

# STEFAN BOSSE<sup>1,2\*</sup>

---

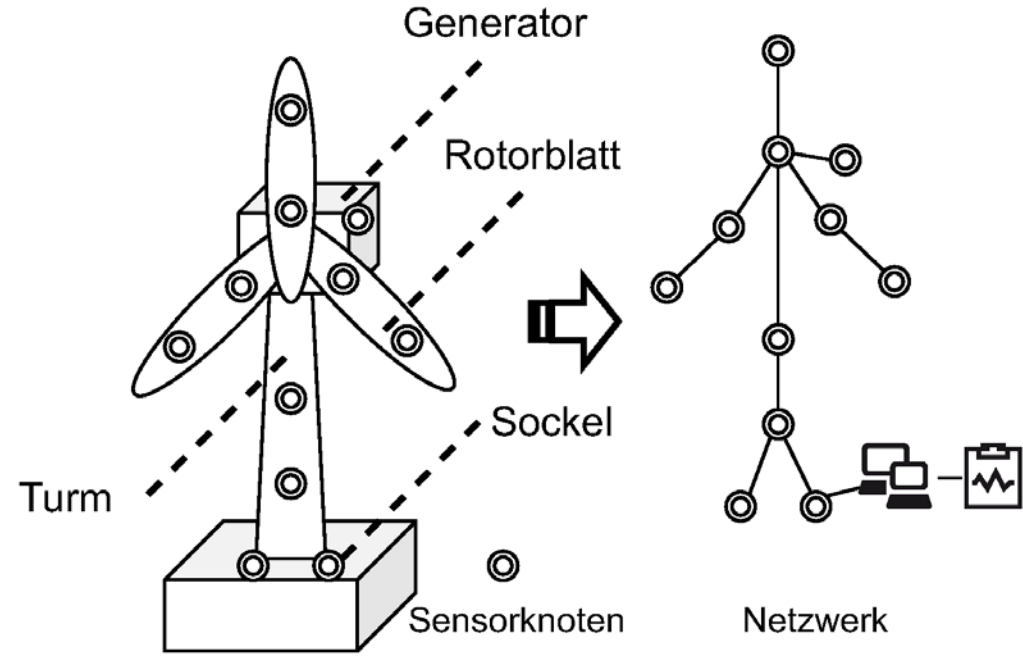
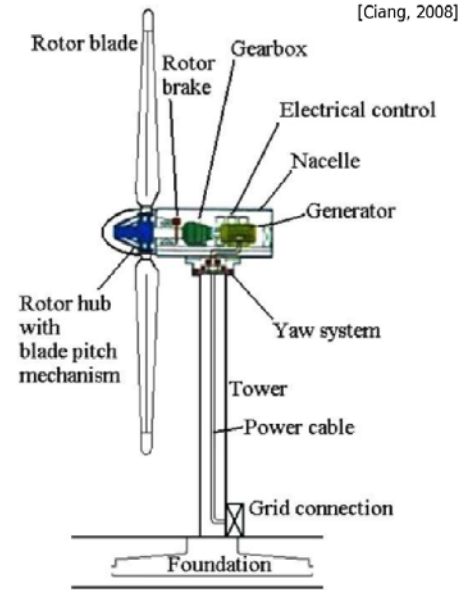
<sup>1</sup>Fachbereich Mathematik und Informatik  
Institut für Digitalisierung und Digitalität  
Universität Bremen

<sup>2</sup>Fakultät Maschinenbau  
Lehrstuhl für Materialkunde und Werkstoffprüfung  
Universität Siegen



Universität  
Bremen





# EREIGNISBASIERTE VERTEILTE ZUSTANDSÜBERWACHUNG UND SCHADENSERKENNUNG IN GROßSKALIGEN UND KOMPLEXEN KONSTRUKTIONEN MIT HYBRIDER MULTISENSORFUSION – EIN ÜBERBLICK

Stefan Bosse



# INHALT

01

## Einführung

Taxonomie der Schadensdiagnostik in Windenergieanlagen

02

## Metriken und Ereignisse

Heterogenität von Sensorik und Sensordaten: Der Fluch der Dimensionalität! Zeit  $\times$  Raum

03

## Verteilte Sensornetzwerke

Übergang von diskreten zentralisierten Messsystemen auf verteilte Sensornetzwerke

04

## Lokalisation und Uhren

Wie können Schäden lokalisiert werden. Wir brauchen Uhrensynchronisation!

05

## Sensorfusion

Zusammenführung von verschiedenen sensorischen Signalen und Merkmalen.

06

## Ganzheitliches SHM

Einheitliches SHM für räumlich ausgedehnte und heterogene Sensorsysteme am Beispiel Windenergieanlagen.

# EINFÜHRUNG

- Für die **zerstörungsfreie Prüfung** von Strukturen werden üblicherweise verschiedene Methoden eingesetzt
- Unter anderem werden **Schallemissions- und Ultraschallprüfungen** häufig zur Beurteilung von Strukturen eingesetzt.
- **Verbesserung** der Inspektionsfähigkeiten und der Zuverlässigkeit von Systemen zur Überwachung des strukturellen Zustands (SHM) auf der Grundlage von ultraschallgeführten Wellen mit Schallemissions- und Akustoultraschalltechniken durch **Kombination und Fusion!**



**Die Verwendung eines auf geführten Wellen basierenden Ansatzes beruht auf der Tatsache, dass sich diese Wellen über relativ große Entfernungen ausbreiten können und empfindlich und spezifisch mit verschiedenen Arten von Defekten interagieren.**

# EINFÜHRUNG



**Akustische Emission hingegen liefert Informationen über dynamische Ereignisse in Strukturen mit nachfolgender persistiver Zustandsänderung, wie z.B. bei der Entstehung von Rissen oder Brüchen.**

- Ein gängiger Ansatz für den Entwurf von SHM-Systemen beginnt mit der Charakterisierung des „intakten“ Zustands der Struktur anhand von **Basismessungen**.
- Das SHM-System vergleicht Testmessungen mit den Basismessungen und berechnet eine Schätzung des aktuellen strukturellen Zustands.



**Die Basismessung verliert aber durch strukturelle und sensorische Änderung an Referenzqualität. Sensorfusion und ML Verfahren können eine Adaption der Referenz ermöglichen.**

## Structural

### Tower / Housing

Cracks  
Fatigue  
Breakage  
Corrosion  
Surface Damage

## Mechanics

Bearing  
Corrosion, Leakages

## Blades

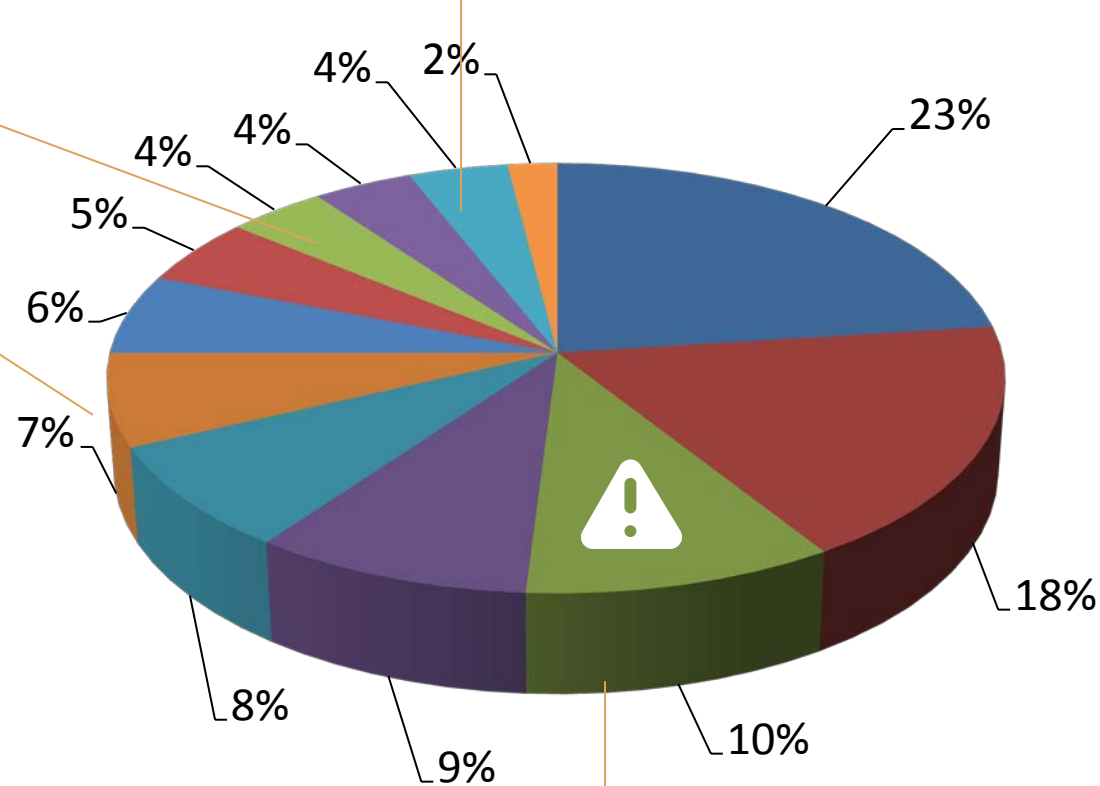
Cracks  
Surface Damage  
Structural Damage

## Sensors

### Electronics

Noise  
Zero/One Stuck Error  
Decalibration  
Communication Error  
Debouncing  
Shift/Bias

## Failures [%]



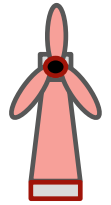
- Electrical System
- Plant Control System
- Sensors
- Hydraulic System
- Yaw System
- Rotor Blades
- Mechanical Brake
- Rotor Hub
- Gear Box
- Generator
- Structural Parts / Housing
- Drive Train

C. C. Ciang, J.-R. Lee, and H.-J. Bang, "Structural health monitoring for a wind turbine system: A review of damage detection methods," Meas. Sci. Technol., vol. 19, 2008.

