

## Online Monitoring und Diagnose von Leistungstransformatoren: Eine technisch und wirtschaftliche sinnvolle Lösung für den sicheren Betrieb von Transformatoren

Leistungstransformatoren sind der zentrale Knotenpunkt in der elektrischen Energieverteilung und -übertragung. Entsprechend entscheidend ist ihr Zustand für einen zuverlässigen und störungsfreien Betrieb. Ein Ausfall kann schwerwiegende Folgen haben. Die daraus resultierenden Überlastungen von Netzabschnitten können zu weitreichenden Versorgungs- und Produktionsausfällen führen. Bei einem totalen Versagen der Isolation kann es in der Folge zu gefährlichen Personen- und immensen Sachschäden kommen.

Betreiber von elektrischen Netzen müssen sich folgenden Herausforderungen stellen:

1. Die Transformatoren müssen bis an das Ende ihrer Lebensdauer sicher funktionieren.
2. Diese altern schneller aufgrund zusätzlicher Netzüberlastungen und veränderter Lastflüsse.
3. Außerdem werden diese durch immer mehr Netztransienten (z.B. Überspannungen) belastet.

Online-Monitoring und Diagnosemessungen stellen Instrumente dar, um die oben genannten Herausforderungen zu meistern, sodass ihre Leistungstransformatoren sicher betrieben werden können. Dieser Beitrag liefert einen Überblick über die möglichen Monitoringsysteme und deren Mehrwert. Vor allem der Mehrwert von [DGA Online Monitoringsystemen](#) wird kurz vorgestellt. Das Zusammenspiel zwischen Online Monitoring und Diagnose anhand von elektrischen Messungen wird ebenfalls erläutert.

### Warum Online Monitoring und was sind nun die Vorteile eines Monitoringsystems mit engmaschiger Überwachung gegenüber periodischen Überprüfungen?

Zyklische Messungen zur Zustandsbewertung von Leistungstransformatoren sind für die Zustandsbewertung von Transformatoren sehr sinnvoll. Diese werden in zwei Gruppen aufgeteilt: [Öl-Analyse](#) (z.B. Analyse der im Öl gelösten Gase, DGA) und [elektrische Messungen](#) (z.B. Wicklungswiderstandsmessung). In der Praxis werden sowohl die Öl-Analyse als auch die elektrischen Messungen periodisch durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen liefern eine Momentaufnahme über den Zustand des Transformators. Erst nachdem über mehrere Jahre hinweg Messwerte gesammelt und verglichen wurden, können Trends erkannt werden. Für jede dieser Messungen muss der betreffende Transformator außer Betrieb genommen werden. Hinzu kommt, dass manche Messwerte erst dann eine gute Aussagekraft haben, wenn sie während des Betriebes aufgezeichnet und ausgewertet werden. Aus diesen Gründen kann es bei ausgewählten Transformatoren sinnvoll sein, ergänzend zu den zyklischen Messungen [Online Monitoring Systeme](#) zu installieren.

Um den Mehrwert einer Online Überwachung zu illustrieren wird beispielhaft die zeitliche Entwicklung einer Messgröße in der Abbildung 1 gezeigt. Im diesem Fall handelt es sich um eine Messgröße, die zeitveränderlich ist. So eine zeitabhängige Veränderung kann beispielsweise auf die betriebliche Auslastung eines Transformators zurückzuführen sein. Die Abbildung zeigt ebenfalls die Messergebnisse, die man aus periodischen Messungen erhalten würden. Es werden drei Tendenzkurven geplottet, welche aus diskreten Messwerten von „periodischen“ Messungen abgeleitet worden sind. Der Abbildung kann entnommen werden, dass abhängig von Zeitpunkt der periodischen Messung, unterschiedliche Interpretationen über die zeitliche Entwicklung der Messgröße entstehen.

