

Fachbericht

# Condition Monitoring bei Schienenfahrzeugen – von Konzepten zu Lösungen



Bild 1

Bild 1: Baumer bietet zuverlässige und robuste Sensorlösungen für Schienenfahrzeuge.

## Einführung

Insbesondere in der Bahnindustrie spielt die Senkung von Reparatur- und Wartungskosten eine entscheidende Rolle, um sich Wettbewerbsvorteile im Transportwesen zu sichern. Condition Monitoring (CM) gilt als ein Schlüssel um die Gesamtkosten von Investitionsgütern nachhaltig zu reduzieren. Die zentralen Ansätze hierbei:

- Verlängerte Wartungsintervalle – vorausschauende Wartung zur Kostensenkung
- Geringeres Risiko zufälliger Ausfälle – erhöhte Betriebszeit
- Verlängerte Lebensdauer zur Reduzierung der Investitionskosten

Zahlreiche Fallstudien haben gezeigt, dass Sensorsignale in Kombination mit Sensordatenfusion (SDF) wertvolle Informationen über den Zustand von Lagern, Rädern, Generatoren, Filtern usw. liefern. Die meisten herkömmlichen Sensoren messen Beschleunigung, Drehzahl (Geschwindigkeit), Temperatur, Schall, Druck, Durchfluss, Kraft und Dehnung.

Definition der Sensordatenfusion (SDF):

Bei der Sensordatenfusion werden die Daten mehrerer Sensoren kombiniert, um Informationen zu erhalten, die genauer, zuverlässiger oder völlig neu sind, als es bei der Nutzung der einzelnen Sensoren der Fall wäre.

### Schlüsselfaktoren für die erfolgreiche Implementierung von Condition Monitoring

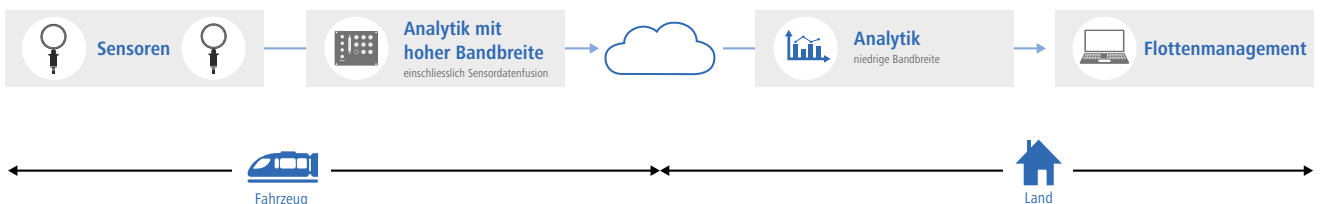
Bei Um Condition Monitoring erfolgreich zu implementieren, müssen die folgenden Faktoren berücksichtigt werden:

- **Kosten der Implementierung**  
Um die Integrationskosten zu minimieren, ist es sinnvoll, bestehende Sensoren zu nutzen und diese mit CM-Funktionen aufzurüsten.
- **Betriebliche Änderungen**  
Mit CM werden die Wartungsintervalle flexibel. Das CM-System gibt den optimalen Zeitpunkt für Wartungsmassnahmen an. Dies erfordert eine Umstellung von einer gut planbaren auf eine flexible Wartungsplanung.
- **CM-Zuverlässigkeit – Falsche Alarme**  
Präzise und zuverlässige Sensorsignale sind unerlässlich, um Fehlalarme zu vermeiden, die dazu führen können, dass Fahrzeuge irrtümlich zur Wartung aus dem Betrieb genommen werden. Der Vergleich der Werte mehrerer Sensoren ermöglicht eine Plausibilitätsprüfung.
- **CM-Zuverlässigkeit – Sicherheitsüberlegungen**  
Verlängerte Wartungsintervalle können den Eindruck erwecken, dass ein Zugbetreiber Kosten sparen möchte und dabei ein erhöhtes Risiko in Kauf nimmt. Die CM-Funktionen müssen daher sorgfältig validiert werden.
- **RAMS / LCC-Aspekte**  
Eine lange Lebensdauer ist für Bahnausrüstungen unerlässlich. Je mehr Ausrüstung vorhanden ist, desto höher ist das Risiko von Ausfällen und Stillstandzeiten, insbesondere bei der Elektronik. Ein weiterer Grund, bestehende Sensoren und Steuergeräte für CM zu verwenden.

