

Präventive Erkennung von Störungen und Fehlern bei Messwandlern

Tanja Lukan, Biljana Čuček, Tim Gradnik, Tanja Seme

Elektroinstitut Milan Vidmar, Hajdrihova 2, 1000 Ljubljana, Slowenien, +38614743661, tanja.lukan@eimv.si, biljana.cucek@eimv.si, tim.gradnik@eimv.si, tanja.seme@eimv.si, <https://www.eimv.si/en/>

Kurzfassung: Die zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie ist eine der Grundlagen des heutigen Lebens. Die Instandhaltung der Anlagen des elektrischen Energiesystems ist daher auf die präventive Erkennung von Fehlern und Störungen ausgerichtet. Am Elektrotechnischen Institut Milan Vidmar (EIMV) erkennen wir seit mehreren Jahrzehnten mit der Diagnose von Transformatorenölen Störungen und frühe Stadien von Transformatorfehlern. Dadurch ermöglichen wir den Betreibern eine zustandsorientierte Anlagenbewirtschaftung und tragen so indirekt zur kontinuierlichen Betriebsfähigkeit der Transformatoren bei.

Im Referat konzentrieren wir uns auf die bisherigen Erfahrungen mit der Diagnostik von Messwandlern, die in der Energietechnik eine sehr wichtige Rolle spielen, da sie die notwendigen Messgrößen bereitstellen und so das zuverlässige Funktionieren der Schutzanlagen gewährleisten. Ein Ausfall eines Messwandlers bedeutet nicht nur einen Stromausfall, sondern stellt auch eine erhebliche Gefahr für Menschen dar, da die Möglichkeit einer explosionsartigen Havarie besteht. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Hersteller, Typen und Konstruktionen von Messwandlern haben wir verschiedene Kriterien entwickelt, die eine Zustandsbewertung der Messwandler anhand von vier diagnostischen Codes ermöglichen. Mit diesen Codes werden die Betreiber auf Messwandler hingewiesen, die eine verstärkte Überwachung oder einen Austausch erfordern.

Keywords: Messwandler, präventive Diagnostik, Zustandsüberwachung, technisches Asset-Management

1 Einleitung

Das slowenische Hochspannungsübertragungsnetz umfasst Betriebsmittel auf drei Spannungsebenen (400 kV, 220 kV und 110 kV) und dient der Übertragung elektrischer Energie von großen Erzeugungsanlagen (Kernkraftwerke, Wärmekraftwerke, Wasserkraftwerke) zu den Verteilnetzen sowie zu direkt angeschlossenen Hochspannungsabnehmern.

Für einen sicheren und unterbrechungsfreien Betrieb des Übertragungsnetzes ist eine kontinuierliche Überwachung des gesamten Systems erforderlich. Zu den Schlüsselementen, die eine permanente Überwachung und für den Betrieb relevante Daten

gewährleisten, gehören Messwandler. Sie dienen der Messung und Überwachung des Systemzustands sowie dem Schutz hochspannungselektrischer Anlagen.

Die Anzahl der Messwandler im elektroenergetischen System ist deutlich höher als die der Leistungstransformatoren; zudem ist ein einzelner Messwandler kostengünstiger, schneller verfügbar und enthält weniger Isolierflüssigkeit. Diagnostisch betrachtet verfügen sowohl Messwandler als auch Leistungstransformatoren über vergleichbare Isoliersysteme, bestehend aus einer Kombination von Zelluloseisolierung und Isolieröl. Das Isolieröl übernimmt dabei mehrere Funktionen: Imprägnierung der Feststoffisolierung, elektrische Isolation, Kühlmittel sowie die Rolle eines Informationsträgers über die im Transformator ablaufenden Prozesse [1].

Die physikalisch-chemische Diagnostik von Messwandlern am Elektrotechnischen Institut Milan Vidmar (EIMV) basiert auf einem speziell angepassten Untersuchungsprogramm, das aus einer begrenzten Ölmenge wesentliche Informationen über den Zustand des Isoliersystems und die Betriebssicherheit liefert.

Aufgrund ihrer wichtigen Funktion ist die Diagnostik auf die präventive Erkennung unzuverlässiger Einheiten ausgerichtet, sodass das ordnungsgemäße Funktionieren der Geräte sowie die Zuverlässigkeit und Sicherheit von Anlagen und Personal sichergestellt werden.

