

welcome to the  
**smart area**



## Smart Area Aachen Fachkonferenz

Teilprojekt 8: Instandhaltung in zukünftigen  
Verteilungsnetzen mit innovativen Komponenten  
– Bewertungskonzepte

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Teilprojekt 8: Instandhaltung

## Agenda

- Motivation und Zielsetzung
- Verfahren der zustandsbasierten Instandhaltung
- Benchmark von Zustandsbewertungsverfahren
- Einbindung von Messdaten in die Zustandsbewertung
- Zusammenfassung und Ausblick

# Motivation und Zielsetzung

## Motivation und Ziele des Teilprojekts

### Motivation

- IKT-Komponenten in Verteilungsnetzen stellen zunehmend umfangreiche online Information bereit
- Es wird vermutet, dass neuartige, informationstechnische Komponenten eine kürzere Lebensdauer haben, als konventionelle
- Neben dem Risiko sinkender Verfügbarkeit ergibt sich die Chance, neue Informationen über Betriebsmittel zu nutzen, um Instandhaltung effizienter zu planen

### Ziele

- Anpassung bestehender Instandhaltungskonzepte an neue Betriebsmittel
- Analyse und Entwicklung von Zustandsbewertungsmethoden
- Einbindung dynamischer Messdaten in die Zustandsbewertung
- Analyse der Vor- und Nachteile dynamischer Messdaten
- Kosten-/ Nutzenanalyse von Messtechnik für das Asset Management



# Motivation und Zielsetzung

## Verbundprojektspartner



Bereitstellung  
Systemland-  
schaft und  
Anwendungs-  
entwicklung



Entwicklung  
von  
Algorithmen  
und  
Validierung



Durchführung  
von Feldtest  
und  
Bewertung

# Teilprojekt 8: Instandhaltung

## Agenda

- Motivation und Zielsetzung
- Verfahren der zustandsbasierten Instandhaltung
- Benchmark von Zustandsbewertungsverfahren
- Einbindung von Messdaten in die Zustandsbewertung
- Zusammenfassung und Ausblick

# Grundlage der zustandsbasierten Instandhaltung

## Definition eines Zustandswerts

### Zustandswert

- Kennzahl zur vergleichenden Bewertung von Betriebsmitteln
- Bewertung von IH-Bedarf und Restlebensdauer
- Skala z.B. von 0 (gut) bis 1 (schlecht)

### Zustandsbasierte Instandhaltung

- Priorisierung der Betriebsmittel nach dem Zustandswert
- Bedarfsorientierte, individuellen Instandhaltungsplanung

### Typische Eingangsdaten der Zustandsbewertung

- Stammdaten der Betriebsmittel
- Ergebnisse aus Inspektionen
  - Bewertung binär (in Ordnung/Defekt)
  - Bewertung mit Notensystem (z.B. 1-4)



# Verfahren der Zustandsbasierten Instandhaltung

## Zustandserfassungsschema

### Inspektionsprotokolls nach dem iNA-System

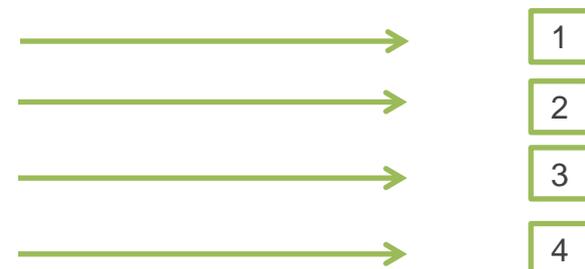
- 121 Inspektionpunkte mit Bewertung durch Noten 1 – 4
- Digitale Dokumentation mit Tablet-Computern
- Unterstützung der Objektivität der Bewertung durch einen Schadenskatalog
- Einsatz zusätzlicher Messtechnik zur Objektivierung der Bewertungsergebnisse
- Erweiterung des Inspektionsprotokolls für IKT im Projekt



### Vierstufiges Bewertungsschema:

- Keine erkennbaren Mängel
- Langfristige Mängelbeseitigung erforderlich
- Kurzfristige Mängelbeseitigung erforderlich
- Sofortige Mängelbeseitigung erforderlich

### Entsprechende Noten:



# Verfahren der Zustandsbasierten Instandhaltung

## Zustandserfassung mit Messtechnik

### Verwendete Messtechnik zur Objektivierung der Zustandserfassung

- **Isolation: Teilentladungsmessung**

- Ultraschall-Mikrofon  
(luftisolierte, offene MS-Anlagen)
- Messung der Ableitspannung  
(Gekapselte MS-Anlagen)



- **Elektrische Kontakte: Temperaturmessung**

- Einsatz einer Wärmebildkamera



- **Erdung: Widerstandsmessung**

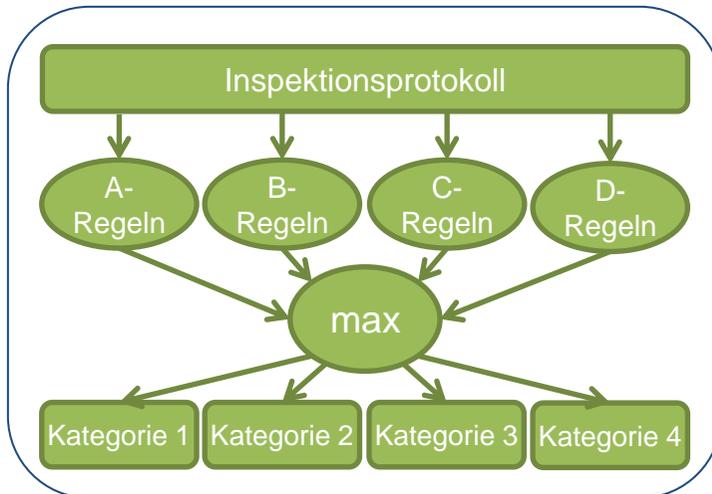
- Erdungsprüfzange zur Widerstandsmessung der Erdungsschleife