### Technische Lösungen

CM Lösungen berücksichtigen die gesamte Datenkette von den fahrzeugseitigen Daten bis zu den stationären Bodenkontrollgeräten. Die Datenraten nehmen entlang der Kette ab. Die Sensordatenraten liegen im Bereich von Mikrosekunden bis Millisekunden. In der Analytik und im Flottenmanagement nehmen die Datenraten weiter ab und reichen von Sekunden bis hin zu Stunden.

Das Diagramm gibt einen Überblick über die Herausforderungen der CM-Implementierung in Onboard-Lösungen:



- **Sensoren:**  
Der Einbau zusätzlicher Sensoren für CM kann komplex sein, insbesondere wenn sie an Strukturelementen wie Drehgestellrahmen angebracht werden müssen. Dies führt zu zusätzlichen Kosten für Sensoren, Verkabelung und mechanische Integration. Die Bandbreite der Sensorsignale liegt oft unter 1 Millisekunde.

- **Analytik bei hoher Bandbreite:**  
Schnittstellen mit hoher Bandbreite und der Bedarf an Rechenleistung stellen eine zentrale Herausforderung dar. Relevante physikalische Sensorinformationen (z. B. Beschleunigung) werden mit einer Bandbreite von weniger als 1 Millisekunde erfasst. Kombinierte Sensordaten (z.B. Drehzahl und Beschleunigung) sowie Filterung, Analyse, Schnittstellen und Datenspeicherung erfordern erhebliche Rechenleistung.

Die Borddaten müssen zur weiteren Analyse an stationäre Bodenkontroll- und Auswertungssysteme übertragen werden, was folgende Herausforderungen mit sich bringt:

- **Analyse mit niedriger Bandbreite:**  
CM-Informationen müssen komprimiert und mit anderen Informationen (z. B. GPS- und Wetterdaten) korreliert werden. Anschliessend müssen die Informationen visualisiert und gespeichert werden. Dies kann zu enormen Datenmengen führen, die grundlegende Informationen für die Entscheidungsfindung liefern. Dieser Schritt im Analyseprozess kann Stunden, Tage oder sogar Wochen in Anspruch nehmen.
- **Flottenmanagement:**  
Um Empfehlungen für den Betrieb geben zu können, müssen bestehende Flottenmanagementsysteme Condition Monitoring unterstützen.