Der Beitrag präsentiert die Ergebnisse einer Analyse der diagnostischen Historie von untersuchten Messwandlern der Baujahre 2000 und jünger. Aufgrund erheblicher Abweichungen zwischen den einzelnen Messwandlern, lag der Schwerpunkt insbesondere auf den Unterschieden sowie auf der Auswertung der Störungshäufigkeit.

2 Messwandler

Messwandler sind zentrale Komponenten im elektroenergetischen System, da sie eine genaue und sichere Messung elektrischer Größen wie Strom und Spannung ermöglichen. Ihre Hauptaufgabe ist es hohe Ströme oder Spannungen in niedrigere, messbare Werte umzuwandeln, die für Messgeräte, Schutzrelais und Überwachungssysteme geeignet sind.

Abhängig von der umgeformten elektrischen Größe werden Messwandler wie folgt klassifiziert:

- Spannungswandler,
- Stromwandler und
- Kombinationswandler.

Da sich diese Gruppen sowohl in der Konstruktion als auch in den Belastungen unterscheiden, ergeben sich Unterschiede zwischen ihnen, die unterschiedlich häufigen Störungen widerspiegeln.

3 Diagnostische Methoden

Das Isoliersystem eines Transformators besteht aus Öl und Papier, die als organische Materialien besonders anfällig für Alterungsprozesse sind. Diese werden durch chemische Reaktionen und mechanische Schäden beeinflusst, die durch Temperatur, Feuchtigkeit, Sauerstoffpräsenz, Kontaminationen, elektrische Felder und mechanische Belastungen hervorgerufen werden. Das Transformatoröl überträgt dabei wichtige Informationen über die im Transformator ablaufenden Prozesse und ermöglicht einen präzisen Einblick in dessen inneren Zustand. Die physikalisch-chemische Diagnostik des Transformatoröls erlaubt eine vertiefte Beurteilung des Transformatorzustands, da sie elektrische oder thermische Störungen, Materialinkompatibilitäten sowie die Ölalterung aufdecken kann [2,3].

Da die für die Probenahme verfügbare Ölmenge in Messwandlern sehr begrenzt ist, wurde am EIMV auf Basis langjähriger Erfahrung eine spezifische Auswahl an Untersuchungen zusammengestellt, die folgende Analysen umfasst:

- **Gas-in-Öl-Analyse** nach IEC 60567:2024: Bestimmung gelöster und freier Gase im Isolieröl, die Folge verschiedener Störungen sein können. Anhand der Menge einzelner Gase sowie der Verhältnisse zwischen ihnen kann beurteilt werden, um welche Art von Störung es sich handelt.
- **Flüssigchromatographische Analyse** nach IEC 61198:1993: Bestimmung von Furanverbindungen, die durch die Alterung der Papierisolierung entstehen und teilweise im Isolieröl löslich sind.
- Der **Wassergehalt im Öl** wird mittels der coulometrischen Karl-Fischer-Methode gemäß IEC 60814:1997 bestimmt und gibt Aufschluss darüber, inwieweit das Öl noch über ausreichende dielektrische Eigenschaften verfügt sowie über den Feuchtegrad der Papierisolation.
- Hauptindikatoren chemischer Veränderungen, Alterung und Ölverunreinigung durch inkompatible Materialien sind die **Grenzflächenspannung** gemäß ASTM D971:2020 und die **Neutralisationszahl** gemäß IEC 62021-1:2003.

4 Fehlerarten bei Messwandlern

In Tabelle 1 sind die weltweit erfassten Störungen bei Messwandlern aufgeführt, wie sie im Standard IEC 60599:2022 [4] angegeben sind. Dieser gibt an, dass weltweit etwa 1 % der Ausfälle die gesamte Messwandlerpopulation betreffen, jedoch können die Werte in einzelnen Untergruppen deutlich höher liegen.