# MESSVERFAHREN

Aktive Messverfahren

Passive Messverfahren



Rotorblätter  
Turm

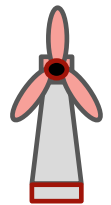


**GUW / AU**



**AE**

Sockel  
Turm  
Rotorblätter  
Generator  
Getriebe



Sockel  
Rotorblätter  
Generator  
Getriebe



**Vibration**



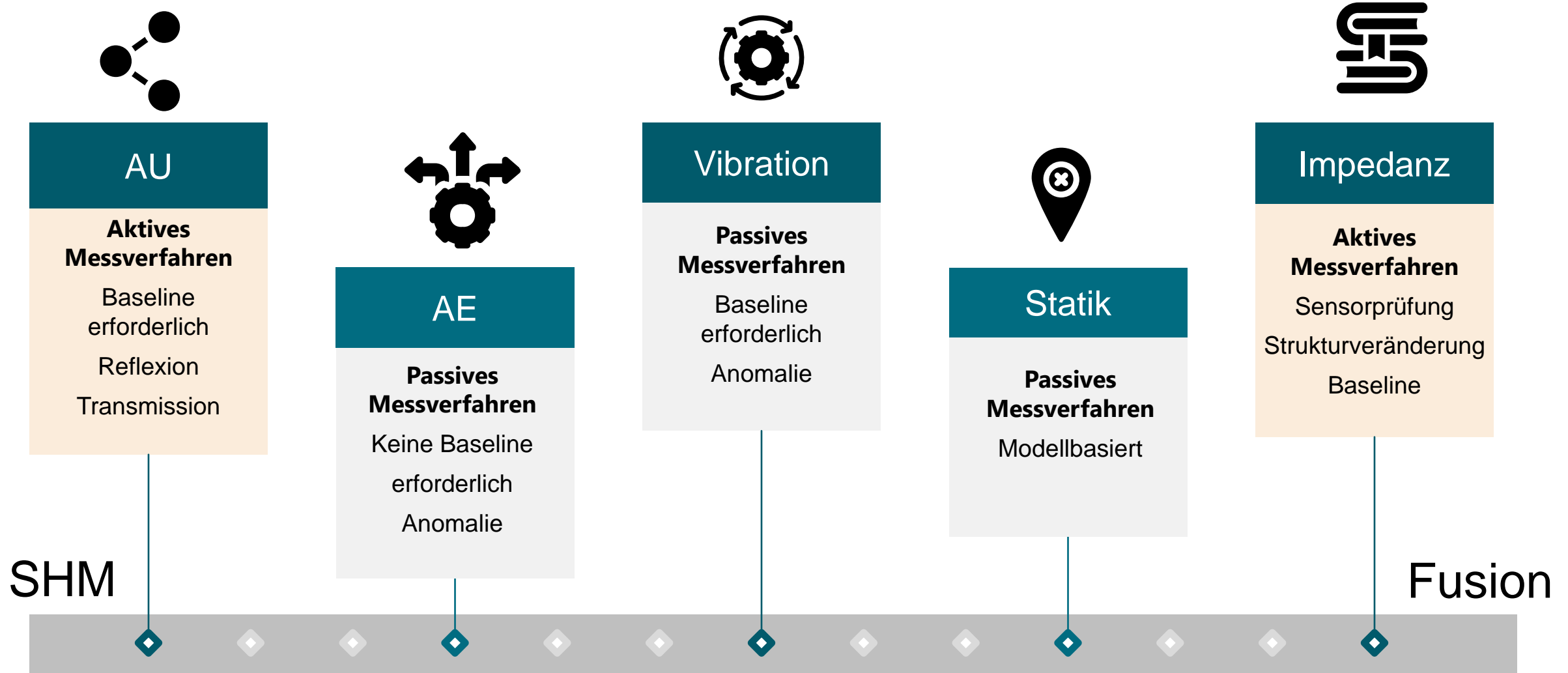
**Statik**

Sockel  
Turm  
Kopf



**SHM**

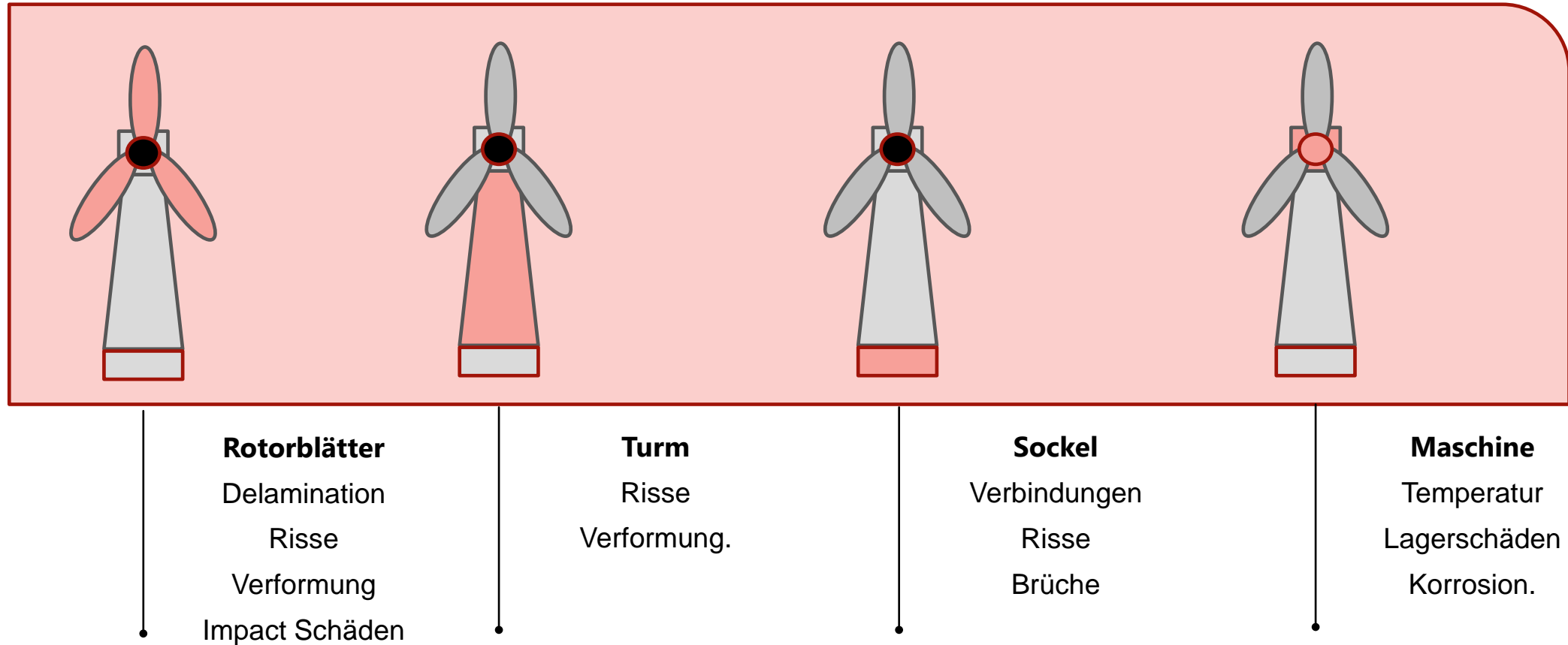
# MESSVERFAHREN



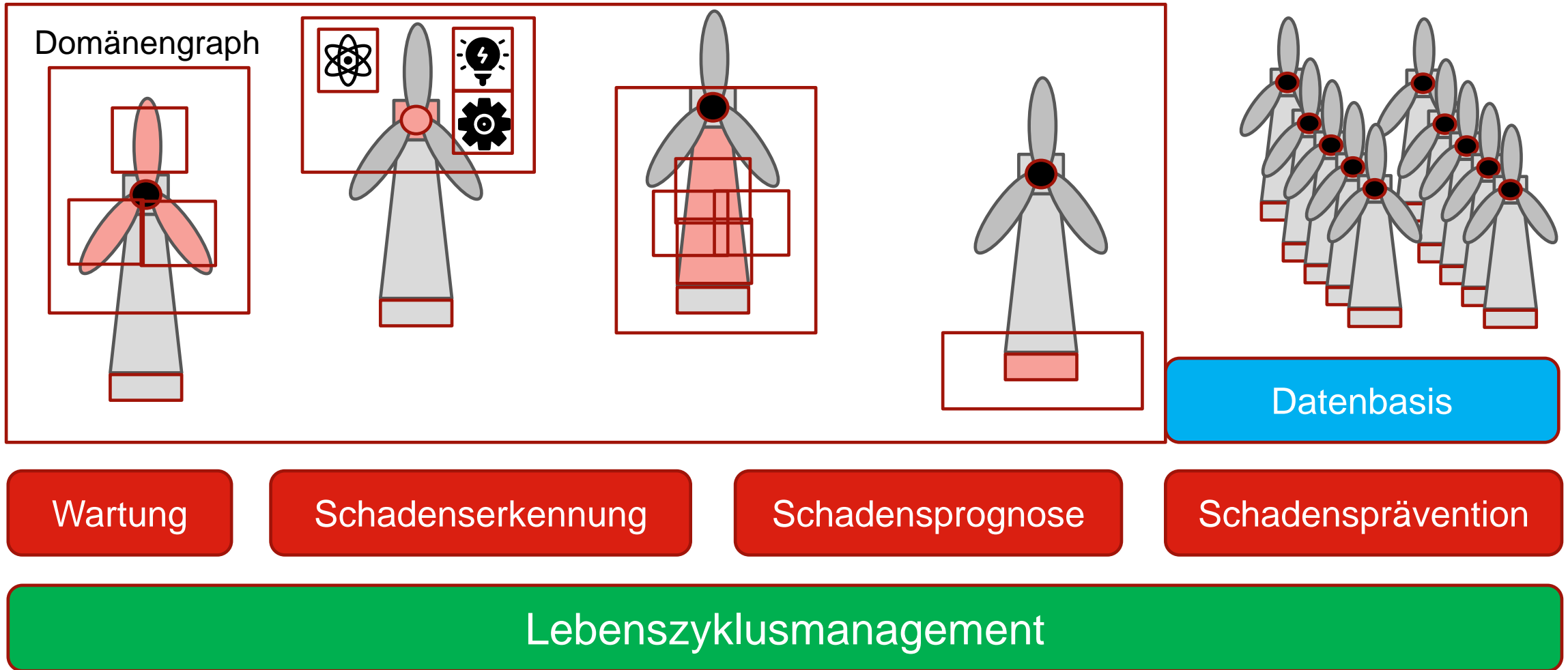


|                           | GUW/AU              | AE                    | Vibration         | Statik          | Impedanz          |
|---------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Zeitsignal                | ✓                   | ✓                     | ✓                 | ✗               | ✗ / ✗             |
| Frequenzbereich [kHz]     | 10-1000             | 10-1000               | 0.001-1           | -               | -                 |
| Sampling / Triggerung     | Generativ<br>[N/ms] | Ereignis<br>[1/h]     | Auto<br>[N/s]     | Diskret<br>[m]  | Generativ<br>[m]  |
| Sensoren                  | Piezoel.<br>Tran.   | Piezoel.<br>Kapazitiv | DMS<br>(Piezoel.) | DMS<br>Silizium | Piezoel.<br>Tran. |