Mögliche Interpretationen:

- Tendenzkurve 1: konstante und hohe Messgröße über die Zeit
- Tendenzkurve 2: konstante und niedrige Messgröße über die Zeit
- Tendenzkurve 3: konstanter Einstieg der Messgröße über die Zeit

Keiner dieser drei Interpretationen bildet das tatsächliche Verhalten der Messgröße ab. Es handelt sich hierbei also um Fehlinterpretationen.

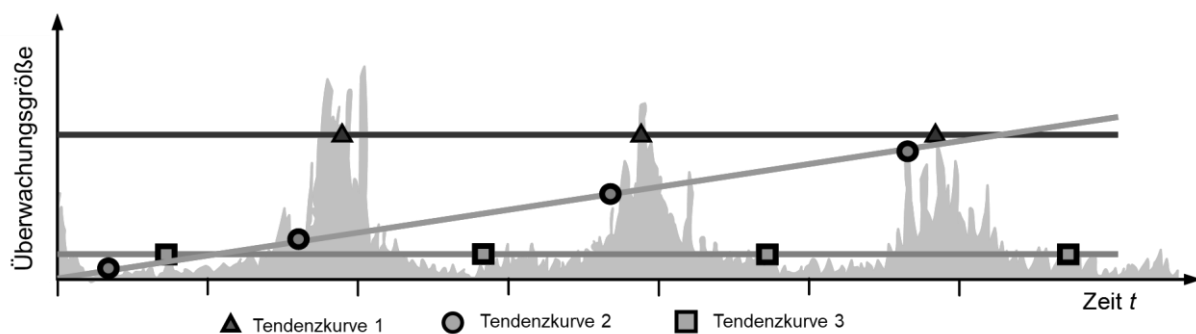


Abbildung 1. Beispielhafte Darstellung der zeitlichen Entwicklung einer Messgröße

### Welche Parameter sind sinnvoll zu überwachen?

Der erste Schritt bei der Implementierung eines Online Monitoring Systems ist die Wahl der zu überwachenden Messgrößen. Dafür sind die unterschiedlichen Komponenten eines Transformators zu beachten. Die Hauptkomponenten eines Leistungstransformators sind der Aktivteil, die Durchführungen und der Stufenschalter (siehe Abbildung 2). Ergänzende Komponenten sind Kühlsysteme (Lüfter, Pumpen) sowie Überspannungsableiter. Gemäß Ausfallstatistiken für Transformatoren nach Cigré WG A2.37 sind die meisten Ausfälle von Transformatoren auf den Aktivteil (Wicklungen, Kern) sowie auf die Durchführungen zurückzuführen. Aus diesem Grund wird in der Regel bei der Implementierung eines Online Monitoringsystems der Fokus auf diese Komponenten gesetzt.

