

# Condition Based Maintenance

für die bestehende Wiener U-Bahn Flotte am Beispiel Druckluftsystem

# Inhalt

- Vorstellung – Projektteam
- Ausgangssituation – Problemstellung
- Aufgabenstellung – Zielsetzung
- Methodischer Ansatz – Lösungsweg
- Ergebnisse
- Fazit & Ausblick



# Wiener Linien Fahrzeugtechnik – Uptime Engineering



## Integriertes Verkehrsunternehmen

**9000** Mitarbeiter\*innen      **1200** km Linienlänge      **19** Werkstätten  
**164** U-Bahn Züge      **483** Straßenbahnen      **439** Busse



## Beratung und Software

für Zuverlässigkeit im gesamten  
Produkt-Lebenszyklus



**UPTIME SOLUTIONS™** | Reliability Software Suite



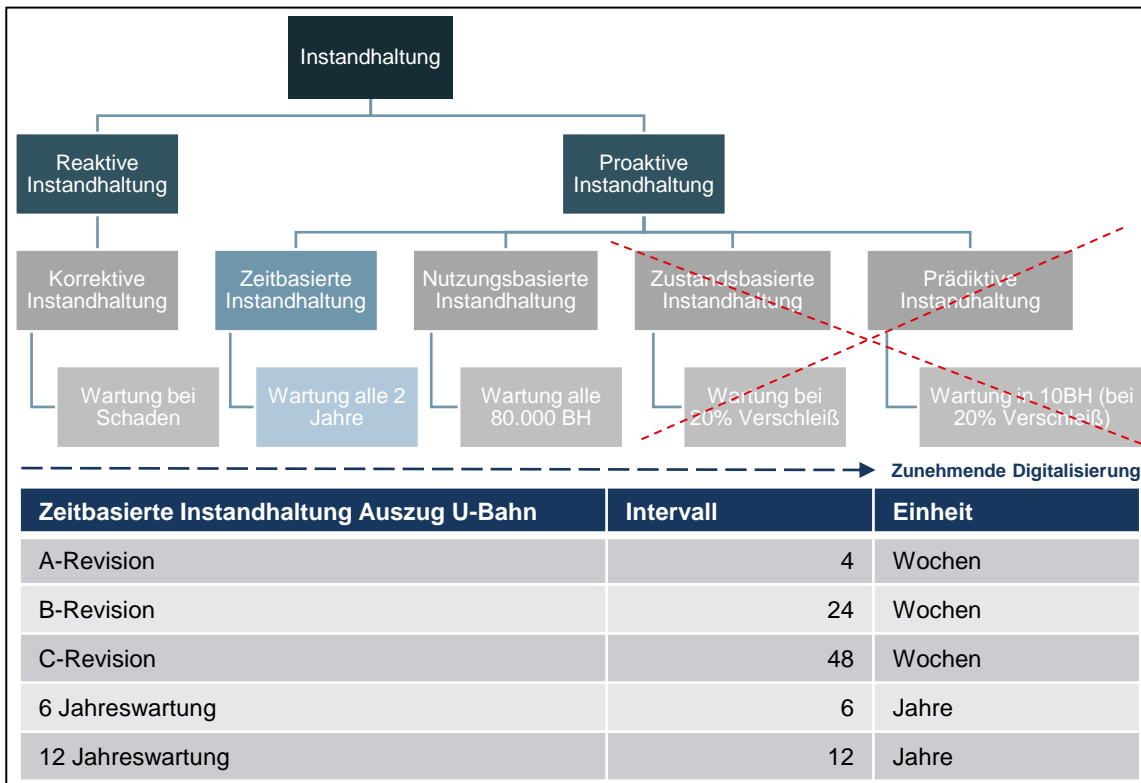
## Methodik und operative Unterstützung

- für Produktentwicklung und –validierung
- für Flottenüberwachung und Analytik

12 Mitarbeiter in Graz, seit 2010

über 100 Projekte und Software-Anwendungen  
für PKW, NFZ, Baumaschinen, Windturbinen,  
Haushaltsgeräte, Vollbahn, U-Bahn

# Ausgangssituation



## Problemstellung

- Grenzen des KVPs zur Störungsreduktion erreicht
- Neue Fahrzeuggenerationen liefern Daten
- Sicherheit, Zuverlässigkeit & Kosten im Spannungsverhältnis

