



Applikation von Künstlicher Intelligenz in der Maschinenfabrik Reinhausen

© MR27-Nov-2024 | ATC Dr. Andreas Kurz

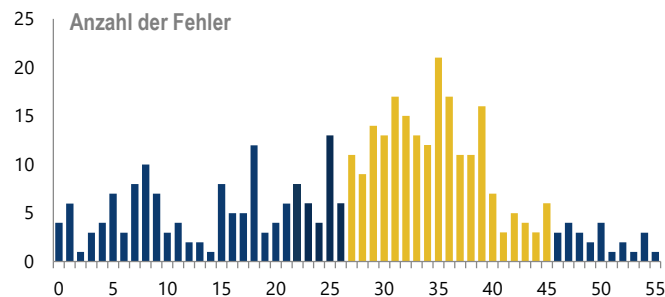


Warum ein Blick auf Leistungstransformatoren relevant ist ?

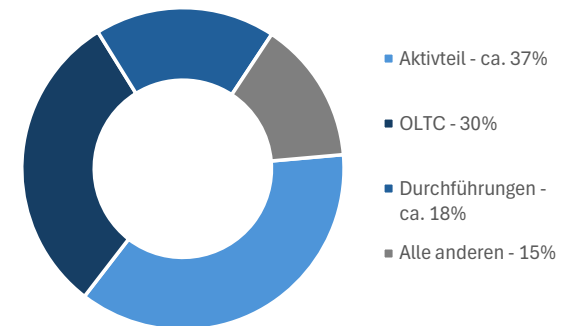
+ Durchschnittliches Alter von Leistungstransformatoren



+ Häufigkeit der Fehler in Abhängigkeit des Alters

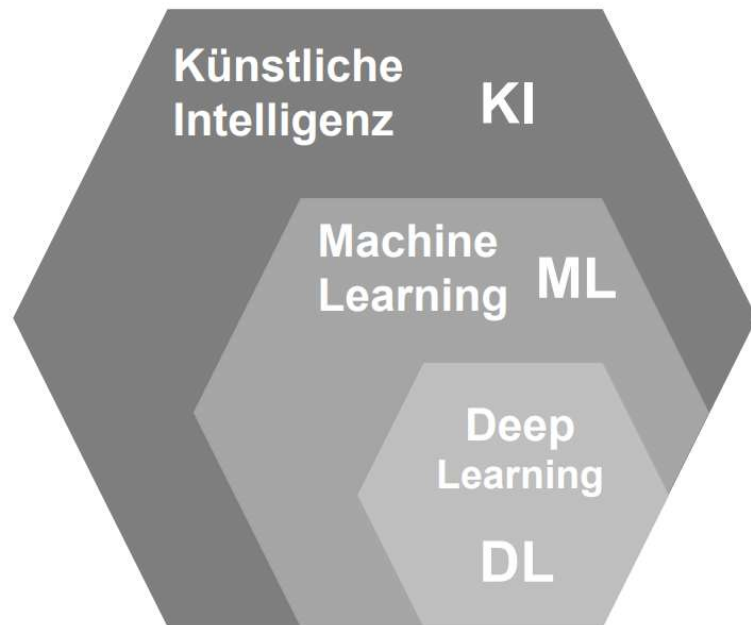


+ Betroffene Komponente im Leistungstransformator



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

Wodurch wird „Künstliche Intelligenz“ (KI) charakterisiert?



- + Die **KI** ist ein Teilgebiet der **Informatik** und verfolgt das Ziel bestimmte, intelligente **Entscheidungsstrukturen** von Menschen **automatisiert** nachzubilden
- + **Machine Learning** ist ein Oberbegriff für die maschinelle Generierung von Wissen aus bereits vorliegenden **Erfahrungen und Daten**.
- + **Deep Learning** ist eine Methode des Machine Learning, die **von der Funktionsweise** des menschlichen **Gehirns inspiriert** ist.