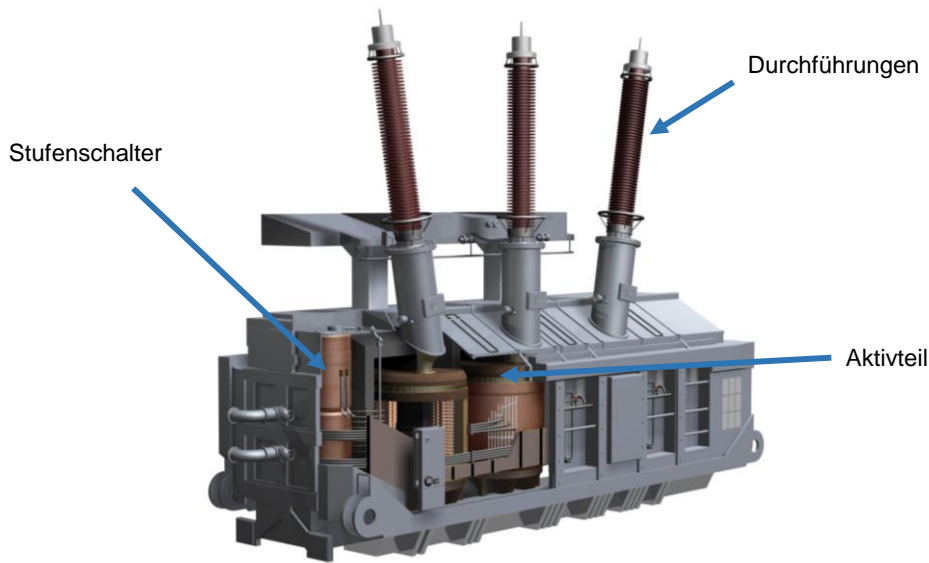


Abbildung 2. Hauptkomponenten eines Leistungstransformators

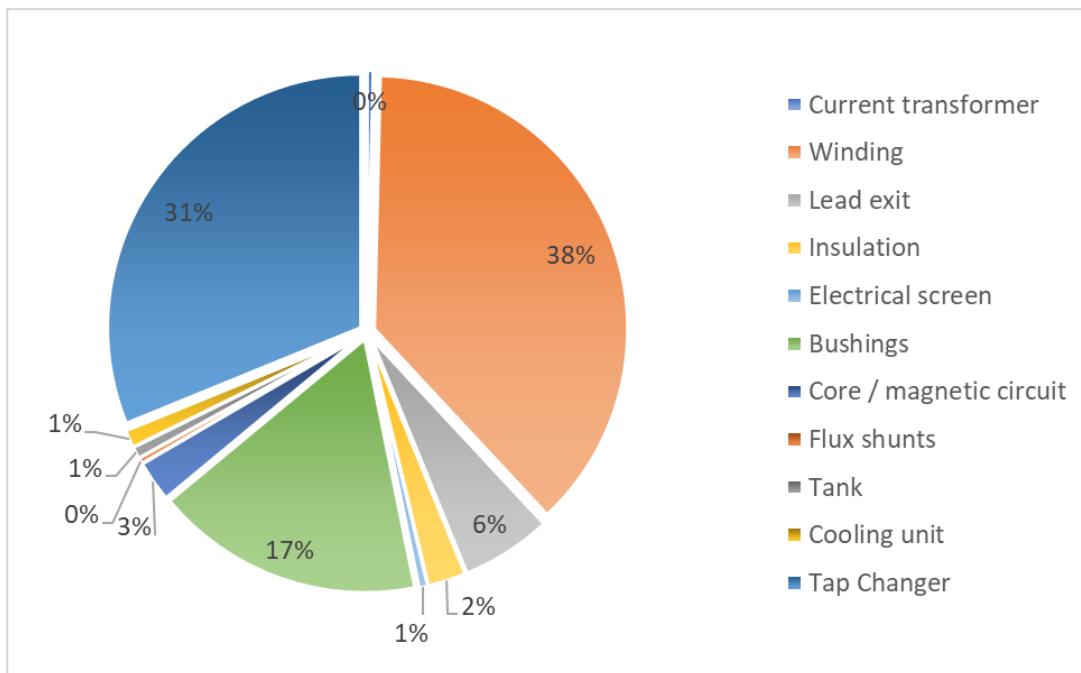


Abbildung 3. Ausfallstatistiken für Transformatoren nach Cigré WG A2.37

Abbildung 4 zeigt eine Übersicht über die üblichen Messgrößen zur Überwachung des Aktivteils von Transformatoren. Die gängigen Monitoringverfahren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: „Grundlegend“ und „Fortgeschritten“. Aufgrund der hohen Wirksamkeit bei der Erkennung von Fehlern im Aktivteil haben sich in der Praxis die [DGA Online Monitoringsysteme](#) durchgesetzt. In der werden die Fehlertypen nach IEC 60599, die im Aktivteil eines Transformators auftreten aufgelistet.

Auch das das [Online Monitoring von Durchführungen](#) findet häufig Anwendung.