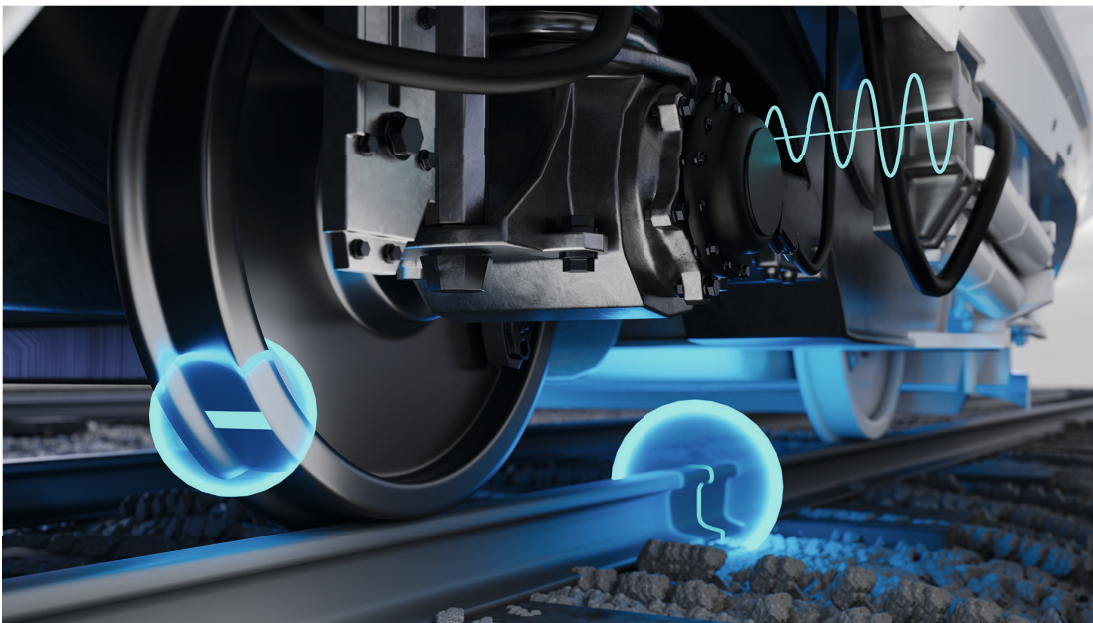


Bild 2: Der bewährte BPIK Achsimpulsgeber mit Condition Monitoring Funktionalität ermöglicht eine wirtschaftliche und leistungsfähige Zustandsüberwachung am Radsatz.

Bild 2

### Business Case Condition Monitoring am Drehgestell

Drehgestelle und Räder machen etwa 20 bis 30% der gesamten Zugstandhaltungskosten aus. Daher stehen sie im Mittelpunkt von CM-Lösungen. Potenzielle Anwendungsfälle sind Räder mit Flachstellen, Polygonisierung, Rollkontaktermüdung (RCF), Lager, Radsatz (Torsionsschwingungen), Getriebe, Fahrmotor und Bremsen. Moderne Züge sind mit mindestens einem Achsimpulsgeber an jeder Achse ausgestattet.

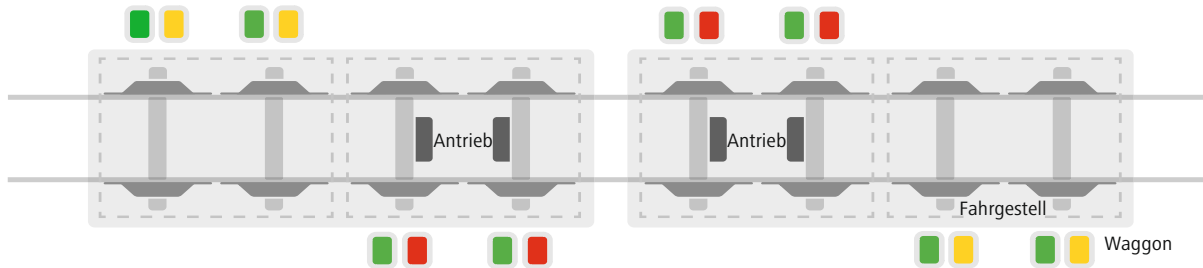
Achsseitige Sensoren werden für mehrere Teilsysteme wie Gleitschutz (WSP), Juridical Recording Units (JRU), Traktionskontrolle und Zugsteuerung (z. B. ETCS) benötigt und können für Funktionen wie Heissläufer- oder Torsionsschwingungserkennung verwendet werden. Baumer entwickelt seit Jahren das Konzept der

Achsimpulsgeber weiter und hat das Portfolio nun um spezifische Achsimpulsgeber für Condition Monitoring erweitert. Damit werden die Vorteile von CM genutzt, während der Bedarf an zusätzlichen Sensoren minimiert wird. Sensoren an der Achse liefern präzise Drehzahl-informationen (Umdrehungen pro Minute U/min) direkt an den Rädern. Da die Sensoren nahe an den Radsatzlagern installiert sind, erfassen sie ungedämpfte Beschleunigungssignale im Zusammenspiel von Rad und Schiene.