Embedded Transformer Operation System (ETOS) – Vision des digitalen Zwillings am Leistungstransformator

Überwachung

Thermisches Monitoring

- + Simulation & Vorhersage von Überlast
- + Berechnen der Hot Spot – Temperatur
- + Dynamic Transformer Rating

Durchführungsmonitoring

- + Online Überwachung von Änderungen der Kapazität und des Verlustfaktors

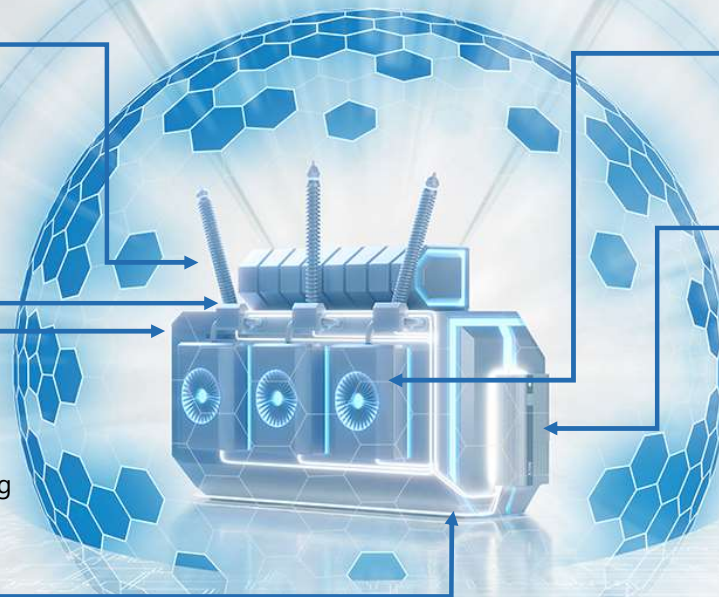
Stufenschalter-Monitoring

- + Überwachung von OLTC-Motorantriebssignalen für Wartungsempfehlungen & Intervallberechnung
- + Drehmoment-Monitoring in Echtzeit
- + Vibroakustische Überwachung (VAM)

Online-DGA-Überwachung

- + Aufzeichnung von bis zu 9 gelösten Gasen
- + Individuell konfigurierbarer Grenzwert

Asset Intelligence



Regelung / Kontrolle

Kühlanlagenüberwachung

- + Überwachung des Wärmewiderstands und der Kühlleistung
- + Kühlstufen individuell parametrierbar

Spannungsregelung

- + Dynamische Sollwertsteuerung auch für reverse power flow (PV - Einspeisung)
- + Parallelbetrieb für bis zu 16 Transformatoren

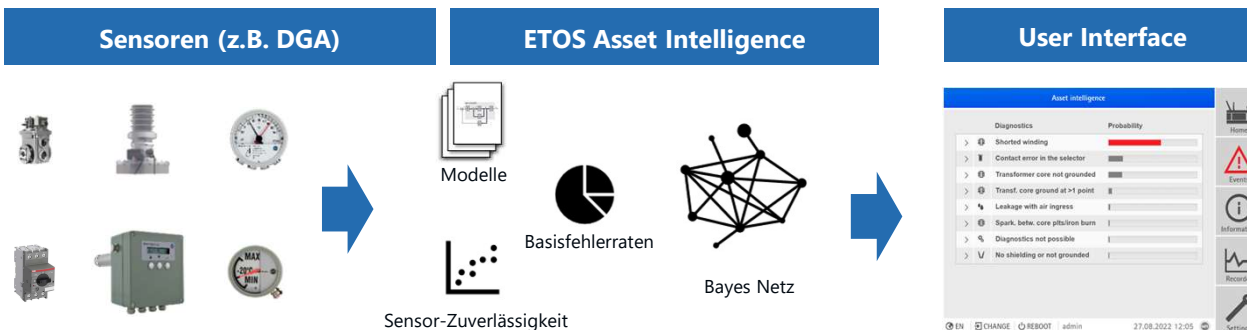
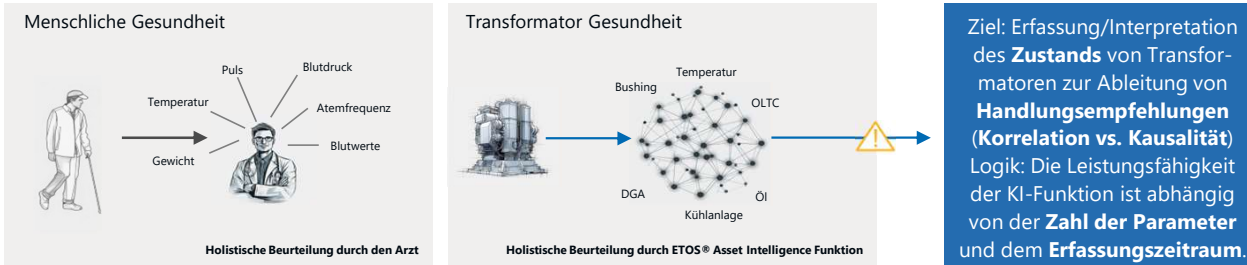
Zusätzliche Merkmale

