

Dipl.-Ing. Michael Hartje, Hückeswagen

Erfassung von Teilentladungen an Leistungstransformatoren im Netzbetrieb

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **61**



Übersicht.....	1
Einleitung	2
1 Untersuchungen zur Ermittlung grundlegender Merkmale der Teilentladungen	5
1.1 Bestimmung charakteristischer Eigenschaften der TE-Impulse in flüssigen Isolierstoffen.....	6
1.1.1 Eigenschaften elektrischer Erscheinungsformen	6
1.1.2 Eigenschaften akustischer Erscheinungsformen.....	7
1.2 TE-Erfassung an räumlich ausgedehnten Anordnungen am Beispiel eines Transformators	8
1.2.1 Erfassung der elektrischen TE-Erscheinungen	8
1.2.2 Erfassung der akustischen TE-Erscheinungen.....	10
2 Grundlegende Untersuchung der akustischen Verfahren der TE-Messung.....	11
2.1 Meßaufbau zur Erfassung von akustischen TE-Signalen.....	12
2.2 Akustische Sensoren zur Messung von TE-Signalen	13
2.2.1 Messung mit Körperschallaufnehmern	13
2.2.2 Messung mit Hydrophon.....	14
2.3 Spektrale Eigenschaften der Teilentladung in Öl.....	15
2.3.1 Deutung des Betragsspektrums einer direkten TE-Schallwelle	16
2.4 Vergleich der Eigenschaften unterschiedlicher Aufnehmer und deren Korrektur.	17
2.4.1 Aufbau zur Kalibrierung von Körperschallaufnehmern mittels Hydrophon.	17
2.4.2 Das Problem der Glättung des Frequenzbereichs	19
2.4.3 Ergebnis der Kalibrierung eines Körperschallaufnehmers mit TE-Impulsen	20
2.5 Der Einfluß von Gefäßwand und metallischen Dämpfungskörpern.....	21
2.5.1 Übertragungsfunktion der Behälterwand.....	21
2.5.2 Untersuchungen des Dämpfungsverhaltens von Platten in Transformatoröl bei senkrechtem Eintritt des Schalls.....	22
2.5.3 Untersuchungen des Dämpfungsverhaltens von Platten in Transformatoröl bei schrägem Eintritt des Schalls	24
2.6 Untersuchungen verschiedener Einflußgrößen auf die akustischen TE-Phäno- mene an der Quelle und im Ausbreitungsweg.....	25
2.6.1 Der Einfluß auf die TE-Quelle	25
2.6.2 Der Einfluß der Ausbreitungsweglänge in homogenen flüssigen Medien bei konstanten Bedingungen	25
2.6.3 Der Einfluß der Bestromung der TE-Quelle.....	26
2.6.4 Der Einfluß der Temperatur auf die Schallausbreitung	27
2.7 Mittelwertbildung zur Verbesserung der Signaleigenschaften von akustischen TE-Signalen.....	27
2.8 Zusammenhang zwischen elektrischer und akustischer Signalamplitude.....	29
2.9 Diskussion der Ergebnisse	30

3	Anwendung der akustischen Verfahren auf ein Wicklungsmodell.....	33
3.1	Das untersuchte Wicklungssegment eines Leistungstransformators	33
3.2	Wahl einer TE-Quelle für die akustischen Untersuchungen.....	34
3.3	Laufzeiteigenschaften des direkten Schalls im Modell	35
3.4	Festlegung der Messungen am Wicklungsmodell	36
3.4.1	Meßaufbau zur Bestimmung des akustischen Dämpfungsverhaltens des Wicklungsmodells	37
3.4.2	Auftreten negativer TE-Impulse mit großen Schallamplituden.....	37
3.5	Die Dämpfungseigenschaften des untersuchten Wicklungsmodells.....	39
3.5.1	Ergebnisse der Untersuchungen.....	39
3.5.2	Diskussion der Untersuchungsergebnisse zum Dämpfungsverhalten des Wicklungsmodells	41
4	Verbesserung der Schallübertragung durch akustische Wellenleiter und ab- schließende Bewertung der akustischen TE-Messung	44
4.1	Grundlegende Untersuchungen am Wellenleiter.....	44
4.1.1	Meßaufbau und Anordnung mit akustischem Wellenleiter	44
4.1.2	Bestimmung der einzelnen Dämpfungskonstanten des Wellenleiters bei verschiedenen Eintrittsarten des Schalls.....	46
4.1.3	Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wellenleiter.....	47
4.2	Möglichkeiten des Einsatzes in Leistungstransformatoren	47
4.2.1	Untersuchungen am Wicklungsmodell mit Wellenleiter.....	48
4.2.2	Untersuchungsergebnisse.....	48
4.3	Beurteilung des Einsatzes von Wellenleitern in der Praxis	50
4.4	Abschließende Bewertung der akustischen TE-Messung für die Praxis.....	51
5	Meßverfahren zur Erfassung und Bewertung von elektrischen TE-Merkmalen an Transformatoren	54
5.1	Grundlagen der Messung elektrischer TE-Merkmale	54
5.2	Ankopplungseinheiten zwischen Hochspannung und TE-Meßgerät	56
5.2.1	Anforderungen	56
5.2.2	Der Einfluß einer parallelen Kapazität auf die Kondensatorauskopplung ...	57
5.2.3	Ausführungsformen kapazitiver Auskopplungen	59
5.2.3.1	Auskopplung über den Meßanschluß der Durchführungen.....	59
5.2.3.2	Auskopplung am Spannungswandler	61
5.2.3.3	Auskopplung über Aktivantenne.....	63
5.2.4	Induktive Ankopplung.....	63
5.3	Diskussion und Vergleich verschiedener Auskopplungsmethoden der TE- Meßtechnik für die Messung vor Ort	64

6	Elektrische Auskopplung von TE-Impulsen mit Rogowski-Spule	67
6.1	Theoretische Betrachtungen zur Funktionsweise der Rogowski-Spule.....	68
6.1.1	Funktionsweise der Rogowski-Spule	68
6.1.2	Elektrische Merkmale der Rogowski-Spule.....	70
6.1.2.1	Induktivität.....	70
6.1.2.2	Belastung und Strom-Übertragungsfunktion.....	70
6.1.3	Optimierung der Übertragungseigenschaften von Rogowski-Spulen für die TE-Messung	71
6.1.3.1	Abhängigkeit von der Windungszahl der Spule.....	73
6.1.3.2	Abhängigkeit vom Spulendurchmesser (Durchflutungsfläche).....	74
6.1.3.3	Abhängigkeit von der Permeabilität des Kernmaterials.....	74
6.1.3.4	Abhängigkeit von dem Belastungs- und Meßwiderstand R_m	75
6.1.4	Ergebnis der Optimierung und Schlußfolgerungen	75
6.1.4.1	Optimierung der Übertragungseigenschaften für die breitbandige TE-Messung	75
6.1.4.2	Schlußfolgerungen aus den theoretischen Untersuchungen	76
6.2	Praktische Untersuchungen an einer Rogowski-Spule für die TE-Auskopplung.....	77
6.2.1	Messung der Induktivität.....	77
6.2.2	Messung des Übertragungsverhaltens an einem Modell.....	78
6.2.3	Mögliche Meßfehler.....	79
6.2.4	Vergleich der Ergebnisse der theoretischen und praktischen Untersuchungen.....	79
6.3	Verstärkung der über Rogowski-Spulen erfaßten TE-Signale	80
6.3.1	Anforderungen an einen angepaßten Vorverstärker.....	80
6.3.2	Funktionsweise und Aufbau eines angepaßten Vorverstärkers.....	80
6.4	Messungen mit elektronisch erzeugten TE-Impulsen am Modell	81
7	Probleme der Messung elektrischer TE-Merkmale an Transformatoren	83
7.1	Vergleichende Betrachtung des Übertragungsverhaltens für TE an unterschiedlichen Transformatoren	84
7.1.1	Auswahl der Meßobjekte.....	85
7.1.2	Meßmethode und Meßaufbau am Ortsnetztransformator.....	85
7.1.3	Messung am Leistungstransformator	86
7.1.4	Schlußfolgerungen aus der vergleichenden Betrachtung für die TE-Messung.....	87
7.1.5	Abhängigkeit des Frequenzganges von Ölbefüllung und Kesselwandung	88
7.2	Zeitverhalten der TE-Impulse an einer Transformatorwicklung	89
7.3	Übertragungsverhalten bei Anregung mit elektronisch nachgebildeten TE-Impulsen.....	90
7.4	Diskussion der Meßergebnisse	92
7.5	Rechnerische Untersuchung des TE-Übertragungsverhaltens von Transformatorwicklungen.....	94

7.6	Übertragungsverhalten verschalteter Transformatorwicklungen.....	95
7.7	Vergleich der Messungen und Wahl der Meßsysteme zur elektrischen TE-Messung an Transformatoren.....	96
7.8	Verfahren zur digitalen Bewertung der TE-Signale	97
8	Probleme der elektrischen TE-Messung vor Ort	100
8.1	Digitales TE-Meßsystem zur Erfassung und Verarbeitung der TE- und Störsignalen an Transformatoren vor Ort.....	101
8.1.1	Digitales Meßsystem zur Erfassung von TE-Signalen.....	101
8.1.2	Meßaufbau am Leistungstransformatoren vor Ort.....	102
8.2	Analyse der vor Ort auftretenden Störsignale	103
8.2.1	Modell über die Einwirkung von Störungen auf das zu messende TE-Signal.....	103
8.2.2	Arten und Eigenschaften von vor Ort auftretenden Störsignalen	104
8.2.2.1	Klasseneinteilung der Meß- und Störsignale	104
8.2.2.2	Zeitverhalten von Störsignalen	105
8.2.2.3	Spektrale Eigenschaften.....	106
8.2.3	Einflüsse auf die Störsignale.....	106
8.2.4	Möglichkeiten zur Verminderung von Einflüssen der Störungen auf die Meßsignale.....	107
8.3	Filterverfahren zu Minderung der Einflüsse von Störsignalen.....	108
8.3.1	Frequenzselektive Verfahren mit analogen Filtern	108
8.3.2	Frequenzselektive Verfahren mit digitalen Filtern	109
8.3.2.1	Einfache "adaptive" Sperrfilter mittels Fourierapproximation	110
8.3.2.2	Beurteilungskriterien für die Wirksamkeit von Filtern durch die Signalleistung	110
8.3.2.3	Bedeutung der Signalleistung für die Praxis.....	111
8.3.2.4	Bestimmung der optimalen Anzahl von einfachen "adaptiven" Sperrfiltern mit Fourierapproximation	112
8.3.3	Optimale Filter.....	113
8.3.4	Adaptive Filter.....	115
8.3.4.1	Gewinnung statistischer Eigenschaften durch adaptive Vorhersagealgorithmen.....	115
8.3.4.2	Auswahl eines adaptiven Filterverfahrens mit Signalschätzung	116
8.3.4.3	Eigenschaften und Versuchsergebnisse des ausgewählten Algorithmus	117
8.3.5	Gegenüberstellung des Rechenaufwandes verschiedener digitaler Filterverfahren.....	118
8.4	Verfahren zur Differenzierung impulsförmiger Störsignale unter Ausnutzung von räumlichen Eigenschaften des Meßaufbaus	118
8.4.1	Brückenschaltungen und ihre Probleme bei der TE-Messung	118
8.4.2	Anwendung einer Richtkopplung in der TE-Meßtechnik.....	119
8.4.2.1	Aufbau und Funktionsweise einer Richtkoppelschaltung.....	120

8.4.2.2	Orientierende Messungen vor Ort mit elektronisch nachgebildeten TE-Signalen	121
8.4.2.3	Untersuchung der Übertragungseigenschaften der Elemente des Richtkopplers mit harmonischen Signalen vor Ort.....	122
8.4.2.4	Untersuchung der Richtwirkung mit harmonischen Signalen	124
8.4.2.5	Richtwirkung im Betrieb an einem Leistungstransformator	125
8.4.2.6	Probleme bei der praktischen Realisierung des Richtkopplers	126
8.4.3	Kombinierter Einsatz von Filtern und Richtkopplung zur Erhöhung der Empfindlichkeit bei der TE-Messung vor Ort.....	126
8.4.3.1	Meßergebnisse	126
8.4.3.2	Diskussion der Meßergebnisse.....	127
8.4.3.3	Erweiterungen und Ausblick für das Richtkoppelverfahren	127
9	Konzept und Aufbau eines Systems zur kontinuierlichen Erfassung von elektrischen TE-Kenngrößen.....	129
9.1	Analoger Verarbeitungsteil.....	129
9.1.1	Konzept der Vorverarbeitung.....	129
9.1.2	Realisierung der Vorverarbeitung	130
9.2	Aufbereitung und digitaler Verarbeitungsteil.....	130
9.3	Programmgesteuerte Erfassung und Auswertung	131
9.4	Erste Erfahrungen mit dem aufgebauten Meßsystem.....	131
9.5	Messungen an einem Leistungstransformator.....	131
	Ausblick.....	133
	Zusammenfassung	135
	Literaturverzeichnis	140
	Verzeichnis häufiger Abkürzungen und mehrfach verwendeter Formelzeichen	151
	Bildteil.....	153
	Anhang	