

bachmann.



Kann Ihr Windpark schon KI? Instandhaltung mit KI-gestützten Strategien



bachmann.



Instandhaltung mit KI-gestützten Strategien

Inhalte:

Motivation

Hintergrundinformationen:
Zahlen, Fakten und
Zielfunktionen: "Smart Maintenance"

Datenanalyse in der
Betriebsführung

Datenvorbehandlung mit Hilfe von KI
KI-Methoden

KI in der
Betriebsführung

Beispiele für den Einsatz von Bayes-
Filtern und von genetischen KI-
Methoden

Zusammenfassung
und Ausblick

Was ist der aktuelle Stand und wie
kann/sollte es weitergehen.



Bachmann Group: Zahlen & Fakten **b.guard**



Bachmann Monitoring GmbH

63 Employees

11,0 Mn Euro Turnover

12,0 % Ø Growth p.a.

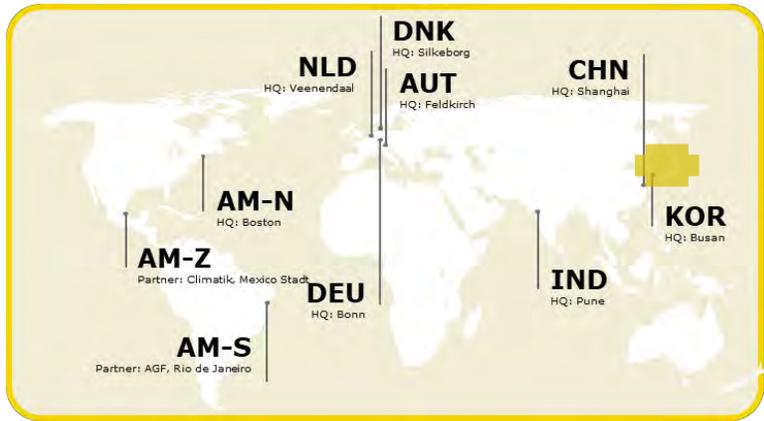
4 Locations

b.guard

CMS-Portfolio

- Hardware
- Sensoren
- Software
- Monitoring
- Services
- Consulting
- Training

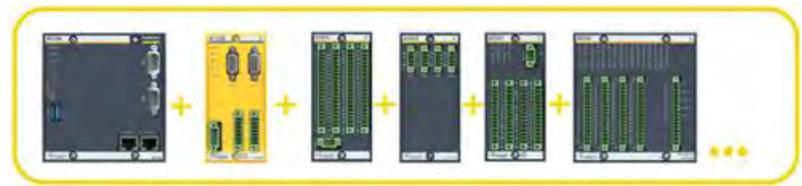
Bachmann hat weltweit mehr als 140.000 WEA automatisiert. Aber was bedeutet das in Bezug den Einsatz KI-gestützten Strategien?



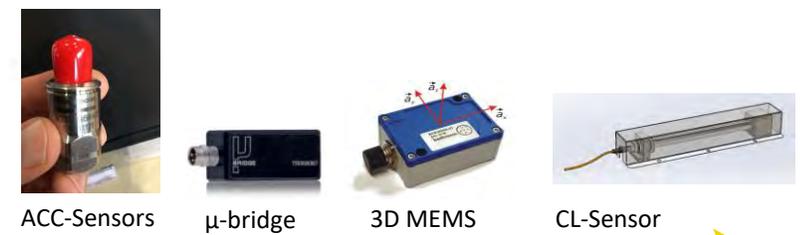
547 Employees **102 Mn** Euro Turnover **9,8 %** Ø Growth p.a. **25** Locations

4 Competence Areas
4 Industries

b.control **b.grid** **b.operate** **b.guard**



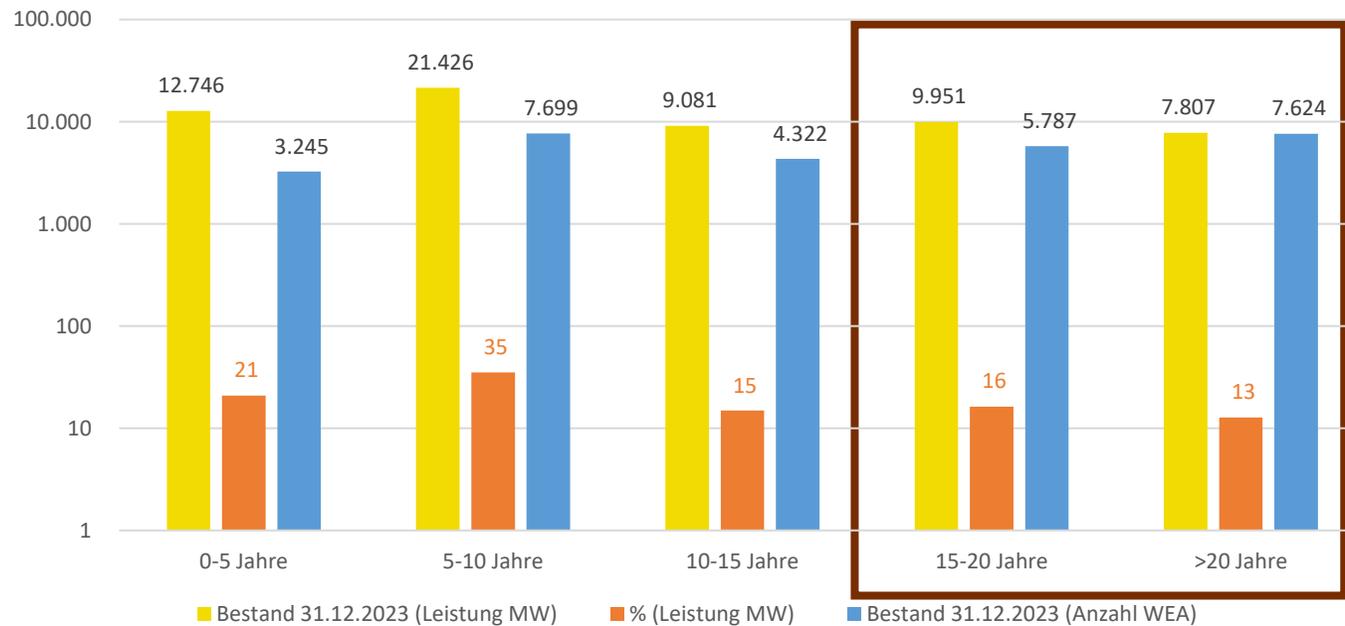
Modulare Steuerungs- und Messsysteme



Motivation & Hintergrund

Die Onshore Windparkflotte altert!