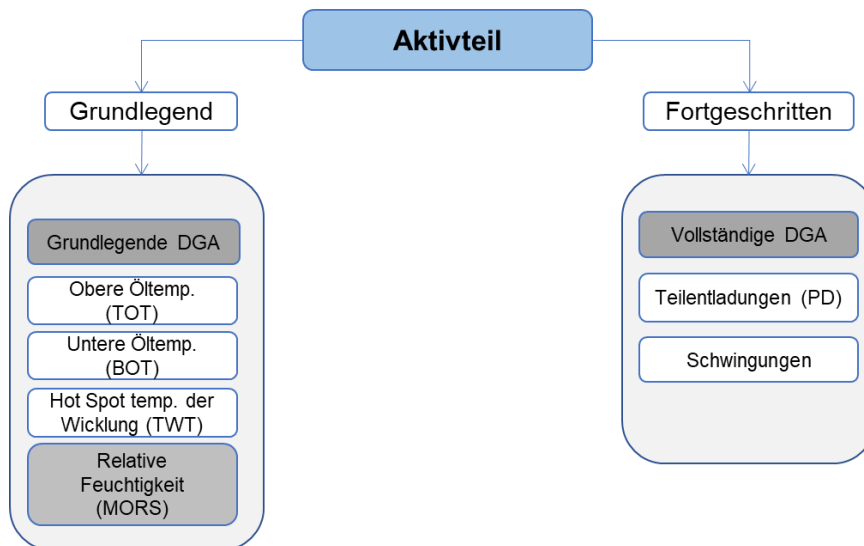


Abbildung 4. Übersicht über die Messgrößen zur Online Überwachung des Zustandes von Leistungstransformatoren

Abkürzung	Festgestellte Schäden
T3	Thermische Fehler mit Temperaturen über 700 °C Karbonisierung des Öls, Metallverfärbung (800 °C) oder Metallschmelze (>1000 °C)
T2	Thermische Fehler in Öl und/oder Papier über 300 °C Karbonisierung des Papiers
T1	Thermische Fehler in Öl und/oder Papier unter 300 °C Papier bräunlich verfärbt
PD	Teilentladungen X-Wachs-Bildung auf der Papierisolierung, Nadellöcher, karbonisierte Perforationen im Papier
D1	Entladungen niedriger Energie Größere karbonisierte Perforationen durch das Papier (Löcher), Karbonisierung der Papieroberfläche (Kriechwegbildung) oder Kohlestoffteilchen im Öl
D2	Entladungen hoher Energie Umfangreiche Zerstörung und Karbonisierung des Papiers, Metallschmelze am Entladungsbereich, umfangreiche Karbonisierung des Öls
S	Streugasen in Öl
O	Überhitzung <250 °C
C	Mögliche Karbonisierung des Papiers
T3-H	Thermische Fehler in Öl mit Temperaturen über 700 °C

Tabelle 1. Definition von Fehlertypen nach IEC 60599 und Cigré TB 783

## Vorteile von Online Monitoring

Die Hauptvorteile der Installation von Online Monitoringsystemen sind in der Abbildung 5 dargestellt.

