



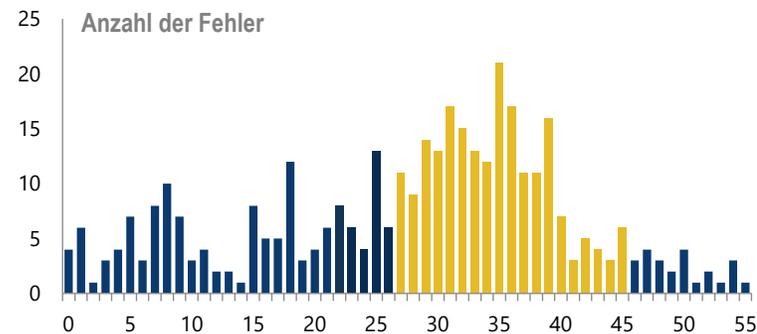
# Wie KI-gestützte Algorithmen die online DGA-Analyse für Laststufenschalter revolutionieren

# Warum ein Blick auf den Stufenschalter relevant ist ?

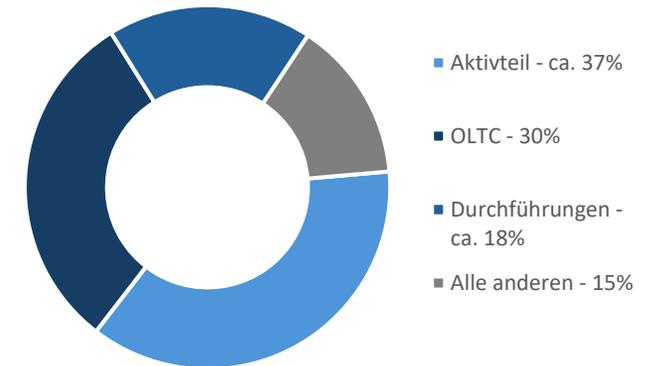
+ Durchschnittliches Alter von Leistungstransformatoren



+ Häufigkeit der Fehler in Abhängigkeit des Alters



+ Betroffene Komponente im Leistungstransformator



+ Leistungstransformatoren und Laststufenschalter sind in einem kritischen Alter und in einer relevanten Häufung an den Fehlern von Leistungstransformatoren beteiligt

# Warum ist die DGA eine sinnvolle Erweiterung des Monitorings?

Mögliche Fehlerquellen	Mögliche Detektions-Technologie			
	Vibroakustische Messtechnik	Drehmoment-Überwachung	Feuchte- & Temperatur-Sensoren	DGA im OLTC
Dielektrische z.B. - Teilentladungen - Verlängerte Lichtbogenzeiten				X
Mechanische z.B. - Blockanden (Wähler oder LUE) - erhöhtes Drehmoment	X	X		
Thermische z.B. - Überhitzung - Rü-Heizen - Heißstellen			X	X
Isolierflüssigkeit z.B. - Feuchtegehalt zu hoch - Durchschlagspannungsfestigkeit zu gering - Gasbildung			X	X

- + Eine Technologie alleine ist nicht in der Lage alle Fehlerquellen zu entdecken
- + Eine Kombination von verschiedenen Methoden ist unbedingt erforderlich
- + Mittels der Online DGA reduziert sich die Unsicherheit aufgrund der Zeitspanne zwischen den einzelnen Ölproben und aufgrund der möglichen Einflüsse beim Entnehmen der Ölprobe drastisch

# Standard DGA-Interpretationsmethoden

+ Interpretationsmethoden können aktuell in 4 Gruppen eingeteilt werden:

## Gruppe 1:

- + traditionelle Methoden zur manuellen Fehlerklassifizierung
- + diese Methoden sind oft grafisch und verwenden Gasverhältnisse von typischen Fehlern zur Klassifizierung von Fehlern

## Gruppe 2:

- + einschlägige Industrienormen und Leitfäden (z.B.: IEEE Standard C57.139)
- + über die Einführung von Grenzwerten und Entscheidungsbäumen ermöglichen diese Methoden bereits einen gewissen Grad an Automatisierung

## Gruppe 3:

- + Softwarelösungen basierend auf den ersten beiden Gruppen, welche eingesetzt werden, um die beschriebenen Methoden zu vereinfachen

## Gruppe 4:

- + umfasst auf maschinellem Lernen basierende Methoden
- + Schwächen, wenn die zur Bewertung erforderlichen Informationen unvollständig sind



Hohe Anforderungen an den Nutzer der Methode, unzureichend zur Abbildung des ungestörten Betriebs und hoher Bedarf an Inputparametern

# Standard DGA-Interpretationsmethoden für OLTC'S

- + Grundsätzliche Herausforderung ist das Verständnis der Gasgeneration im OLTC, die im Vergleich zu einem Leistungstransformator deutlich komplexer ist.
- + Daher erfolgt eine Einteilung in Abhängigkeit ihrer konstruktiven Merkmale (insbesondere aufgrund ihres Schaltprinzips).
- + Innerhalb der Cigré wird daher eine Unterteilung in die folgenden 8 Klassen vorgeschlagen:

A	Arc-breaking in oil for breaking/making load current
V	Vacuum interrupters for breaking/making load current
R	Bridging current through resistors (Resistor type)
X	Bridging current through reactances (Reactor type)
S	Diverter switch and Tap selector in different oil compartments (Separate)
C	Diverter switch and Tap selector in the same oil compartment (Combined)

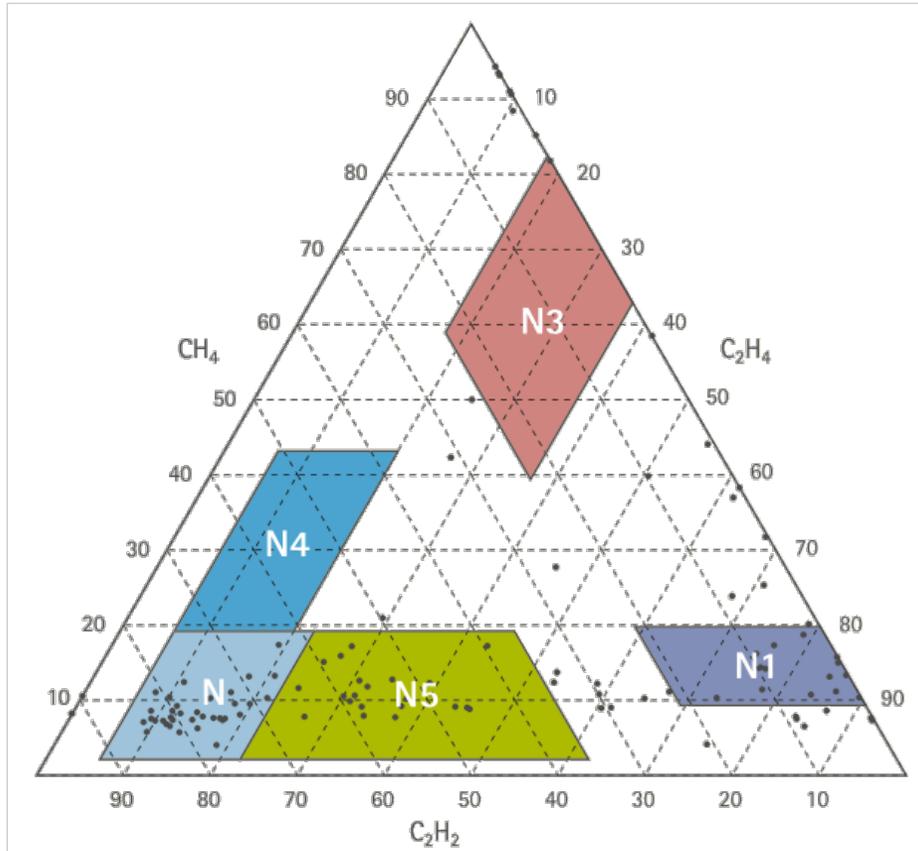
# Standard DGA-Interpretationsmethoden für OLTC'S

- + Gemäß IEEE erfolgt eine Erweiterung der Kriterien zur Unterscheidung, sodass sich 24 Klassen zur Unterscheidung ergeben.
- + Insbesondere erfolgt die Erweiterung im Hinblick auf abgeschlossene und freiatmende Systeme.

A	Arcing switch (Arcing contacts are tap-changer contacts where switching arcs occur in oil during a normal tap change operation.)
V	Vacuum (Vacuum contacts have the switching arc contained in a vacuum bottle.)
R <sup>a</sup>	Resistor type (bridging through resistors)
X	Reactor type (bridging through a reactance)
S	Arcing switches in separate compartment from non-arcing switches
A	All oil-immersed switches in one compartment, arcing-type selector
N	All oil-immersed switches in one compartment, non-arcing
S	Sealed tank (with or without pressure relief)
B	Non-sealed

# Standard DGA-Interpretationsmethoden für OLTC'S

+ Beispiel anhand des Duval Dreiecks #2 und ca. 100 Messergebnisse für verschiedene Schalter



- + Grundsätzliche Darstellung von CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> und C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (Messung zwingend erforderlich)
- + Alle Eintragungen zeigen 100 fehlerfreie Schalter
- + Trotz Erweiterung der Zonen, die einen ungestörten Betrieb ausweisen bleibt ein Anteil von ca. 30% der Schalter fälschlicherweise in einem fehlerhaften Bereich
- + In der Folge sind Bewertungen durch Experten erforderlich, oder es entstehen hohe Kosten für ggf. unnötige Serviceeinsätze
- + In der Bewertung werden i.d.R. keine Metadaten (Ölvolumen, Schalhäufigkeiten etc.) berücksichtigt
- + Online werden sehr teure Systeme benötigt

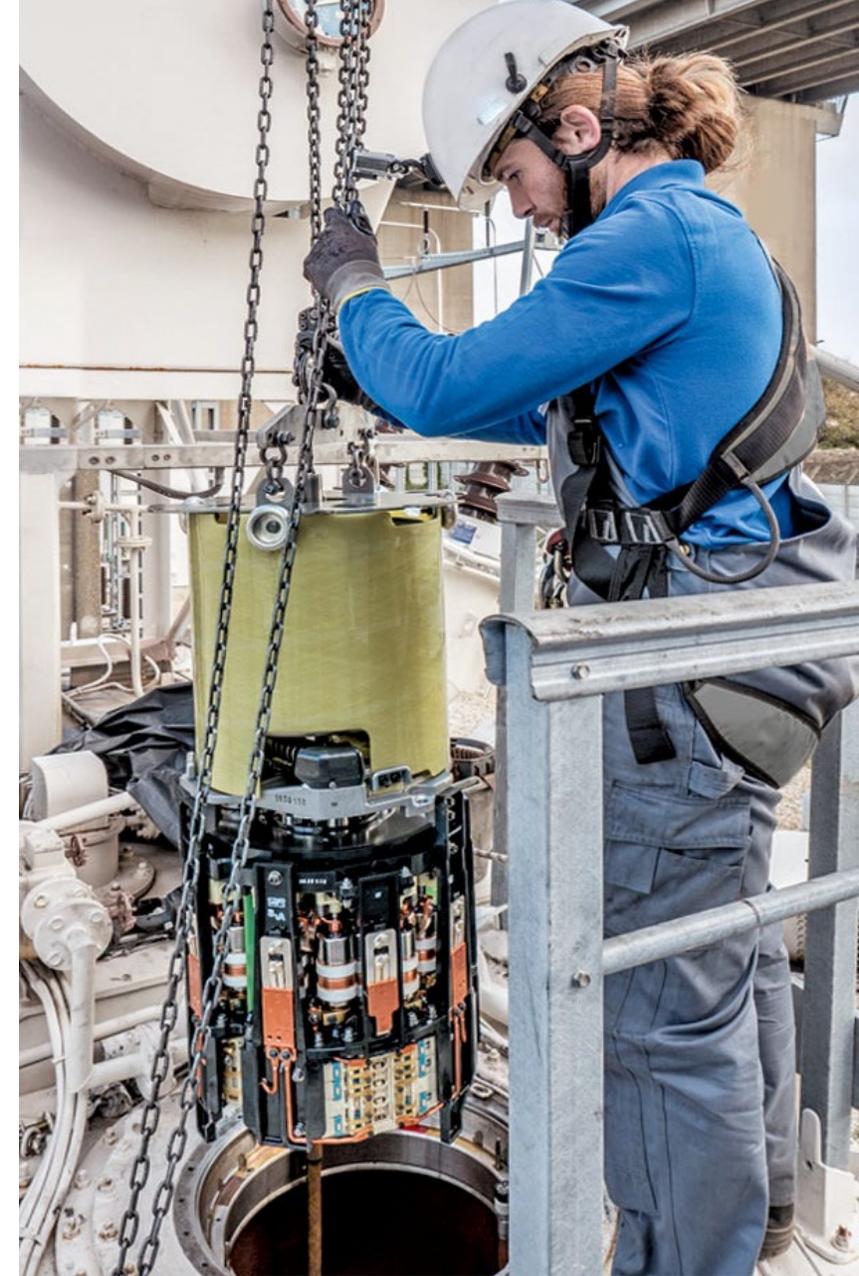
# Standard DGA-Interpretationsmethoden für OLTC'S

## Zusammenfassung zum Stand der Technik:

### Aktuelle Verfahren

- + erfordern schon bei der Anwendung Wissen von Experten
- + benötigen eine Vielzahl von Gaskonzentrationen
- + berücksichtigen keine Metadaten (z.B.: Anzahl der Schalthandlungen)
- + zeigen Schwächen bei fehlenden Gaskonzentrationen auf
- + haben Schwierigkeiten ungestörte Betriebsbedingungen zu erkennen
- + zeigen keine Wahrscheinlichkeiten bzw. Unsicherheiten auf
- + basieren nur im geringen Umfang auf Know-How der Hersteller

➔ Methoden aus dem Umfeld der KI nutzen, um die Nachteile abzustellen



# OLTC DGA unterstützt durch KI

Problemlösung: Entwicklung eines Algorithmus unter Nutzung von KI zur Abbildung der Entscheidung von Experten:

## Das Vorgehen – Step 1 Imputation:



Ergänzung nicht gemessener  
Daten mit dem  
Imputationsverfahren

- + Experten berücksichtigen zur Auswertung der gemessenen Gaskonzentrationen Metadaten wie:
  - Den Typ des Stufenschalters
  - Das Alter des Stufenschalters
  - Die Applikation bzw. Anwendung des verbauten Transformators
  - Die Anzahl der Schalthandlungen
  - Die Spezifika des Isoliermediums (z.B. Inhibitoren etc.)
  - Die Gaskonzentrationen der relevanten Gase
  - ...

### + Wenn Daten fehlen:

- Werden bekannte Abhängigkeiten, wie zum Beispiel die Korrelation zwischen Ethan und Ethylen ausgenutzt und mit Unsicherheiten bewertet
- Werden Regressionsmodelle und statistische Methoden genutzt, um die fehlenden Daten zu ergänzen
- Werden die Besonderheiten der Anlagen und Betriebsbedingungen in Kombination mit empirischem Wissen genutzt
- Werden von Experten abgeleitete Unsicherheitsmaße berücksichtigt

# OLTC DGA unterstützt durch KI

Problemlösung: Entwicklung eines Algorithmus unter Nutzung von KI zur Abbildung der Entscheidung von Experten:

## Das Vorgehen – Step 2 Preprocessing:



DGA-Daten auf einheitliche  
Bewertungsbasis bringen

- + Anpassung und Normierung der Daten:
  - Zur Erhöhung der Vergleichbarkeit werden die notwendigen Daten automatisiert normiert
  - Die Normierung erfolgt in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussfaktoren, wie z.B.:
    - Das Öl-Volumen
    - Die Schalzhäufigkeit
    - Etc.

- + z.B.: Kompensation der Gaskonzentration  $c$  in Bezug auf das Öl-Volumen

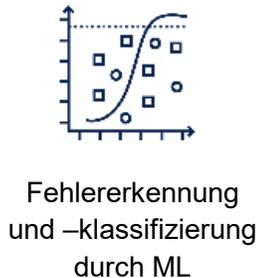
$$C_{komp} = \frac{V}{V_0} \times c$$

- Abhängig von der, durch die Imputation bedingten, Unsicherheiten wird dieser Schritt mehrfach durchlaufen
- Es ergibt sich somit für die Konzentrationen ein Konfidenzintervall, welches die Unsicherheiten entsprechend abbildet

# OLTC DGA unterstützt durch KI

Problemlösung: Entwicklung eines Algorithmus unter Nutzung von KI zur Abbildung der Entscheidung von Experten:

## Das Vorgehen – Step 3 Zustandsklassifizierung:



### + Definition der Zustandsklassen:

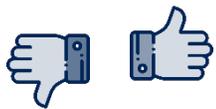
- Basierend auf einer Expertenauswertung werden die folgenden Klassen gebildet:
  - Normaler Betriebszustand
  - „Stray-gassing“
  - Thermischer Fehler
  - Dielektrischer Fehler mit geringem Energieeintrag
  - Dielektrischer Fehler mit hohem Energieeintrag

- ### + Backlabeling eines Datensatzes von mehreren Tausend Datensätzen durch eine Vielzahl von Experten
- Basierend auf den bisherigen Ausführungen wird auch der Algorithmus zur Klassifizierung mehrfach durchlaufen und somit der Unsicherheit der Daten Rechnung getragen

# OLTC DGA unterstützt durch KI

Problemlösung: Entwicklung eines Algorithmus unter Nutzung von KI zur Abbildung der Entscheidung von Experten:

## Das Vorgehen – Step 4 Handlungsempfehlung:



Ableiten einer  
Handlungsempfehlung

### + Nutzen des definierten Zustands

- Basierend auf den Handlungsempfehlungen des Gremiums von Experten wird im Algorithmus ein Entscheidungsbaum hinterlegt
- Handlungsempfehlungen reichen dabei von:
  - Es sind keine Aktionen erforderlich
  - Bis zur Empfehlung einer sofortigen Servicemaßnahme

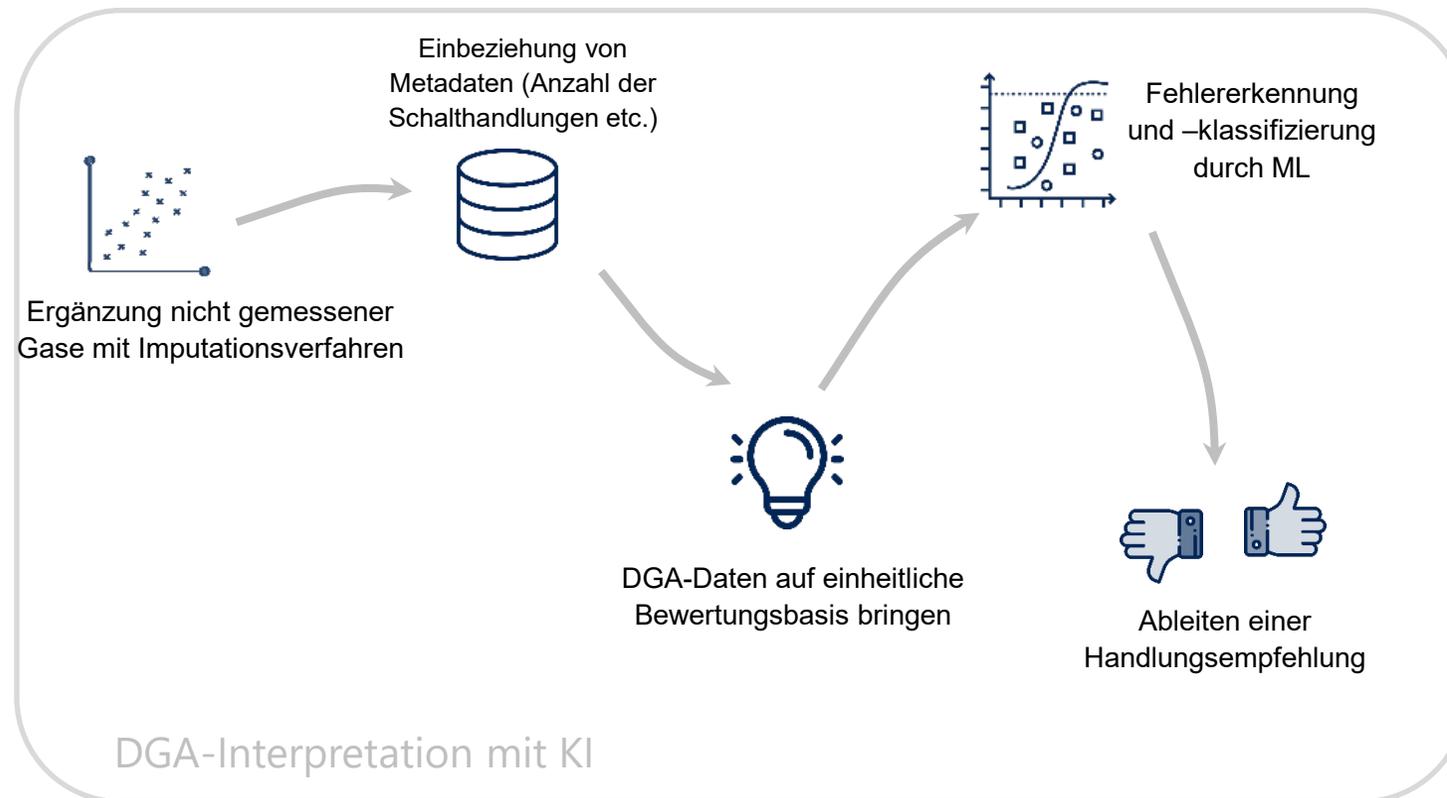
### + Zukünftiger Mehrwert der KI:

- Eigenständige Anpassung der Handlungsempfehlungen durch Nutzerfeedback
- Die Handlungsempfehlung kann beispielsweise durch das Feedback des Nutzers – Bestätigung oder Rückspielen einer alternativen Handlung eigenständig die Bedürfnisse des individuellen Nutzers lernen

# OLTC DGA unterstützt durch KI - Zusammenfassung

Problemlösung: Entwicklung eines Algorithmus unter Nutzung von KI zur Abbildung der Entscheidung von Experten:

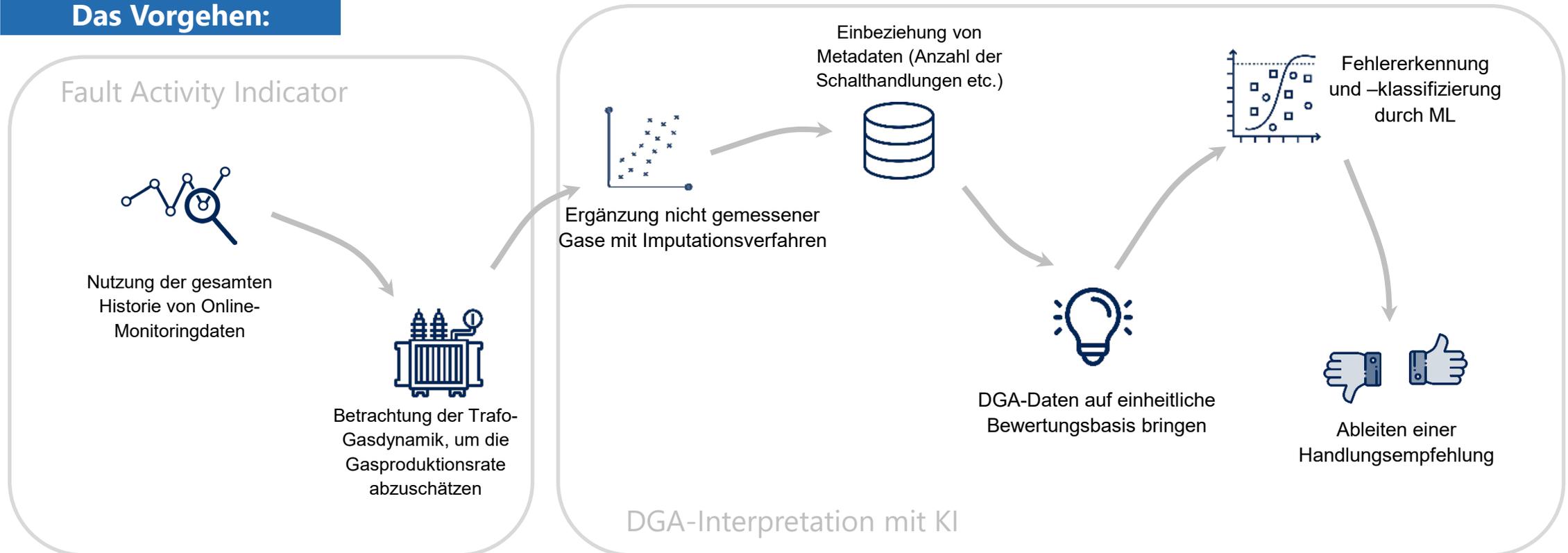
## Das Vorgehen:



# OLTC DGA unterstützt durch KI – Erweiterung mittels Erfahrungswerten und weiterer Sensordaten

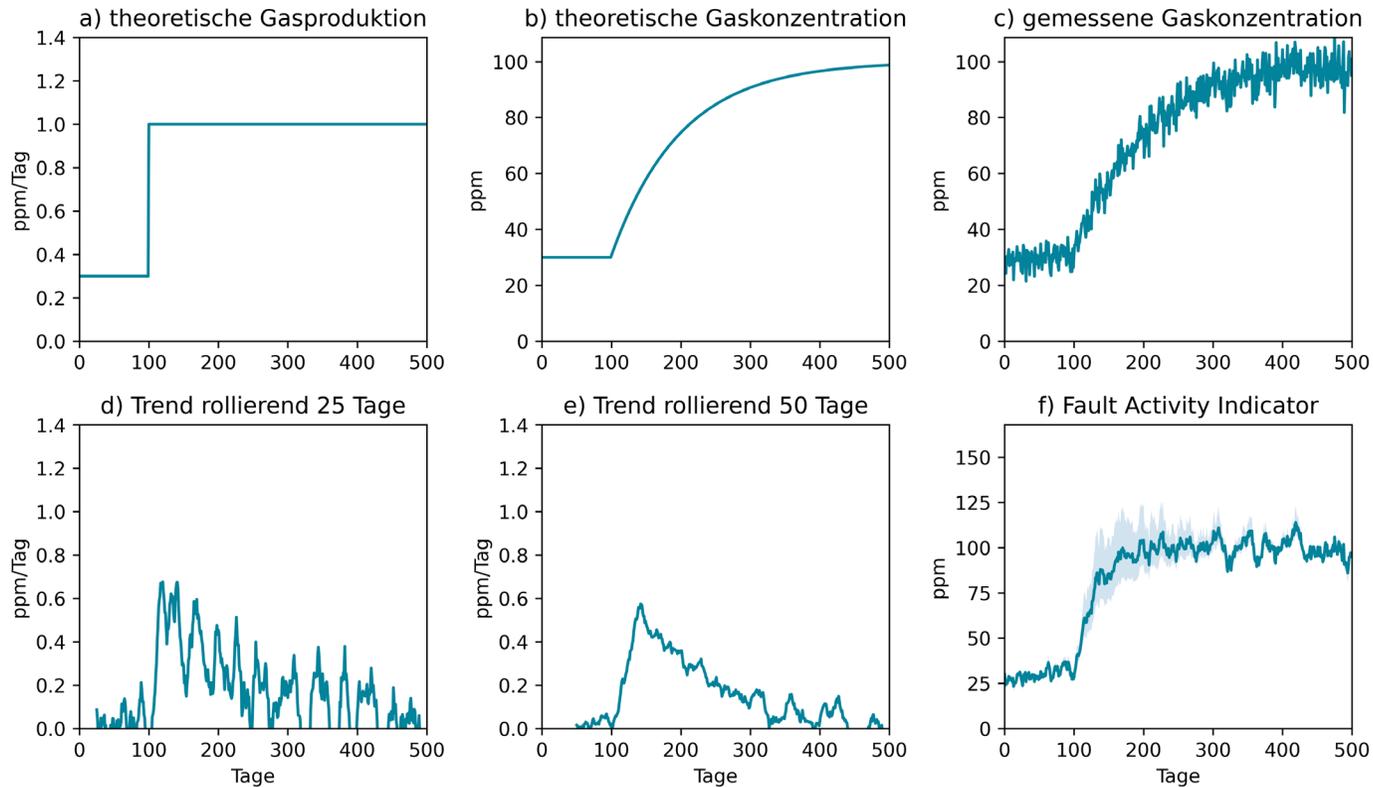
Problemlösung: Entwicklung eines Algorithmus unter Nutzung von KI zur Abbildung der Entscheidung von Experten:

## Das Vorgehen:



# Fault Activity Indicator zur effizienten Nutzung von Monitoringdaten – vereinfachte Darstellung

Problemlösung: Nutzung von Expertenwissen zur Trafogasdynamik, um aus Zeitserien frühzeitig Probleme zu erkennen



Normalerweise werden bei der DGA-Interpretation nur Gaskonzentrationen betrachtet. Was aber eigentlich interessiert, ist die Menge an Gas, die pro Zeit produziert wird. Diese beiden Größen sind über die Trafo- und OLTC-Gasdynamik miteinander verbunden.

Über unser Wissen zur Gasdynamik können wir aus den Zeitreihen (wie sie aus den Monitoringsystemen kommen) auf die Gasproduktionsrate rückschließen.

Links ein Beispiel dazu: Ab Tag 100 tritt ein Problem auf, was zu einem sprunghaften Anstieg der Gasproduktionsrate führt (a). Die Gaskonzentration steigt erst mit einer Verzögerung, da das Ölvolume groß ist, und sich das neu produzierte Gas verteilt (b). In der Messung der Gaskonzentration treten weitere Störungen und Messrauschen auf (c). Stand der Technik ist, dass die Steigungen der letzten Tage als Proxyvariable für die Gasproduktionsrate benutzt werden (d&e). Der Fault Activity Indicator nutzt hingegen die bekannte Gasdynamik um die Gasproduktion direkt zu schätzen (f). Das beschleunigt die Fehlerdetektion und reduziert den Einfluss von Messrauschen.

# OLTC DGA unterstützt durch KI

Problemlösung am Beispiel von Daten eines DGA-3 Messsystems:

## + Konfiguration:

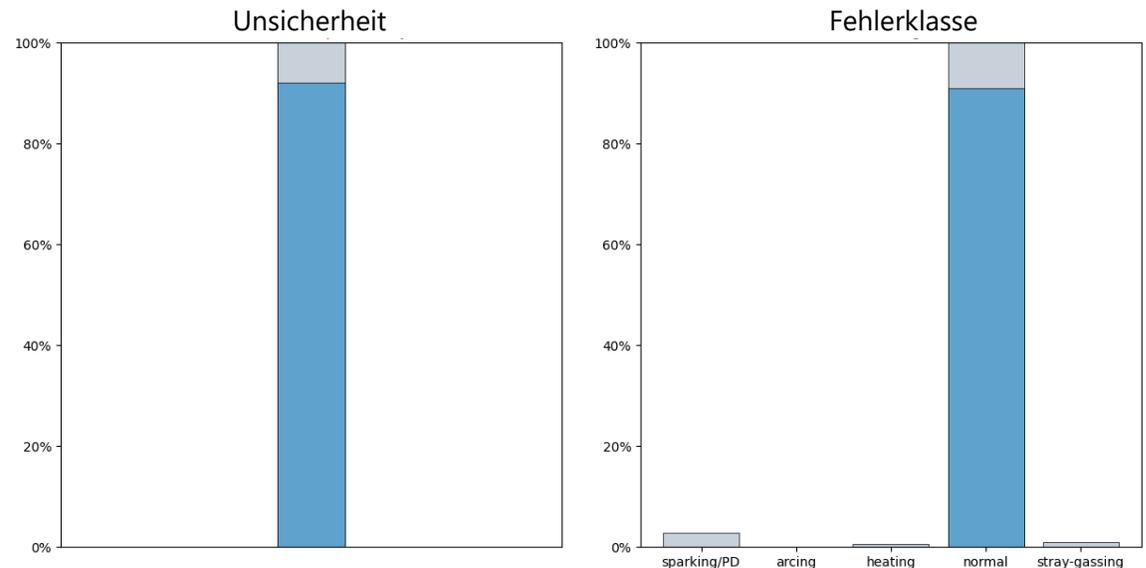
- Schaltertyp: VR
- Applikation: Windenergie
- Schalthandlungen: 35201
- Alter: 3 Jahre
- Angaben zum Öl sind fehlend (Typ, Inhibitor, Volumen, ...)
- Angaben zur Last sind ebenfalls unbekannt

## + Gaskonzentrationen in ppm:

- H<sub>2</sub>: 34
- CH<sub>4</sub>: N/A
- C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>: N/A
- C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>: N/A
- C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>: N/A
- CO: 584
- CO<sub>2</sub>: N/A

## + Ausgabe des Systems:

- Handlungsempfehlung: Keine Maßnahmen erforderlich Zustand normal
- Unsicherheit sehr gering
- Angabe der Imputation in ppm ( CH<sub>4</sub> 17, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 5, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 7, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 5, CO<sub>2</sub> 3680)



# OLTC DGA unterstützt durch KI

Beispiel einer potenziellen Fehlerbewertung:

## + Konfiguration:

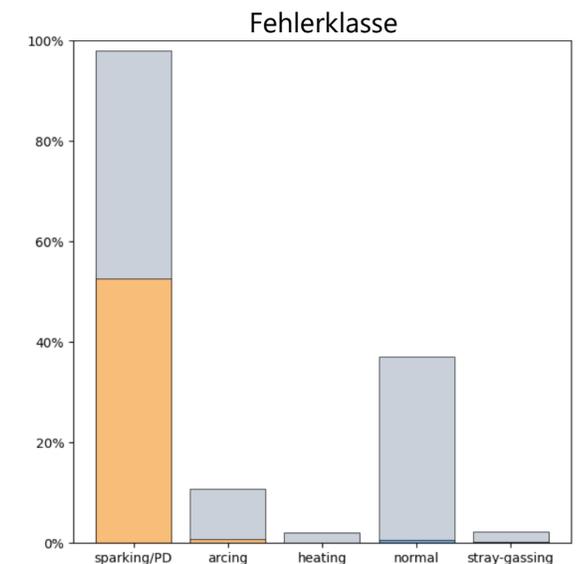
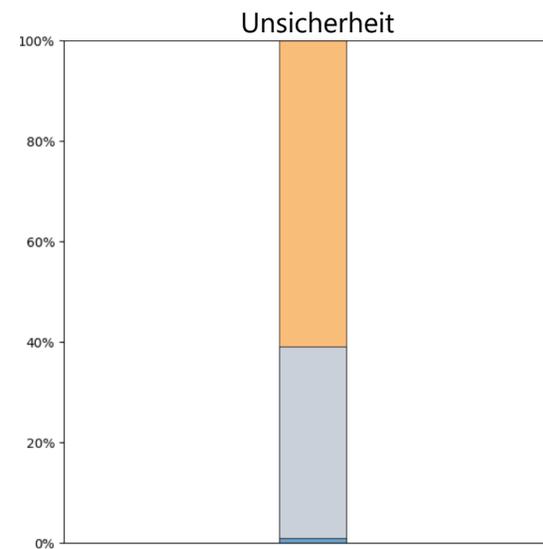
- Schaltertyp: VR
- Applikation: N/A
- Schalthandlungen: 420
- Alter: 1 Jahr
- Angaben zum Öl sind fehlend (Typ, Inhibitor, Volumen, ...)
- Angaben zur Last sind ebenfalls unbekannt

## + Gaskonzentrationen in ppm:

- H<sub>2</sub>: 133
- CH<sub>4</sub>: 8
- C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>: N/A
- C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>: 6
- C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>: 13
- CO: 346
- CO<sub>2</sub>: N/A

## + Ausgabe des Systems:

- Handlungsempfehlung: Wartung durchführen
- Wahrscheinlichkeit >50%
- Angabe der Imputation in ppm (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 3, CO<sub>2</sub> 1830)



# OLTC DGA unterstützt durch KI

Beispiel einer potenziellen Fehlerbewertung:

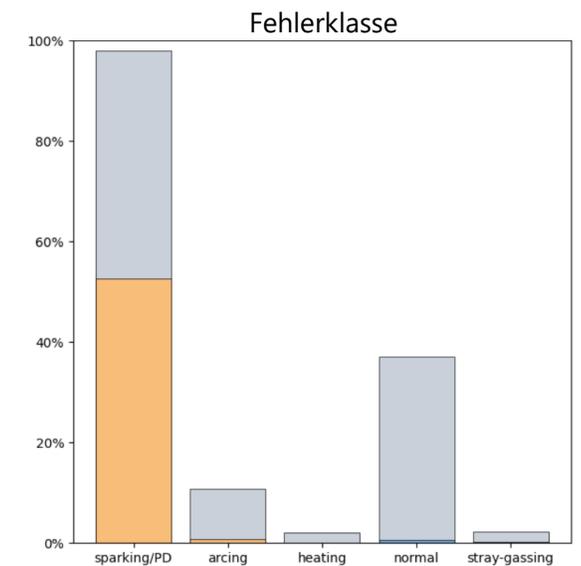
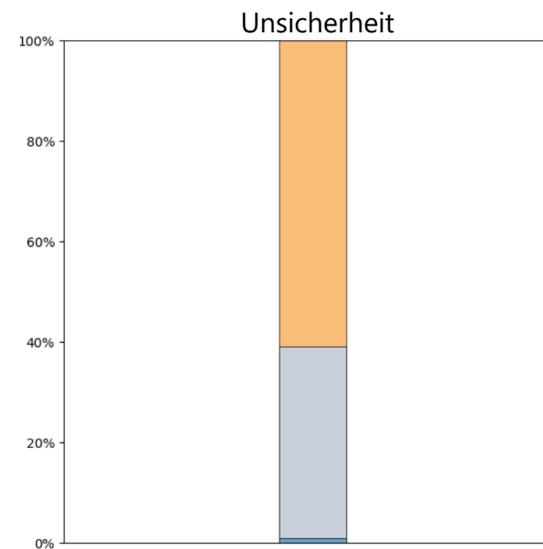
## + Ergebnis der Wartung:

- Montagefehler – Kontakt nicht fest angezogen



## + Ausgabe des Systems:

- Handlungsempfehlung: Wartung durchführen
- Wahrscheinlichkeit >50%
- Angabe der Imputation in ppm ( $C_2H_6$  3,  $CO_2$  1830)





# Vielen Dank für Ihr Interesse.

Bitte kontaktieren Sie uns:

**Christian Haselbeck**

A1 – Head of Intelligent Transformer  
[C.Haselbeck@reinhausen.com](mailto:C.Haselbeck@reinhausen.com)

**Andreas Kurz**

ATC – Head of Condition Assessment  
[A.Kurz@reinhausen.com](mailto:A.Kurz@reinhausen.com)

**Roland Götz**

AT – Head of Innovation and Technology  
[R.Goetz@reinhausen.com](mailto:R.Goetz@reinhausen.com)

**THE POWER  
BEHIND POWER.**  
[reinhausen.com](http://reinhausen.com)