## Condition-Based Maintenance

## Potential

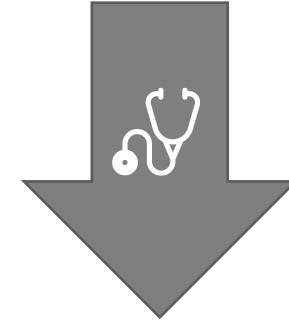
- Lebensdauer einzelner Komponenten maximieren → Asset Ausnutzung
- Materialeinsparungen → Umwelt, Kosten
- Störungen im Fahrbetrieb verhindern → Sicherheit, Zuverlässigkeit, Kosten

# Aufgabenstellung

- **Proof of Concept einer Methodik** zur Einführung von Condition Based Maintenance (CBM) Aktivitäten
- CBM-Methodik soll **Störungen mit betrieblicher Auswirkung**, sprich mit Fahrgastbezug, reduzieren
- Aussage über die **Rentabilität eines CBM-Retrofittings** der Bestandsflotte



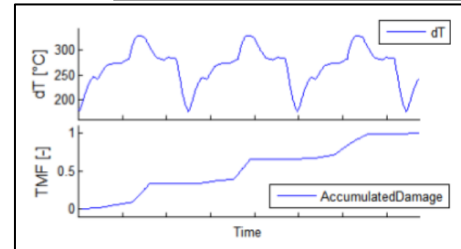
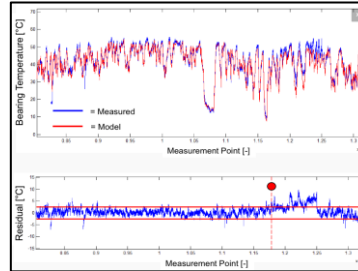
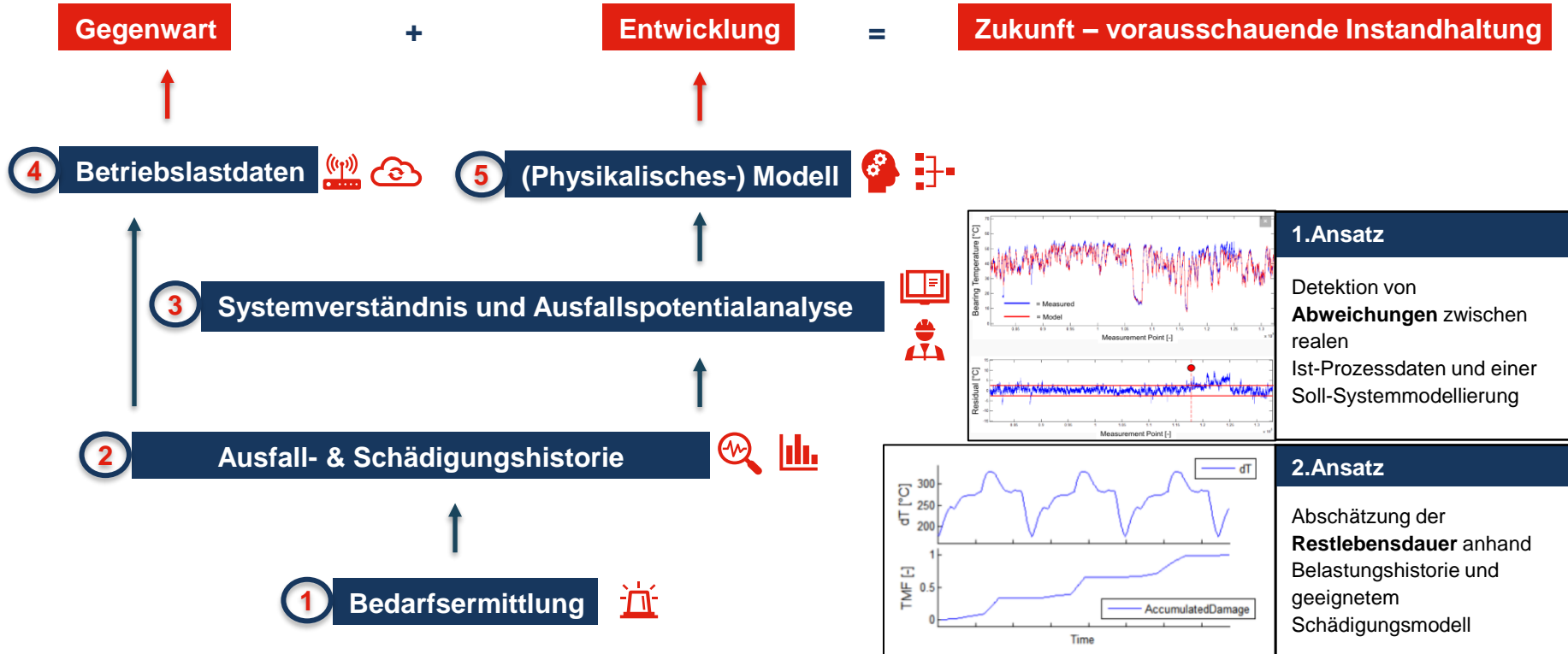
Von korrektiven ...