Tabelle 1: Fehlerarten bei Messwandlern

Fehlerarten	Beispiele
Teilentladungen	<ul style="list-style-type: none"> • Entladungen in Gasblasen aufgrund unzureichender Imprägnierung, feuchtem Papier, Übersättigung des Öls mit Gasen, Falten oder Knicken im Papier was führt zu x-Wachs Ablagerungen und erhöhten dielektrischen Verlusten. • Entladungen infolge von Schalthandlungen in benachbarten Sammelschienensystemen von Umspannwerken (im Fall von Stromwandlern) oder infolge von Überspannungen an den Kanten der Kondensatoreinheiten (im Fall von kapazitiven Spannungswandlern).
Entladungen geringerer Energiedichte	<ul style="list-style-type: none"> • Funkenbildung an losen Verbindungen oder schwebenden Metallbändern. • Kriechstrombildung in der Papierisolierung. • Lichtbogenbildung in Verbindungen der statischen Abschirmung.
Entladungen hoher Energiedichte	<ul style="list-style-type: none"> • Lokale Kurzschlüsse zwischen Kondensatorplatten. • Allgemeine Kurzschlüsse mit durchfließendem Strom sind häufig zerstörerisch, führen zu schweren Schäden an der Anlage oder sogar zu Explosionen, und eine Gas-in-Öl-Analyse ist nach dem Ausfall nicht immer möglich.
Thermische Fehler $300\text{ °C} < T < 700\text{ °C}$	<ul style="list-style-type: none"> • Wirbelströme in der Papierisolierung, verursacht durch hohe dielektrische Verluste infolge von X-Wachse, Feuchtigkeit oder ungeeigneter Auswahl von Isoliermaterialien, mit der Folge dielektrischer Erwärmung und thermischer Durchschläge. • Schlechte Kontakte in Verbindungen oder Schweißnähten. • Überhitzung aufgrund des ferroresonanten Stromkreises in Spannungswandlern.
Thermische Fehler $T > 700\text{ °C}$	<ul style="list-style-type: none"> • Wirbelströme an den Kanten der Stahlbleche.

Lang andauernde Störungen oder Kombinationen mehrerer Fehlerarten können zum Ausfall eines Messwandlers führen, was erhebliche Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des elektrischen Energiesystems haben kann. Daher ist die präventive Erkennung und Aussonderung unzuverlässiger Einheiten entscheidend, um einen stabilen und sicheren Netzbetrieb zu gewährleisten [5].

5 Übersicht der Messwandler nach Spannungsebene, Hersteller und Typ

Im Überblick sind etwa 1300 Messwandler mit Nennspannungen zwischen 110 kV und 400 kV einbezogen, die am EIMV mindestens einmal untersucht wurden. Jede Spannungsebene wurde entsprechend der Bauart (Stromwandler, Spannungswandler, Kombiwandler) ausgewertet und in weiteren Untergruppen statistisch nach Hersteller, Typ und Herstellungsjahr evaluiert.