| Digitale Auflösung [Bits] | 8-14                | 8-12                  | 16                | 24              | 12-16             |
| Signallänge [Samples]     | 8k-1M               | 1M                    | 1-100k            | 1               | 1 (10k)           |
| Signalamplitude           | µV-mV               | µV-mV                 | mV                | mV              | mV                |
| Sensorabstand (m)         | 0.1-1               | 10-100                | 10-100            | 1               | 1                 |
| Sensordichte (Anzahl)     | 10                  | 100                   | 2-10              | 100             | 10                |

# ZIEL: GANZHEITLICHE STRUKTURÜBERWACHUNG



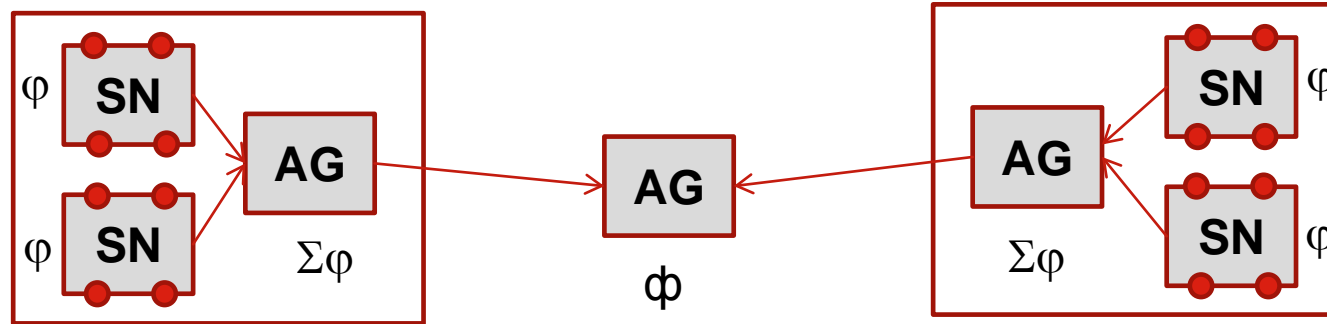
# ZIEL: HIERARCHISCHE ZUSTANDSSCHÄTZUNG MIT ML



# ZIEL: AUTONOME DEZENTRALE SENSORNETZWERKE

Hoch vernetzte und robuste Verteilte Sensornetzwerke

Autonomie und Selbstorganisation

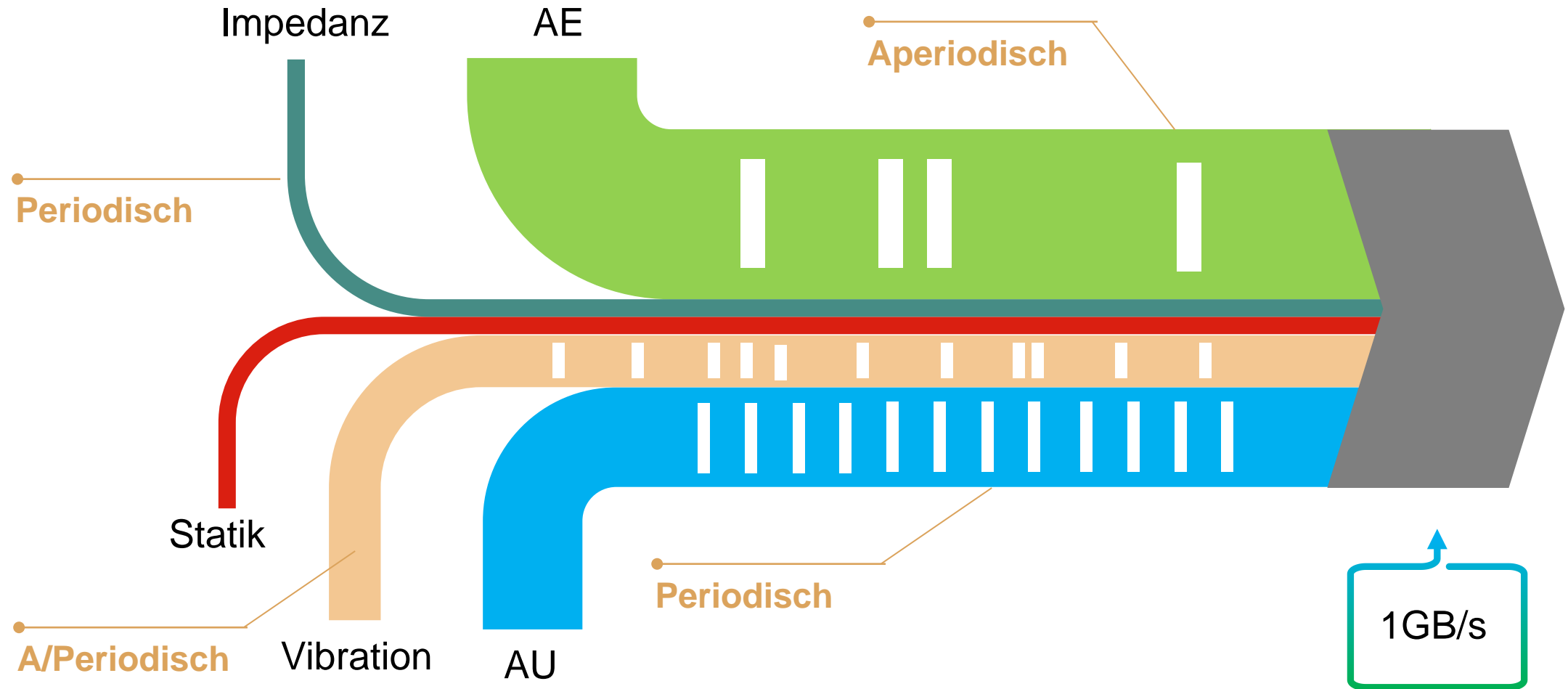


- Lokale Schadens- und Anomalieschätzung (unsicher, unzuverlässig)
- Lokale Sensordatenverarbeitung, ereignisbasiert
- Aggregation in Sub-Netzen, aggregierte Domänenschätzung
- Globale Fusion mit robuster Zustandsschätzung