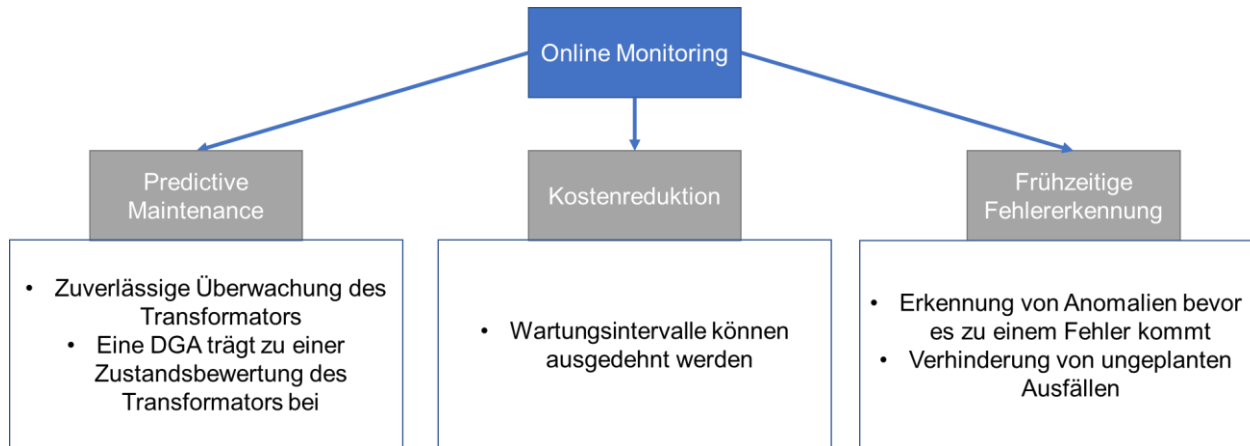


Abbildung 5. Übersicht über die Vorteile der Installation von Online Monitoringsystemen

Die Aufnahmen von vielen Messwerten über längere Zeiträume ermöglichen eine Trenderfassung und somit eine kurze Reaktionszeit auf Veränderungen. Hier können eventuelle Ausfallkosten vermieden werden. Außerdem kann das Ausmaß von Abweichungen besser eingeordnet werden, sodass ein sicherer Weiterbetrieb mit Hilfe einer intensiveren Überwachung möglich ist und der Austausch von „angeschlagenen“ Transformatoren hinausgezögert und geplant werden kann.

Wenn Sie wichtige Parameter Ihres Transformators ständig überwachen, können Sie diesen sicher betreiben, auch über dessen zu erwartende Lebensdauer hinaus. Bei Anomalien in den Messergebnissen können Sie früh reagieren und den Transformator entlasten. Das gibt Ihnen die nötige Zeit, um dessen Außerbetriebnahme zu planen. Nach weiterführenden Messungen können Sie entscheiden, ob der Transformator nun dauerhaft außer Betrieb gesetzt werden muss. Die enormen Kosten eines plötzlichen Totalausfalls können Sie so vermeiden.

Einen an das Ende seiner zu erwartenden Lebensdauer gekommenen Transformator permanent zu überwachen kann aus mehreren Gründen sinnvoll sein:

- Der Transformator ist wichtig für Ihr Netz, aber nicht redundant ausgeführt. Im deutschen Stromnetz gilt zwar die N-1-Sicherheitsregel, diese kann aber nicht vollständig umgesetzt werden.
- Dezentrale Erzeugungsanlagen (z.B. Photovoltaik) sowie leistungselektronische Anlagen überlasten Ihren Transformator immer wieder. Das Vorhandensein von Oberschwingungen sowie schnelle Spannungsänderungen können die Komponenten des Transformators zusätzlich belasten
- Neue Kabelverbindungen und Drosseln zur Blindleistungskompensation können zu veränderten transienten Beanspruchungen für Ihren Transformator führen. Die Installation dieser Betriebsmittel verändern die Netzimpedanz. Es können Resonanzen auftreten, die beispielweise zur Überspannungen führen, welche wiederum die Isolation des Transformators belastet.

Stellen Sie die Risiken und die Folgen eines ungeplanten Ausfalls Ihres Transformators den Aufwänden für dessen Online-Monitoring gegenüber. So können Sie entscheiden, ob die Ausstattung Ihres Transformators mit einem Online-Monitoring-System sinnvoll ist.

## DGA Online Monitoring

Die Gas-in-Öl-Analyse (DGA) bei Leistungstransformatoren ist eine wichtige Komponente bei der zustandsorientierten Wartung sowie bei der Erkennung von Fehlern und der Vermeidung ungeplanter Transformatorausfällen, weil die Gaswerte im Transformatoröl auf das Vorhandensein eines Fehlers hinweisen können.