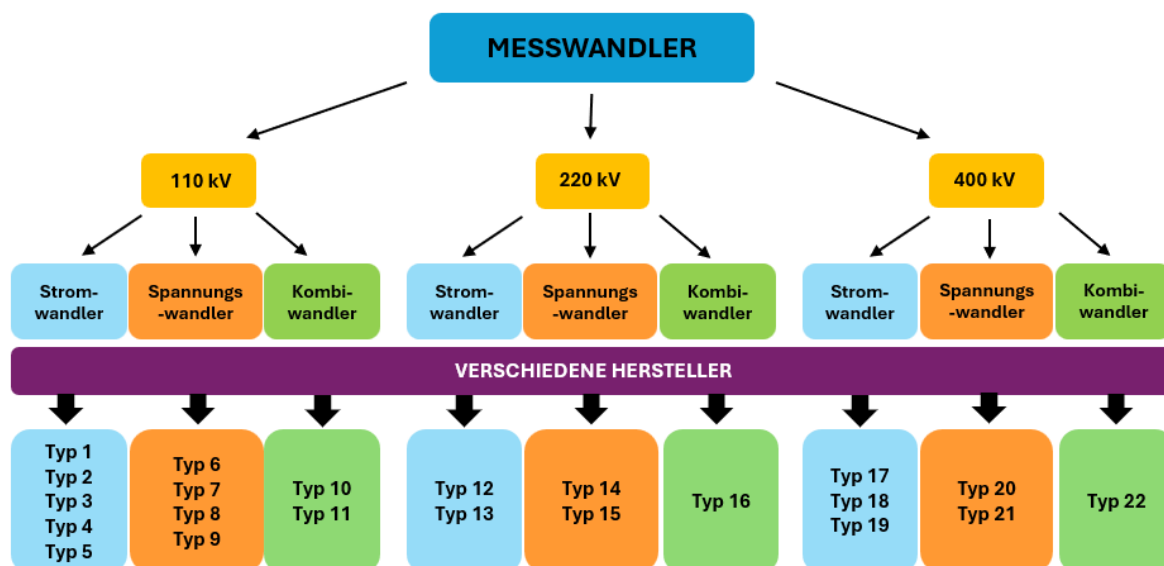


Abbildung 1: Übersicht der Untergruppen von Messwandlern

Abbildung 1 zeigt, dass die Untersuchung 22 verschiedene Typen von Messwandlern umfasst. Der Standard IEC 60599 gibt typische Referenzwerte ausschließlich für Stromwandler und Spannungswandler an, während die Öluntersuchungen am EIMV zeigen, dass es spezifische Unterschiede zwischen einzelnen Typen innerhalb derselben Gerätekategorie gibt. Diese Unterschiede können unterschiedlich stark ausgeprägt sein und erfordern eine individuelle Bewertung der jeweiligen Typen.

Die Anzahl der untersuchten Messwandler pro Typ ergibt sich aus den jährlichen Diagnostikplänen des Auftraggebers gemäß den Instandhaltungsrichtlinien. Dadurch entstehen je nach Gruppengröße erhebliche Unterschiede, die die Aussagekraft der ermittelten typischen Parameterwerte beeinflussen können. Ist eine Gruppe klein, sind die Schlussfolgerungen entsprechend weniger verlässlich. Auch die Altersstruktur der einzelnen Typen unterscheidet sich deutlich, was ebenfalls auf die Beschaffungsgeschichte der verschiedenen Messwandler-Typen und den Diagnoseplan zurückzuführen ist. Die erwartete Lebensdauer der Messwandler beträgt etwa 25 Jahre, während das durchschnittliche Alter der untersuchten Einheiten je Typ zwischen 7 und 18 Jahren liegt (Abbildung 2).

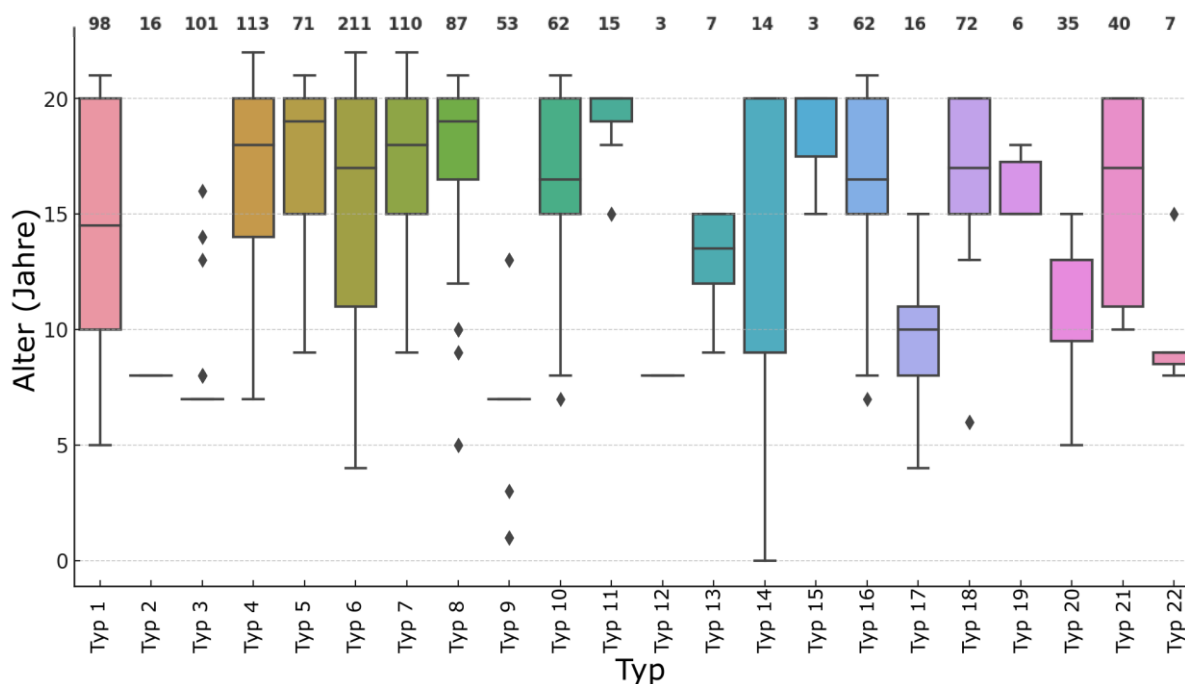


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Altersverteilung zum Zeitpunkt der Analyse des Messwandlertypen; oberhalb jeder Säule ist die Anzahl der am EIMV untersuchten Transformatoren angegeben