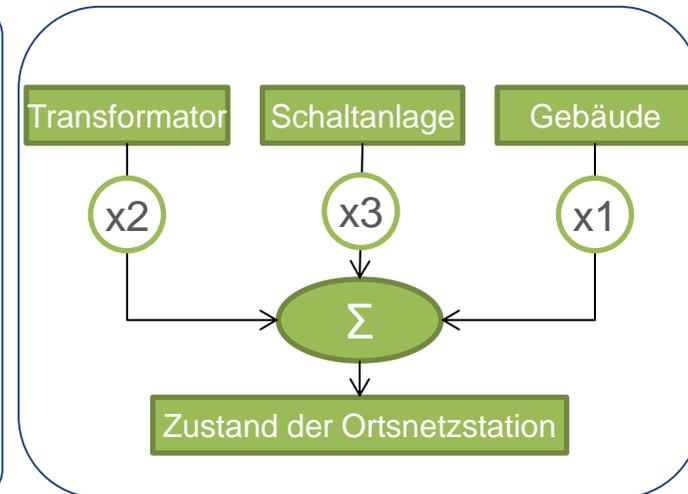
# Verfahren der Zustandsbasierten Instandhaltung

## Übersicht der angewendeten Bewertungsverfahren

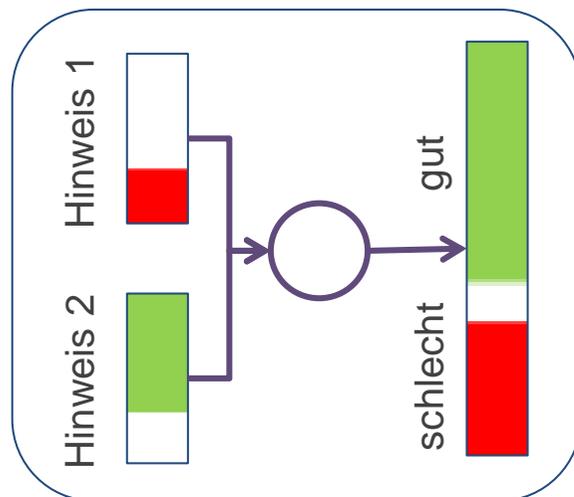
### ABC-Verfahren



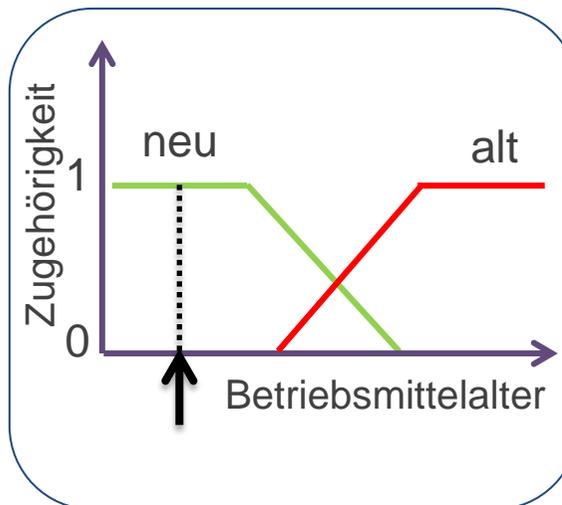
### Gewichtete Summenbildung



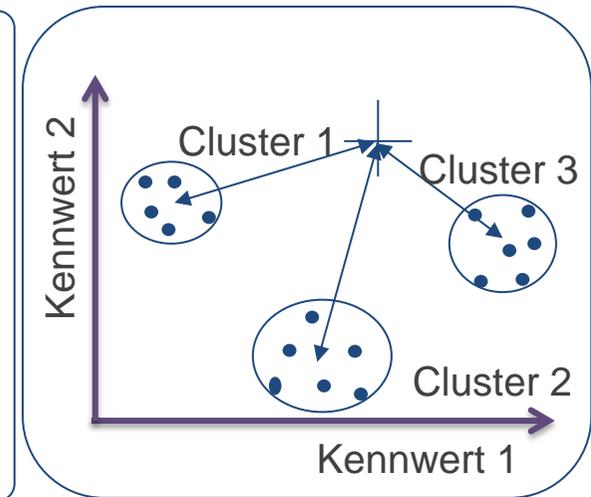
### Evidenztheorie



### Fuzzy Logik

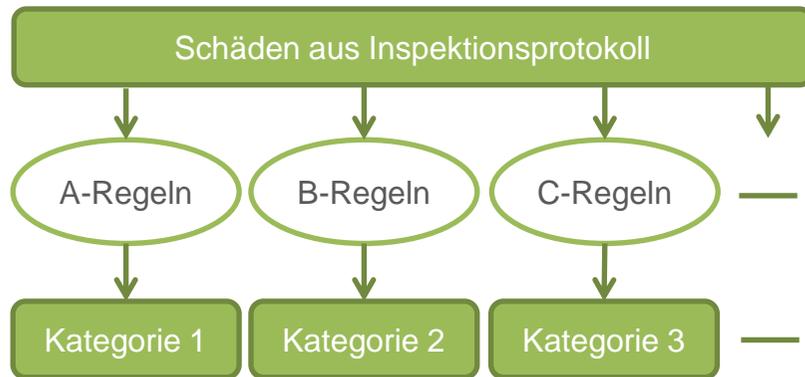


### Clusteranalyse



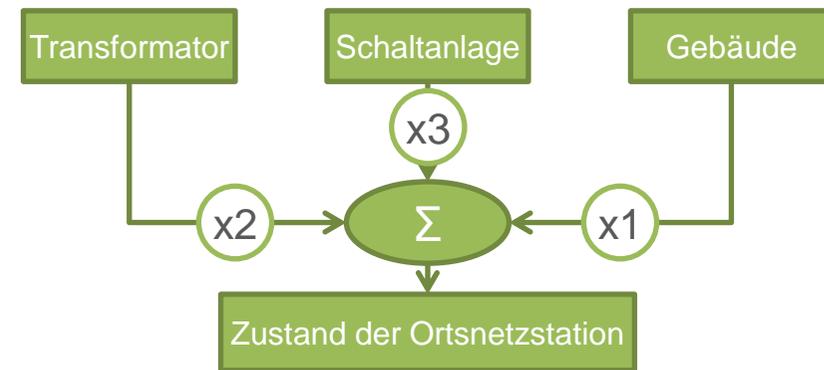
# Verfahren der Zustandsbasierten Instandhaltung

