SF2 SEMANTIC FOLDING SENSOR FUSION

Erkennung leckagebezogener Zustandsmuster an Hubkolbenkompressoren

Von Predictive zu Precision Maintenance –
basierend auf dem gesamten sensorischen Kontext.

714.960
Messwerte
verarbeitet

720
Messpunkte pro Umdrehung
entspricht 0,5° Kurbelwinkel

993
Analysierte Umdrehungen

4
Fehlerbezogene
Zustandskontexte

DIE HERAUSFORDERUNG – Schleichende Leckagen im komplexen Sensorsignal erkennen

Bei doppeltwirkenden Hubkolbenkompressoren können Leckagen an Saugventilen, Druckventilen oder Kolbenringen zu drastischen Wirkungsgradverlusten, thermischer Überlastung und ungeplanten Verdichterausfällen führen. Diese Leckagen entstehen in der Regel schleichend. Rein schwellenwertbasierte Überwachungsverfahren stoßen bei variablen Betriebszuständen an Grenzen oder erfassen Veränderungen erst bei der Überschreitung definierter Schwelle.

Die Kernfrage: Lassen sich charakteristische Veränderungen an kritischen Komponenten als stabile Multi-Sensor-Muster erfassen und für eine zukünftige Echtzeit-Frühwarnung nutzen?

Ein führender Hersteller für Komponenten von Kolbenkompressoren, Steuerungstechnik und Antriebskomponenten wollte untersuchen, ob charakteristische Betriebszustände zuverlässig unterscheidbar und für eine Echtzeit-Frühwarnung nutzbar gemacht werden können.

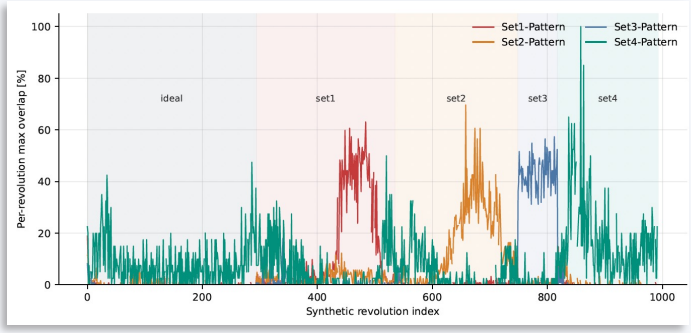
DIE SF2 LÖSUNG – Sensorischer Kontext statt Einzelwerte

Statt isolierter Druck- oder Temperatursignale überführte SF2 den gesamten physikalischen Kontext in einen semantischen Repräsentationsraum.

Die gelernten Multi-Sensor-Muster werden als binäre Zustands- Fingerprints in der **Referenzbibliothek** hinterlegt.

Im späteren laufenden Betrieb misst SF2 kontinuierlich den Fingerprint-Overlap gegenüber diesen Kontextankern.

Schleichende Zustandsveränderungen können als steigender und persistenter Overlap im jeweiligen Kontextkanal sichtbar werden – anstatt erst auf die Überschreitung eines einzelnen Sensorgrenzwertes zu warten.



Maximaler Overlap pro Umdrehung für die vier Status-Fingerprints.

DAS ERGEBNIS – Klar unterscheidbare Zustandskontexte

Fingerprint / Muster *	Mittel	P90 **	Max	Umdr. mit Overlap ≥20%
Set1- Kapazitätsverlust / Druckeinbruch	13,3%	46,7%	63,1%	26,1%
Set2 - Restriktion /Druckamplituden	14,8%	35,0%	69,7%	34,1%
Set3 - Rezirkulation/Temperaturanstieg	41,9%	51,6%	57,4%	97,1%
Set4 - dynam.-therm. Anomalie/Druck	16,5%	37,5%	100,0%	33,7%

Aggregierte Overlap-Metriken pro Umdrehung im jeweiligen Quellsegment des Trainingsstroms. Der Overlap beschreibt die semantische Ähnlichkeit des aktuellen Multi-Sensor-Kontextes mit dem gelernten Zustandskontext.

* Die vier Sets repräsentieren unterschiedliche untersuchte Betriebs-/Fehlerkontexte.
** P90 = 90. Perzentil des maximalen Overlaps pro Umdrehung

Zentrale Ergebnisse

- ✓ **Vier unterscheidbare Zustandskontexte:** Statt zwischen „Anomalie" und „Normalbetrieb" zu unterscheiden, bildet SF2 vier charakteristische Betriebszustände als eigenständige Multi-Sensor-Muster ab.
- ✓ **Kontinuierliches Ähnlichkeitsmaß statt binärem Alarm:** Der Overlap mit einem Referenz-Fingerprint verändert sich kontinuierlich und macht sichtbar, wie ähnlich der aktuelle Maschinenzustand einem charakteristischen Zustandskontext ist.
- ✓ **Erklärbare Zustandsanalyse** macht die Diagnose eines Betriebszustandes wesentlich transparenter als klassische Black-Box-Klassifikatoren.

SF2 macht Komponentenwissen für den laufenden Betrieb nutzbar.

WIE SF2 FUNKTIONIERT

1 Daten-Normalisierung (Binning)

Zylinderdrucke (0,5° KW Auflösung) und Liniendaten werden synchronisiert, strukturiert und in diskrete semantische Kontexte überführt.

2 Semantisches Mapping (Semantic Dictionary)

SF2 erstellt einen semantischen Repräsentationsraum, in dem sich betrieblich ähnliche Maschinen-kontexte gruppieren.

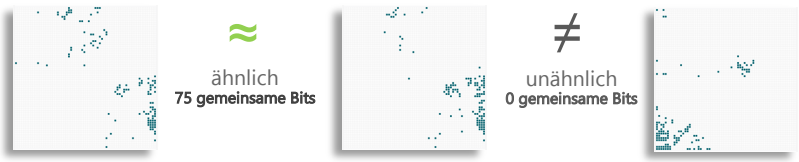
3 Fingerprint Aggregation (Stacking)

Einzelne Prozesszustände werden zu stabilen Fingerprints aggregiert,
die den aktuellen Gesamtzustand des Systems widerspiegeln.

4 Echtzeit-Identifikation (Comparison)

Laufende Messdaten werden als Bit-Fingerprints kontinuierlich mit den bekannten Referenz-mustern verglichen.

SF2 verarbeitet Zustände als **binäre semantische Fingerprints.** Dadurch basieren Echtzeitberech-nungen auf schnellen Binäroperationen anstatt auf rechenintensiven Matrixmultiplikationen. Dadurch können sie direkt auf einem handelsüblichen Industrie-PCs ausgeführt werden.



WAS SF2 AUSZEICHNET

SF2 - Erklärbare Zustandsintelligenz

- ✓ Zustandsbasierte Analyse multivariater Rohsensordaten
- ✓ Keine großen gelabelten Fehlerdatensätze erforderlich
- ✓ Direkter Overlap als Ähnlichkeitsmaß
- ✓ Interpretierbare Ergebnisse (keine Black Box)
- ✓ Effiziente Overlap-Vergleiche mit geringer Rechenlast
- ✓ Vollständig lokal und air-gap-fähig

Trainingsintensive ML-Ansätze

- ✗ Statistische Entscheidungsmodelle aus Trainingsdaten
- ✗ Häufig größere historische Datensätze erforderlich
- ✗ Ergebnisse abhängig von Modell und Trainingsbasis
- ✗ Nachvollziehbarkeit abhängig von Modellarchitektur
- ✗ Rechenbedarf abhängig von Modellkomplexität
- ✗ Meist cloudabhängig (Daten & Sicherheitsrisiko)

NUTZEN FÜR KOMPONENTENHERSTELLER

Komponentenwissen digital nutzbar
Charakteristische Zustände als wiederverwendbare digitale Referenzen

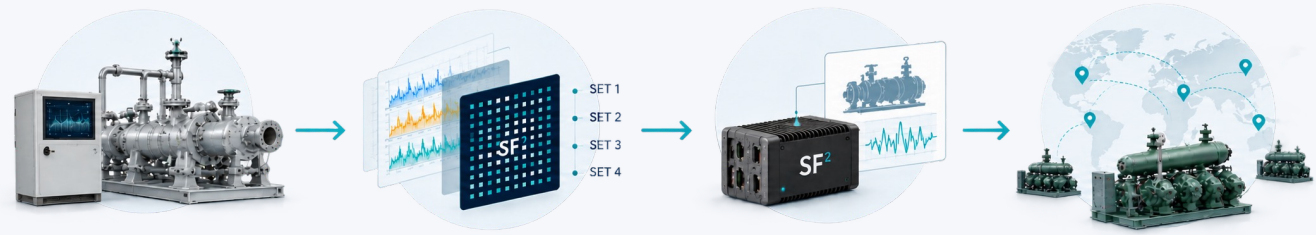
Schleichende Degradation sichtbar machen
Zustandsdrift wird über Fingerprint-Overlap messbar

Risiko von Folgeschäden reduzieren
Frühzeitige Erkennung unterstützt gezielte Wartungsmaßnahmen

Edge-Ready & datensouverän
Lokale Echtzeitanalyse ohne Cloud-Abhängigkeit

PRECISION MAINTENANCE – Auf dem Weg zur gezielten Instandhaltung

SF2 macht Komponentenwissen für den laufenden Betrieb nutzbar.



PRÜFSTAND
Charakteristische Komponenten-zustände erfassen

DIGITALE REFERENZEN
Validierte Zustände als Fingerprints hinterlegen

EDGE-DEPLOYMENT
Zustandswissen auf Maschinen und Anlagen ausrollen

FLOTTE
Zustände über Maschinen und Standorte hinweg vergleichen

FAZIT

Die Fallstudie zeigt, dass unterschiedliche Kompressorzustände aus hochaufgelösten Druck-, Temperatur- und Kurbelwinkeldaten als charakteristische semantische Zustands-Fingerprints abgebildet werden können. Damit schafft SF2 die Grundlage, Komponentenwissen in digitale Zustandsreferenzen zu überführen und den laufenden Maschinenzustand kontinuierlich und lokal mit diesen Referenzen zu vergleichen.

Mehr unter www.SF2systems.com

SF² SYSTEMS

© 2026 SF2 Systems GmbH

info@SF2systems.com | www.SF2systems.com