In der Fachliteratur sind nur wenige Daten zur Diagnostik von Ölen in Messwandlern verfügbar, wobei ein erheblicher Teil der veröffentlichten Ergebnisse bereits veraltet ist. Der Standard IEC 60599:2022 gibt in Tabelle A.7 die 90-Perzentil-Grenzkonzentrationen der Gase ($\mu\text{l/l}$) in Messwandlerölen an. Die Daten aus verschiedenen Stromnetzen weltweit wurden vor dem Jahr 2000 im Rahmen der IEC und CIGRÉ-Arbeitsgruppen gesammelt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Werte stark vom Transformatortyp, den Betriebsbedingungen, den klimatischen Verhältnissen sowie vom Alter der Transformatoren abhängen [4].

Die Gas-in-Öl-Analyse ist bei Leistungstransformatoren im Betrieb eine der wichtigsten diagnostischen Untersuchungen zur Feststellung elektrischer oder thermischer Fehler. Die Diagnostik basiert auf der Änderungsrate der Konzentrationen einzelner Gase im Zeitraum zwischen den Untersuchungen. Bei Messwandlern ist aufgrund der geringen Menge an Isolierflüssigkeit eine wiederholte Ölprobenahme über die gesamte Lebensdauer nur eingeschränkt möglich, wodurch diese Form der Diagnostik erschwert wird.

Tabelle 2 zeigt einen Vergleich der am EIMV ermittelten typischen Werte für einzelne Messwandlertypen mit den im Standard IEC 60599:2022 festgelegten Referenzwerten. Der IEC-Standard enthält keine typischen Werte für alle diagnostizierten Gase und liefert zudem keine Angaben zu weiteren physikalisch-chemischen Parametern.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der IEC- und EIMV-typischen Parameter für Messwandler

Gerätetyp	H ₂ [μl/l]	CH ₄ [μl/l]	C ₂ H ₂ [μl/l]	C ₂ H ₄ [μl/l]	C ₂ H ₆ [μl/l]	CO [μl/l]	CO ₂ [μl/l]	2FAL [mg/kg]	Grenzflächen- spannung [mN/m]
Stromwandler (IEC 60599)	6-300	11-120	1-5	3-40	7-130	250- 1100	800- 4000		
Stromwandler (EIMV)	8-404	2-10	0-2	0-5	0-4	51-332	103- 722	0,00-0,00	19-44
Spannungs- wandler (IEC 60599)	70- 1000		4-16	20-30					
Spannungs- wandler (EIMV)	3-44	3-35	0-0	0-2	0-10	21-254	139- 7802	0,00-0,07	32-44
Kombiwandler (EIMV)	3-18	3-17	0-1	0-4	1-6	9-69	265- 796	0,00-0,00	22-39

Die in Tabelle 1 dargestellten Werte sind ausschließlich informativer Natur. Sie dienen als Hilfsmittel für Instandhaltung und Prognosen, jedoch nicht als Grenzwerte oder Akzeptanzkriterien zur Beurteilung des Zustands einzelner Transformatoren. Eine solche Übersicht veranschaulicht die Unterschiede zwischen den einzelnen Gerätetypen und erleichtert das Verständnis. Aus Abbildung 3 geht hervor, dass Spannungswandler charakteristisch höhere Konzentrationen von CO₂ und CH₄ aufweisen, während Stromwandler und Kombiwandler eine niedrigere Grenzflächenspannung besitzen.