## Konventionelle Verfahren



### ABC-Verfahren

- Kategorisierung von Objekten nach festgelegten Regeln:
  - 5) Besondere Dringlichkeit
  - 4) MS-Anlage
  - 3) Transformator
  - 2) Niederspannung / Gebäude
  - 1) In Ordnung
- Es können nur binäre Bewertungen berücksichtigt werden



### Gewichtete Summenbildung

- Berechnung einer gewichteten Durchschnittsnote
- Die Wichtigkeit eines Indikators wird durch 7 objektiv bewertbare Kriterien definiert:
  - Funktionsbeeinträchtigung
  - Personensicherheit und Umweltschutz
  - Netzauswirkung und Reparaturdauer
  - Schadens- und Störungshäufigkeit
- Zur Berechnung der Gewichte wird der „Analytic Hierarchy Process“ verwendet

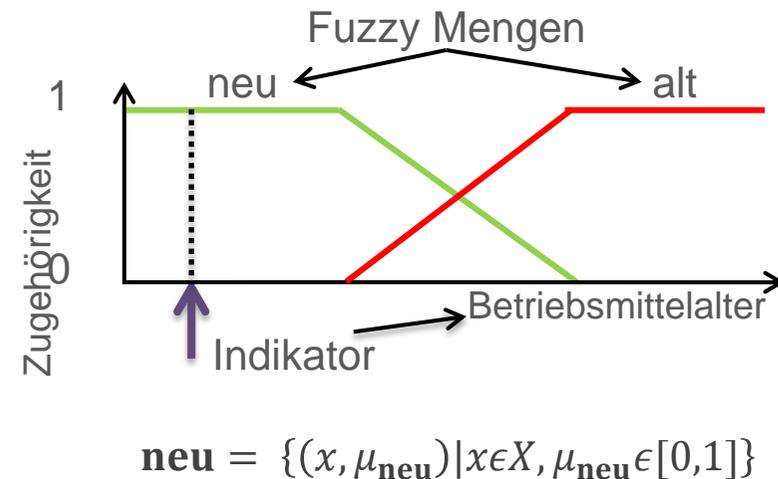
# Verfahren der Zustandsbasierten Instandhaltung

## Innovative Verfahren: Fuzzy Logik



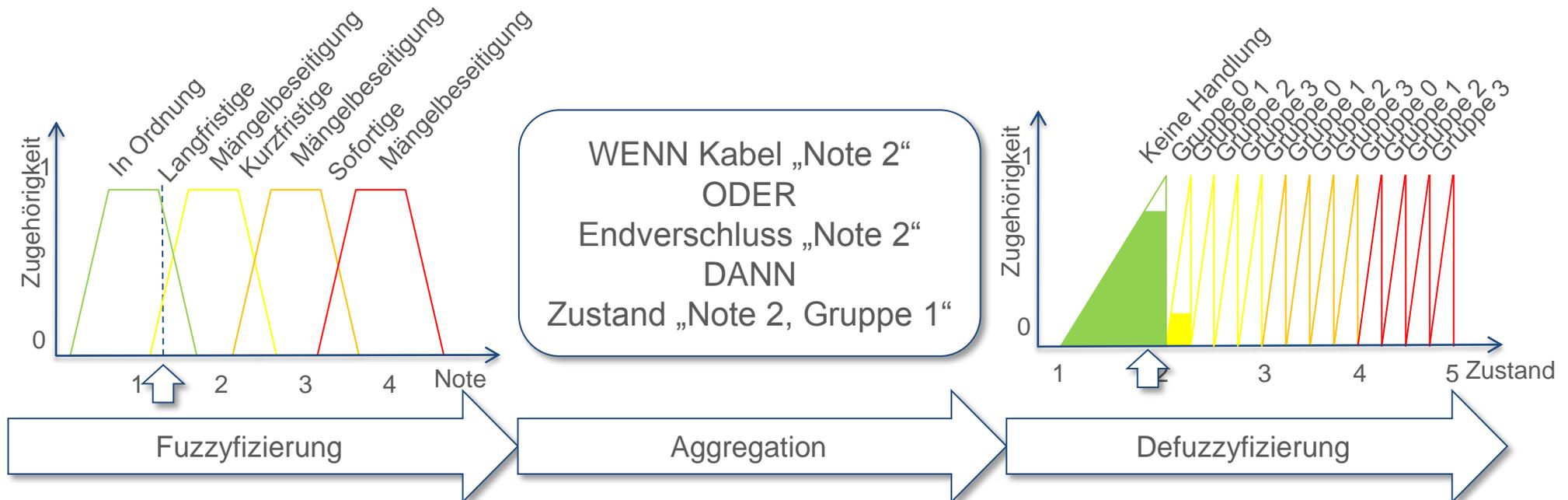
### Fuzzy Expertensystem

- Basiert auf der Fuzzy Mengenlehre
- Abbildung unscharfer Zusammenhänge und menschlicher Entscheidungslogik
- Linguistische Bewertungsregeln
  - Definition von  $k^n$  Regeln
  - $k$ : Anzahl Indikatoren,
  - $n$ : Anzahl Fuzzy Mengen je Indikator



# Verfahren der Zustandsbasierten Instandhaltung

## Innovative Verfahren: Fuzzy Logik



- Parametrierung des Verfahrens durch sprachliche Regeln
- Ausgangsvariablen werden nach Noten und Klassifizierung nach Wichtigkeit des Schadens (Gruppe 0 – 3) gewählt
- Bauartspezifische Bewertungen können durch sprachliche Regeln berücksichtigt werden
- Die Defuzzifizierung erfolgt durch eine Kombination der entwickelten LERP-Methode (linker Rand des rechten Plateaus) und der Schwerpunktmethod
- Die maximale Zeit zur Instandhaltung und alle Schäden werden berücksichtigt

# Teilprojekt 8: Instandhaltung

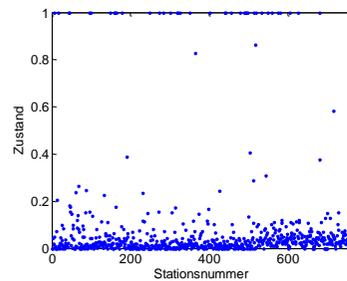
## Agenda

- Motivation und Zielsetzung
- Verfahren der zustandsbasierten Instandhaltung
- **Benchmark von Zustandsbewertungsverfahren**
- Einbindung von Messdaten in die Zustandsbewertung
- Zusammenfassung und Ausblick