Angaben zu Bestandsanlagen in Deutschland: 31.12.2023



Onshore:

Etwa 30% der in Deutschland installierten Leistung ist älter als 15 Jahre

Europa:

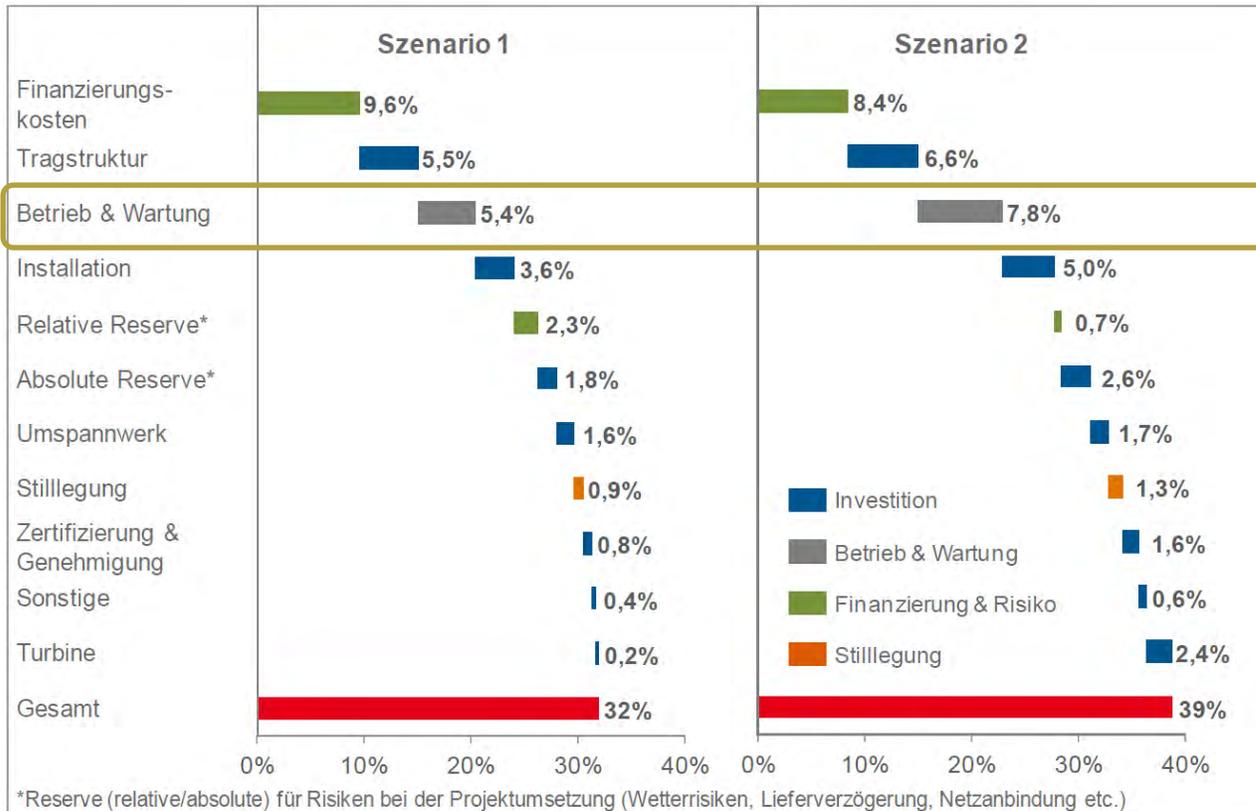
Z.B. in Spanien etwa 44% und in Dänemark sogar 57%

Übersicht über die Altersstruktur der Bestandsanlagen in Deutschland (Stand 31.12.2023) Quelle: Deutsche WindGuard 2023; [Jahr 2023 - Deutsche WindGuard](#)



Kostensenkungspotenziale

Wesentliche Faktoren der Profitabilität



Die Reduktion der Betriebs- und Wartungskosten sowie die Senkung der Finanzierungskosten bieten die größten Einzelpotenziale.

Quelle: Prognos-Fichtner-Studie

Gewinn = Einnahmen – (CAPEX + OPEX)

Einnahmen die Einnahmen aus dem Verkauf des erzeugten Windstroms.

CAPEX die Investitionskosten sind, die Kosten für den Bau, von Windprojekten: WEA, Infrastruktur

OPEX die operativen Kosten fallen während des Betriebs und der Instandhaltung des Projekts an: dies sind die laufenden Kosten z.B. für Wartung, Betrieb, Versicherungen, Personal usw.



Optimierungspotenziale: Betriebskosten

Stromgestehungskosten: Finanzmathematische Durchschnittskosten über die Nutzungsdauer

$$SGK = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t \downarrow}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{el} \uparrow}{(1+i)^t}}$$

I_0 : Investitionsausgaben in Euro

A_t : Jährliche Betriebskosten in Euro im Jahr t

M_{el} : Produzierte Strommenge im jeweiligen Jahr in MWh

i : Realer kalkulatorischer Zinssatz in % (hier WACC)

n : Wirtschaftliche Nutzungsdauer (20 Jahre-30 Jahre)

t : Jahr der Nutzungsperiode (1, 2, ...n)

Sinken die Stromgestehungskosten „SGK bzw. LCOE (Levelized Cost of Electricity)“ steigt die Rentabilität der Projekte.

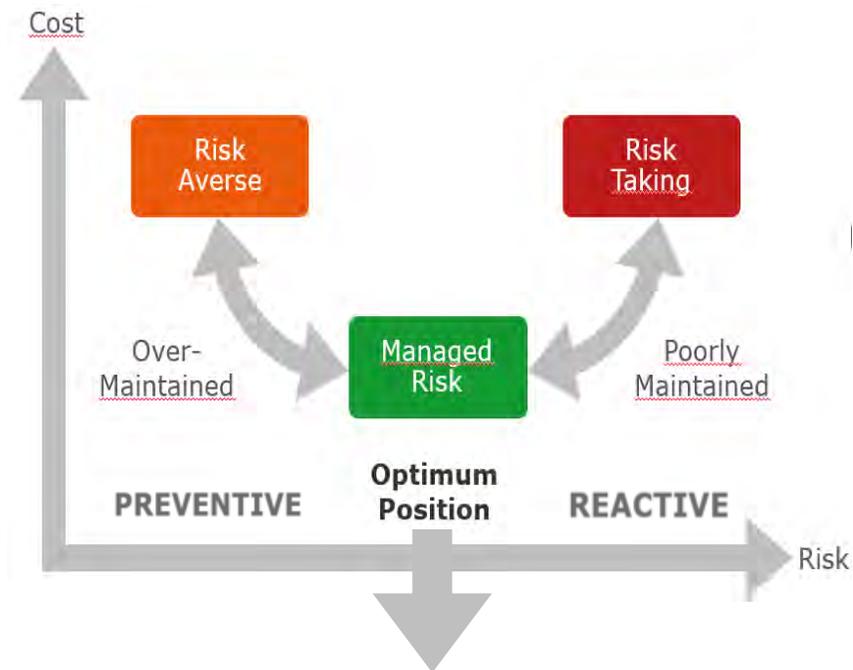


Smart Maintenance

Instandhaltungsstrategien: Wissensbasierte Instandhaltungsoptimierung

Instandhaltungsstrategien:

1. Preventive Maintenance (Time- or Duty-based / Risk Averse)
 1. Intervallbasierte Revisionen
2. Predictive Maintenance (Condition Based)
 1. Überwachung ausgewählter Parameter zur Beurteilung des Zustands der Maschine:
Planbare Instandsetzung
3. Reactive Maintenance (Run to Failure / Risk Taking)
 - Anlage läuft bis zum Ausfall – hohe Reparaturkosten und schlechte Verfügbarkeit



Optimierte Instandhaltungsstrategie:
Smart Maintenance

Smart Maintenance

- Strategie basierend auf Anlagenkomponenten
- Reduziert unnötige Arbeit
- Reduziert ungeplante Nichtverfügbarkeit
- Unterstützt die Planung
- Inputs aus KI-Methoden zur Verbesserung der Anomalieerkennung und der Prognose

Smart Maintenance

Budgetplanung: Wissensbasierte Instandhaltungsoptimierung?

Budgetplanung: Betreiber/ TBF

■ Instandhaltungsmaßnahmen und Inspektionen

Wartungspläne: Regelmäßige Wartungen gemäß Herstellerempfehlungen oder gesetzlichen Anforderungen (z.B. jährliche Wartung, Hauptkomponenten-Inspektionen).

Prüfpflichten: Technische Inspektionen wie die Wiederkehrende Prüfung durch den TÜV oder andere Prüforganisationen, um die Betriebserlaubnis zu sichern.

Zustandsorientierte Instandhaltung: Maßnahmen auf Basis von Zustandsüberwachung (z.B. CMS), um kostspielige Reparaturen zu verhindern.

■ Ersatzteilmanagement

Komponenten mit erwarteter Lebensdauer: Abschätzung, welche Teile (z.B. Lager, Getriebeteile, Hydraulikpumpen) wahrscheinlich ausfallen könnten und welche auf Lager gehalten werden sollten.

Lagerhaltungskosten vs. Lieferzeiten: Entscheidungen darüber, ob Ersatzteile auf Lager gehalten werden oder ob eine Just-in-Time-Beschaffung wirtschaftlicher ist.

Kritische Ersatzteile: Ein Budget für teure, kritische Komponenten wie Transformatoren, Hauptlager, Getriebe oder Pitch-Systeme, um im Fall eines plötzlichen Ausfalls gewappnet zu sein.

Kran- und Hebekosten: Falls größere Komponenten ausgetauscht werden müssen, sind dies oft erhebliche Kostenfaktoren, die eingeplant werden sollten.



Faustregel: Die jährlichen Betriebskosten eines Windparks liegen oft bei etwa 2-4% der ursprünglichen Investitionskosten (CAPEX). Das bedeutet, über einen Zeitraum von 20 Jahren können die Betriebskosten etwa 40-80% der anfänglichen Investitionssumme betragen.

Daten

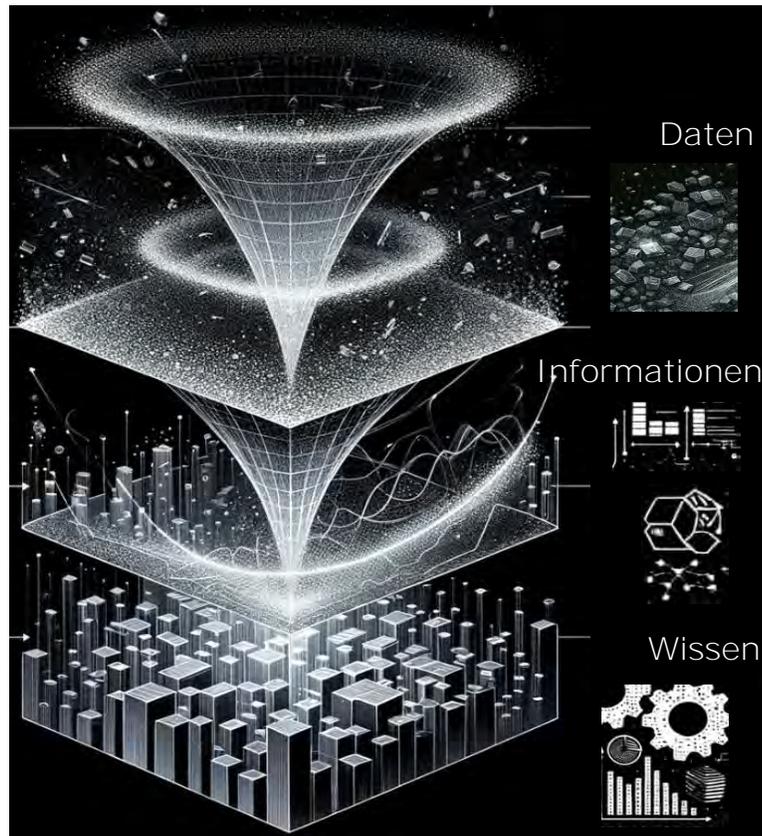
in der Betriebsführung



Die Umwandlung von Daten in Wissen

Daten → Informationen → Wissen: Verringerung der Entropie

Verringerung der Entropie



Daten:

Sind die Fakten der Welt:
z.B. Temperatur: **80°C**

Informationen:

Datensequenz die als
Nachricht interpretiert
werden kann. z.B.
Lagertemperatur

Wissen:

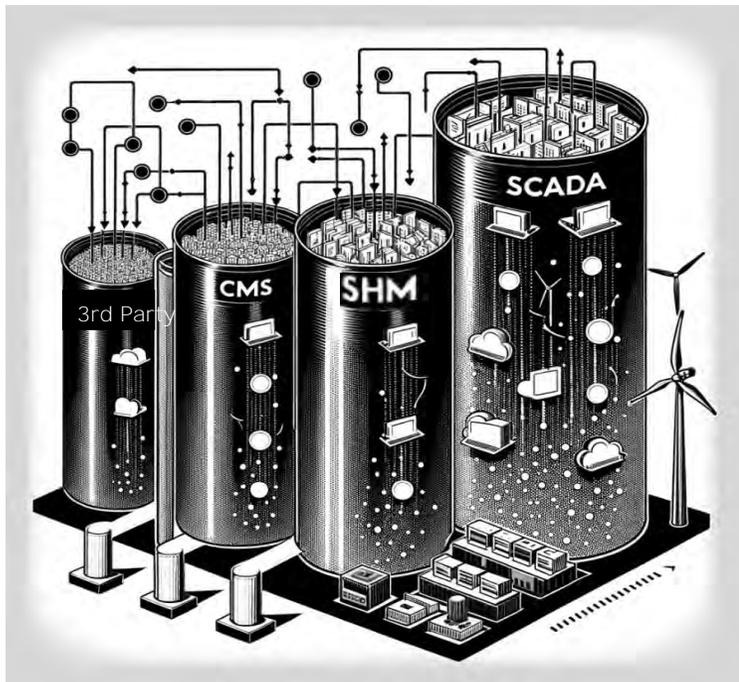
Domänen-/ Expertenwissen:
Dieses Lager an dieser Stelle
der Maschine ist zu heiß!



Quelle: [region-holzkirchen/internationales-bildhauer-symposium-hohendilching](https://www.region-holzkirchen.com/internationales-bildhauer-symposium-hohendilching)

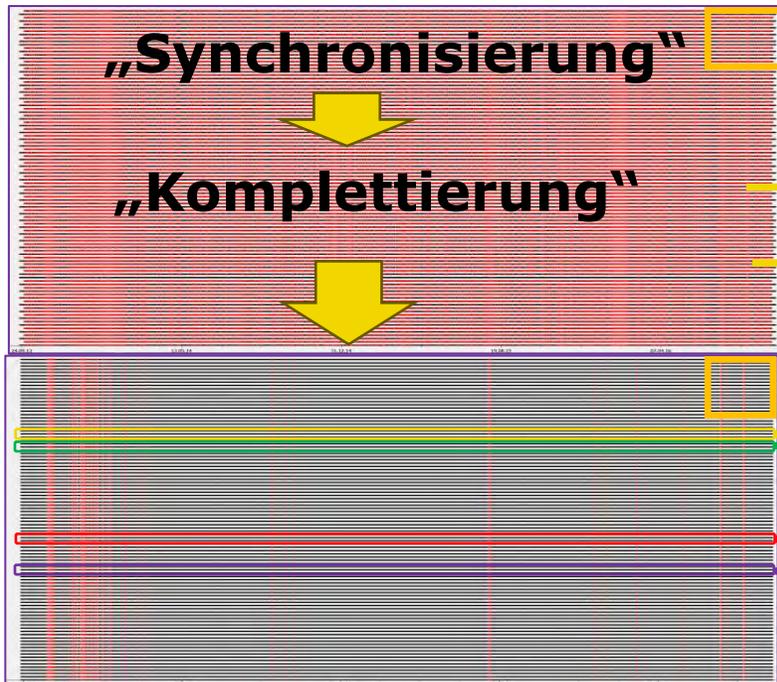
Notwendigkeit der Datenvorbehandlung

Datensilos – Oft müssen unterschiedliche Datenquellen berücksichtigt werden.



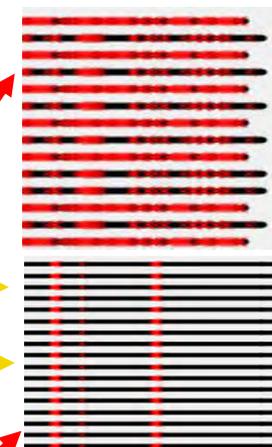
Datensilos: SCADA, CMS, 3rd Party Systems

Die Synchronisation von verschiedenen Datenquellen ist ein häufig unterschätztes Problem



Beispiel: SCADA-Daten und CMS-Kennwerte

Daten liegen oft nur ungeordnet und meist sehr lückenhaft vor.

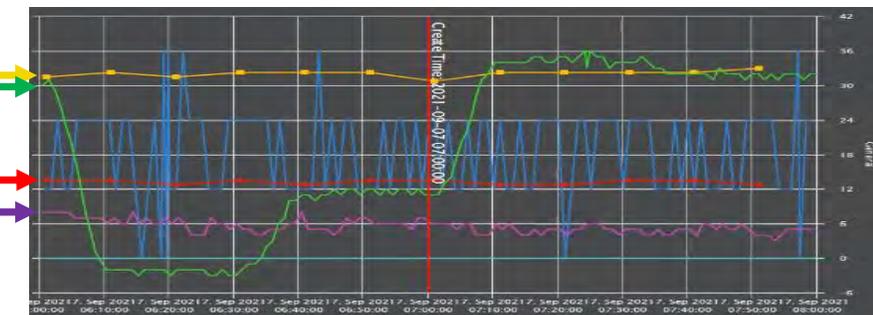


Statistischen Methoden

Kullback-Leibler Divergenz

+

Shannon Entropie



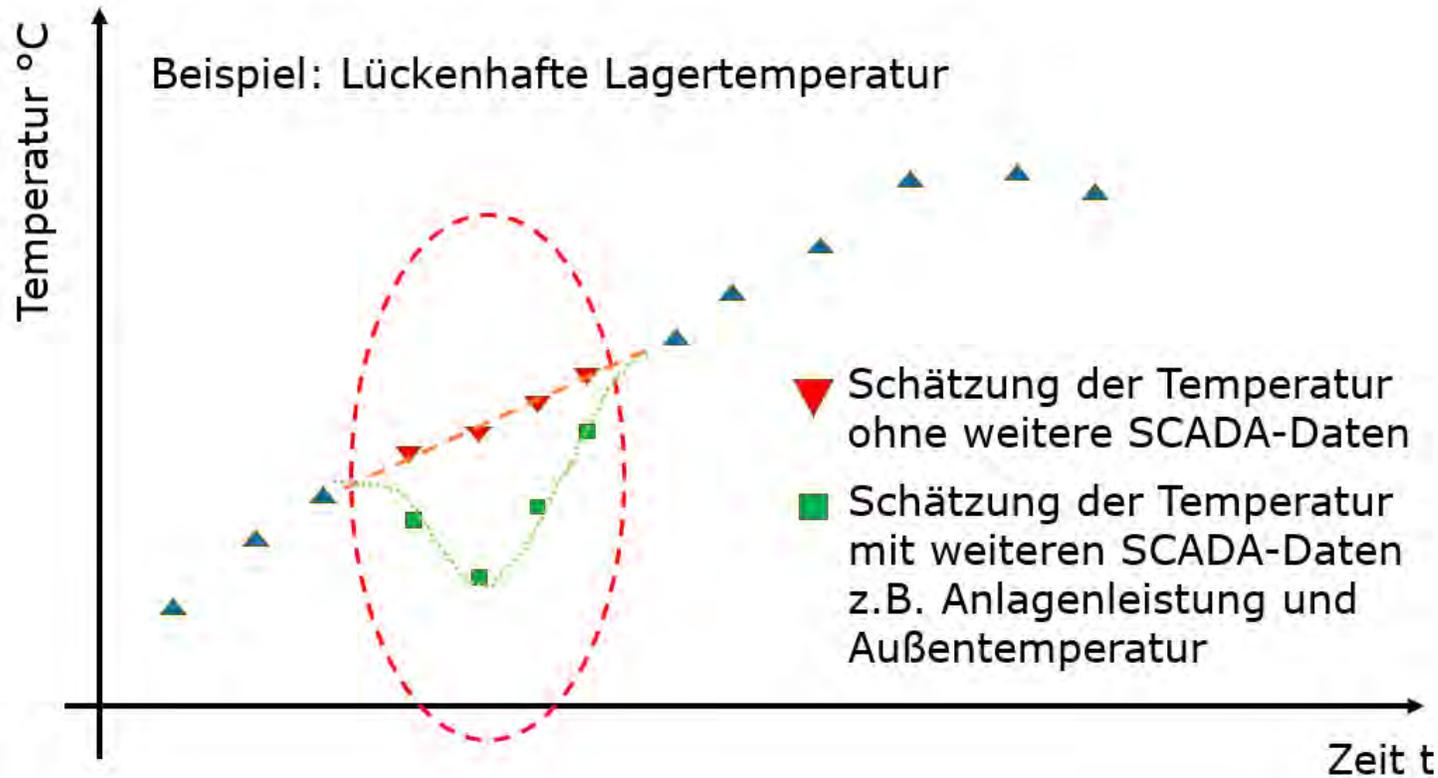
Beispiel: SCADA-Daten und CMS-Kennwerte

Daten liegen oft nur ungeordnet und meist sehr lückenhaft vor.



Notwendigkeit der Datenvorbehandlung

Datensilos und lückenhafte Datensätze



KI-basierte Vervollständigung der Daten:
Einsatz eines rekursiven Schätzers in Verbindung mit neuronalen Netzwerken (Kalman-Filter)

1. Kullback-Leibler Divergenz
KL-Divergenz misst, wie unterschiedlich die Verteilungen der lückenhaften Datenreihe $P_{(x)}$ und der komplettierten Datenreihe $Q_{(x)}$ sind. Sie zeigt, wie viel Information verloren geht, wenn Q anstelle von P verwendet wird.

$$D_{KL}(P \parallel Q) = \sum_x P(x) \log \left(\frac{P(x)}{Q(x)} \right)$$

2. Shannon Entropie (zur Sicherstellung)

$$H(P) = - \sum_x P(x) \log P(x)$$



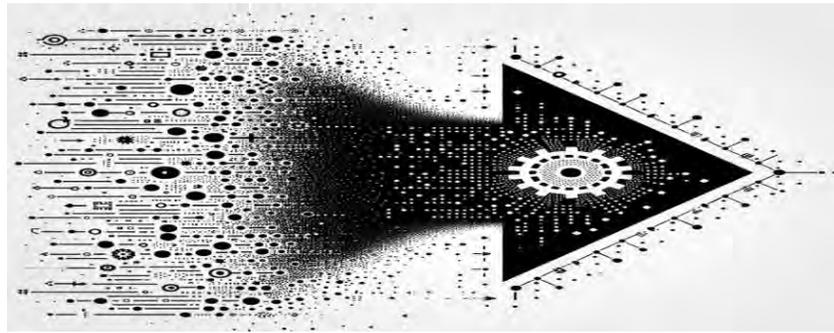
Informationsgewinnung: KI

Informationsdichte und Informationsfilterung

Verringerung der Entropie



Quelle: [kunsthalle-schnake-steine](#)



... der bekannte Zusammenhang zwischen Information und Entropie **wird auch hier wieder deutlich ...**



Die Verdichtung der Daten zu relevanten Informationen erfordert einen hohen mathematischen Aufwand.

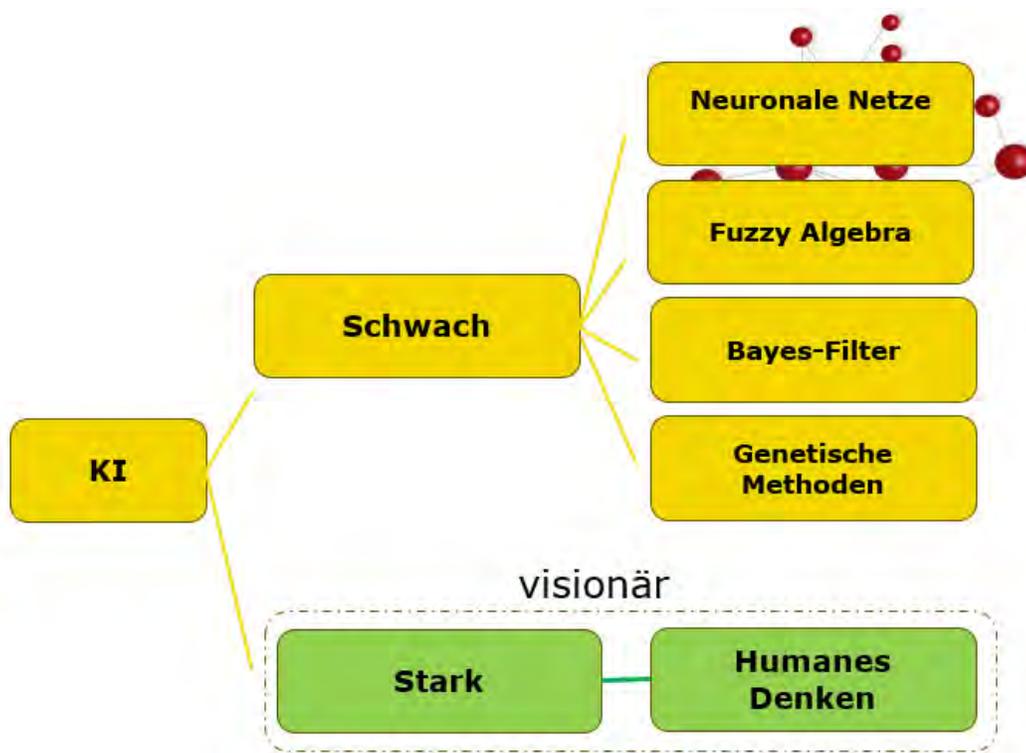


Quelle: [SZ.de Michelangelo](#)

Michelangelo:
„Die Figur war schon in dem Stein.
Ich musste nur alles überflüssige Gestein entfernen.“

KI -Methoden und Applikationen

Systematisierung



Method	KI-Applikationen
Neuronale Netze	ML (Deep Learning, SVMs, Reinforcement Learning), Mustererkennung, Digitaler Zwilling, Approximationsmethoden
Fuzzy Algebra	Logische Modellierung, Expertensysteme
Bayes-Filter	Optimale Suchalgorithmen, Mustererkennung, ML
Genetische Methoden	Approximationsmethoden, optimale Suchalgorithmen

Empirisch: Ein Schaden an einer komplexen Maschine ist i.A. kein eindeutiger physikalischer Messwert

SHM-Daten

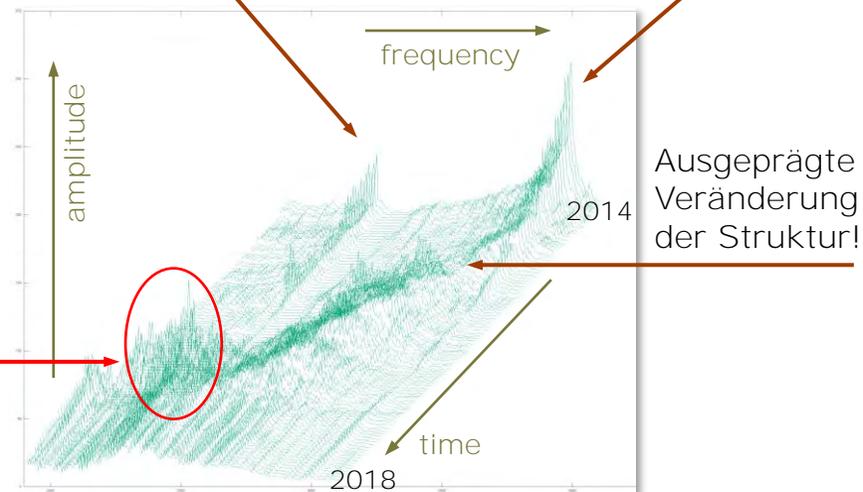
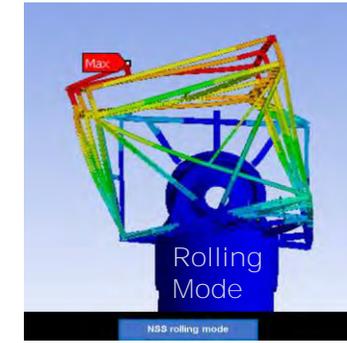
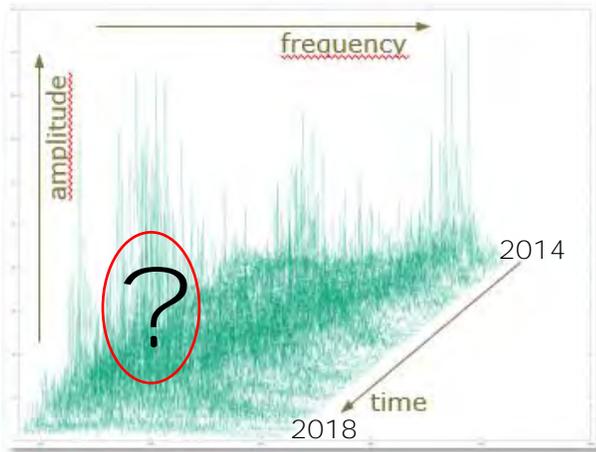
in der Betriebsführung und Anwendung von KI:

- Bayes-Filter
- Genetische Methoden



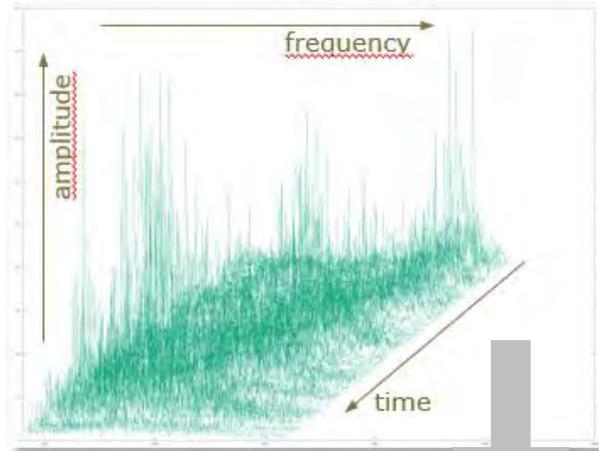
Schadensvermeidung durch SHM und KI

Beispiel: Strukturversagen



Schadensvermeidung durch SHM

Beispiel I: Strukturversagen und Einsatz von Bayes-Filtern



Definition der Systemantwort $X(t)$ auf eine Anregung $f(t)$:

$$X(t) = \int_{-\infty}^t G(t-t')f(t') dt'$$

Im Frequenzbereich:

$$X(\omega) = G(\omega)f(\omega)$$

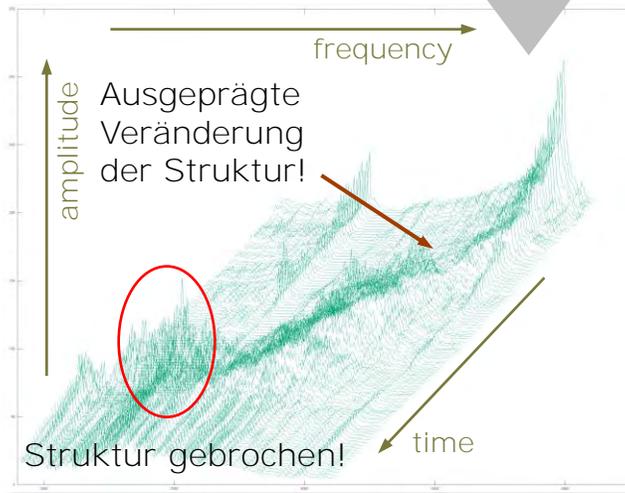
Die Green-Funktion $G(\omega)$

$$G(\omega) = \sum_i \frac{\rho_i}{\omega^2 - \theta_i^2}$$

ρ_i : Beitrag jedes Eigenwertes θ_i

Die Green-Funktion hängt ausschließlich von den Eigenwerten des Systems ab.

Die mathematische Extraktion des strukturelevanten EV-Spektrums ermöglicht die Überwachung der Struktur



WTG	Begin	Damage Indicator	End
WTG 17	12/15		04/19
WTG 03	01/16		05/20
WTG 34	12/15		07/19
WTG 01	12/15		06/19
WTG 75	02/16		05/20
WTG 49	12/15		05/20
WTG 42	03/16		05/20
WTG 12	10/15		05/20
WTG ..	01/20		05/20
WTG ..	12/15		07/19

Kennwerte für die automatisierte Überwachung



Genetischen KI -Methoden

Beispiel II und Mathematischer Hintergrund

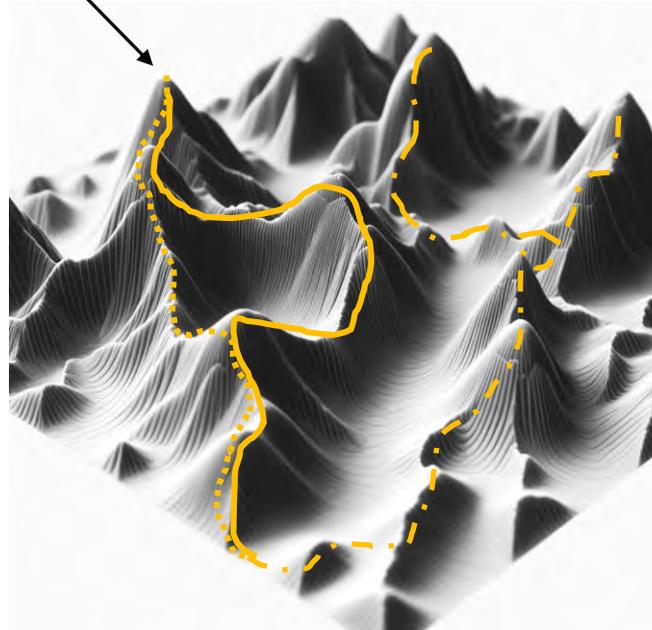
Fitness-Funktion die Höhe des Funktionswertes $f(x, y)$

Genetischer Auswahlprozess zur Optimierung der Maxima:

- Initialisierung: Erstelle eine Startpopulation mit zufälligen Werten für x und y .
- Selektion: Wähle die besten Kombinationen mit den höchsten Fitness-Werten (lokale Maxima).
- Rekombination und Mutation: Kombiniere die besten Individuen und füge Mutationen hinzu, um die Umgebung zu durchsuchen und potenzielle Maxima in der Nähe zu finden.
- Wiederholung: Setze den Prozess fort, bis sich die Population auf die höchsten Maxima in der Landschaft stabilisiert.

$$F(x, y) = f(x, y) = \sin(x) \cdot \cos(y) + \frac{x^2}{10} - \frac{y^2}{10}$$

$$(x^*, y^*) = \arg \max_{x, y} \left(\sin(x) \cdot \cos(y) + \frac{x^2}{10} - \frac{y^2}{10} \right)$$



(x^*, y^*) der Punkt im Funktionsraum, der ein lokales Maximum darstellt und keine unmittelbaren höheren Maxima in der Nachbarschaft hat.

Der genetische Algorithmus startet mit einer Population von möglichen „Lösungen“ (Punkten in der Landschaft), die zufällig über die gesamte Landschaft verteilt sind. Jede dieser Lösungen beginnt einen eigenen Pfad, und der Algorithmus optimiert die Population gleichzeitig.

Beispiel: Genetische Methoden

Mathematischer Hintergrund

Allgemeines Ziel:

Quantitative und Qualitative Erfassung eigenschaftsbezogener Zustandsänderung in einer Anlagenpool. Entwicklung einer von allgemeingültigen Ansätzen zur Anomalieerkennung (Triebstrang bzw. Struktur (Fundament, Turm, Rotorblätter)

Nutzen:

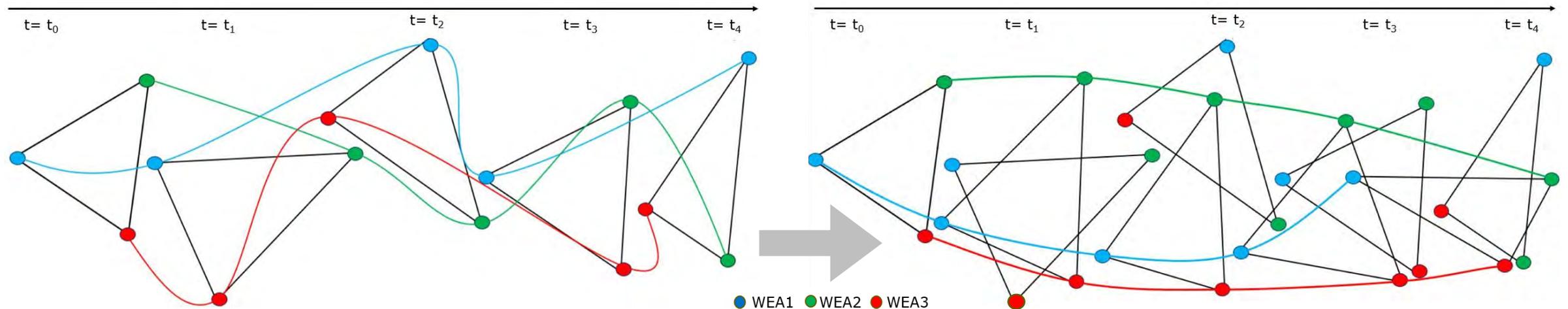
Auswertung spezifischer Fragestellungen, weitergehende Analysen
Software zur permanenten Realzeitanalyse eines beliebigen Anlagenpools

Abweichung der Distanzen

$$\sum_{t=0}^T \sum_{I,J} \left(d^{(IJ)}(t) - D^{(IJ)}(t) \right)^2$$

Änderung der Positionen

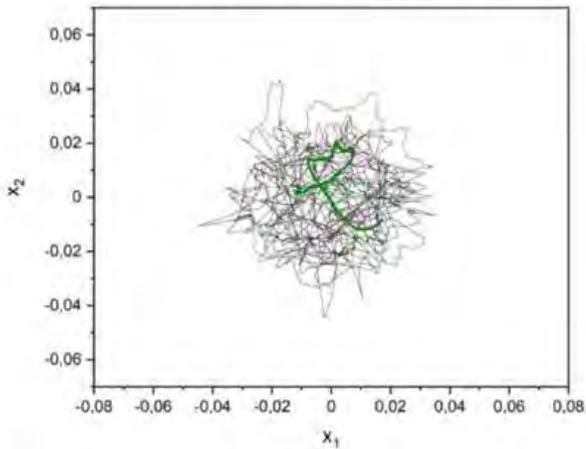
$$\frac{\mu_0}{2} \sum_{t=0}^{T-1} \sum_I \left(x_I(t + \Delta t) - x_I(t) \right)^2$$



Skizzierung des Lösungsansatzes

SW-Tools zur Priorisierung von Diagnose- und Servicearbeiten

Evolution vom 01.01.2017 – 20.08.2018



Vergleich von 22 WEA in Mittelamerika:
 ➤ Die Veränderung der Struktur ist auch ohne spezifische Anlagenkenntnis gut erkennbar.



Quelle: OZ nach Brand-von-WEA



Quelle: www.energie-und-management.de

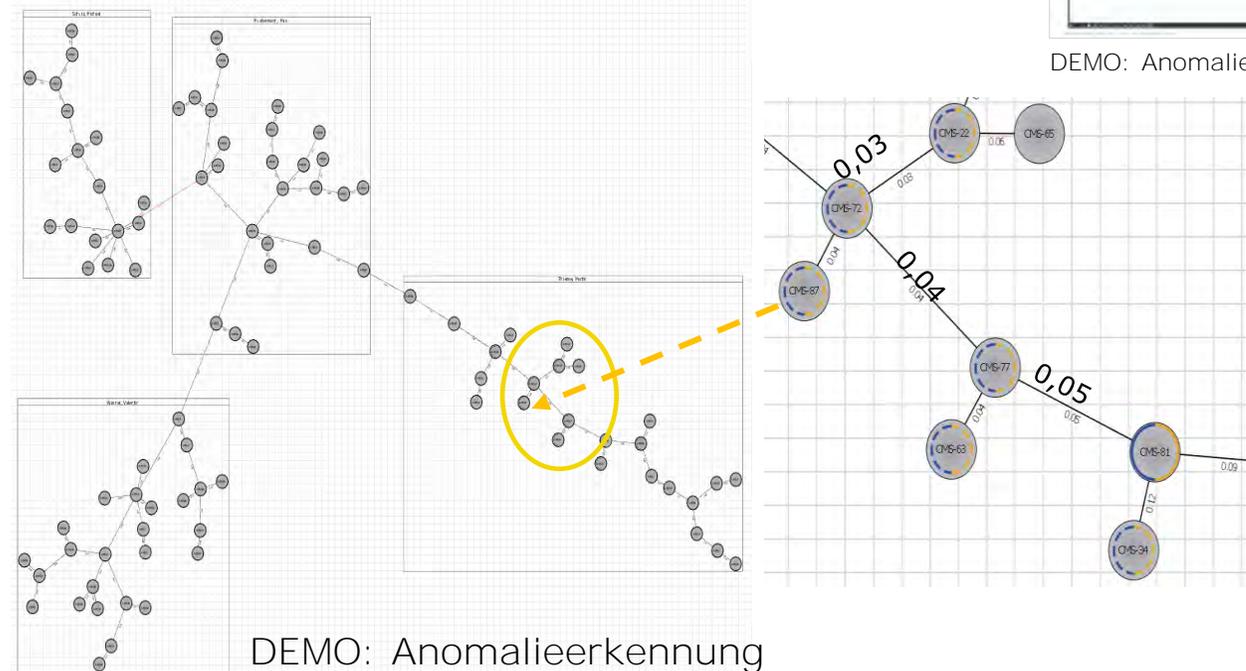
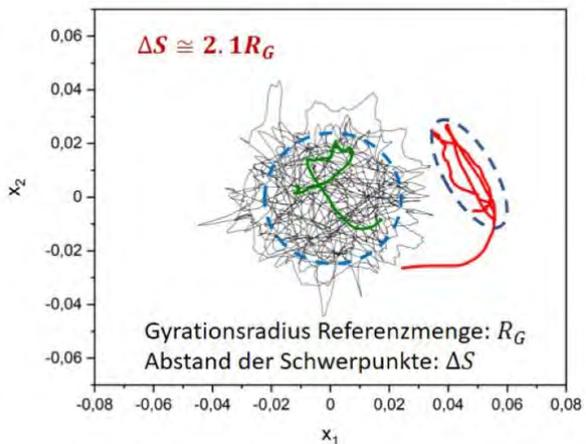
Nutzen:

Software-Lösung mit schneller Analyse des Struktur- bzw. des Betriebsverhaltens im Anlagenpool



DEMO: Anomalieerkennung

Evolution vom 27.04.2020 – 01.06.2021

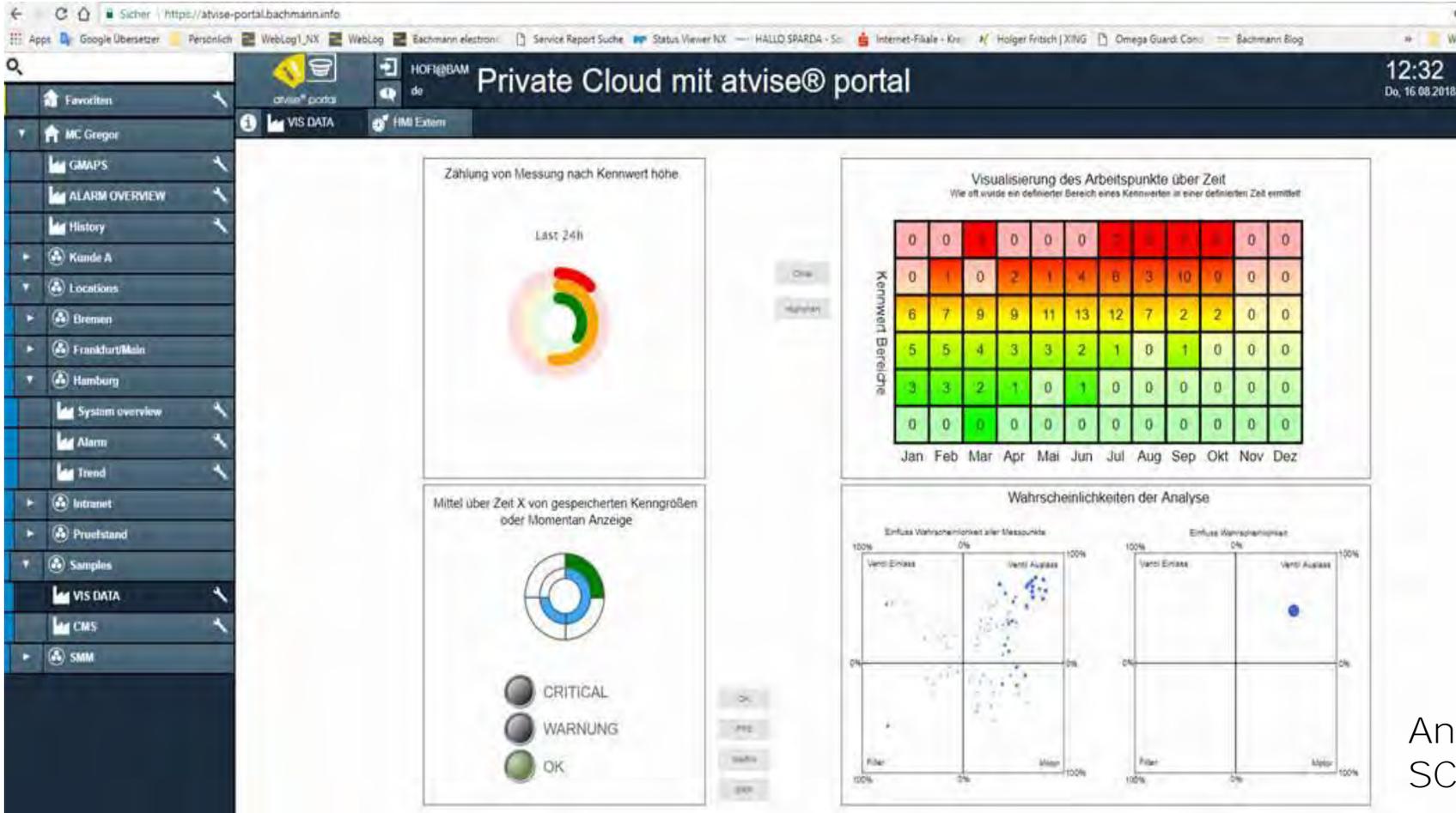


DEMO: Anomalieerkennung



Fehlererkennung mit SCADA-Daten

Beispiel: Visualisierungsmöglichkeiten in einem SCADA-System



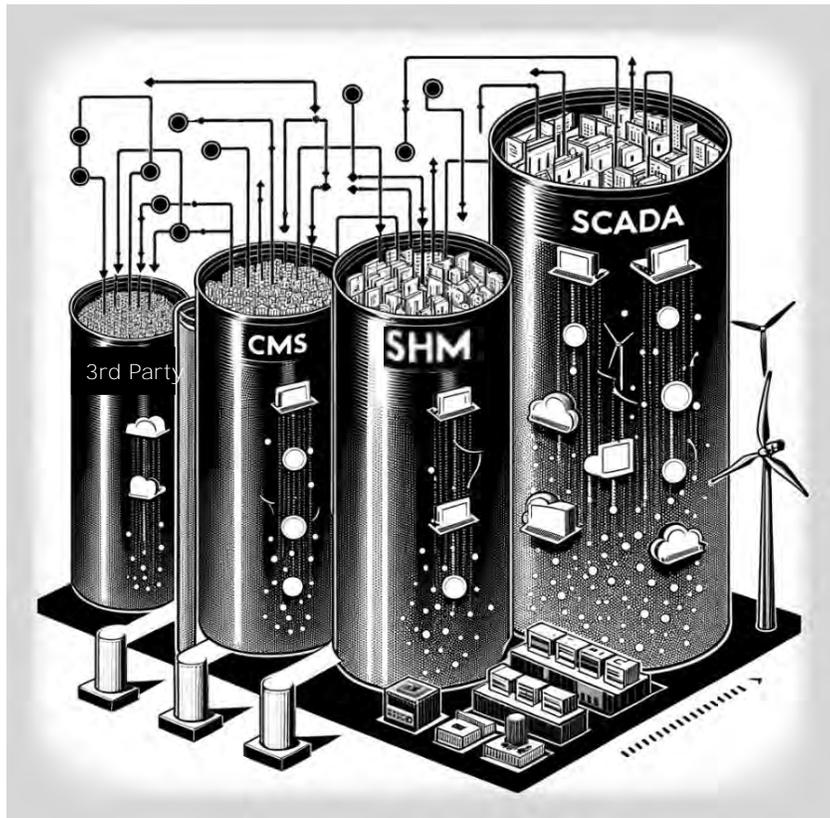
Verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten von langsamen Zustandsänderungen bzw. Anomalieerkennung in einem SCADA-System

Anomalieerkennung basierend auf SCADA-Daten und KI-Methoden



Nutzung von SCADA-Systemen

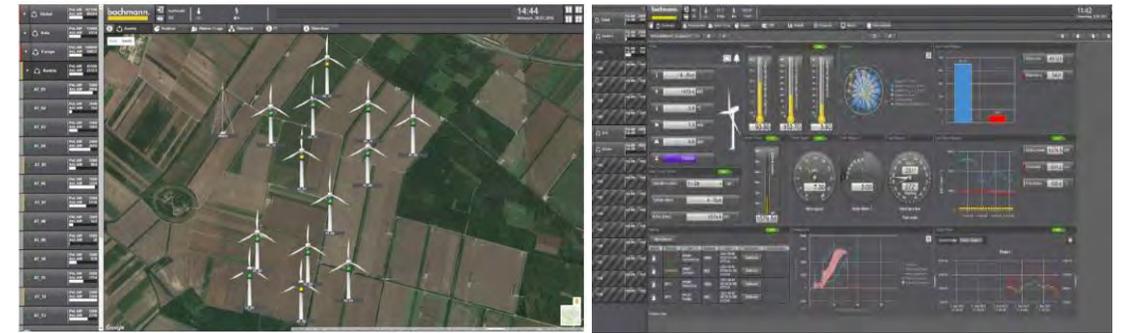
SCADA: Integration von Datenquellen und Visualisierung für die Betriebsführung



Datensilos: SCADA, CMS, 3rd Party Systems



Standard-Protokolle:
(IEC 61400-25, OPC-UA)



SCADA-System zur Datenvisualisierung und Datenintegration



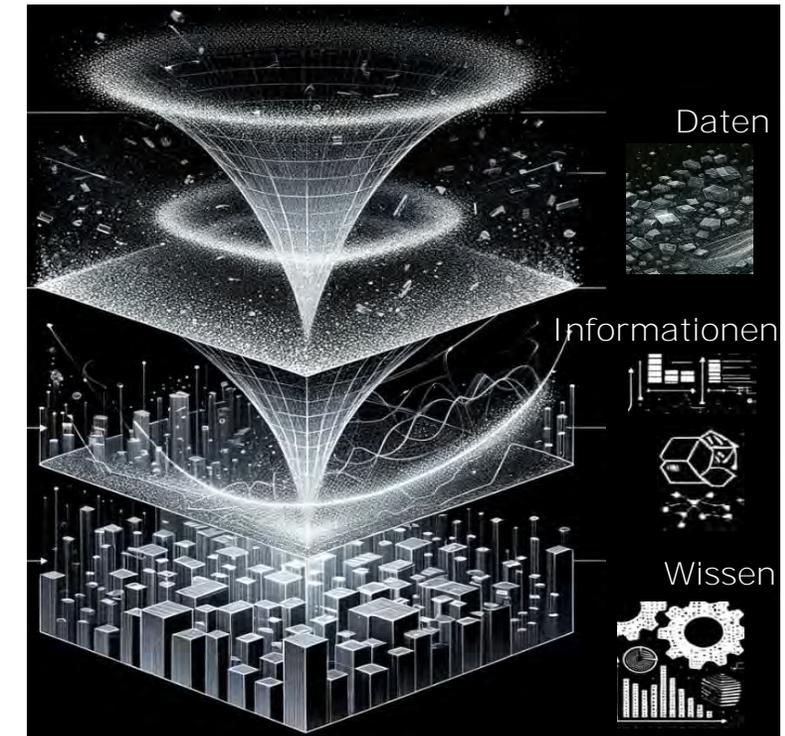
Fazit

Nutzung von KI-Methoden zur Betriebsoptimierung (OPEX)

Daten und KI zur Optimierung von Instandhaltung, Wartung und Betrieb

- ✓ Notwendigkeit der Datenvorbehandlung
- ✓ SCADA-Daten eignen sich gut zur Anomalieerkennung von zumeist häufig auftretenden Fehlern
- ✓ Vorstellung verschiedenen KI-Methoden (Bayes-Filter und genetische Methoden) zur Betriebsoptimierung eines Flottenpools
- ✓ Praxisbeispiele (KI-Lösungen für SHM und Möglichkeiten zur **Performance-Verbesserung**)
- ✓ Ausblick: Integration und Visualisierung in einem SCADA-System

Wir sollten und können unsere
Windenergieanlagen besser und länger nutzen!



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!



bachmann.





Prof. Dr. Michael Schulz
Bachmann Monitoring GmbH
Michael.Schulz@bachmann.info

Holger Fritsch
Bachmann Monitoring GmbH
Fritz-Bolland-Straße 7
07407 Rudolstadt
Tel. +49 163 /76 16 575
Holger.Fritsch@Bachmann.info