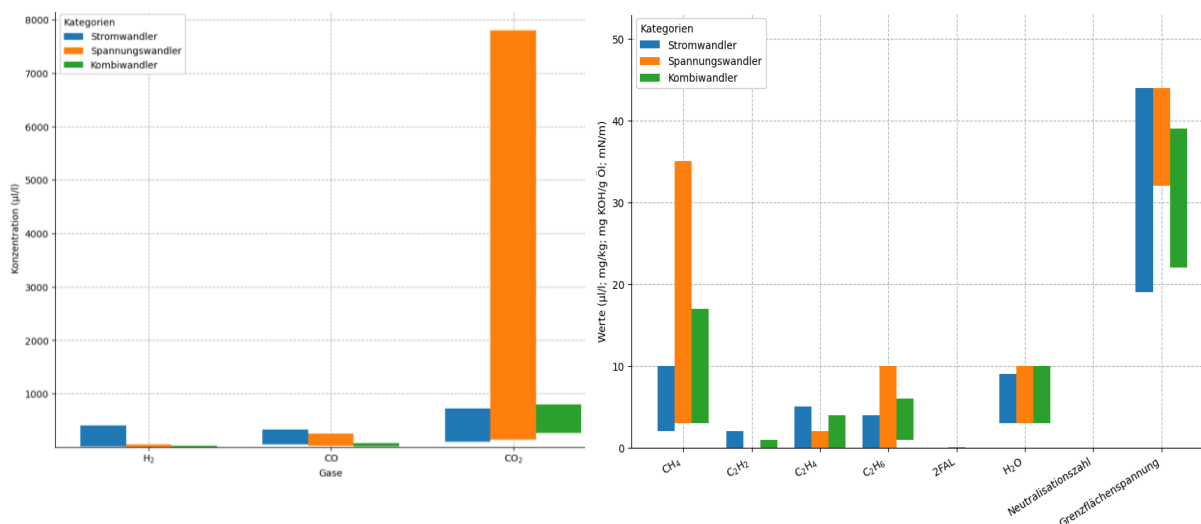


Abbildung 3: Grafische Darstellung typischer Werte zwischen verschiedenen Messwandlerkategorien

Langjährige Untersuchungen von Messwandlern haben gezeigt, dass sich die Ergebnisse der Ölanalyse zwischen einzelnen Typen innerhalb derselben Geräteart deutlich unterscheiden. Bei bestimmten Typen sind spezifische Merkmale erkennbar, die auf Konstruktions- oder Kompatibilitätsprobleme hinweisen können. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse haben wir begonnen, eine Expertenbewertung sowie Bewertungskriterien für einzelne Transformatortypen zu entwickeln. Der Vergleich der Gaskonzentrationen und weiterer

Parameter innerhalb einer Gruppe gleichartiger Messwandler stellt dabei die genaueste und zuverlässigste Beurteilung eines einzelnen Messwandlers dar.

Auf der Spannungsebene von 110 kV wurden fünf verschiedene Spannungswandler-Typen evaluiert (Abbildung 4). Der Vergleich einzelnen Typen zeigt große Abweichungen in den Konzentrationen aller Gase; besonders deutlich sind auch erhebliche Unterschiede bei den Werten der Grenzflächenspannung. Die nachstehenden Diagramme verdeutlichen, dass unterschiedliche Konstruktionen und verwendete Einbaumaterialien einen starken Einfluss auf die Gasbildung haben. Daher ist es zwingend erforderlich, jeden Typ mit einem spezifischen fachlichen Ansatz zu behandeln.