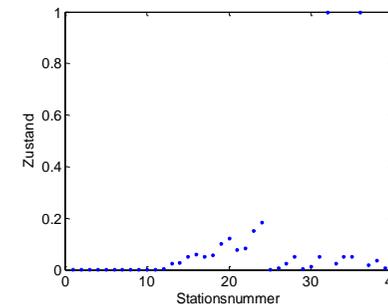
# Benchmark von Zustandsbewertungsverfahren

## Übersicht von Benchmarkverfahren

### Vergleich der Zustandsbewertung eines Kollektivs



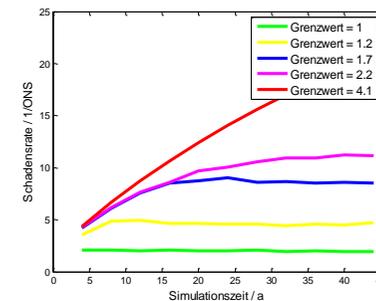
### Vergleich der Zustandsbewertung eines Testdatensatzes



### Qualitativer Vergleich der Bewertungsverfahren

Kriterium	Gesamtscore Summe	Fuzzy Logic
Präsentation als leicht angreifbar Indikatoren	Mittelschwere und furchig ✓	Schwere Indikatoren ✓
Differenzierung unterschiedlicher Zustände	Kombi-schwere Ausprägung Alle Indikatoren haben einen Einfluss auf den Gesamtscore => Rangfolge möglich ✓	Kombi-schwere Ausprägung Alle Indikatoren haben einen Einfluss auf den Gesamtscore => Rangfolge möglich ✓
Sensitivität	Alle Indikatoren und Gesamtscore Einfluss ✓	Alle Indikatoren und Gesamtscore Einfluss ✓
Erklärung von Abweichungen	Nur über 'Jahre' Grenzwerte => springendes Verhalten ✓	Mittel, Bereichs- und Zyklo-indikatoren => kein springendes Verhalten ✓

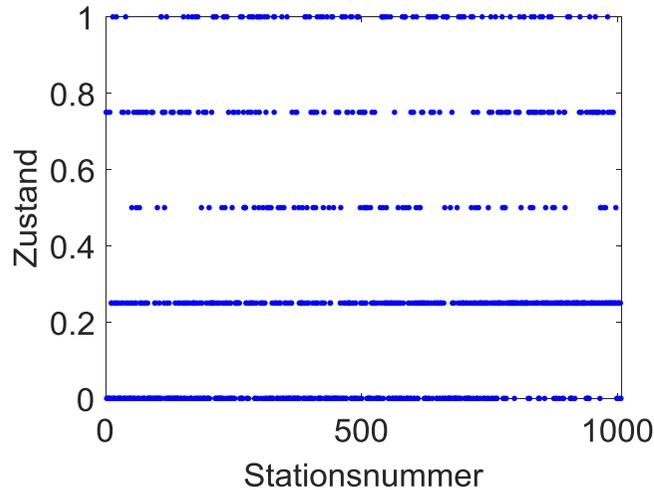
### Simulation der zustandsbasierten Instandhaltung



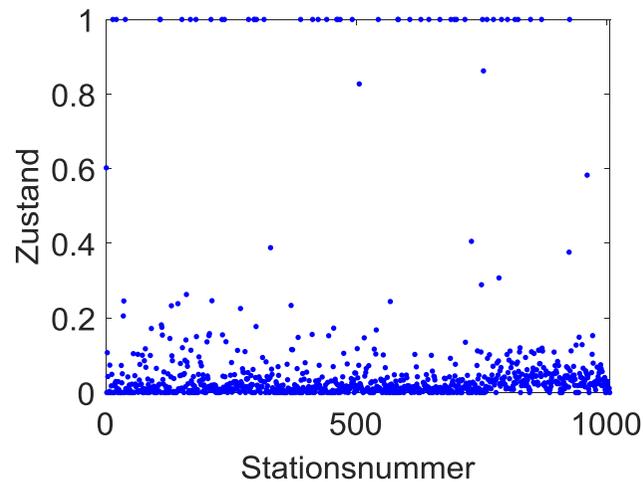
# Benchmark von Zustandsbewertungsverfahren