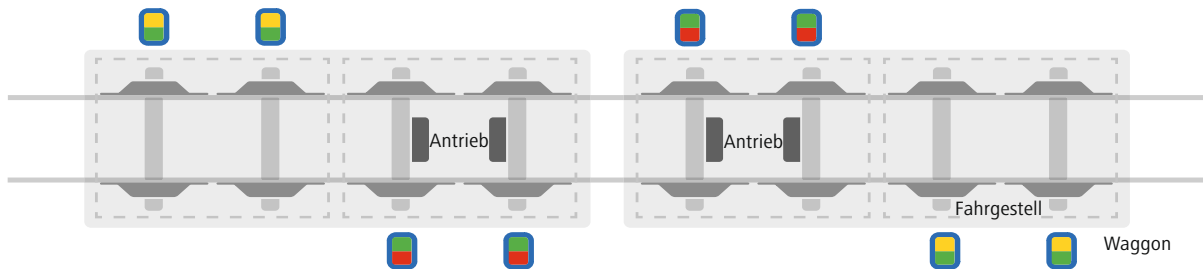
Bild:

- Individuelle Sensoren für jedes Subsystem: 16 Sensoren erforderlich
- Baumer Lösung mit Multi-Unit Encoder Konzept: 8 Sensoren erforderlich

#### Achsbelegungsplan mit Einzelsensoren für jedes System



#### Achsbelegungsplan mit Baumer Multi-Unit-Encoder-Konzept



Mehrere Funktionen in einem Sensor integriert



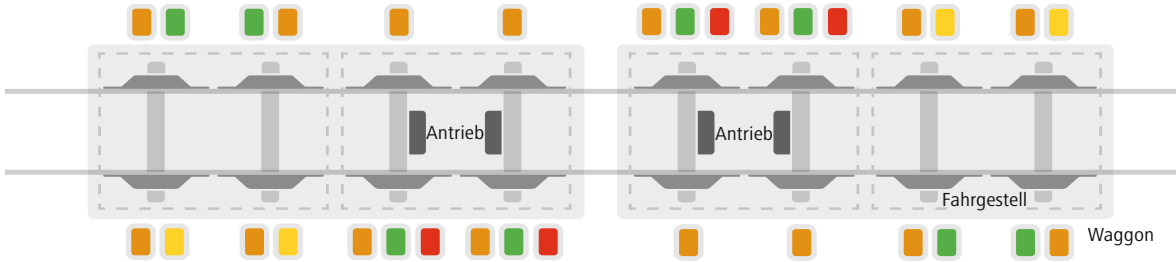
Sicherheitsrelevante Funktionen

- Geschwindigkeitssensor Zugsicherung / JRU
- Geschwindigkeitssensor WSP

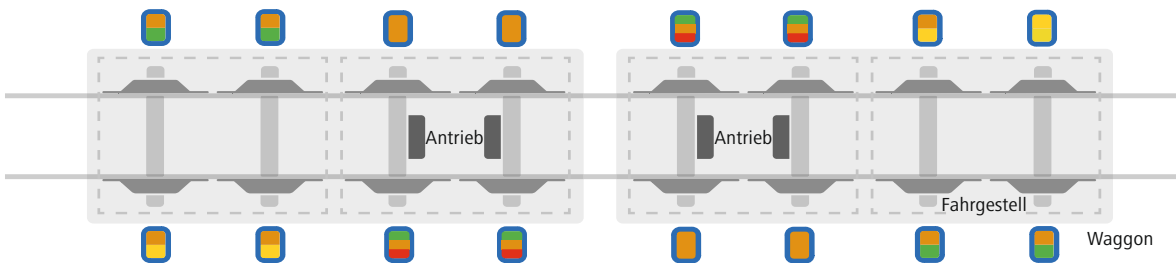
Nicht sicherheitsrelevante Funktionen

- Geschwindigkeitssensor Traktionsregelung

Achsbelegungsplan mit Einzelsensoren für jedes System



Achsbelegungsplan mit Baumer Multi-Unit-Encoder-Konzept



Mehrere Funktionen in einem Sensor integriert



Sicherheitsrelevante Funktionen

- Geschwindigkeitssensor  
Zugsicherung / JRU
- Geschwindigkeitssensor  
WSP

Nicht sicherheitsrelevante Funktionen

- Geschwindigkeitssensor  
Traktionsregelung
- Temperatursensor Heissläufer  
und Condition Monitoring

Achsbelegungsplan für eine EMU für Achsimpulsgeber mit Condition Monitoring auf beiden Seiten des Radsatzes.

Bild:

- Jedes Teilsystem durch einzelne Sensoren abgedeckt: 32 Sensoren erforderlich
- Baumer Lösung (Multi-Unit Encoder Konzept): 16 Sensoren erforderlich

**Schlussfolgerung:**

Das Baumer Multi-Unit-Encoder-Konzept minimiert die Anzahl der zusätzlich benötigten Sensoren für das CM, indem es die vorhandenen Sensoren nutzt. Jeder Drehgeber ist galvanisch getrennt und erlaubt eine individuelle Konfiguration und Parametrierung, ohne gegenseitige Rückwirkung.

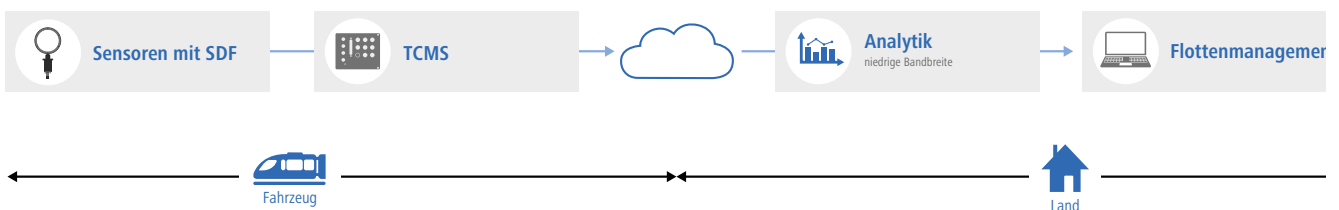
### Sensorlösung mit BPIK-Achsimpulsgeber

In die bewährten BPIK-Achsimpulsgeber wurden MEMS-basierte Beschleunigungssensoren integriert. Für die Kommunikation mit einem Edge Device, Hub oder TCMS stehen serielle Schnittstellen nach RS-485-Standard und digitale Schnittstellen (HTL i/o) zur Verfügung. Auf diese Weise können bestehende Sensoren für die CM-Funktionalität verwendet werden, was zu erheblichen Kosteneinsparungen in Bezug auf, Elektromechanik und Mechanik führt.

### Die Systemarchitektur umfasst zwei Ansätze

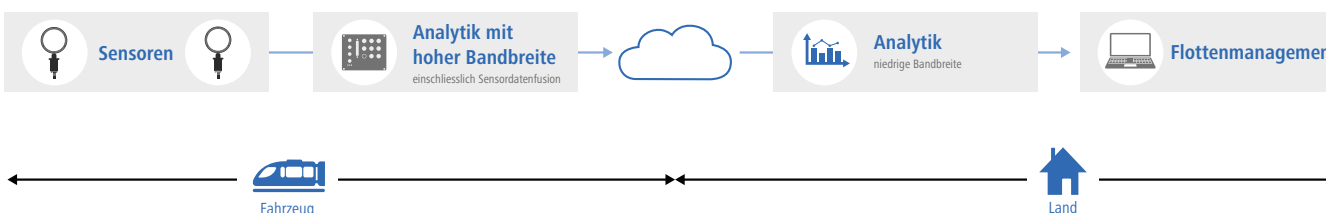
Achsimpulsgeber mit integriertem SDF:

- Signalverarbeitung bei hoher Bandbreite im Achsimpulsgeber mit integrierter SDF
- Kommunikation mit geringer Bandbreite zum TCMS (z. B. HTL-Schnittstelle mit Pulsweitenmodulation PWM)
- Das Besondere an dieser Lösung
  - › Niedrige Datenraten für CM-Informationen, geringere Belastung des Zugbusses, z. B. TRDP
  - › Sensor erfordert Rechenleistung für die Datenanalyse



Analytik und SDF in Edge-Devices:

- Kommunikation mit hoher Bandbreite vom Achsimpulsgeber zum Edge Device
- Sensordatenfusion im Edge-Gerät integriert
- Leistungsstarke serielle Schnittstelle für die Kommunikation zwischen Sensor und Edge Device erforderlich
- Das Besondere an dieser Lösung
  - › Hohe Flexibilität bei der Systemgestaltung
  - › Weniger Datenverarbeitungsaufwand im Sensor
  - › Serielle Sensorschnittstelle erforderlich



### Schlussfolgerung

Für beide Konzepte bietet Baumer mit der BPIK-Produktfamilie eine Lösung: Der Sensor mit leistungsfähiger RS-485-Schnittstelle ermöglicht Datenraten von bis zu 1 MBit pro Sekunde oder die Kommunikation über HTL-Hilfsausgänge.

### Sensordatenfusion von Drehzahl und Beschleunigung

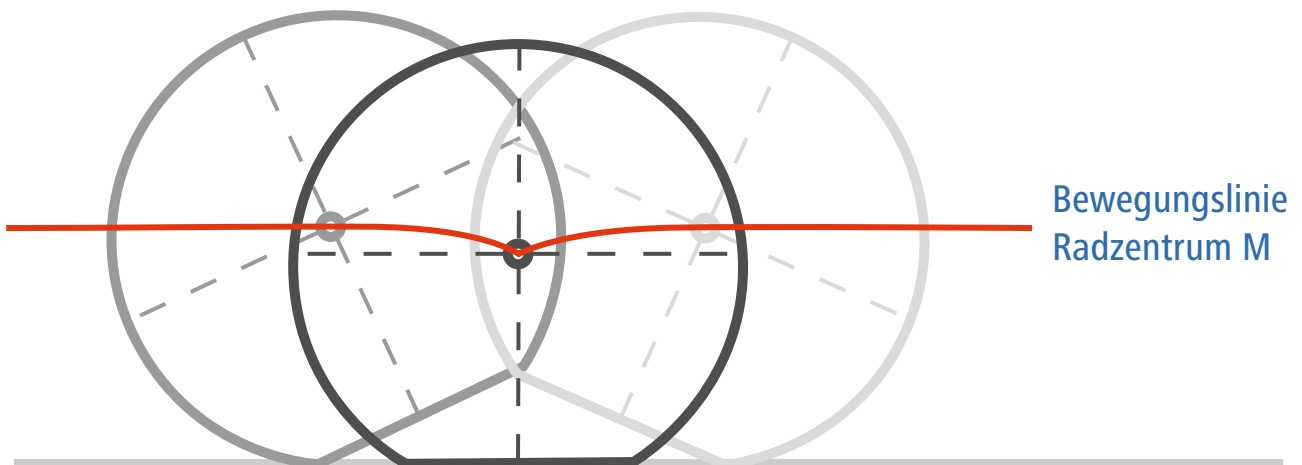
Beschleunigungssignale, die durch ein polygonisiertes Rad, einen Flachstellen- oder Kugellagerdefekt erzeugt werden, sind immer perfekt mit der Drehzahl oder der Winkelposition des Rades synchronisiert. Da der Achsimpulsgeber die genaue, relative Winkelposition und Winkelgeschwindigkeit (RPM) des Rades kennt, kann das Beschleunigungssignal direkt korreliert und präzise gefiltert werden, während gleichzeitig das Rauschen von Rad und Schiene eliminiert wird.

### BPIK-Achsimpulsgeber mit implementiertem CM

Die BPIK-Achsimpulsgeber von Baumer bieten derzeit 2 Funktionen zum Condition Monitoring:

- Flachstellenerkennung

Selbst eine kleine flache Stelle von nur 0,1 mm erzeugt eine vertikale Beschleunigung, die vom Beschleunigungssensor erfasst wird. Die ausgelöste Beschleunigung ist einfach: Die flache Stelle hat einen kleineren Radius, in den der Zug quasi "hineinfällt". Die Bereitstellung zuverlässiger Indikatoren für eine Flachstelle erfordert spezielle Sensoren (Drehzahl und Beschleunigung), eine ausgefeilte Analyse und SDF. Eine Herausforderung besteht darin, zwischen den verschiedenen Geräuschquellen (Weichen, Rad- und Gleisverformung, Unebenheiten usw.) zu unterscheiden und die richtigen Signale zu filtern. Die schnelle und hochpräzise Erfassung von Drehzahl und Beschleunigung ermöglicht eine hohe Differenzierung von Signal und Rauschen.



- Erkennung von Schienenlücken

Im Falle einer Schienenlücke ist eine ungewöhnlich hohe Spitze im Beschleunigungssignal sichtbar. Alle Sensoren, die auf der gleichen Seite des Zuges angebracht sind, melden eine solche Spitze. Das TCMS braucht nur die Abfolge dieser Signale zu messen, um festzustellen, dass möglicherweise eine Schienenlücke vorliegt. Die BPIK-Sensoren bieten die Grundlage für weitere Anwendungen wie z.B. die Überwachung von Kugellagern, Flachstellendetektion, Radpolygonisierung, etc.

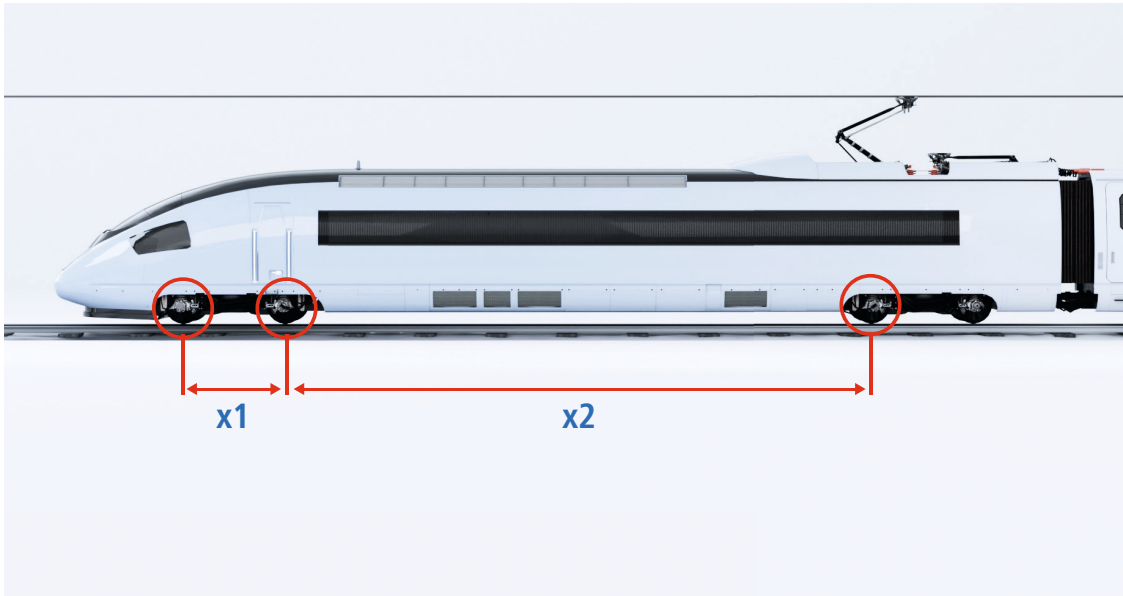


Bild 3

Bild 3: Condition Monitoring zur Erkennung von Schienenlücken

### Schlussfolgerung

Die bewährten BPIK-Sensoren von Baumer bieten kostengünstige und leistungsstarke Lösungen für das Condition Monitoring. Das auf multifunktionalen Sensoren basierende Design der Achsimpulsgeber ist der Schlüssel zur Maximierung der Leistung und Minimierung der Gesamtbetriebskosten. Die Kombination aus präziser Drehzahl- und Beschleunigungserfassung und Sensordatenfusion (SDF) führt zu genauen und zuverlässigen Informationen über den Zustand des Zuges.

Innovative Lösungen für die Bahnindustrie:  
[www.baumer.com/railway](http://www.baumer.com/railway)



AUTOR  
Peter Grollmann  
Head of Business Unit  
Railway, Baumer