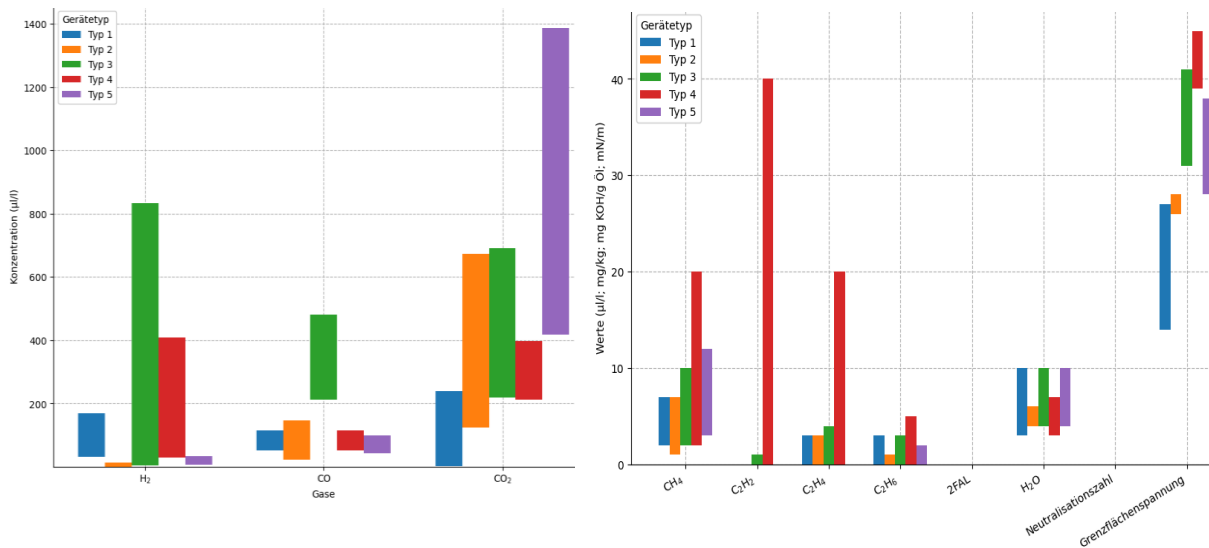


Abbildung 4: Wertevergleich für alle Spannungswandler auf der Spannungsebene 110 kV

6 Zustandsübersicht und die am häufigsten festgestellten Störungen

Der Standard IEC 60599:2022 führt aus, dass die häufigsten Endschäden lokale oder katastrophale dielektrische Überschlüge der Papierisolation umfassen, die auf eine langanhaltende Aktivität von Teilentladungen und/oder thermische Überhitzung folgen [4].

Am EIMV wurden Untersuchungen an 1300 Messwandlern durchgeführt, wobei etwa zwei Drittel der Einheiten als zuverlässig und in gutem Zustand ohne festgestellte Störungen bewertet wurden. Nahezu ein Drittel der Messwandler benötigt jedoch eine zusätzliche Überwachung, die Aufschluss über die Geschwindigkeit der Veränderungen und damit über die verbleibende erwartete Lebensdauer der Geräte gibt. Ein kleinerer Anteil der untersuchten Messwandler wies hingegen einen kritischen Zustand auf, bei dem eine zusätzliche Überwachung nicht sinnvoll ist, da die Einheit nur noch eine sehr kurze erwartete Lebensdauer hat oder potenziell gefährlich ist (Abbildung 5).

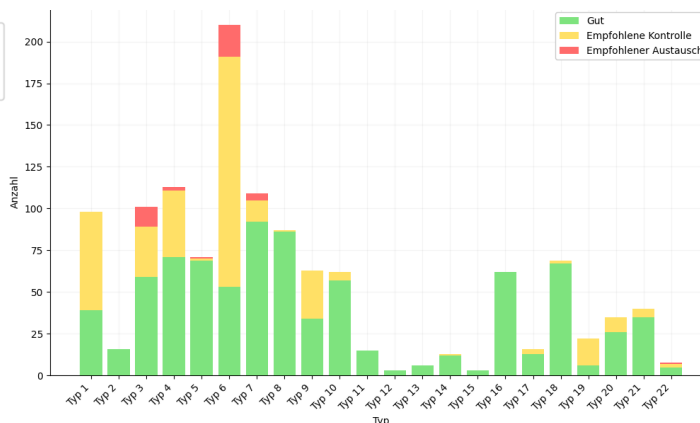
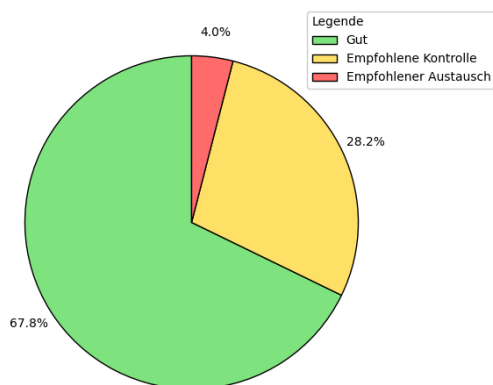


Abbildung 6: Darstellung des allgemeinen Zustands

Abbildung 5: Zustand nach Messwandlertypen

In Abbildung 6 sind die Unterschiede in der Zustandsbewertung der einzelnen Messwandler-Typen dargestellt, was die Identifikation von Typen mit höherer oder geringerer Zuverlässigkeit ermöglicht. Besonders auffällig ist Typ 6, der im Vergleich zur übrigen Population einen deutlich geringeren Anteil an Transformatoren in gutem Zustand aufweist.