## Vergleich der Zustandsbewertung eines Kollektivs

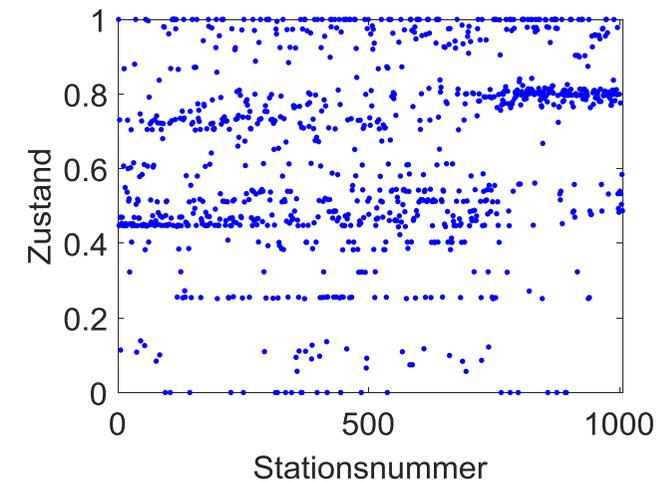
### ABC-Verfahren



### Gewichtete Summe



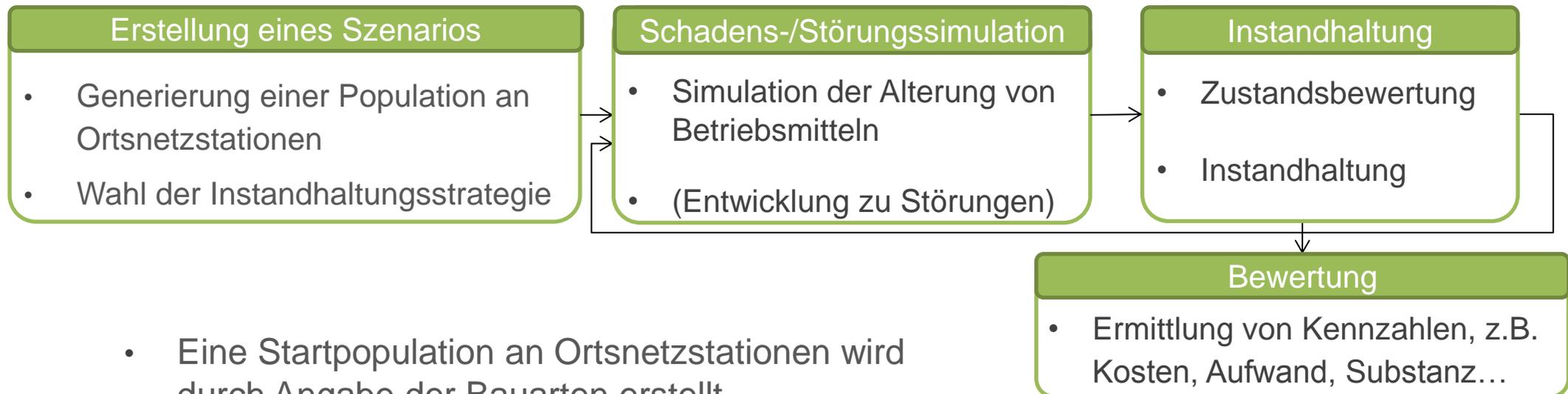
### Fuzzy Logik



- Bei der ABC-Methode können nur 5 verschiedene Zustände angenommen werden
- Die gewichtete Summe führt eher zur Annahme von Werten im niedrigen Wertebereich (0 – 0,3) während die Fuzzy Logik zu Zuständen im Bereich 0 – 1 führt
- Bei der Fuzzy Logik zeigt sich eine Häufung von bestimmten Zuständen, da die schlechteste Note einen großen Einfluss nimmt
- Bei den Stationen 800 – 1000 wurden häufig schlechte Noten bei der Beschriftung der NS-Anlage vergeben, was zu schlechten Werten, insbesondere bei der Fuzzy Logik führt
- Die Sensitivität der gewichteten Summenbildung und Fuzzy Logik ist höher als bei der ABC-Methode. Insbesondere können Schäden der Note 2 berücksichtigt werden

# Benchmark von Zustandsbewertungsverfahren

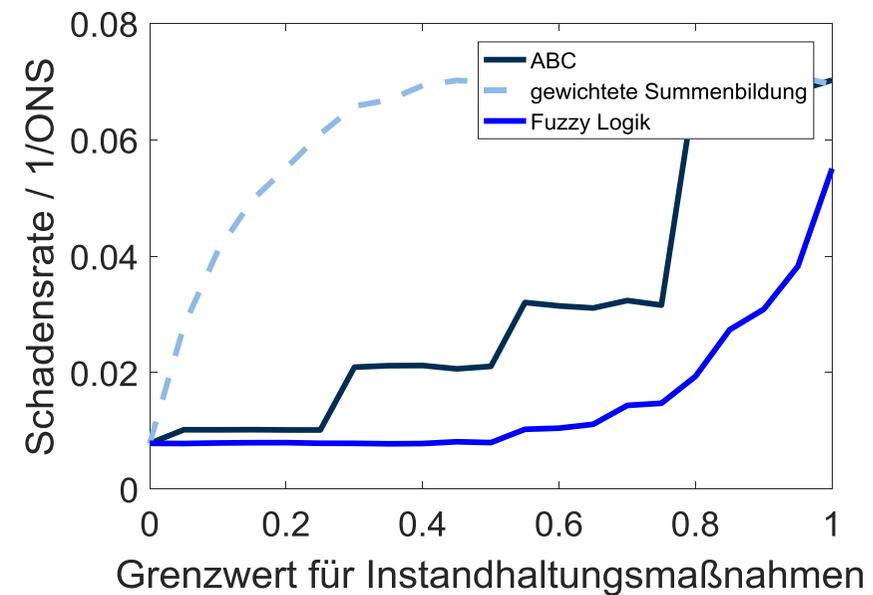
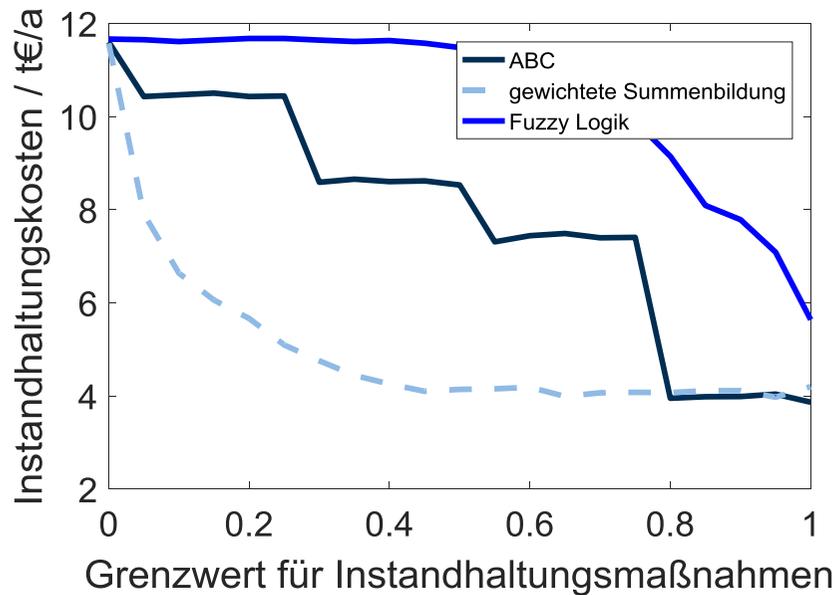
## Übersicht der Simulation



- Eine Startpopulation an Ortsnetzstationen wird durch Angabe der Bauarten erstellt
- Auf Basis einer statistischen Auswertung historischer Daten erfolgt eine Schadensentwicklung für jede Komponente einer Station
- Die Schadensentwicklung berücksichtigt Korrelationen bei auftretenden Schäden
- Nach jeder Inspektion erfolgt eine Zustandsbewertung, Maßnahmenplanung und Instandhaltung
- Die Ermittlung der Instandhaltungskosten und Reparaturdauer erfolgt auf Basis von Annahmen zu schadensspezifischen Reparaturzeiten