# PROBLEM: DATENSTRÖME



Zentrale Verarbeitung  
nicht möglich



# AUSGANGSPUNKT: SIGNALMERKMALE

Schadensmerkmale



**Nur ein kleiner Teil des Messignals enthält Schadens- und Zustandsinformation**  
**Region of Interest (ROI): Zeit- und Amplitudenausschnitt**

## Temporal

- Diskreter Zeitpunkt (im Signal) oder Intervall von Ereignissen
- Diskrete Frequenzen (DFT)
- Frequenzbereiche (MFT)
- Korrelationskoeffizienten

- Eigenschaften der Signaleinhüllenden; Analytisches Signal (HT)
- Wavelet Koeffizienten, Diskrete Wavelet Dekomposition (DWT)

## Amplitude

- Extremwerte
- Statistische Aggregate (Mittelwert, Varianz, Skewness, ..)
- Verteilungen, Histogramm, Fläche, Energie, Entropie

## Raum

- Massenzentrum von Punkten
- Geometrische Eigenschaften (Form, Ausrichtung, usw.)
- Fusion von Merkmalen (lokal und verteilt)
- Position durch Triangulation



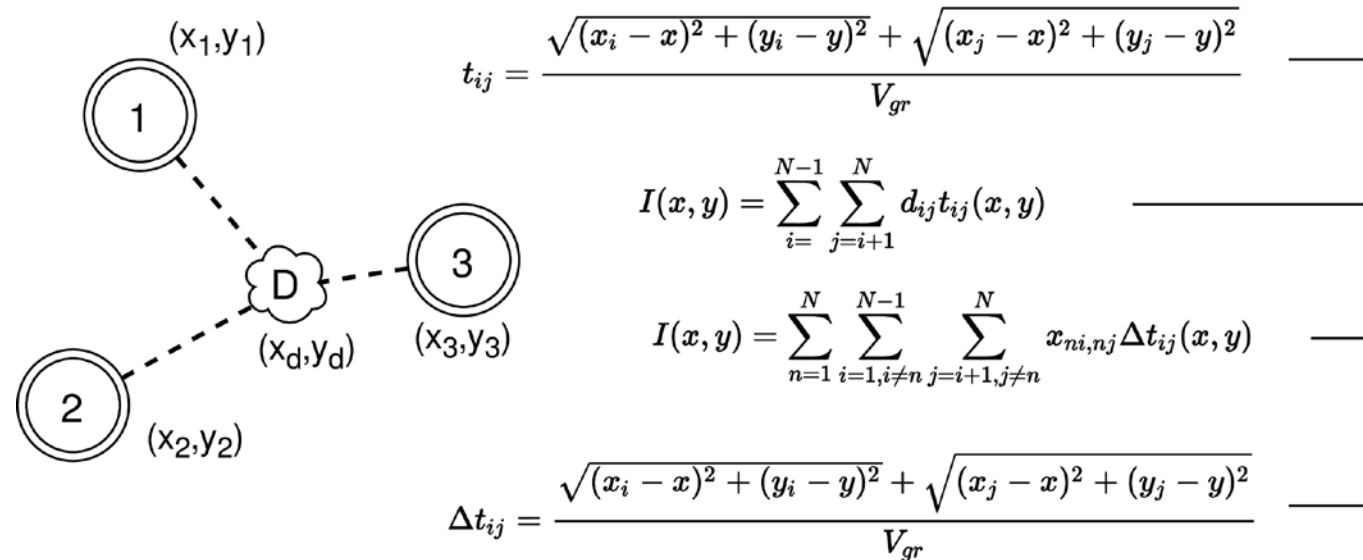
**ROI kann unbekannt sein (dynamisch)**

# LOKALISATION

## Sensor – und Schadenslokalisierung



Für die Lokalisation von Schäden werden i.A. Gruppen aus Sensoren und Aktuatoren (bei aktiven Messverfahren) verwendet. Die Korrelation der einzelnen Messsignale ergibt die Position des Schadens (nicht immer eindeutig, vor allem bei Multischäden). Für die Bestimmung der Position müssen aggregierte oder analytisch ermittelte Merkmale aus Zeitsignalen abgeleitet werden.



Schadenslokalisierung mit Multitransducernetzwerk (nach Croxford, 2008) (Oben) Elliptisches Verfahren (Unten) Hyperbolisches Verfahren

# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

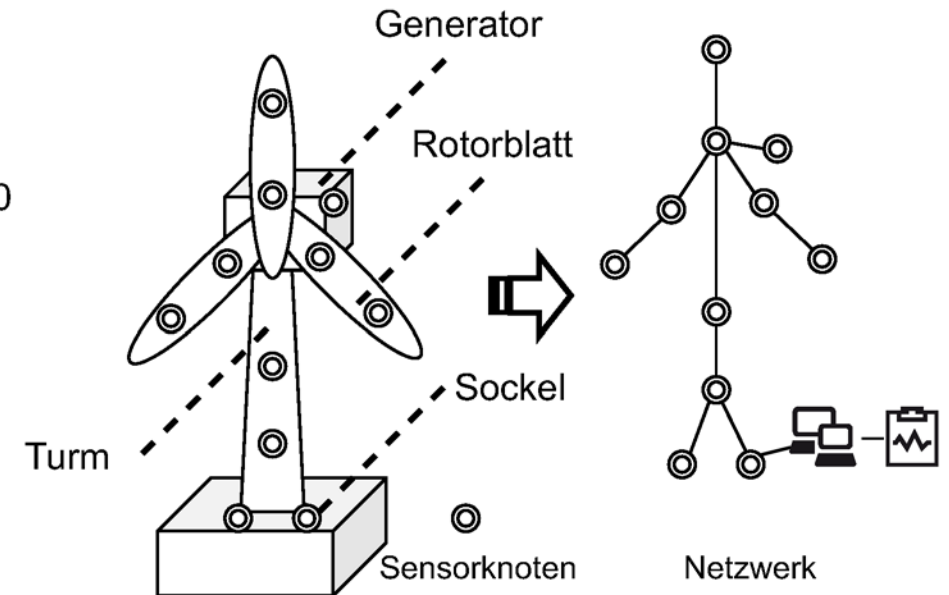
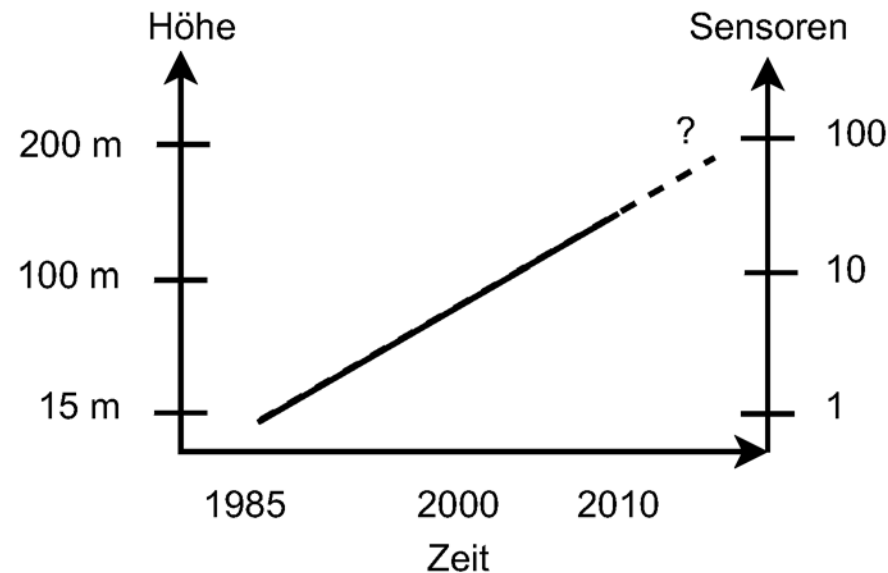
Autonome Sensorknoten in Windenergieanlagen