Die Geräte für das Online Monitoring werden bei der technische Broschüre 783 von Cigre (WG D1/A2.47) abhängig von den Anzahl von Gasen, die überwacht werden, entweder der Kategorie „Fehler Diagnose“ oder der Kategorie „Fehlererkennung“ zugeordnet. Die Geräte der Kategorie „Fehlererkennung“ entsprechen der Kategorie „grundlegendes Monitoring“ in der **Error! Reference source not found.**, während die Geräte der Kategorie „Fehlerdiagnose“ der Kategorie „Fortgeschritten“ entspricht.

Welcher Art von Gerät wann und wo sinnvoll ist, hängt von einer Reihe von Faktoren ab, die im Detail bewertet werden müssen.

Application	Type of monitor	Gases Measured	Faults Possible to Identify	Faults not Possible to Identify
Fault Diagnostic	M8/(M9)	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , (N <sub>2</sub> )	-all 10 faults in Table 2.2, at an early stage	-none
	M6/(M7)	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO, (CO <sub>2</sub> )		-faults in paper very often are not detected correctly with CO only with M6, M5 and M2
	M5	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO	-the 6 basic faults only	-the 5 sub-types of faults.
	M3	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		
Fault Detection	M2	H <sub>2</sub> , CO	-none of the 10 faults can be identified.	-may not detect faults D1, D2 in their early stages, only in their late, sometimes catastrophic stages
	M1	H <sub>2</sub>		
	M1*	Composite reading of H <sub>2</sub> and other gases		

Tabelle 2. Fehler, die mit DGA Online Monitoring erkannt werden können (Quelle: TB 783, WG D1/A2.47 Cigre)

Zur Erkennung von Fehlern sind nach Angaben von Cigré die Geräte M1 oder M2 ausreichend. M1- Geräte überwachen Wasserstoff (H<sub>2</sub>), während M2- Geräte sowohl Wasserstoff als auch Kohlenmonoxid (CO) überwachen.

Ein Beispiel eines Gerätes der Kategorie „Fehlererkennung“ ist das [MHT410](#) von der Firma [VAISALA](#). Dieses Gerät liefert eine zuverlässige Wasserstoffüberwachung zur Fehlererkennung und bietet eine kosteneffiziente Lösung zur einfachen Fehlererkennung und Überwachung. Die Abbildung 6 zeigt eine Installation eines MHT410.



Zur weitergehenden Analyse bietet sich die Möglichkeit an, Multigasanalyse Geräte zu nutzen, welche alle wichtigen Schlüsselgase erfassen können. Dieses ermöglicht nicht nur eine Detektion, sondern auch eine Diagnose des Fehlers. Eine solch umfangreiche Lösung bietet sich bei sehr wichtigen Transformatoren an, deren Ausfall hohe Folgekosten mit sich bringen oder bei bereits vorgeschädigten Transformatoren. Hier kann der Austausch hinausgezögert und ein spontaner Ausfall vermieden werden. Als Beispiel eines Multigasgerätes kann das [OPT100](#) von der Firma [VAISALA](#) genannt werden.



Abbildung 6. Beispielhafte Installation eines Gerätes M1 (MHT410, VAISALA)



Abbildung 7. Beispielhafte Installation eines Gerätes M7 (OPT100, VAISALA)



Gerne beraten wir Sie umfangreich zu dem Thema Online-Monitoring und entwerfen ein für Ihre Betriebsmittel passendes Konzept. Als autorisierter Distributor der Firma [VAISALA](#) können wir Ihnen auch entsprechende Demo-Geräte zur Verfügung stellen.

Nehmen Sie einfach Kontakt mit uns auf!



### **Ansprechpartner**

Philip Wischtukat

Tel. +49 2383 6189 693

Mobil +49 170 4440 082

[p.wischtukat@hgmes.de](mailto:p.wischtukat@hgmes.de)

**Hubert Göbel GmbH**  
Siemensstraße 42  
D-59199 Bönen

[www.hgmes.de](http://www.hgmes.de)  
[LinkedIn / Xing](#)