# Benchmark von Zustandsbewertungsverfahren

## Simulation zustandsbasierter Instandhaltung



- Simuliert werden 100 Ortsnetzstationen über einen Zeitraum von 44 Jahren
- Der Grenzwert für Instandhaltung gibt an, ab welchem Zustandwert eine Station gewartet wird
- Die Simulation zeigt bei größeren Grenzwerten erwartungsgemäß höhere Schadensraten
- Gleichzeitig erfordert die Verringerung der Schäden ein höheres Budget für Instandhaltung
- Die Simulation zeigt, dass mit Anwendung des ABC-Verfahrens nur vier diskrete Zielgrößen erreicht werden können, während die alternativen Methoden eine größere Variation ermöglichen
- Die aktuell verfügbaren Bewertungskenngrößen der Simulation sind nicht sensitiv genug, um die Unterschiede der Bewertungsverfahren zu analysieren

# Teilprojekt 8: Instandhaltung

## Agenda

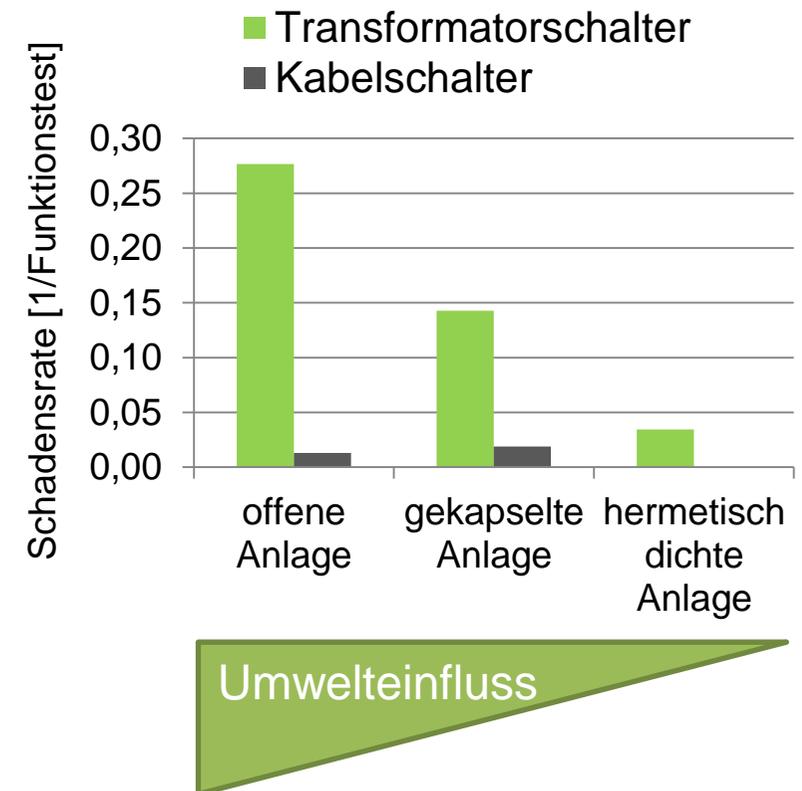
- Motivation und Zielsetzung
- Verfahren der zustandsbasierten Instandhaltung
- Benchmark von Zustandsbewertungsverfahren
- Einbindung von Messdaten in die Zustandsbewertung
- Zusammenfassung und Ausblick

# Einbindung von Messdaten

## Auswahl von Messtechnik für einen Feldversuch

Alterungsrelevante Größen werden auf Basis einer Literaturrecherche identifiziert:

- **Mittelspannungsschaltgeräte**
  - Schäden: Korrosion, Verharzung, Aufquellen von Kunststoff
  - Ursache: Temperatur, Luftfeuchte
- **Informations- und Kommunikationstechnik**
  - Analyse basiert auf Elektronik in unterschiedlichen Anwendungsgebieten
  - Alterungsvorgänge: Ermüdung, Korrosion,
  - Elektromigration, stressgetriebene Verbindung
  - Ursache: Temperatur, Luftfeuchte
- **Transformator**
  - Alterungsvorgänge: Thermische Alterung, Korrosion, Rissbildung
  - Ursache: Öltemperatur, Belastung, Luftfeuchte



# Einbindung von Messdaten

## Auswahl von Messtechnik für einen Feldversuch

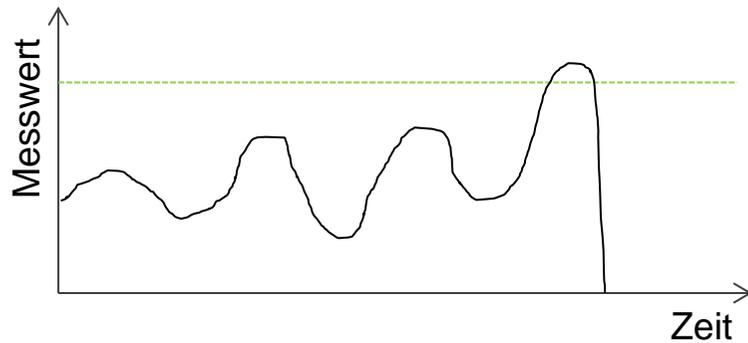
- **Erwartete Messwerte in zukünftigen Verteilungsnetzen**
  - Strom- und Spannungsmessung in 50 Stationen, Messung niederspannungsseitig am Transformator
- **Zusätzliche Messwerte für die Zustandsbewertung**
  - Temperatur- und Luftfeuchtemessungen in 50 Stationen, Messung an der MS-Schaltanlage 1m über Boden
  - Deckelöltemperaturmessung in 30 Stationen, Messung der Lufttemperatur am Auslassgitter
  - Temperatur, Niederschlag, Wind, Sonneneinstrahlung  
Daten von zwei Wetterstationen in Aachen
- **Pilotgebiet**
  - Insgesamt 50 Ortsnetzstationen
  - Unterschiedliche Bauarten und Stationsbaujahre
  - Alle Stationen aus Schwesterprojekten