**Übergang von einzelnen diskreten Sensoren mit zentraler Signalverarbeitung (Labor) hin zu verteilten autonomen und kommunizierenden Sensornetzwerken (Feld)**

## Windenergieanlagen

- Räumliche Ausdehnung: 100m
- Verschiedene Domänen
- Drahtlos vs. verdrahtet





# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

Ereignisverarbeitung



**Schadensmerkmale und Sensorfusion basieren häufig auf Ereignissen (temporal, räumlich lokalisiert)**

Ereignisse in verteilten Strukturüberwachungsnetzwerken sind vielfältig:

- Bei aktiven Messverfahren der Startpunkt
- Bei passiven Messverfahren das Auftreten eines Messsignals
- Das Auffinden eines oder mehrerer ROI (Proposal und Fixierung)
- Bei Multisensorsystemen die Konfiguration von Transducern und Einstellung von Messbereichen
- Erkennung von fehlerhaften Sensoren (zunehmende Ausfallraten)
- Energiegewinnung und -versorgung bei autonomen Sensorknoten (bzw. Energiemanagement)

# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

Ereignisverarbeitung



**Ereignisdetektion sowie Ereignisberichterstattung benötigen in verteilten Netzwerken eine Synchronisation und Kommunikation**

- Ein Sensornetzwerk ist formal ein i.A. zyklischer ungerichteter **Graph**  $\langle N, E \rangle$  mit einer Menge von Knoten  $N$  und verbindenden Kanten  $E$ .
- Die Kanten stellen nachrichtenbasierte Kommunikation zwischen den Knoten her. Die **Netzwerktopologie** kann sehr unterschiedlich sein, jedoch eignen sich für großflächige Netzwerke (wie bei der Windkraftanlage) nur i.A. irreguläre und unvollständige Maschennetzwerke.
- Die **Kommunikation** kann **drahtlos** (z.B. via Bluetooth oder WiFi WLAN) oder **verdrahtet** stattfinden (elektrisch wie optisch).
- Verdrahtete Netzwerke haben den Vorteil gleichzeitig über die Kommunikationsleitungen **Daten und Energie** übertragen zu können.

# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

## Uhrensynchronisation

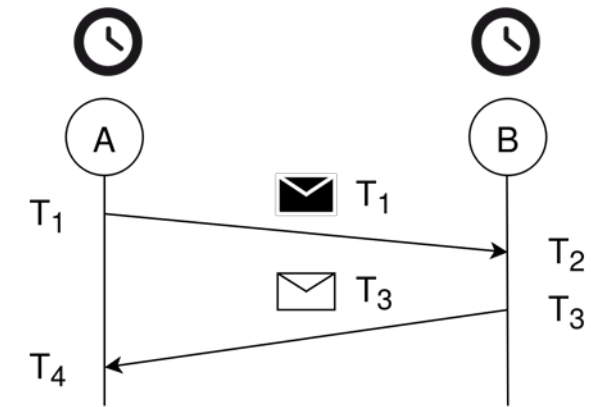


**Die Verarbeitung von Zeitsignalen auf verschiedenen Sensorknoten erfordert i.A. eine Uhrensynchronisation der einzelnen Knoten (absolute Zeit nicht wichtig, nur Timelag)**

- Schadenslokalisierung kann auf zeitlich korrelierten Merkmalen beruhen
- Je nach Messprinzip und Messverfahren (u.A. bestimmt durch Samplingrate) müssen Uhren von räumlich benachbarten Sensoren auf weniger als  $1 \mu\text{s}$  Gangunterschied synchronisiert werden!
- Autonome Sensorknoten (mit eigener Energieversorgung) sind nur zeitweise in Betrieb (z.B. nur während der Messung), besitzen keine persistente Uhr, und der interne Taktgeber zeigt Drift und Rauschen

# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

## Uhrensynchronisation

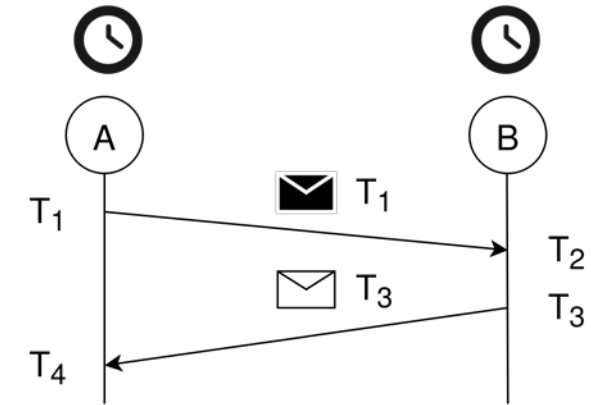


- Durch Drift der Uhren (z.B. materialintegrierte Sensorknoten werden nur mit instabilen RC Oszillatoren betrieben) muss eine häufigere Resynchronisation erfolgen.
- Wenn eine paarweise Synchronisation erfolgt, werden gegenseitig Nachrichten ausgetauscht und dabei Zeitstempel übertragen.
- Es muss dabei die Übertragungszeit (unbekannt)  $d$  heraus gerechnet werden, um den Uhrenversatz  $\Delta$  bestimmen zu können:

$$\Delta = \frac{(T_1 - T_2) - (T_4 - T_3)}{2}, d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2}, T_2 = T_1 + \Delta + d$$

# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

## Uhrensynchronisation

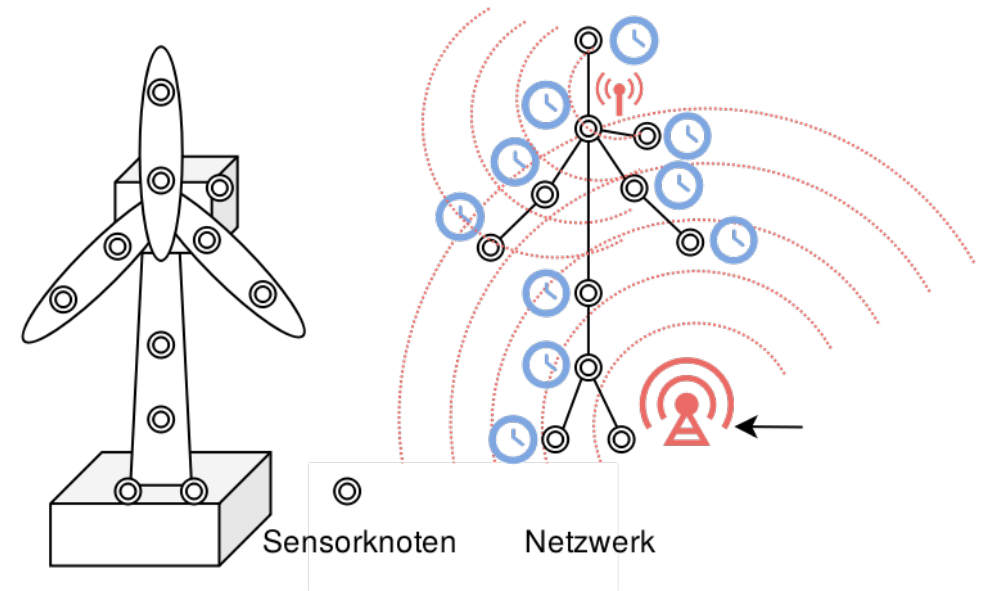


**Bei kaskadierter Nachbarschaftssynchronisation ergeben sich räumlich zunehmende akkumulative Fehler in der Uhrensynchronisation.**

- In **IP-basierten** drahtlosen Sensornetzwerken erreicht man eine Genauigkeit der Uhren von nur typisch **10-100  $\mu$ s**
- In verdrahteten Sensornetzwerken erreicht man eine Genauigkeit der Uhren (P2P) von bis 1  $\mu$ s, unter Umständen für hochfrequente Signalkorrelationen noch zu groß!
- Statt intrinsisch kommunizierten Uhrenabgleich sind extrinsische ereignisbasierte Uhrensynchronisation besser
- Geführte Wellen als Trigger sind nicht optimal (unbekannte Laufzeitunsicherheiten  $> 10 \mu$ s)

# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

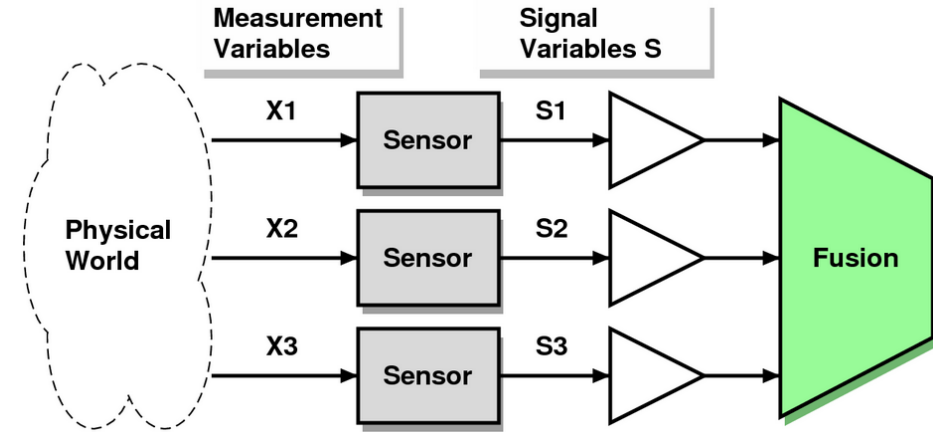
## Uhrensynchronisation



- **Funkwellenbasierte Synchronisation** mit extern ausgelösten Impulsen kann Uhrensynchronisation im gesamten Sensornetzwerk mit  $< 1 \mu\text{s}$  Fehler erreichen.
- Dezidierte Funksender und Baken (Relais)
- Aber schwierig bei materialintegrierten Sensoren, ggfs. mehrstufiges Verfahren mit lokalen Sendern die globales Triggersignal empfangen und weiterleiten
- Einfache VHF/UHF Zeitsignalsender können verwendet werden, oder bestehende drahtlose Kommunikationsinfrastruktur nutzen (Raw WiFi, Bluetooth mit Relaisstationen)

# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

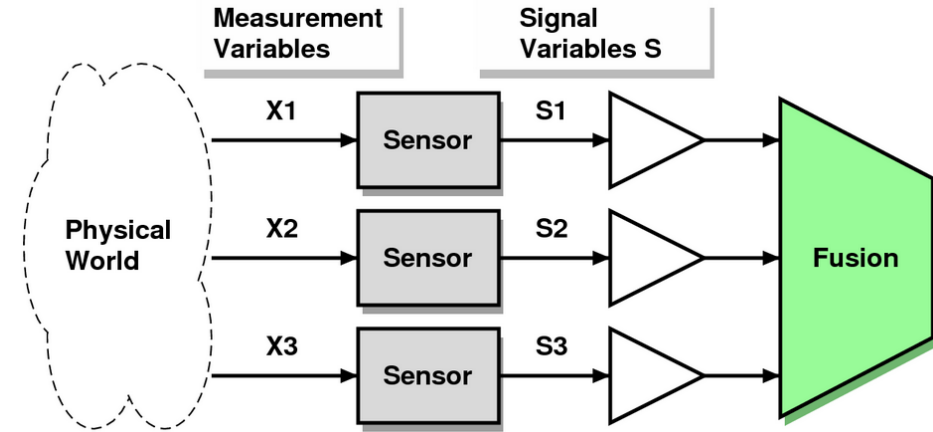
## Sensorfusion



- Sensorfusion kann auf verschiedene Arten und unterschiedlicher **räumlicher Ausdehnung** erfolgen.
- Neben der **Normalisierung** von Sensorwerten, z.B. durch Temperaturkompensation, können z.B. auch Berechnungen aus GUW und AE kombiniert oder korreliert werden (Multivariate Signalanalyse).
- Weiterhin ist **Multisensorfusion** gleichartiger aber räumlich verteilter Sensoren eine wichtige Methodik um auf Schäden zurück schließen zu können (inkl. Lokalisation, wie bereits gezeigt).
- Dabei werden die Zeitsignale in verschiedenen Frequenzbändern mit unterschiedlichen Auflösungen analysiert (Diskrete Wavelet Transformation), indem das Signal in eine grobe Näherung und Detailinformationen zerlegt wird (i.A. über kaskadierte Frequenzfilter).

# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

## Sensorfusion



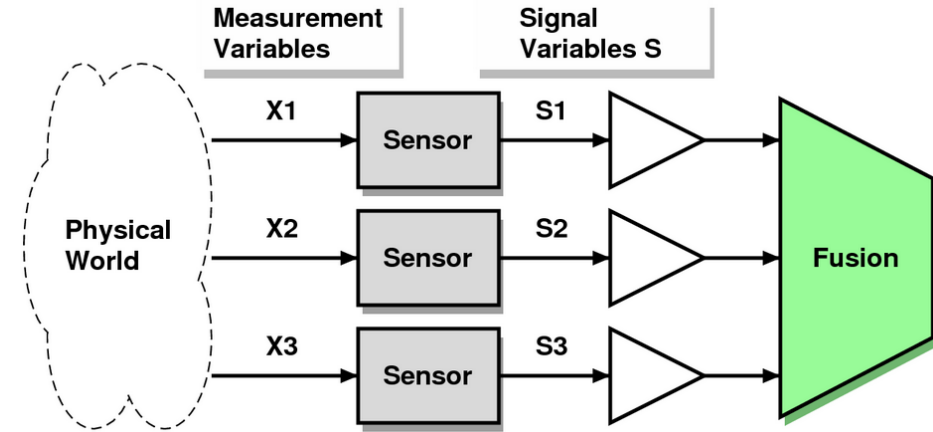
### Klassifizierung Fusion

- **Redundanz:** Mehrere Sensoren messen parallel die gleiche Messgröße (Eigenschaft), z. B. mehrere Temperatursensoren messen die Temperatur eines Körpers
- **Vielfältigkeit:** Mehrere Sensoren messen verschiedene aber korrelierte Messgrößen, z. B. gleichzeitige Messung von Temperatur, Druck und Feuchtigkeit.
- **Bereich:** Mehrere Sensoren messen die gleiche Meßgröße aber in verschiedenen Messbereichen, z. B. mehrerer Temperatursensoren messen am gleichen Ort verschiedene Temperaturbereiche.
- **Zeit:** Aktuelle Messungen von Signalen von Sensoren werden zeitlich mit historischen Informationen korreliert, z. B. von einer früheren Kalibration.



# VERTEILTE SENSORNETZWERKE

Sensorfusion



## Sensor System Konfigurationen

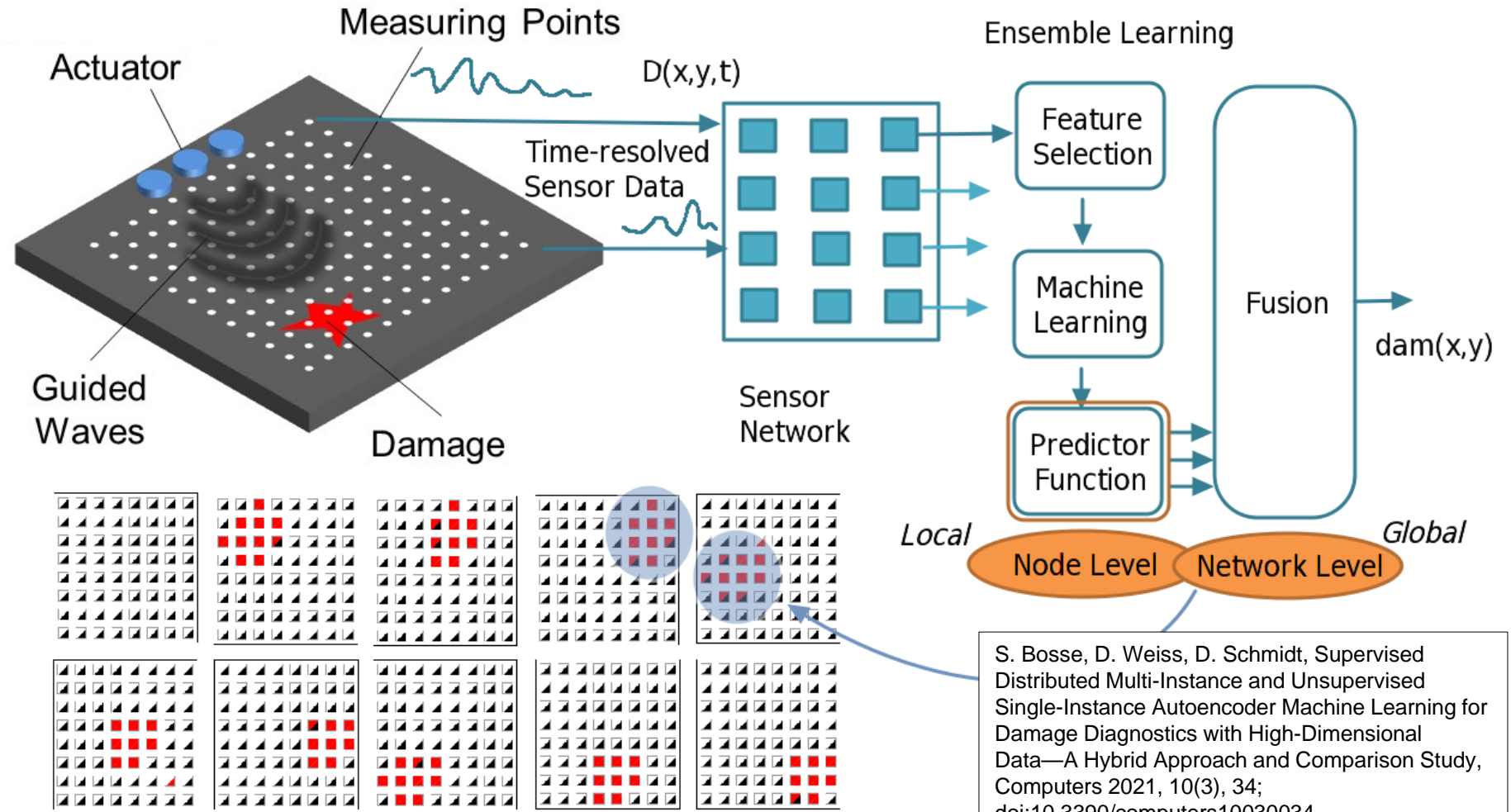
- **Komplementär:** Die Sensoren sind unabhängig voneinander und vervollständigen Informationen
- **Konkurrierend:** Jeder Sensor liefert unabhängig eine Messung der gleichen Messgröße
- **Kooperativ:** Sensoren liefern zusammen Informationen die einzelnen nicht verfügbar wären