- + Visualisierung und Kommunikation
- + Anpassungen können flexibel im laufenden Betrieb vorgenommen werden
- + Offene Programmierung mit modularen Funktionsblöcken
- + Frei programmierbare Ein- und Ausgänge
- + Integration in übergeordnete Schnittstellen
- + Resiliente Betriebsführung (u.a. bei Ausfall der Leitwarte)

ETOS Asset Intelligence mit Hilfe von KI – Echtzeit-Zustandsbewertung von Leistungstransformatoren

Ähnlich dem erfahrenen Arzt, welcher mittels **ganzheitlicher Zustandsbewertung (Anamnese)** eine **entscheidende Diagnose** erstellt, bietet ETOS Asset Intelligence u.a. einen Leitfaden zur **Minimierung von Ausfallrisiken** und zur **optimierten Betriebsführung**.

Die innovative KI-Funktion von ETOS® führt individuelle Daten zu verwertbaren Erkenntnissen zusammen



+ Kompensation von Kompetenzlücken

2020 US State of the electric utility survey report: 77 % der EVU haben Probleme, qualifiziertes Personal zu finden.

Zusätzlich neue Herausforderungen an die Stromnetze (Alterung/Belastung, Elektromobilität/Energiewende).

+ Identifikation von Zusammenhängen

Umgang mit unvollständigen und verrauschten Daten und probabilistische Abschätzung von Diagnosen.

Erkennen von Mustern aus einer Vielzahl, z.T. widersprüchlicher Daten zur Diagnose potentieller Fehlerursachen.

+ Verbesserte Genauigkeit und Flexibilität

Optimierung der Diagnosegenauigkeit durch Kombination mehrerer Quellen (Sensordaten, Zeitreihen, externe Daten, Expertenwissen) per Machine Learning (Bayes'sches Netz – aufgetretene und nicht aufgetretene Warmmeldungen).

Aktualisierung bei Verfügbarkeit neuer Informationen für Online- oder Echtzeit-Diagnosen (u.a. „AI Chat“).

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 Fehlergasen 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:

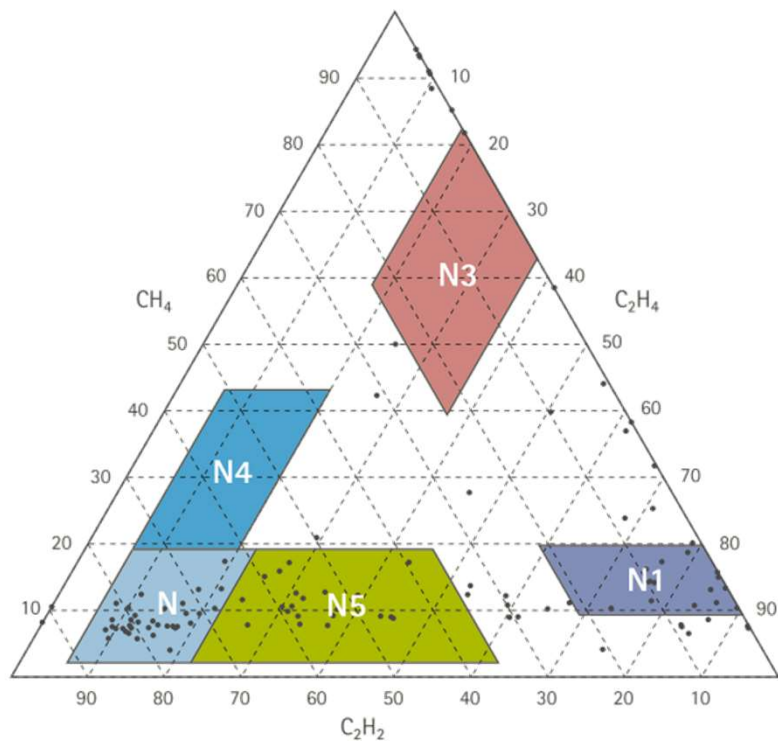
- + umfasst auf maschinellem Lernen basierende Methoden
- + Schwächen, wenn die zur Bewertung erforderlichen Informationen unvollständig sind



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

Standard DGA-Interpretationsmethoden für OLTC'S

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



- + Grundsätzliche Darstellung von CH₄, C₂H₄ und C₂H₂ (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, Schalthäufigkeiten etc.) berücksichtigt
- + Online werden sehr teure Systeme benötigt

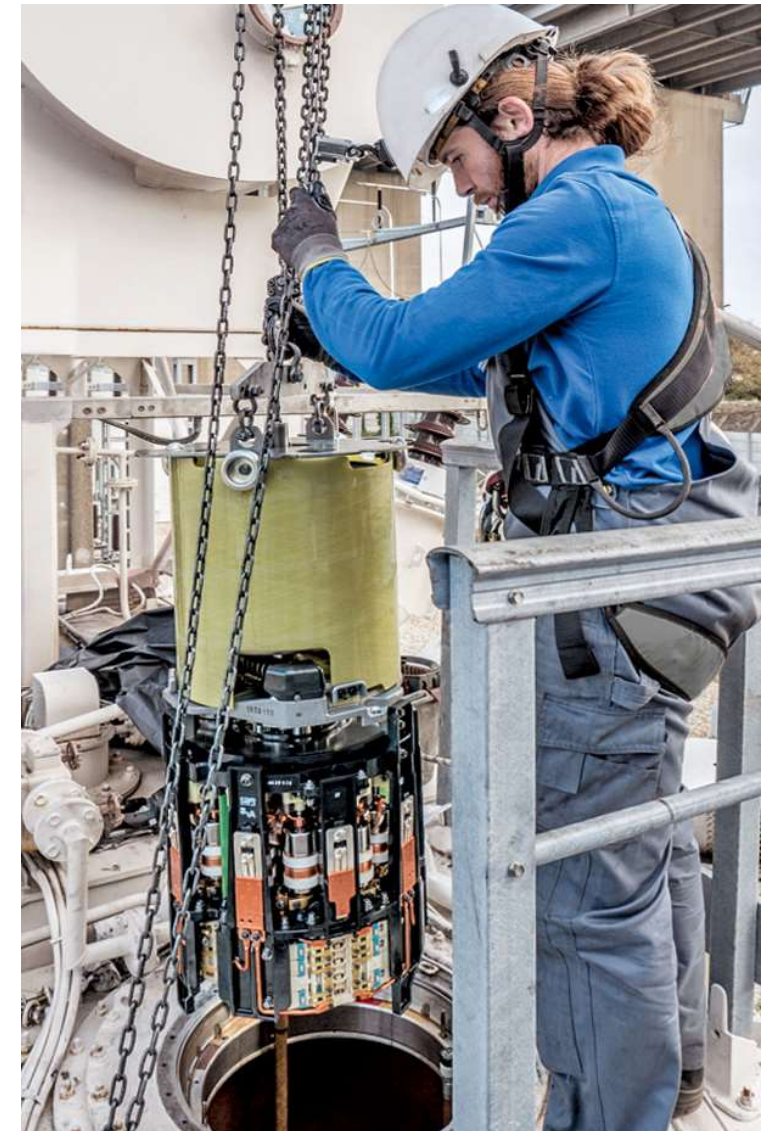
Standard DGA-Interpretationsmethoden für OLTC'S