Auf Grundlage der bisherigen Erfahrungen mit der Messwandler-Diagnostik werden am häufigsten Fehler in Form erhöhter Teilentladungen in unterschiedlichen Intensitätsstufen sowie das Auftreten elektrischer Entladungen mit niedriger Energiedichte festgestellt. Diese sind meist auf die Herstellung des Messwandlers zurückzuführen und können mittels Gas-in-Öl-Analyse bereits nach den Werksprüfungen oder kurz nach Inbetriebnahme der Messwandler detektiert werden. In keinem Fall handelt es sich um selbstheilende Fehler; bei längerem Betrieb können sie zu schwerwiegenden Schäden oder sogar zu Explosionen führen. Daher wird in solchen Fällen eine verstärkte Überwachung und in extremen Fällen die Außerbetriebnahme der Einheit empfohlen.

Bei einem der Typen tritt bei einem hohen Anteil eine thermische Überhitzung auf. Gleichzeitig wurden erhöhte Furankonzentrationen festgestellt, was darauf hinweist, dass auch die Papierisolation in die Störung einbezogen ist. Solche Fälle wurden vor einigen Jahren noch nicht beobachtet.

Die eindeutige Bestimmung der Grundursache einer Störung stellt häufig eine erhebliche Herausforderung dar, insbesondere aufgrund der großen Vielfalt an Messwandlern hinsichtlich Konstruktion, Funktionalität, Qualität und weiterer Eigenschaften. Es hat sich gezeigt, dass die Ausfallhäufigkeit von mehreren Einflussfaktoren abhängt, weshalb die Ergebnisse mit besonderer Vorsicht zu interpretieren sind.

7 Schlussfolgerung

Die physikalisch-chemische Diagnostik von Messwandlern am EIMV ist auf die präventive Erkennung von Serien mit thermischen und elektrischen Störungen sowie inkompatiblen Materialien ausgerichtet. Aufgrund der großen Anzahl an Einheiten ist eine sorgfältige Auswahl der zu untersuchenden Geräte von entscheidender Bedeutung.

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass Kriterien, die sich ausschließlich auf die Geräteart beziehen, nicht ausreichend genau sind. Daher ist es sinnvoll, einen bestimmten Anteil jedes Typs in unterschiedlichen Altersstufen zu untersuchen. Auf diese Weise werden Informationen über das Verhalten der einzelnen Typen im Verlauf der Betriebsjahre gewonnen und Typen mit häufig auftretenden Störungen identifiziert. Störungen von Messwandlern in Slowenien sind am häufigsten auf Fertigungsfehler der Transformatoren zurückzuführen. Durch den zunehmend häufigeren Austausch verschiedener Einbaumaterialien tritt jedoch auch immer häufiger das bekannte Problem der Inkompatibilität dieser Materialien mit der Isolierflüssigkeit auf. Da Transformatoren in Slowenien mit sehr hochwertigen Isolierölen befüllt sind, wurden in den letzten Jahren keine Einheiten mit gealtertem Öl festgestellt.

Durch die physikalisch-chemische Diagnostik der Transformatorenöle von Messwandlern konnten zahlreiche verdächtige oder sogar gefährliche Einheiten identifiziert werden. In solchen Fällen wurde die Außerbetriebnahme empfohlen, wodurch ein zuverlässiger Betrieb des elektrischen Energiesystems sichergestellt werden konnte. Es ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse dieses Beitrags den aktuellen Zustand der untersuchten Baujahre widerspiegeln. Bei zukünftigen Untersuchungen von Einheiten jüngerer Baujahre kann sich der Zustand einzelner Typen infolge von Änderungen in der Geräteproduktion verändern.

8 Literaturverzeichnis

- [1] F. Predl, Dr. M. Freiburg and Dr. M. Anghuber, »Diagnostic measurements on instrument transformers – Part I & II A classification and overview of diagnostic measurements«, Transfomer Magazine.
- [2] Oelbuch, Teil 2: Isolierflüssigkeiten. VDEW, Frankfurt am Main 1983.
- [3] IEC 60422 Mineral insulating oils in electrical equipment- Supervision and maintenance guidance, (Ed.4.0 2013-01).
- [4] IEC 60599 Mineral oil-impregnated electrical equipment in service- Guide to the interpretation of the dissolved and free gases analysis, (Ed. 4.0 2022-05).
- [5] CIGRE Technical Brochure 512 »Final Report of the 2004-2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment Part 4 – Instrument Transformers« by Working group A3.06.