# SENSORFUSION IN VERTEILTEN SENSORNETZWERK

**Verteilte Räumliche Sensorfusion:**

*Lokale Zustandsprädiktion (Schadens- und Anomaliedetektor)*

*Globale Fusion (Lokalisation und Aggregation)*

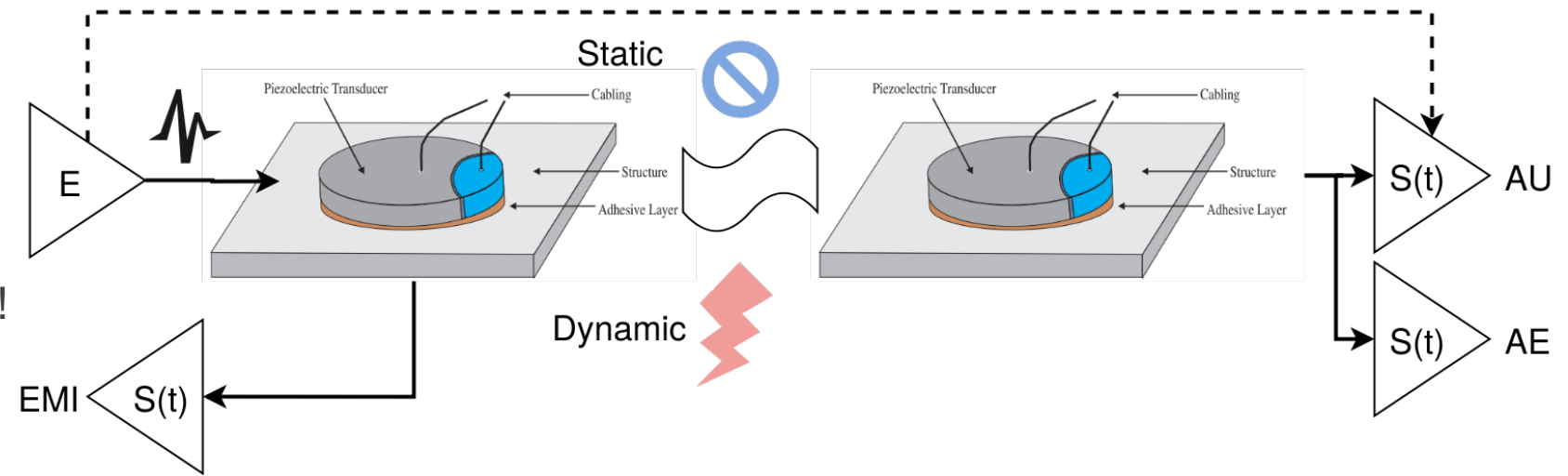


S. Bosse, D. Weiss, D. Schmidt, Supervised Distributed Multi-Instance and Unsupervised Single-Instance Autoencoder Machine Learning for Damage Diagnostics with High-Dimensional Data—A Hybrid Approach and Comparison Study, Computers 2021, 10(3), 34; doi:10.3390/computers10030034

# SENSORFUSION

AU+AE+EMI

Eigentlich Messmethodenfusion!



- PZTs werden zur Erzeugung von Signalen zur Messung von geführten Wellen (aktiv), AE-Ereignissen (passiv), EMI (aktiv) und Dehnung verwendet.
- Jede dieser individuellen Erfassungstechniken kann z.B. für die Rissdetektion und Risswachstumsschätzungen unter Verwendung **statistischer Mustererkennungsverfahren** verwendet werden.
- Die Fähigkeiten des SHM-Systems können durch Verwendung von Datenfusionsmethoden verbessert werden, die auf Kombinationen dieser Sensortechniken angewendet werden, vor allem Erfassung dynamischer und „statischer“ Veränderungen der Struktur.

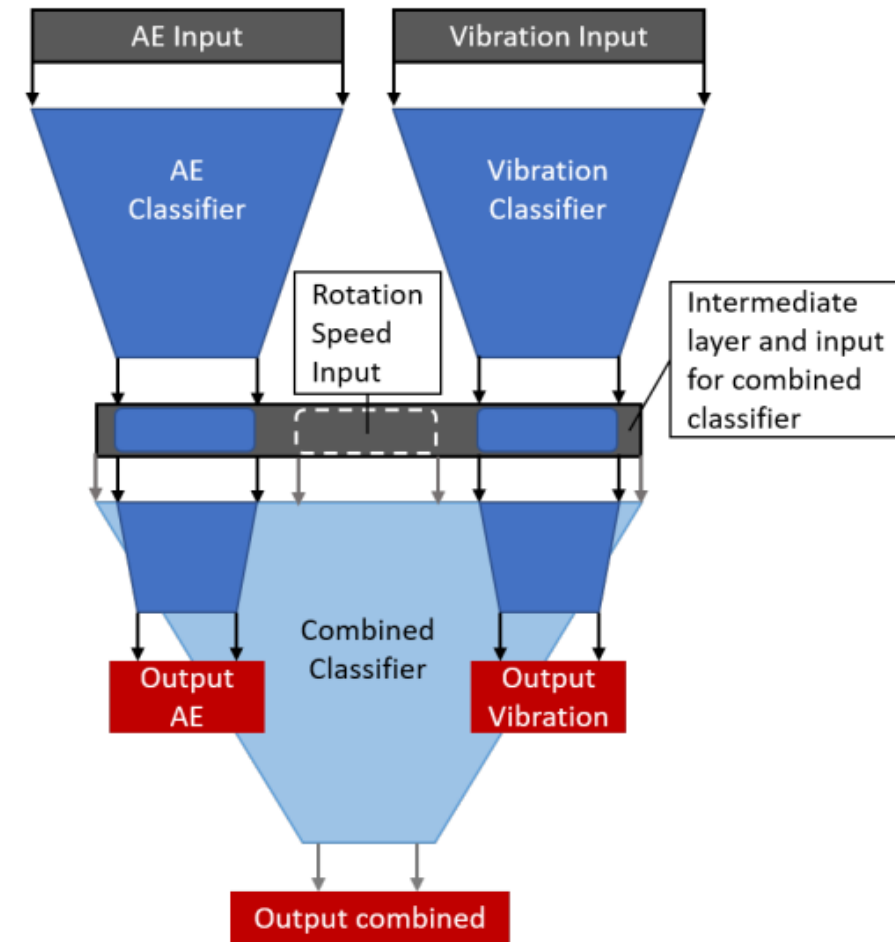
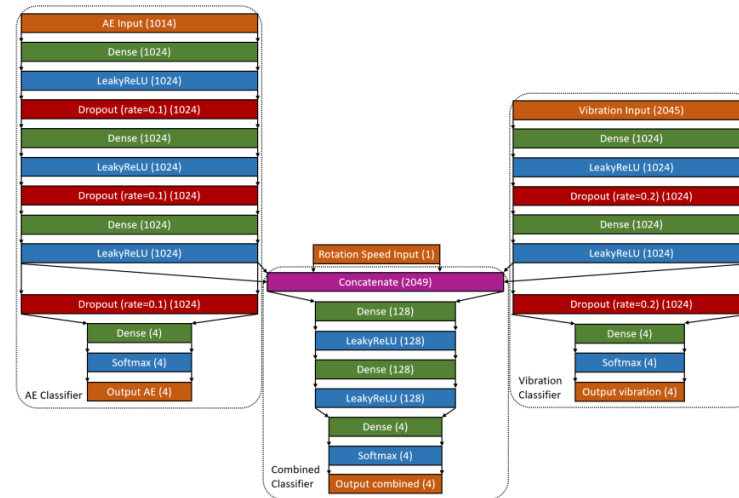
M. M. DERRISO, I. J. E. LITTLE, K. A. VEHORN, M. J. DAVIES, and M. P. DESIMIO, "Crack Detection Using Combinations of Acoustic Emission and Guided Wave Signals from Bonded Piezoelectric Transducers," 2011.