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 Schalthäufigkeit
 - 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



Fehlererkennung
und -klassifizierung
durch ML

+ 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:

+ 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



Ableiten einer
Handlungsempfehlung

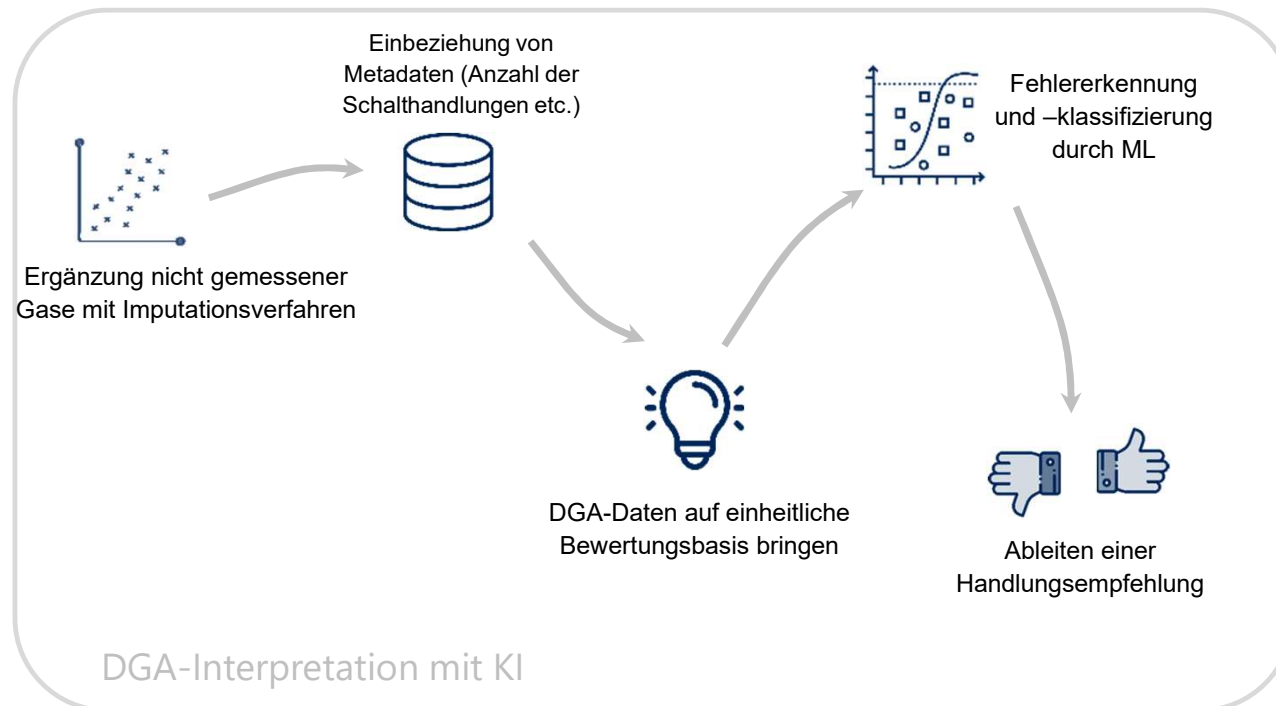
+ Zukünftiger Mehrwert der KI:

- 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:

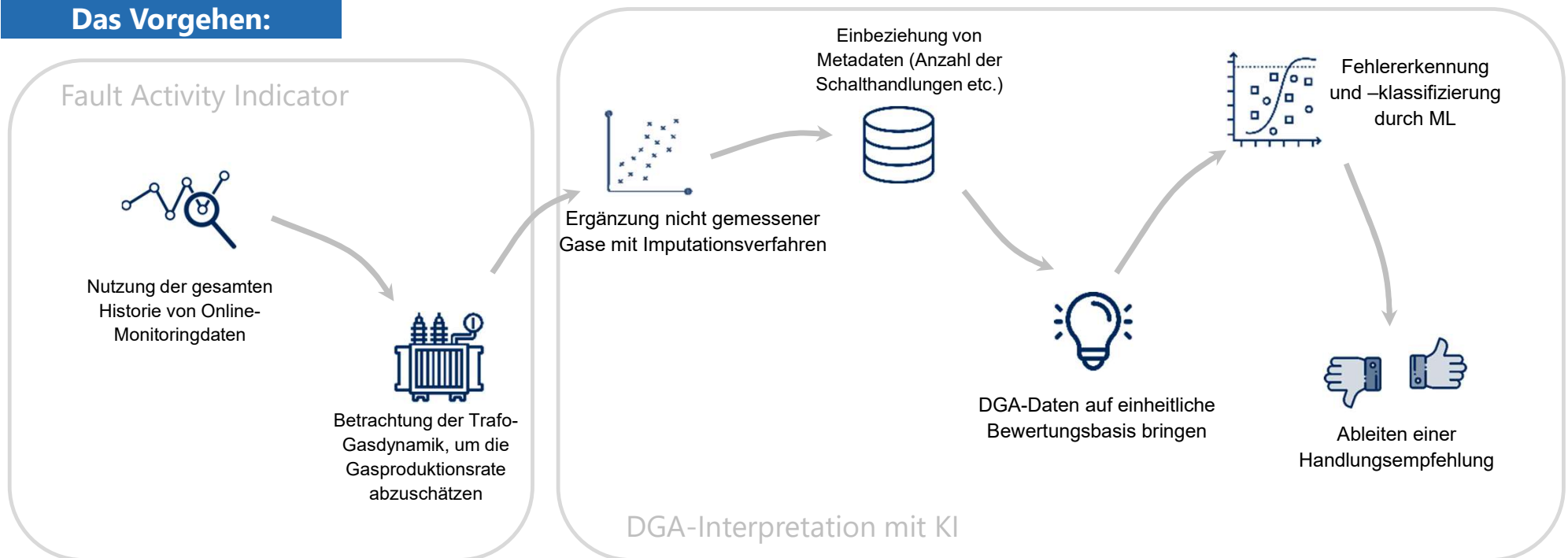
Das Vorgehen:



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

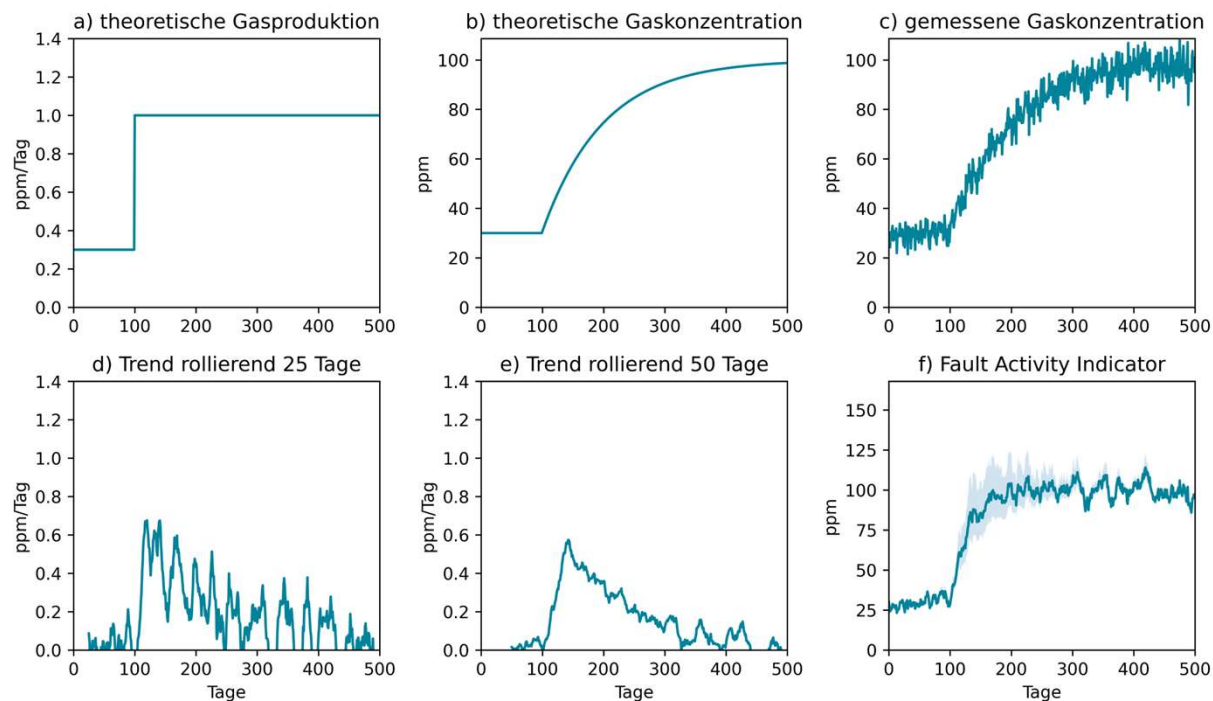
Problemlösung: Entwicklung eines Algorithmus unter Nutzung von KI zur Abbildung der Entscheidung von Experten:

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 Ölvolumen 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:

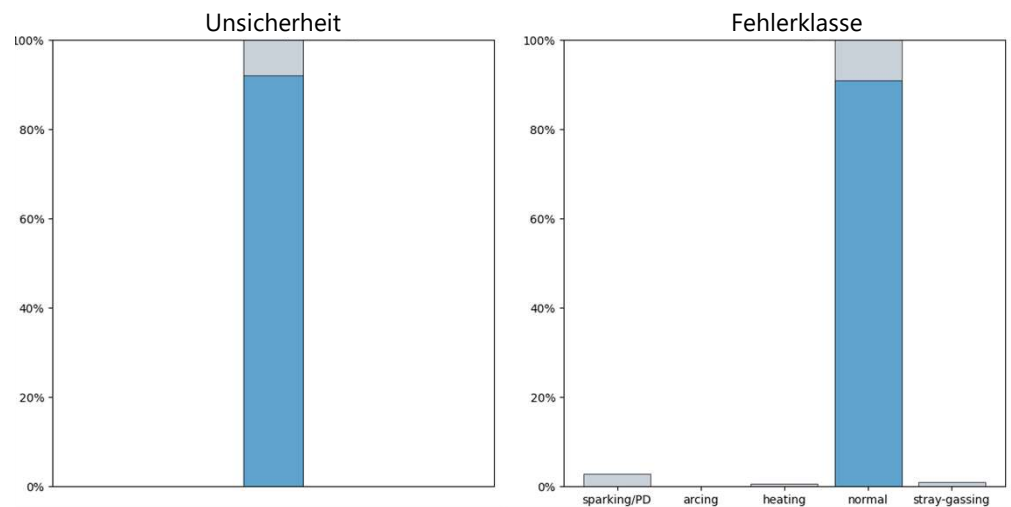
- Schaltertyp: VR
- Applikation: Windenergie
- Schalthandlungen: 35201
- Alter: 3 Jahre
- Angaben zum Öl sind fehlend (Typ, Inhibitor, Volumen, ...)
- Angaben zur Last sind ebenfalls unbekannt