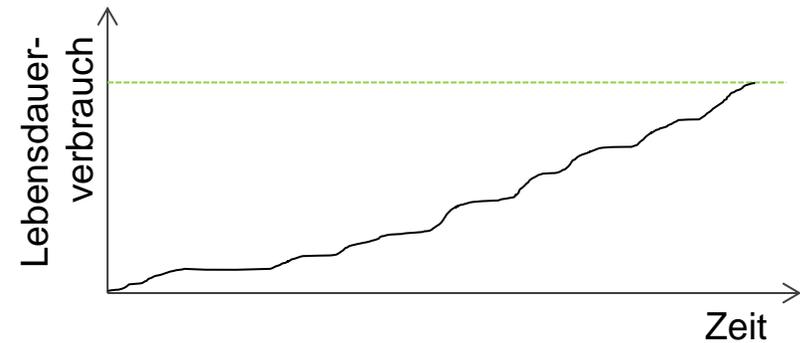
# Einbindung von Messdaten

## Extraktion der Informationen in dynamischen Messdaten

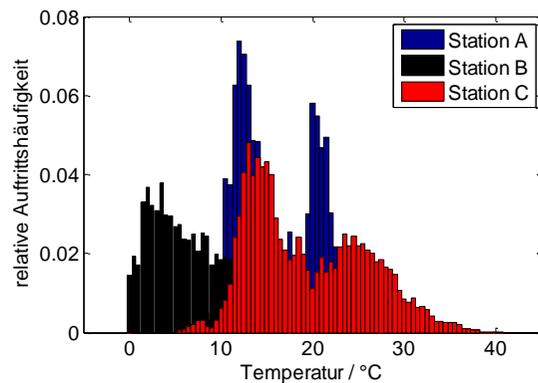
### Grenzwertverletzungen



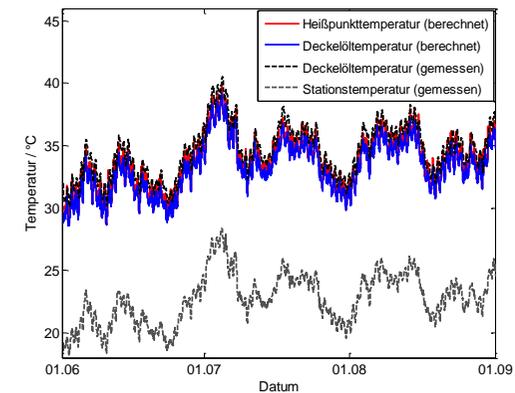
### Alterungsmodelle



### Vergleichende Bewertung



### Monitoring von Komponenten



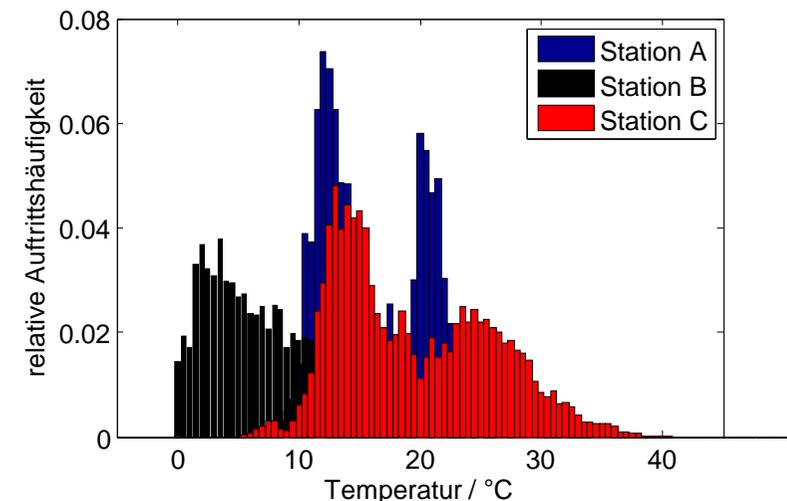
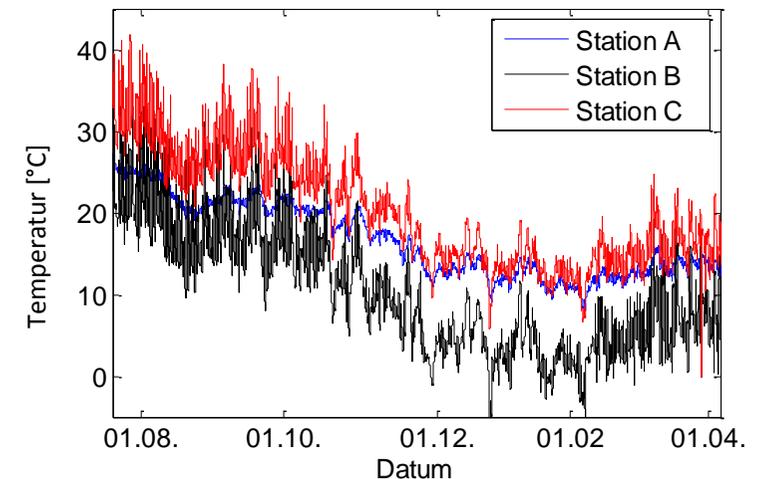
# Einbindung von Messdaten

## Clusteranalyse als Basis einer vergleichenden Bewertung

Transformation von Messreihen  
in Histogramme

Clustern von Histogrammen zur  
Gruppierung gleichartig  
belasteter Stationen

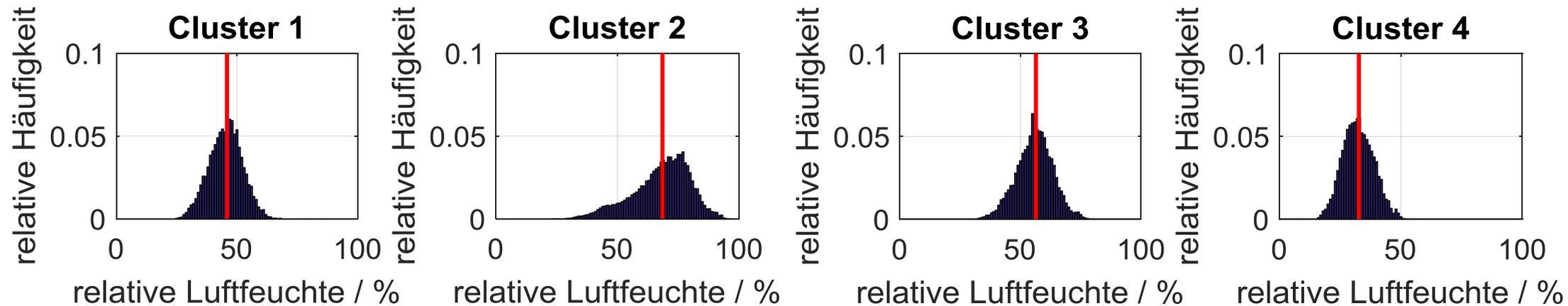
Vergleich der Cluster als Input für  
eine Zustandsbewertung