P. Murdy, "COMBINING ACOUSTIC EMISSION AND GUIDED ULTRASONIC WAVES FOR GLOBAL PROPERTY PREDICTION AND STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF GLASS FIBER COMPOSITES," MONTANA STATE UNIVERSITY Bozeman, Montana, 2018.

# SENSORFUSION

AE+Vibration

Eigentlich Methodenfusion!



- Getrennte Messung von AE und Schwingungen
  - Schwingungsmessung mit Beschleunigungsmesser
  - AE mit PZT
- Fusion mittels Mehrstufenklassifikation (Rechts)
  - AE und Schwingungsklassifiziere mit KNN (jeweils mehrere versteckte Netzwerkebenen mit 1000 Neuronen, Mitte)

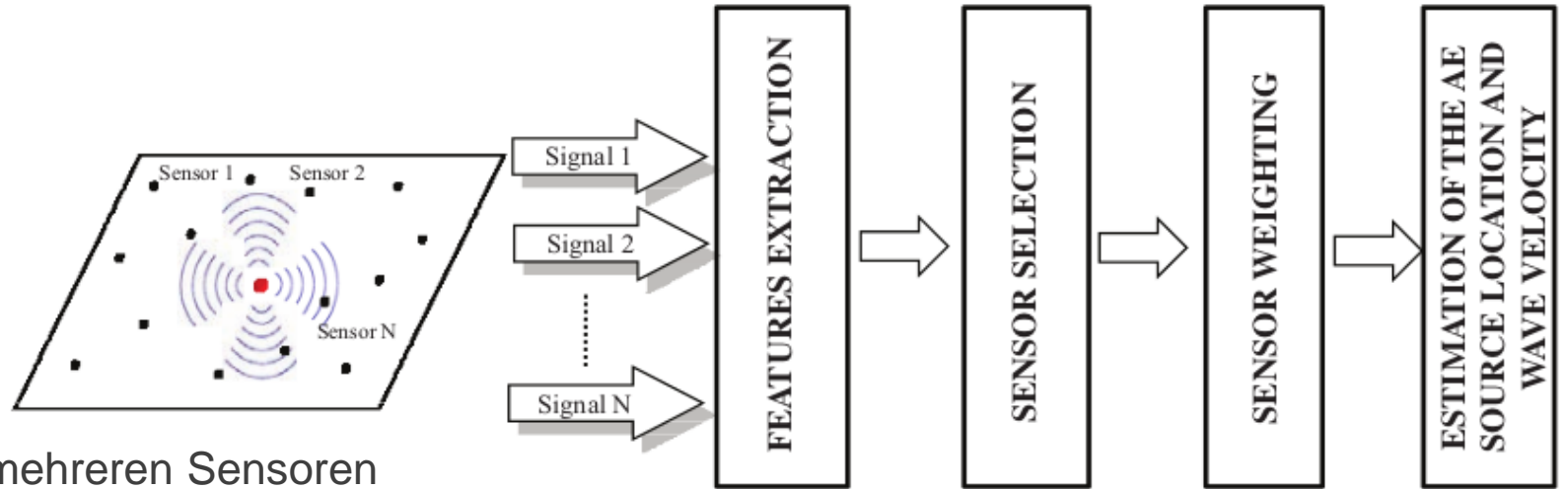
Mey, O., Schneider, A., Enge-Rosenblatt, O., Mayer, D., Schmidt, C., Klein, S. and Herrmann, H.G., 2021. Condition monitoring of drive trains by data fusion of acoustic emission and vibration sensors. Processes, 9(7), p.1108.

# SENSORFUSION

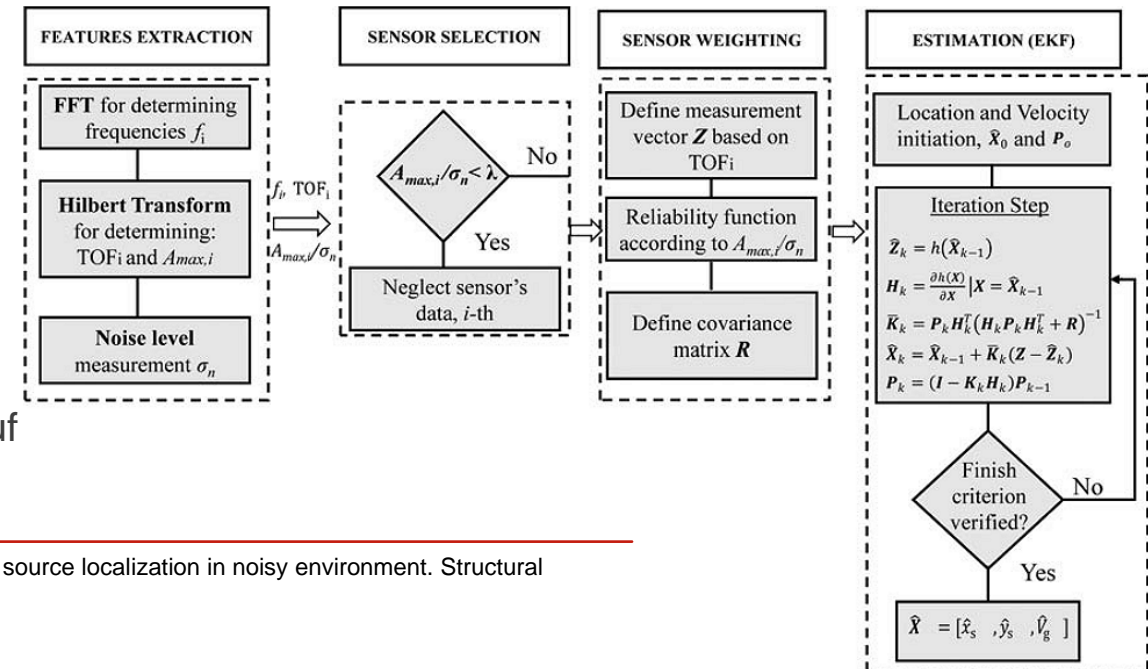
Multi-Sensor AE

Echte Sensorfusion!

Lokalisation und Schätzung



- Getrennte Messung von AE mit mehreren Sensoren
  - AE mit PZT
- Selektives und schätzendes Verfahren:
  - Merkmalsextraktion
  - Sensorauswahl basierend auf einem binären Hypothesentest
  - Sensorgewichtung basierend auf einer genau definierten Zuverlässigkeitsfunktion
  - Schätzung des Ortes der Schallemissionsquelle basierend auf einem erweiterten Kalman-Filter



Dehghan Niri, E., Farhizadeh, A. and Salamone, S., 2013. Adaptive multisensor data fusion for acoustic emission source localization in noisy environment. Structural health monitoring, 12(1), pp.59-77.

# ZUSAMMENFASSUNG

## Windenergieanlagen / SHM

- **Große räumliche Ausdehnung eine Herausforderung!**
  - Kommunikations- und Verarbeitungsarchitektur
  - Algorithmen
- Heterogene Sensoren und Messverfahren: **AE, AU, EMI, Vibration, Dehnung**
- **Hohe Sensordichte**
- Große **Datenströme** und **Volumen** - Zentrale Verarbeitung nicht möglich

## Verteilte Sensornetzwerke

- Anbindung von heterogenen Sensoren und räumlich getrennten Domänen mit ereignisbasierter Kommunikation
- Autonome Sensorknoten mit **lokaler Verarbeitung** von Sensordaten
- **Synchronisation** ist Herausforderung (Uhren!)
- Drahtlose vs. drahtgebundene Kommunikation

## Sensorfusion

- **Bisher wenige Arbeiten (WE)**
- Räumlich: Lokale Zustandsschätzung, globale Fusion
- Heterogen: AE+AU+EMI+Vibration
- **Verbesserung der Lokalisation und Korrektheit**
- **Kompensation** von Ausfall von Sensoren, Drift, Baseline, Adaptivität

# THANK YOU

---

Stefan Bosse

[sbosse@uni-bremen.de](mailto:sbosse@uni-bremen.de)

[www.edu-9.de](http://www.edu-9.de)