+ Gaskonzentrationen in ppm:

- H₂: 34
- CH₄: N/A
- C₂H₆: N/A
- C₂H₄: N/A
- C₂H₂: N/A
- CO: 584
- CO₂: N/A

+ Ausgabe des Systems:

- Handlungsempfehlung: Keine Maßnahmen erforderlich Zustand normal
- Unsicherheit sehr gering
- Angabe der Imputation in ppm (CH₄ 17, C₂H₆ 5, C₂H₄ 7, C₂H₂ 5, CO₂ 3680)



OLTC DGA unterstützt durch KI

Beispiel einer potenziellen Fehlerbewertung:

+ Konfiguration:

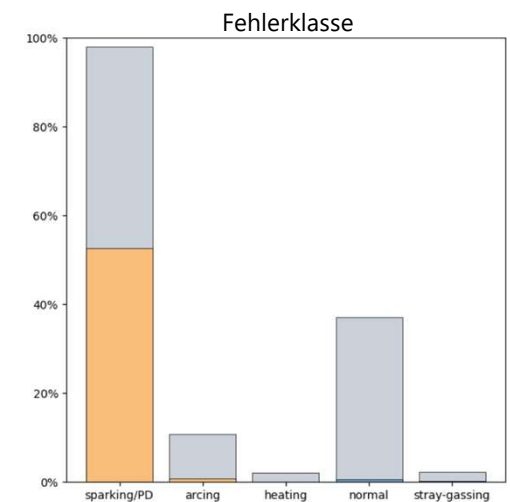
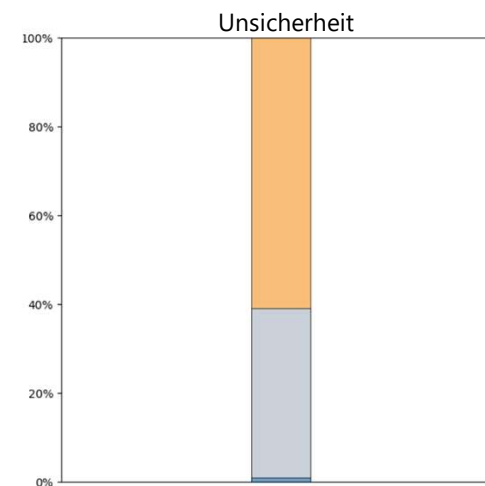
- Schaltertyp: VR
- Applikation: N/A
- Schalthandlungen: 420
- Alter: 1 Jahr
- Angaben zum Öl sind fehlend (Typ, Inhibitor, Volumen, ...)
- Angaben zur Last sind ebenfalls unbekannt

+ Gaskonzentrationen in ppm:

- H₂: 133
- CH₄: 8
- C₂H₆: N/A
- C₂H₄: 6
- C₂H₂: 13
- CO: 346
- CO₂: N/A

+ Ausgabe des Systems:

- Handlungsempfehlung: Wartung durchführen
- Wahrscheinlichkeit >50%
- Angabe der Imputation in ppm (C₂H₆ 3, CO₂ 1830)



KI-Anwendungsfälle @ MR

Klassische KI & Machine Learning

Produktion & Qualität

Intelligente Sensoren

Digitale Zwillinge / digitaler Produktpass

Dienstleistungen im Umspannwerk

Intelligente Datenauswertung und Bewertung

OEM & Systemintegratoren

Netzbetreiber

Lasten & Einspeiser

Generative KI

Service / Support

Sales / Marketing

Software-Development



Vielen Dank für Ihr Interesse.

Bitte kontaktieren Sie uns:

Andreas Kurz

ATC – Head of Condition Assessment

A.Kurz@reinhausen.com

**THE POWER
BEHIND POWER.
reinhausen.com**