**Annahme:** Ähnliche Betriebsmittel mit ähnlicher Belastung weisen eine ähnliche Schadensentwicklung auf

# Einbindung von Messdaten

## Ergebnis der Clusterbildung am Beispiel der Luftfeuchte

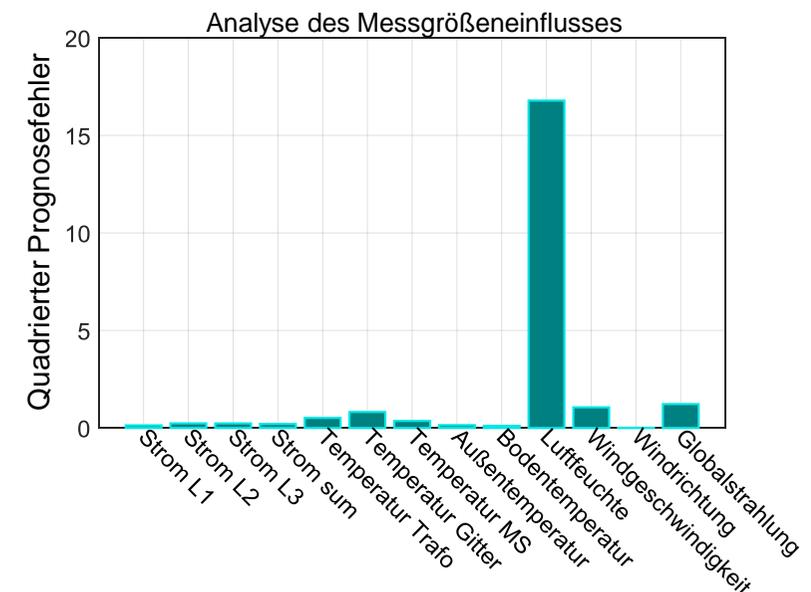
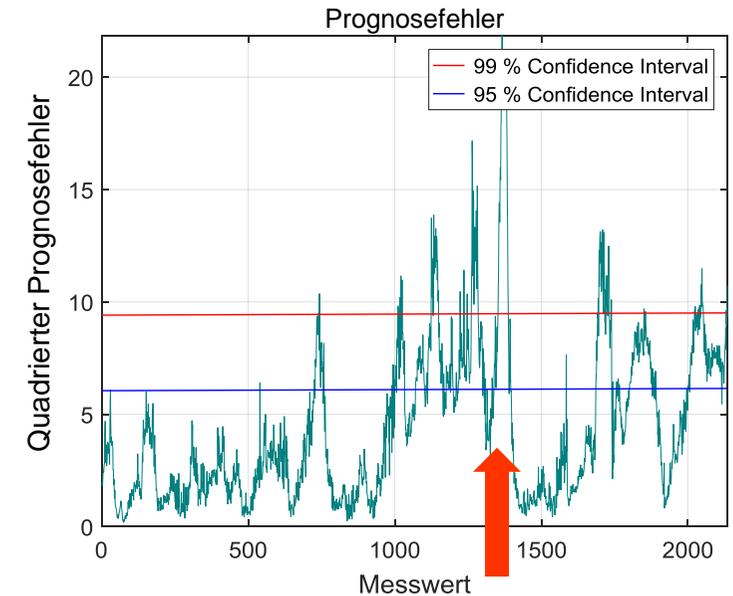


- Die Stationen in Cluster 1 und Cluster 4 haben kontinuierlich Luftfeuchtwerte unterhalb von 60%, sodass keine Oberflächenkorrosion erwartet wird
- Stationen in Cluster 2 weisen die höchste Belastung durch Luftfeuchte auf
- Die Stationen sollten in Bezug auf die Luftfeuchte mit der Priorität: Cluster 2, Cluster 3, Cluster 1, Cluster 4 instandgehalten werden

# Einbindung von Messdaten

## Monitoring: Anwendung der „Principal Component Analysis“

- Messdaten in Ortsnetzstationen weisen untereinander Korrelationen auf
- Die „Principal Component Analysis“ reduziert Zusammenhänge in Messdaten auf wenige lineare Kombinationen
- Einzelne Messdaten können in Abhängigkeit der jeweils anderen Daten vorhergesagt werden
- Eine Abweichung von der Prognose weist auf einen Fehler hin
- Zur Bewertung der Abweichung wird ein Grenzwert definiert, der z.B. 95% der Vorhersagefehler eines Testdatensatzes beinhaltet



# Teilprojekt 8: Instandhaltung

## Agenda

- Motivation und Zielsetzung
- Grundlage der zustandsbasierten Instandhaltung
- Verfahren der zustandsbasierten Instandhaltung
- Benchmark von Zustandsbewertungsverfahren
- Einbindung von Messdaten in die Zustandsbewertung
- Zusammenfassung und Ausblick

# Zusammenfassung und Ausblick

## Zusammenfassung

- Parametrierverfahren für konventionelle und innovative Zustandsbewertungsverfahren werden entwickelt und angewendet
- Der Benchmark von Bewertungsverfahren zeigt Unterschiede bei den Verfahrenseigenschaften, Sensitivität auf einzelne Schäden und Kosten bei unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien
- Eine Analyse der Aussagekraft von Messtechnik zeigt, dass die Temperatur und Luftfeuchte in der Station sowie die Deckelöltemperatur Informationen für die Instandhaltungsplanung liefern können
- Verschiedene Verfahren zur Extraktion zustandsrelevanter Informationen aus Messdaten werden angewendet und analysiert

- Entwicklung von Methoden für das Monitoring von Ortsnetztransformatoren
- Einbindung von Messdaten in Zustandsbewertungsverfahren
- Anwendung von dynamischen Messdaten für die Prognose von Zustandswerten
- Bewertung des Mehrwerts von dynamischen Messdaten in der Zustandsbewertung von Betriebsmitteln
- Weiterentwicklung der Instandhaltungssimulation für einen Benchmark von Bewertungsverfahren



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit