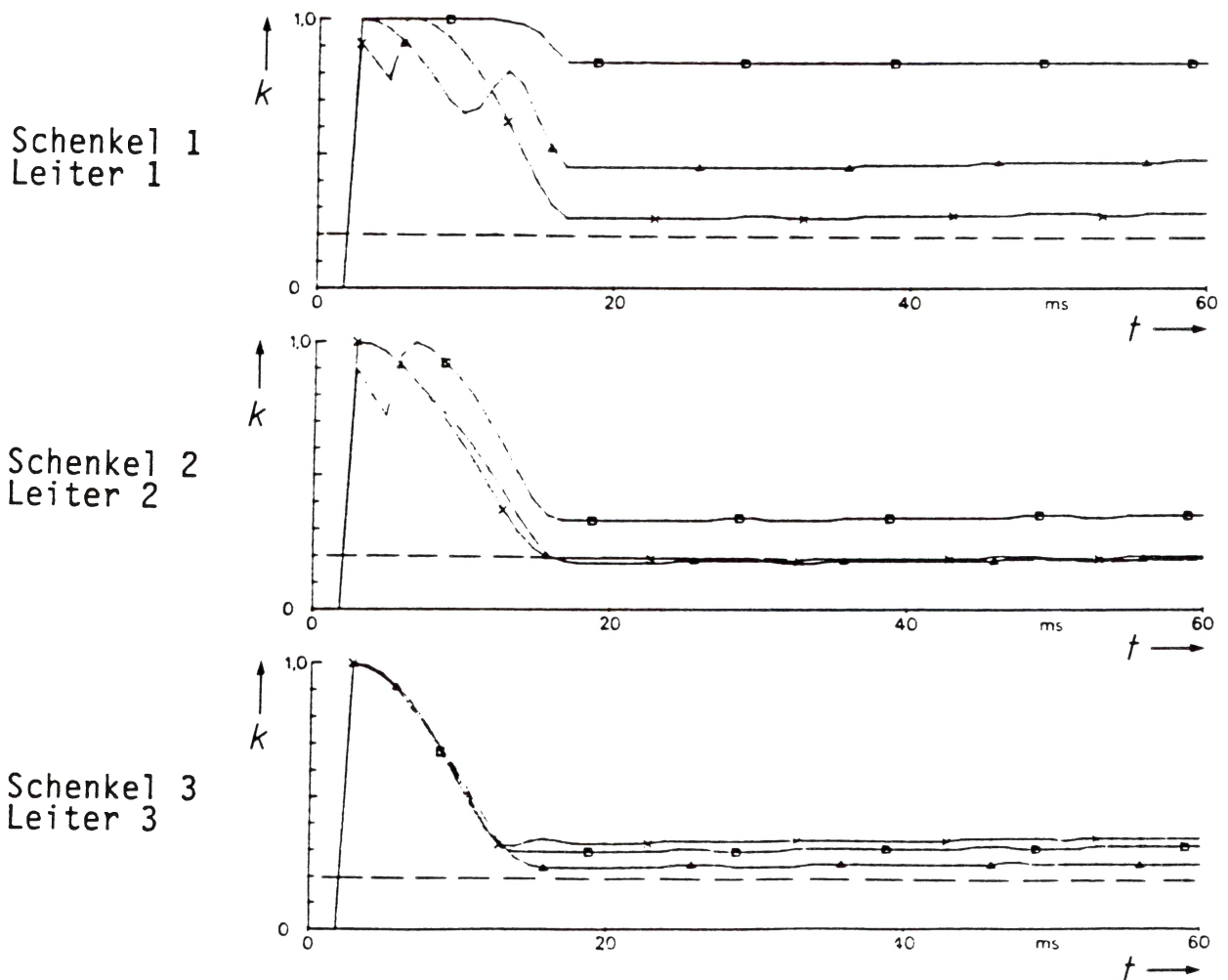
Grundschwingungsfilterung und 100 Hz Filterung des Differenzstromes mit digitalem Fourierfilter (R, S, T)
Komponentenbildung für 50 Hz und 100 Hz
Ermittlung der Nullkomponente für 50 Hz und 100 Hz aus Symmetrieeigenschaften der magnetischen Feldstärke bei Einschaltvorgang
Rücktransformation in R, S, T für 50 Hz u. 100 Hz
Bildung eines Stabilisierungsfaktors k_H für jeden Transformatorschenkel

Beispiel:

Einschaltstromstoß beim Drehstromtransformator



a. Leiterströme



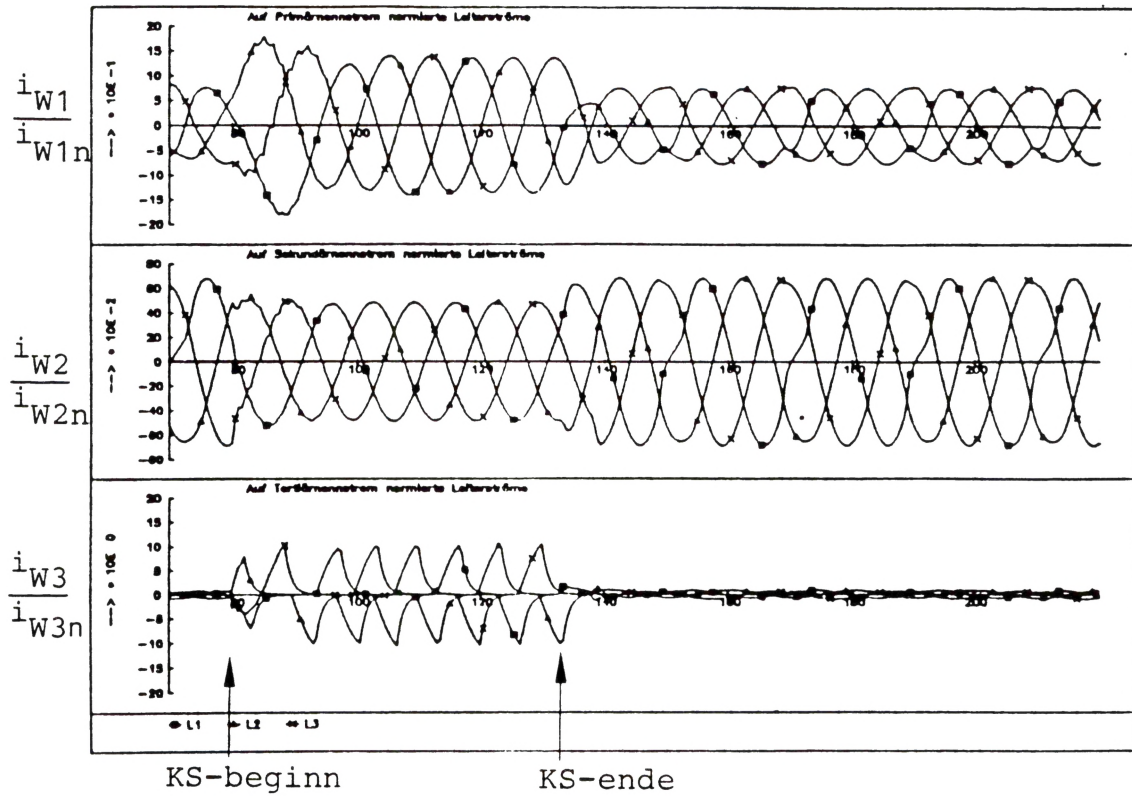
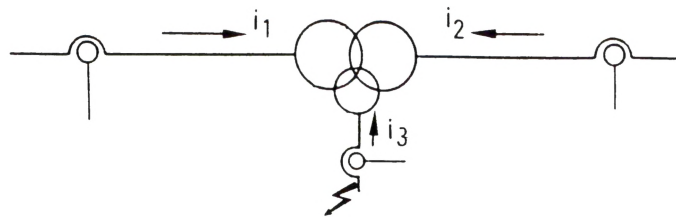
b. Verhältnis der 100 Hz-Komponente zur 50 Hz-Komponente für Feldstärken, Leiterströme und verkettete Ströme

$$\square k_H = \frac{H_{100}}{H_{50}}, \quad \triangle k_{J_L} = \frac{J_{L100}}{J_{L50}}, \quad \times k_{J_V} = \frac{J_{V100}}{J_{V50}}$$

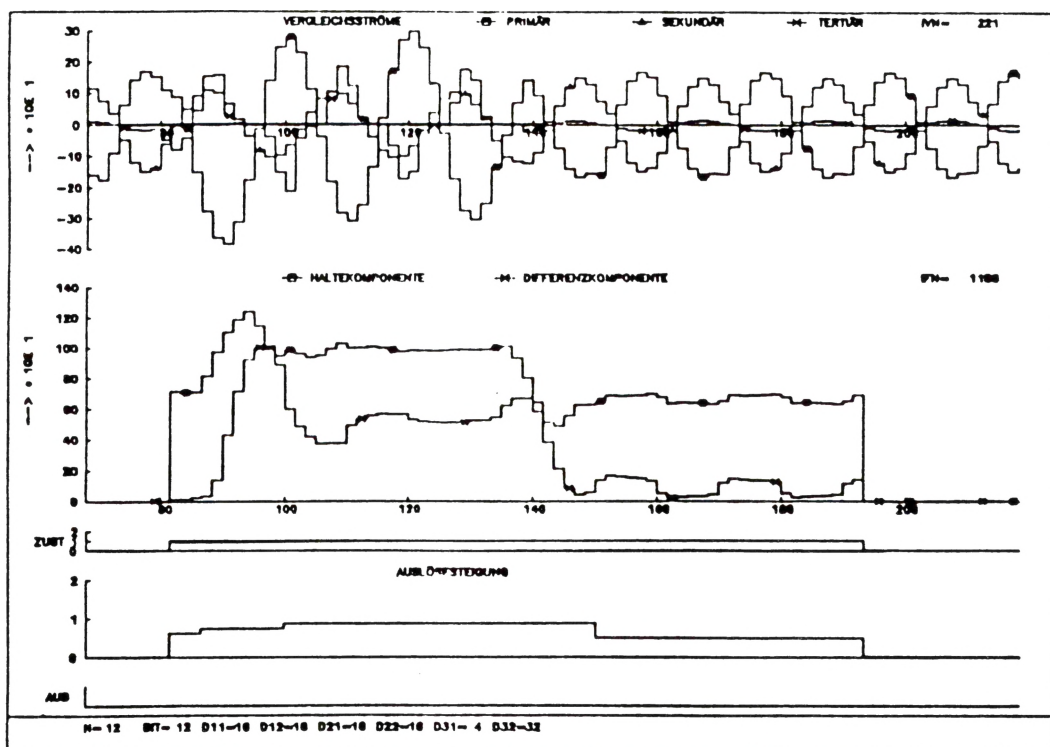
Diagramm für den digitalen Vergleichsschutzalgorithmus

Abtasten der Ströme der primär-, sekundär- und tertiär-seitigen Stromwandler	
Schaltgruppenanpassung auf Primär-, Sekundär- und Tertiärseite	
Bildung von Kennlinienfaktoren n_j und stromadaptive Einstellung der Auslösesteigung m_A	
Bildung von auf die Primärseite bezogenen Vergleichsströmen	
Bildung von Halte- und Differenzstrom	
Filterung des Halte- und Differenzstromes und Bildung des Zeigers (I_H, I_D)	
Bildung des Deltazeigers ($\Delta I_H, \Delta I_D$) für stromschwache Fehler	
Ermittlung des Schutzzustandes ZUST	
Anregung durch Deltakriterium	
Nein	Ja
Andere Aufgaben ausführen	<ul style="list-style-type: none"> - Auslöseentscheid treffen - Einschaltstabilisierung durchführen

Beispiel ① :

abgeta-
stete
Ströme I_H
 I_D

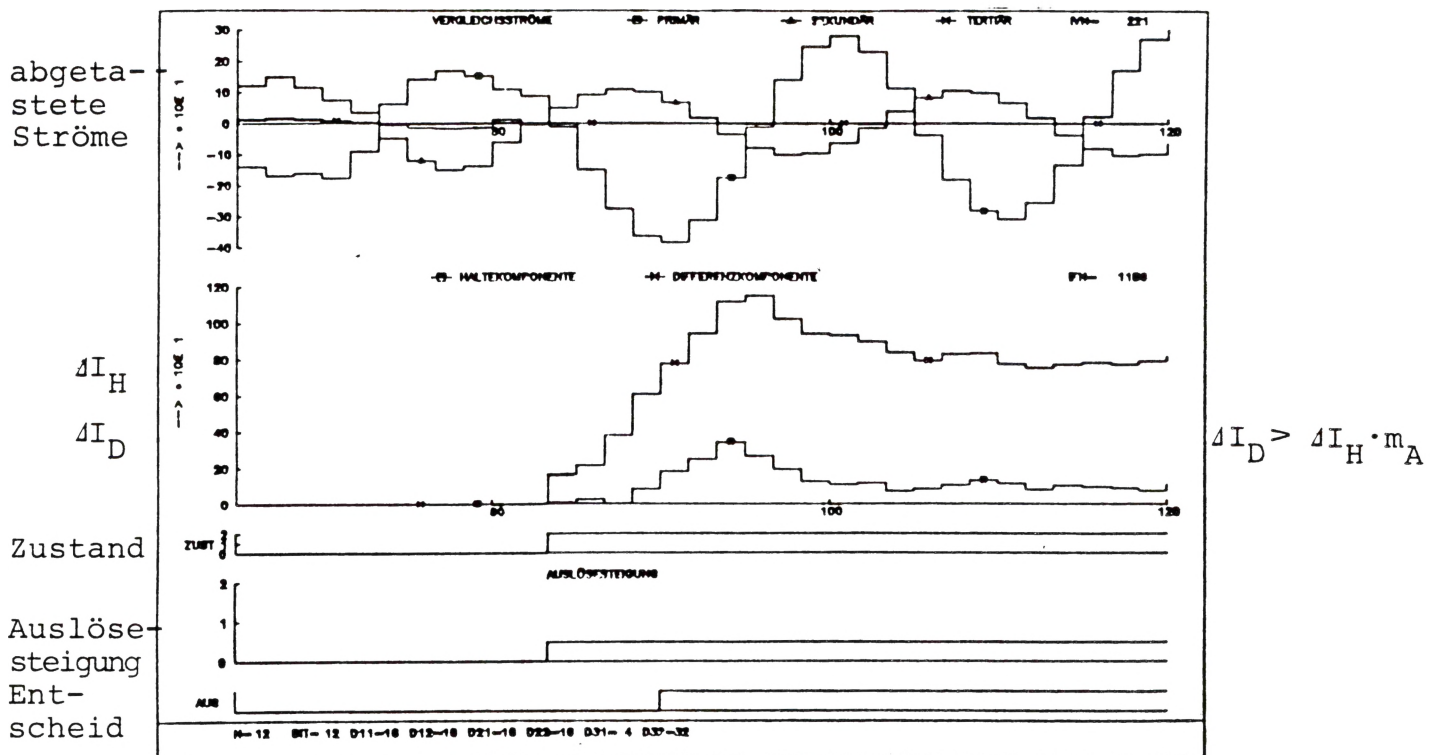
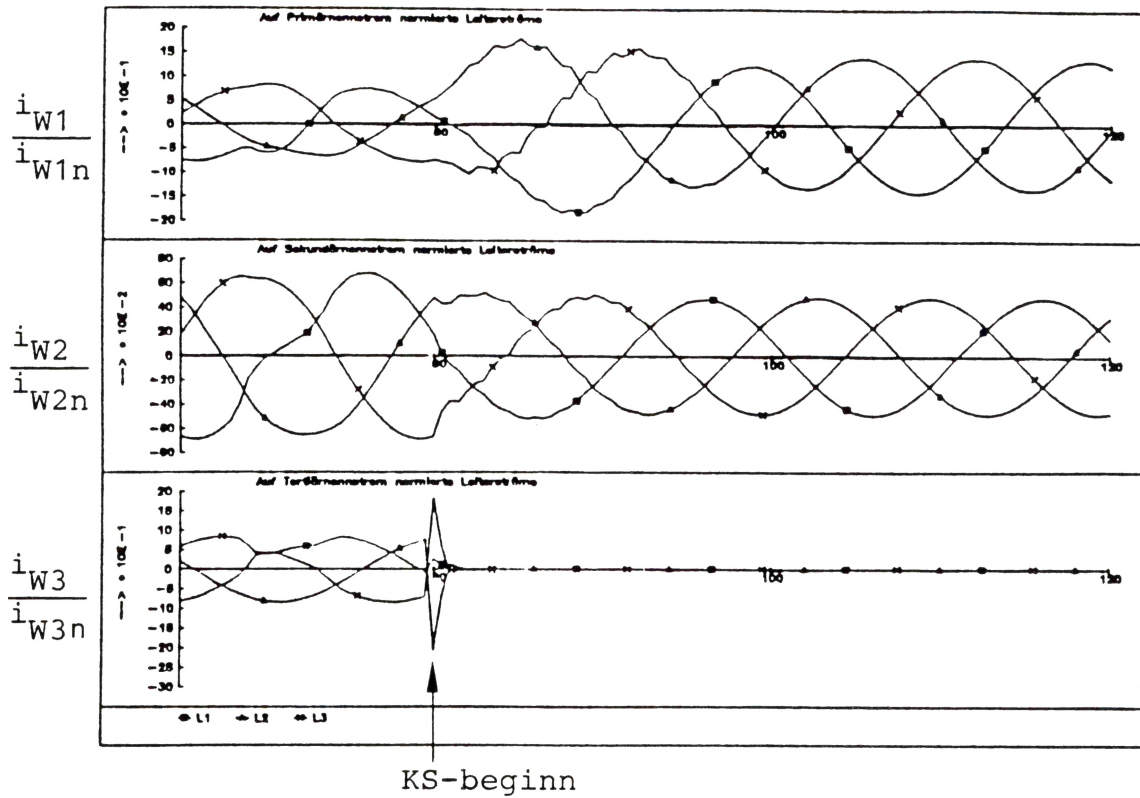
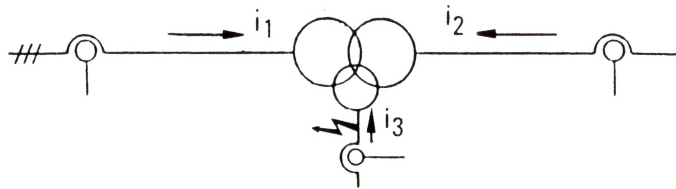
Zustand

Auslöse-
steigung
Ent-
scheid

$$I_H > I_D \cdot m_A$$

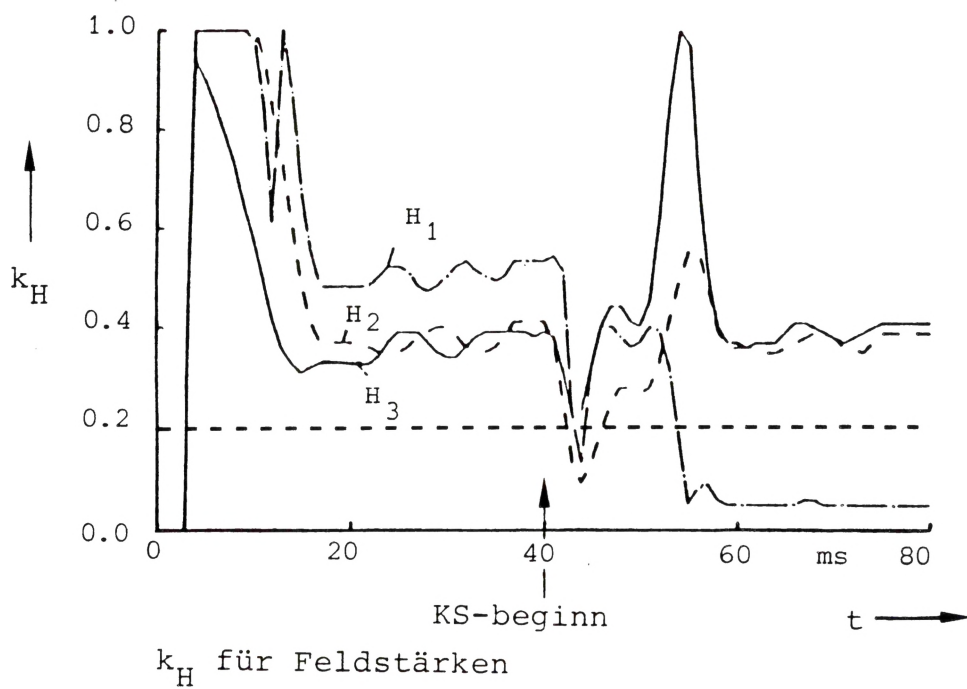
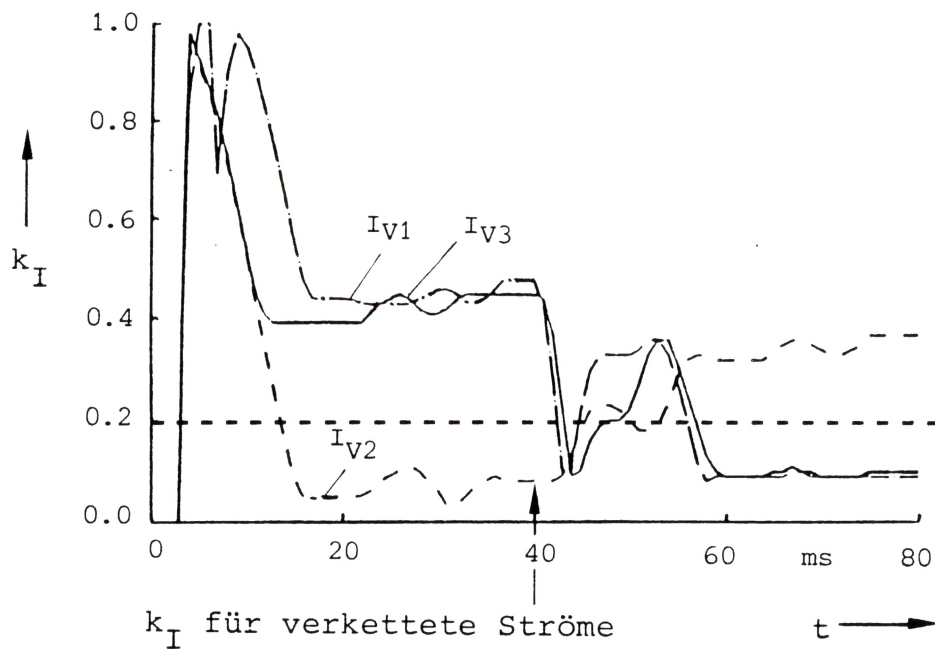
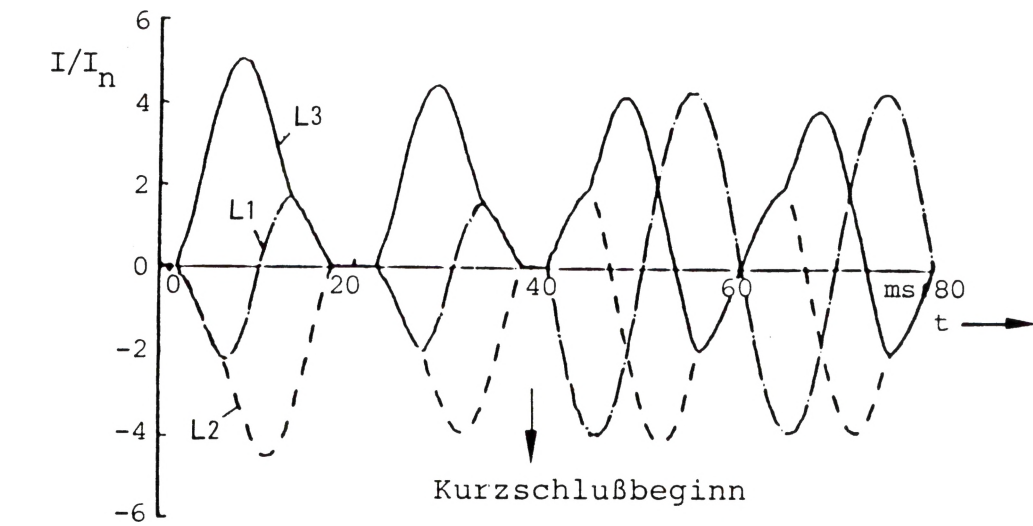
Vergleichsschutzrechnung bezüglich Leiter 1 der Tertiärseite

Beispiel (2) :



Vergleichsschutzrechnung bezüglich Leiter 1 der Tertiärseite

Beispiel 3: Einschaltvorgang mit folgendem 1 pol. Kurzschluß



Vergleich von
analogem und digitalem Transformatorvergleichsschutz

	analog	digital
Hardware	o speziell	o standardisiert
Schaltgruppenanpassung	o durch Anpaßwandler	o rechnerisch
Bildung von Halte- und Differenzglied	o mit Summationsverstärker	o mit Digitalfilter
Auslösekennlinie	o starr	o stromadaptiv
Einschaltstabilisierung	o mit analoger Filterung des 50 Hz und 100 Hz Differenzstromes	o rechnerische Ermittlung der 50 Hz und 100 Hz Komponenten der magnetischen Feldstärke in den Transformatorschenkeln aus den Strömen
<u>Neu</u>		o Parametrierbarkeit und Anschlußmöglichkeit für leittechnische Integration o Deltakriterium zur Erkennung stromschwacher Fehler o Stabilisierung bei Stromwandler-sättigung und außenliegendem Kurzschluß

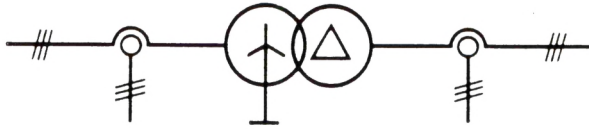
Betriebsführungseinrichtung

- Mikroprozessorschaltung (wie bei Schutzeinrichtungen, Reservefunktion für Schutzeinrichtungen)

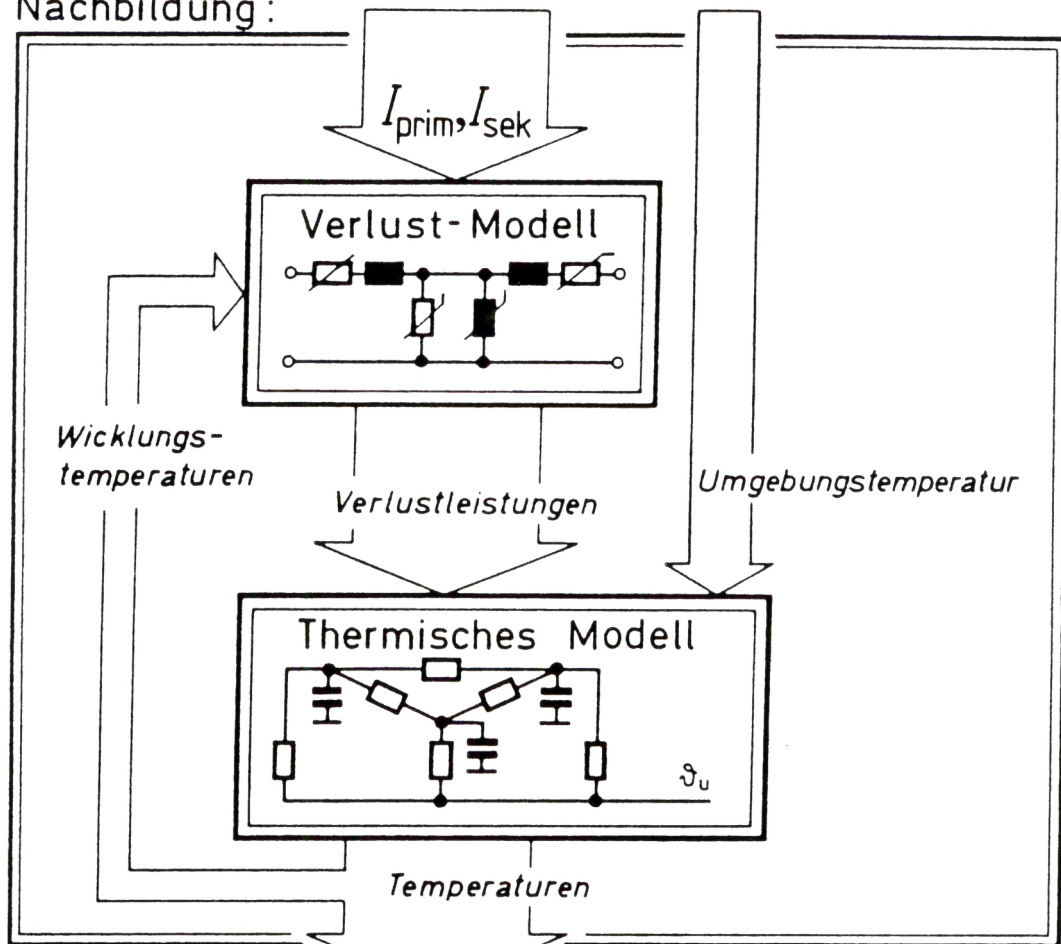
Aufgaben:

- o Thermisches Abbild des Transformators
 - Betriebsdiagramm aufstellen
 - o Angaben über zulässige Leistungen und Zeiten im Grenzbereich zulässiger Temperaturen
 - thermische Möglichkeiten voll ausnützen
 - o Einflußgrößen: Lüfter, Ölströmung, Umgebungstemperatur
 - Lebensdauerverbrauch aus dem gefahrenen Betrieb ermitteln
- o Spannungsregelung für Stufenstellung mit Stufenschalter-Kontrolle
 - Beanspruchung von Schaltkontakten → Wartung
- o Lüftersteuerung
 - abhängig von Belastung, Öl- und Umgebungstemperatur
 - minimale Verluste
- o Schalterversagerschutz
- o Abschaltströme speichern und auswerten
 - Schaltkontakt-Belastung für Wartungsintervalle

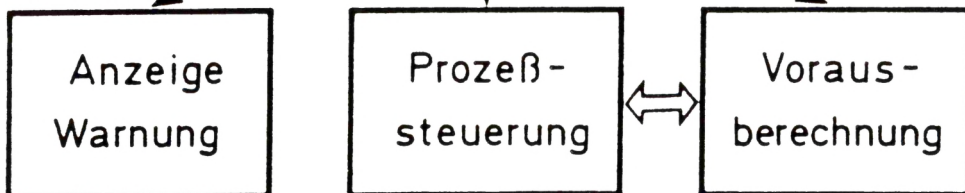
zu schützender Transformator



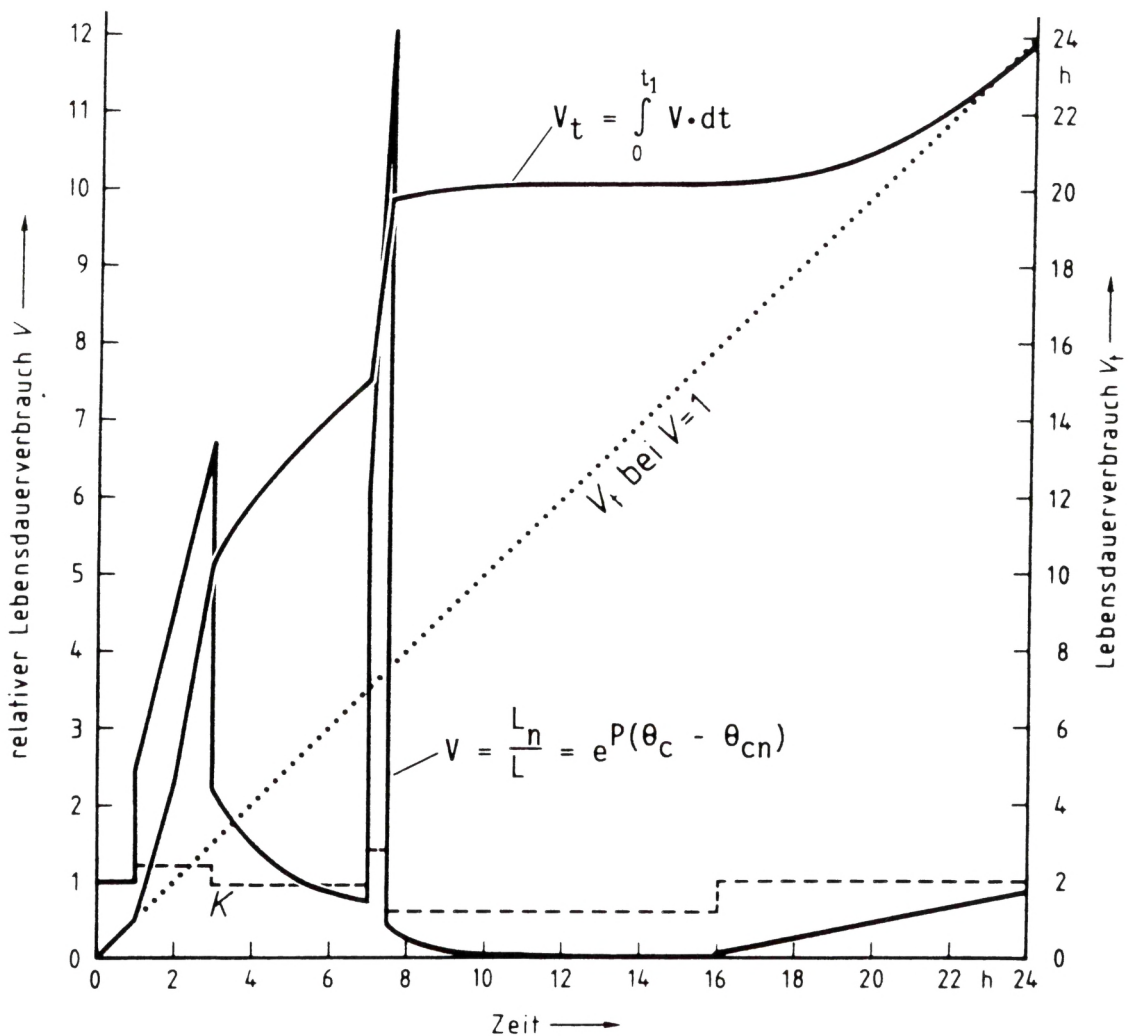
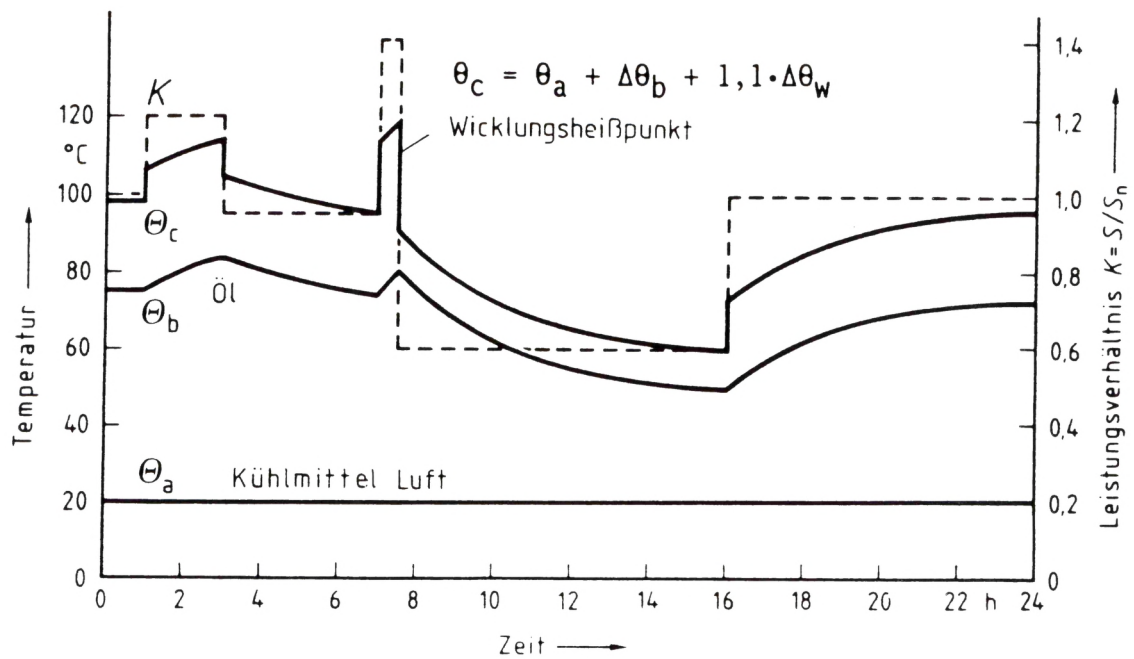
Nachbildung:



Auswertung:



Thermisches Modell für die Betriebsführung



Beispiel für den Lebensdauerverbrauch eines Transformators bei wechselnder Belastung, Kühlungsart ON

($\tau \sim 3h$, $\Delta\theta_{bn} = 55 K$, $\Delta\theta_{wn} = 21 K$, $y = 0,8$, $x = 0,9$, $d \approx 5 = P_{Cu}/P_{Fe}$)

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{b0} + (\Delta\theta_{bs} - \Delta\theta_{b0})(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\Delta\theta_w = \Delta\theta_{wn}(K)^{2y}$$

$$\Delta\theta_{bs} = \Delta\theta_{bn} \left(\frac{1 + d \cdot K^2}{1 + d} \right)^x$$

Überwachungseinrichtungen (langsamer Schutz)

→ Mikroprozessorschaltung, Sensoren

Aufgaben:

- o Überwachung der Isolationssysteme
 - Gasanalyse online mit Sensoren
(heute getrennte Messung)
 - Ölüberwachung online mit Sensoren
(heute getrennte Messung, Kontrolle der Durchschlagsspannung und Neutralisationszahl)
 - Teilentladungsmessung online
 - Berechnung der Transferfunktion
- o Kontrolle der Wicklungskonstruktion auf Verschiebungen durch Transport oder Kurzschlußkräfte
 - Berechnung der Transferfunktion
- o Messung von Resonanzen im Wicklungsaufbau
 - Berechnung der Transferfunktion
- o Messung der Überspannungen an den Klemmen
 - Kontrolle der Isolationskoordination,
Vergleich mit Prüfspannungen

Sensoren für den Netzeinsatz

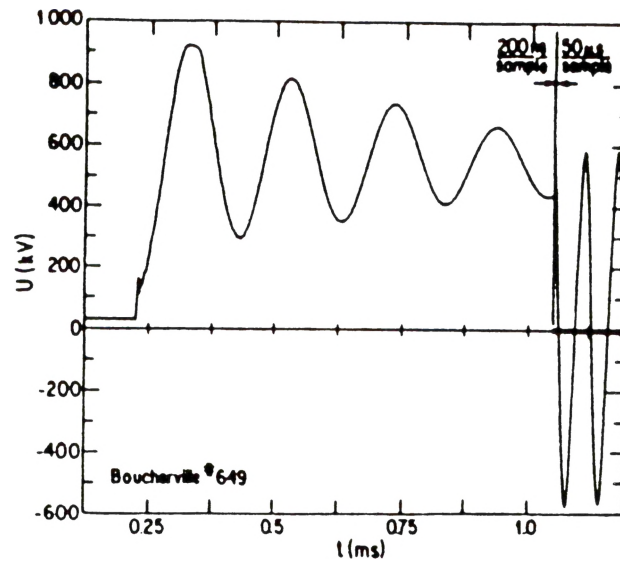
für die Spannungsmessung

- o Spannungswandler
 - induktiv (bis einige 10 kHz)
 - kapazitiv (bis 100 kHz)
- o Durchführung (Meßbelag, bis einige 100 kHz)
 - als Spannungsteiler
 - über Strommessung (Integration, galvanische Trennung)
- o Spannungsteiler
 - kapazitiv (bis einige 100 kHz)
 - gedämpft kapazitiv (bis einige MHz)
- o kapazitive Feldsonden (bis einige 10 MHz)
 - mit analoger oder digitaler Übertragung
 - mit Kabel oder optischer Übertragung

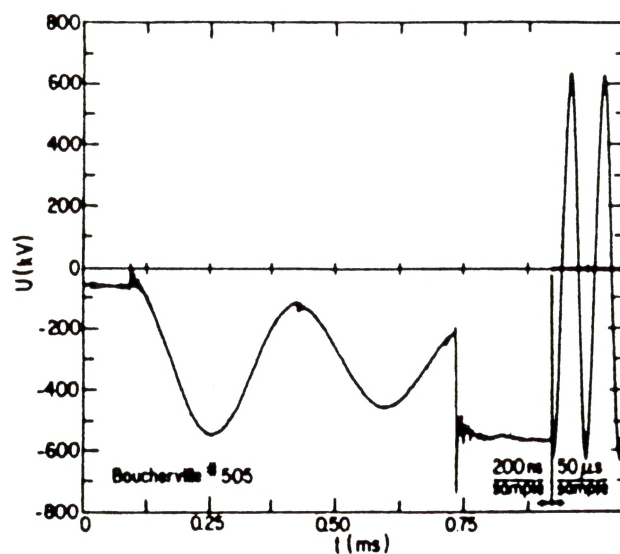
für die Strommessung

- o Stromwandler (bis einige 10 kHz)
- o Shunt (bis einige MHz)
- o Rogowski-Spule (bis einige MHz)

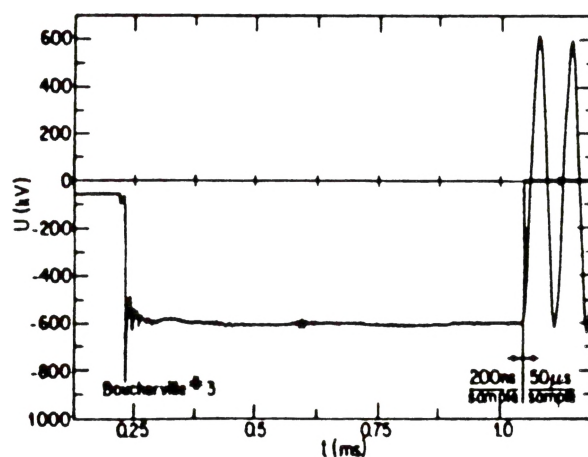
Gemessene Einschaltüberspannungen bei Transformatoren (Malewski, IREQ)



Einschalten eines 735/315 kV, 370 MVA Autotransformators mit einem 315 kV Leistungsschalter ohne Einschaltwiderstände

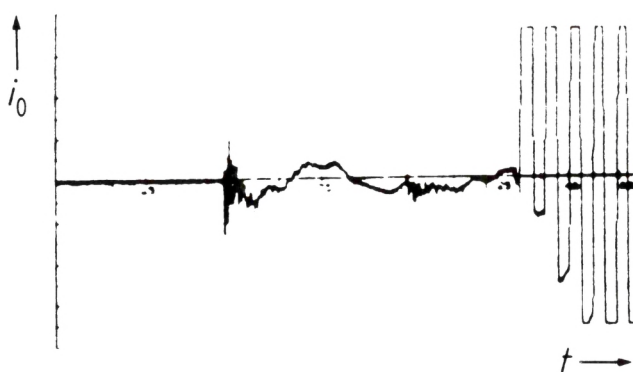
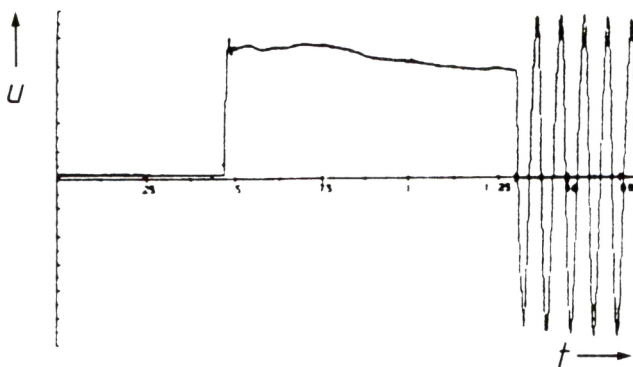
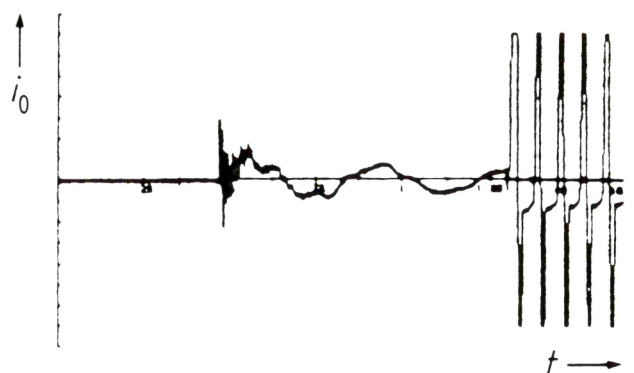
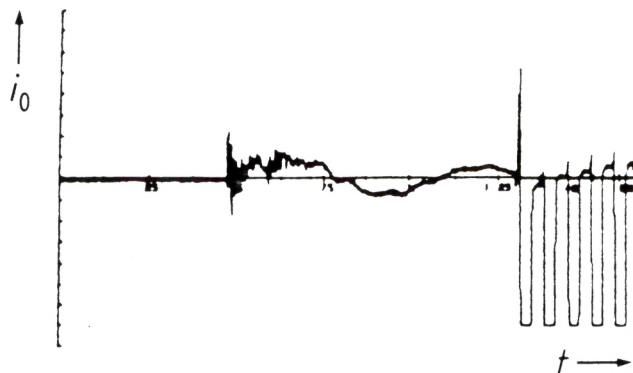
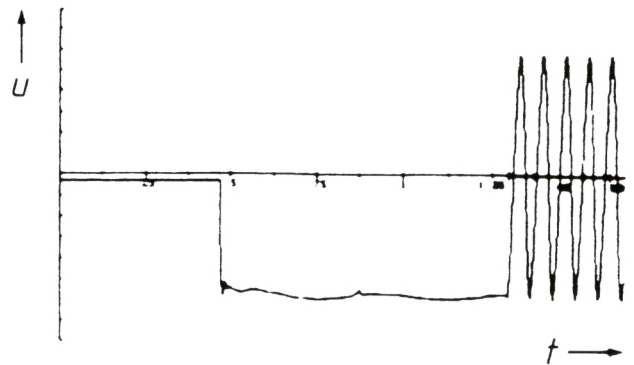
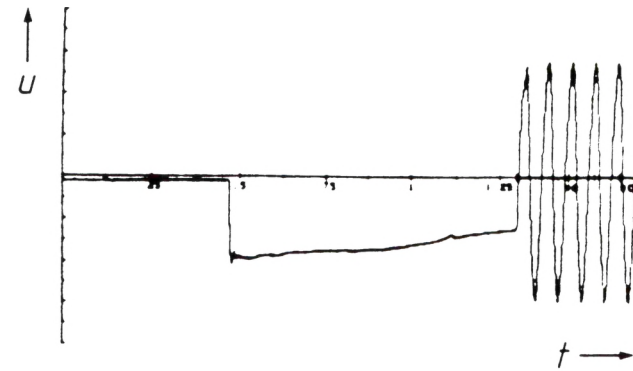


Einschalten eines 735/315 kV, 370 MVA Autotransformators mit einem 735 kV-Leistungsschalter mit 400 Ω Einschaltwiderständen

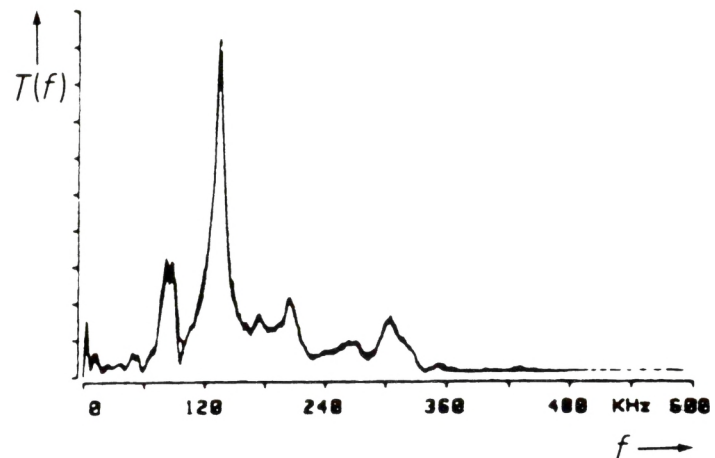


Einschalten eines 735/230 kV, 370 MVA Autotransformators mit einem 735 kV Leistungsschalter mit 400 Ω Einschaltwiderstand

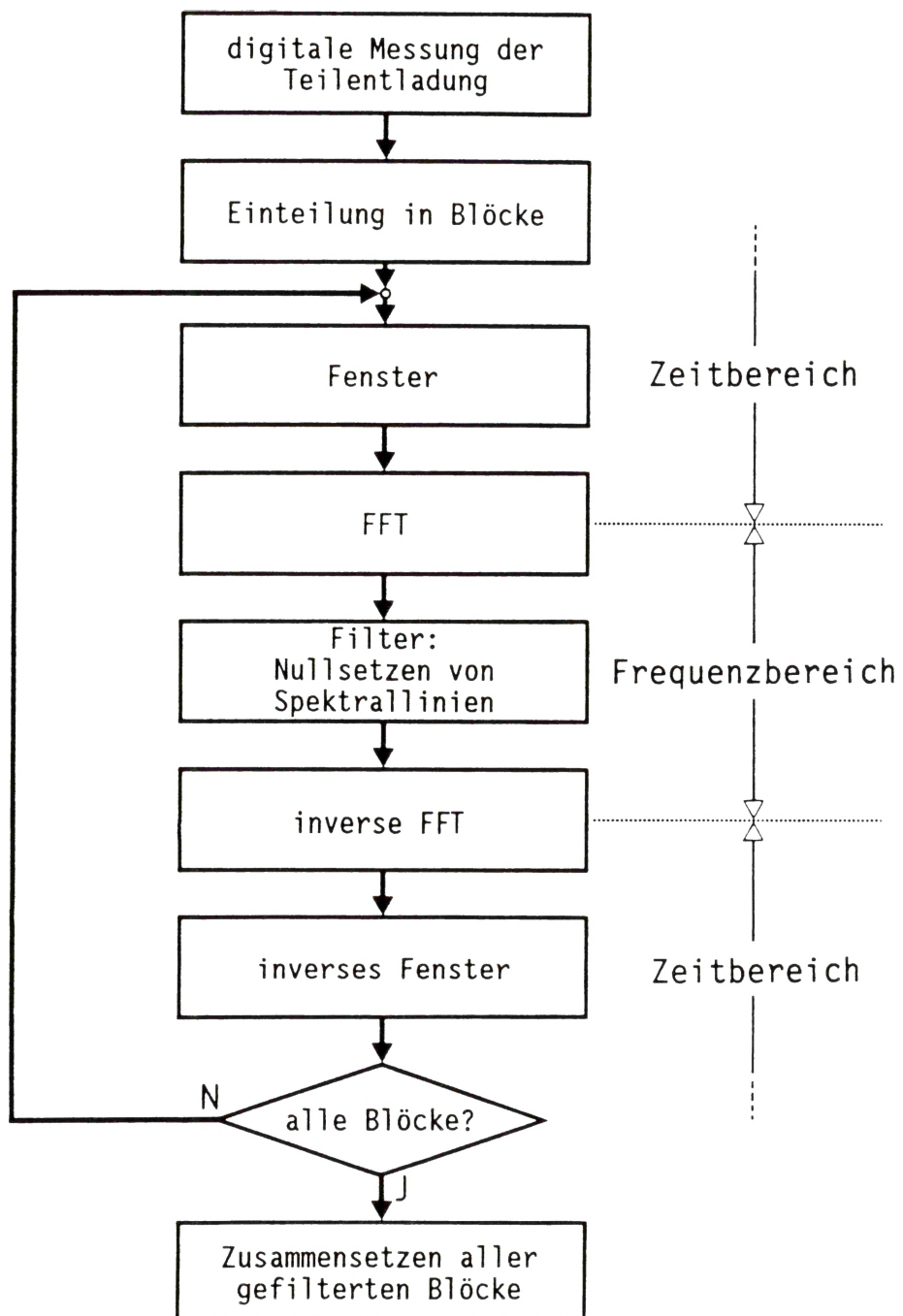
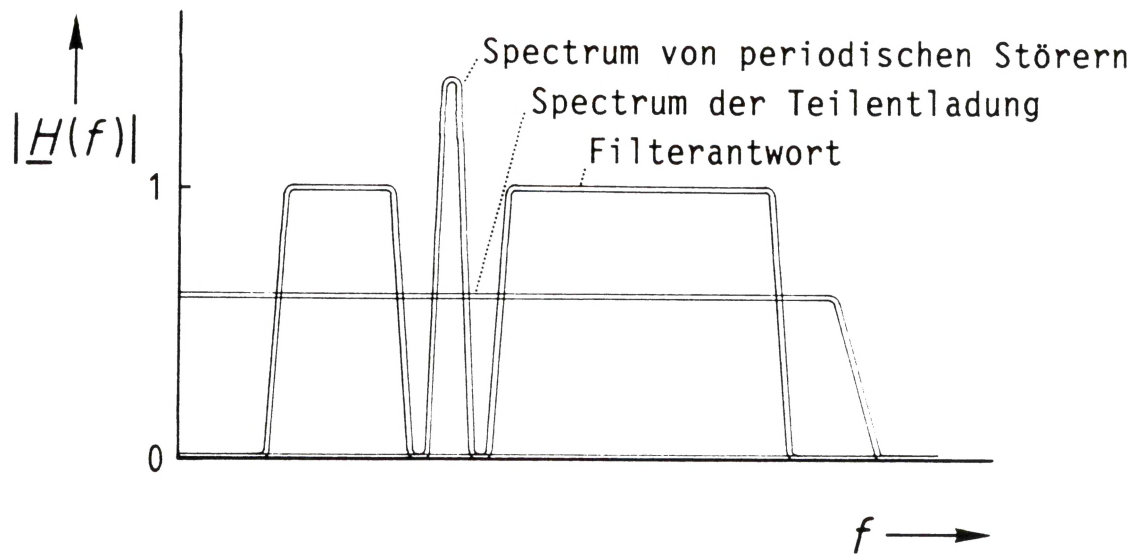
Berechnung der Transferfunktion
 (für drei verschiedene Einschaltvorgänge an einem 735 kV,
 370 MVA Autotransformator, Boucherville (IREQ)
 nach R. Malewski



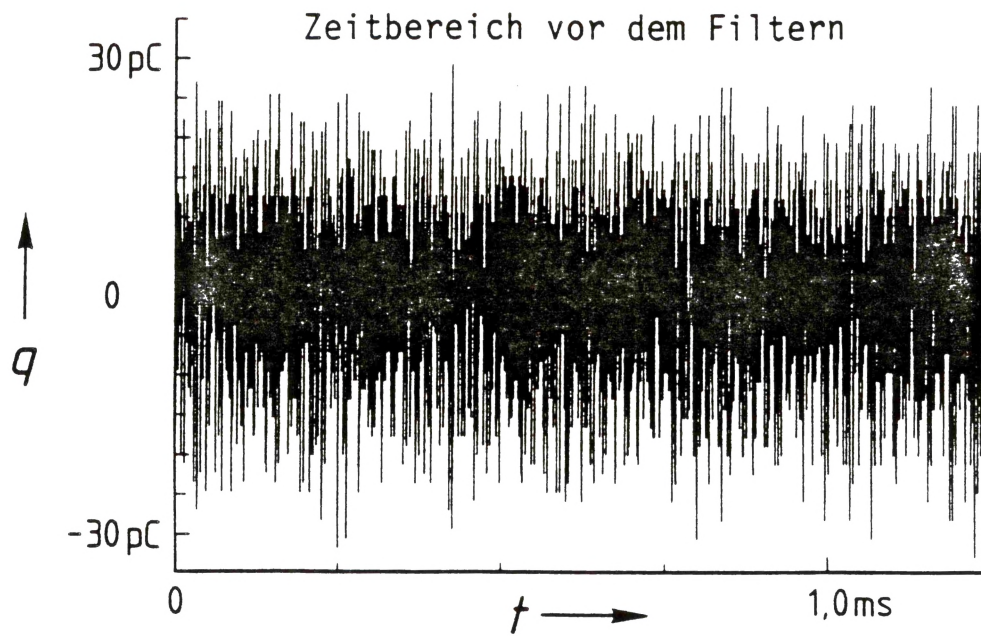
$$\text{Transfer Funktion } T(f) = \frac{i_0(f)}{u(f)}$$



Unterdrückung von periodischen Störsignalen



Beispiel einer Messung



Frequenzbereich