... zu prädiktiven Eingriffen



# Methodischer Ansatz



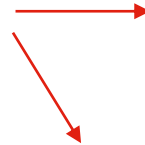
# 1. Bedarfsermittlung

## Mittel und Kriterien zur Identifikation der Systeme mit größtem Potential/Bedarf

1. Aktuelle **Kennzahlen** der Instandhaltung (Mean Distance Between Failure (MDBF), Zuverlässigkeit etc.)
2. Detaillierte Analyse des **Ausfallgeschehens einzelner Systeme** (Sicherheitsrelevanz, Ausfallfrequenz, Störungsbehebungsaufwand etc.)
3. Sinnhaftigkeit einer **CBM-Aktivität** (Dauer des zukünftigen Einsatzes und technologische Entwicklung)



V-Zug Systeme
Druckluft
Antrieb-/Bremsssystem
Spannungsversorgung
...
...
...
...
...
...



Probleme
<ul style="list-style-type: none"><li>• Höchste % der V-Zug-Störungen</li><li>• Sicherheitsrelevant</li></ul>

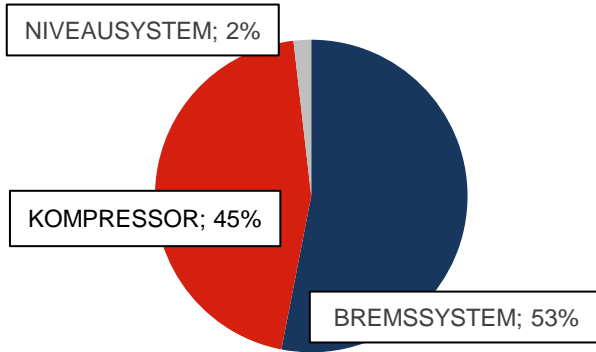
System	Subsysteme	Aufgabe
Druckluft	Kompressor	Druckluftherzeugung
	Niveausystem	Luftfederung – Niveau regulieren
	Bremsssystem	Elektropneumatische Bremse



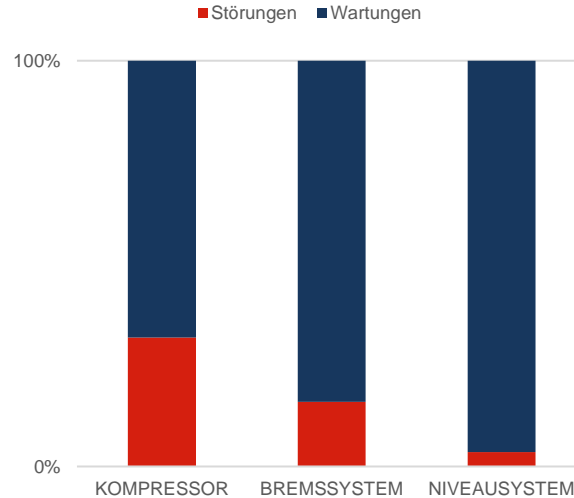
## 2. Ausfalls- & Schädigungshistorie



### Störungsmeldungen



### Verhältnis Wartung - Störung



### Physikalische Schädigungen



→ Auswahl „Kompressor“ als CBM-Kandidat



# 3. Systemverständnis & Ausfallspotentialanalyse

Steuerwagen 1

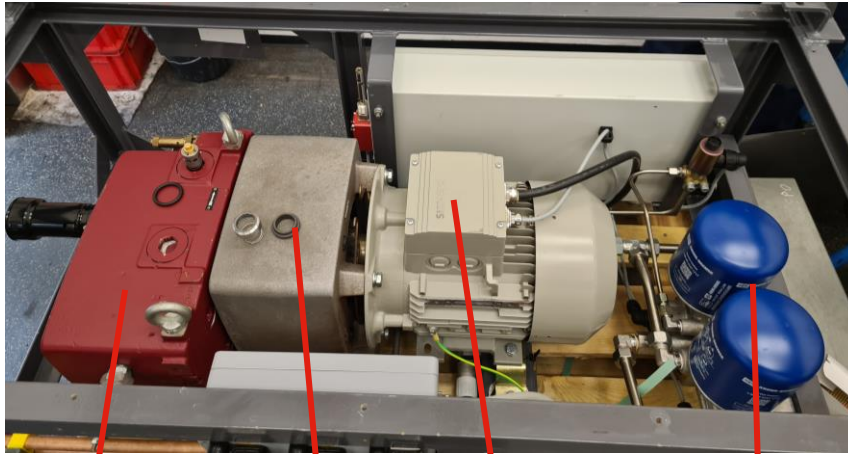
Motorwagen 1

Motorwagen 2

Motorwagen 3

Motorwagen 4

Steuerwagen 2



Kupplung

Flügelzellenkompressor

Drehstrommotor

Lufttrockner

## Allgemeine Information zur Funktion

- 2 Kompressormodule pro Fahrzeug
- Redundanz: Je Fahrtrichtung arbeitet nur ein Kompressor
- Betriebsdruck: 6,5 – 8 bar
- Nur ein Betriebszustand, sprich nur An-Aus

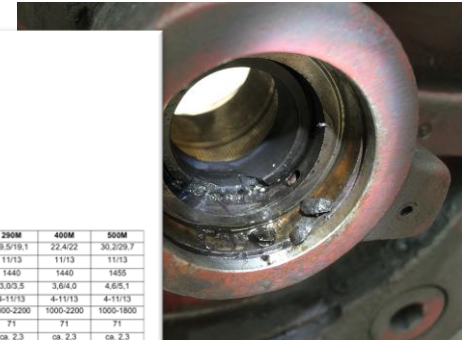
FB-F24-003\_01  
Prüfprotokoll Druckluftkompressoren  
ROL M500A

SAP. Nr.: 104036051  
Name: Experte Alibi  
Dienst-Nr.: 23887  
Werkstoffe: F54a/W53 Tel.: 54332  
Bereitgestellt: ☐  
Zusammenfassend: gemacht

Leistet in Minuten: 60  
Gesamter Temperatur in Celsius: 100  
Anmerkung: Service, Lufttrockner und Druckwächter ein.

2.1 Maschinendaten  
Auf dem Typenschild jeder Maschine finden Sie neben der Maschinen-Nr. die wichtigsten Daten.

Daten der Typenreihe	Typ	190M	280M	290M	400M	500M
Rotationsverdichter						
Volumenstrom $l/min$	10.2/10	15.5/15.2	19.5/19.1	22.4/22	30.2/29.7	
Enddruck (abs.) $bar$	11/13	11/13	11/13	11/13	11/13	
Drehzahl $min^{-1}$	1400	1400	1440	1440	1400	
Leistungsbedarf an der Welle $kW$	2.0/2.2	2.7/3.0	3.0/3.5	3.6/4.0	4.6/5.1	
Enddruckbereich (abs.) $bar$	4-11/13	4-11/13	4-11/13	4-11/13	4-11/13	
Drehzahlbereich $min^{-1}$	1000-2200	1000-2200	1000-2200	1000-2200	1000-1800	
Schalldruckpegel $dB(A)$	68	70	71	71	71	
Ölmenge $l/er$	ca. 2.3	ca. 2.3	ca. 2.3	ca. 2.3	ca. 2.3	
Restigehalt der Druckluft $mg/m^3$	<5	<5	<5	<5	<5	
Gewicht ohne Antriebmotor $kg$	ca. 68	ca. 68	ca. 68	ca. 68	ca. 68	



### 3. Systemverständnis & Ausfallspotentialanalyse

Fehlermodus	Bauteilort	Ursache-Wirkungs-Kette	Schädigende Betriebsweisen	Verschärfende Randbedingungen	Schädigungsmodelle	Messgrößen
<b>Verschleiß</b>	Kompressor - Stirnfläche	Thermische Deformation oder Fehljustierung Achse, erhöhte Reibarbeit an Stirnfläche	Intermittierender Betrieb	Extreme Umgebungstemperaturen und externe Temperaturzyklisierung	Reibweg unter Temperaturzyklisierung Startzähler	<b>Laufzeit Kompressor Startanzahl Umgebungstemperatur</b>
<b>Thermische Alterung</b>	Kompressor – Thermostat-Wachselement	Thermische Alterung des Wachselements, Kein Wechsel auf großen Kühlkreislauf, Überhitzung	Hoher Druckluftbedarf	Hohe Umgebungstemperatur, schlechte Konvektion	Arrhenius (Öltemperatur)	<b>Öltemperatur</b>
<b>Korrosion</b>	...	<b>Gewünschte Messgrößen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betriebszustände: Motor, Lüfter, Thermostat</li> <li>▪ Laufzeit Kompressor</li> <li>▪ Temperaturen: Öl, E-Motor, Druckluftbehälter</li> <li>▪ Feuchtigkeit im Druckluftbehälter</li> <li>▪ Druck im System</li> <li>▪ Leistungsmessung Motor</li> <li>▪ Last auf den Drehgestellen</li> </ul>			...	...

# 4. Betriebslastdaten

## Aufzeichnung

- Keine Sensor-Datenaufzeichnung bei Bestandsflotte
- Installation von Datenlogger an Fahrzeugbus
  - Ein V-Zug / 2 Monate Aufzeichnung
  - Datenprozess nicht automatisiert → Manuelles Auslesen per SD-Karte
  - XML-Datenformat aufwendig zu konvertieren
  - Keine Metadaten zu Messgrößen

```

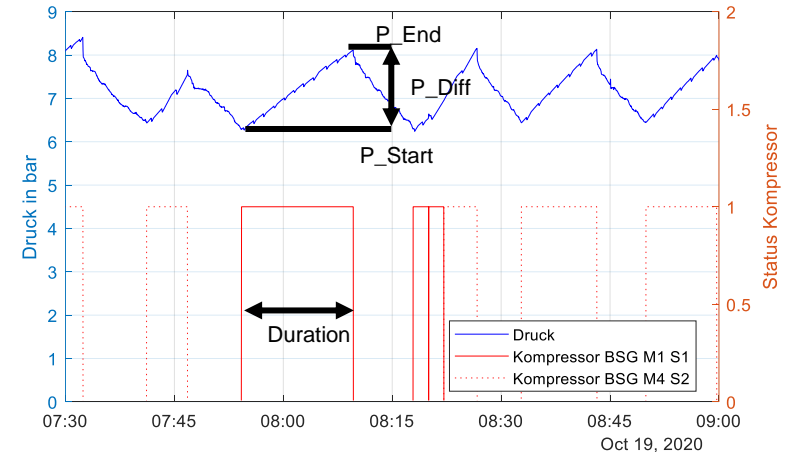
190 <var name="BSG M3/Lastsignal M3.LASTSIGNAL_M" no="1046" />
191 <var name="BSG M3/Lastsignal M3.LASTSIGNAL_M_GUELTIG" no="1047" />
192 <var name="BSG M4/Lastsignal M4.LASTSIGNAL_M" no="1292" />
193 <var name="BSG M4/Lastsignal M4.LASTSIGNAL_M_GUELTIG" no="1293" />
194 <var name="BSG M4/Lastsignal S2.LASTSIGNAL_S" no="1294" />
195 <var name="BSG M4/Lastsignal S2.LASTSIGNAL_S_GUELTIG" no="1295" />
196 </variable_mapping>
197 <data>
198 <e ts="2021-01-13T14:13:54.969">
199 <a var="4612" val="0x012d" />
200 <a var="4624" val="0x0002c8ac" />
201 <a var="4608" val="0x104b" />
202 <a var="4623" val="0x5fff0024" />
203 <a var="4701" val="0x012d" />
204 <a var="4713" val="0x0002c8ac" />
205 <a var="4697" val="0x104b" />
206 <a var="4712" val="0x5fff0023" />
207 <a var="4045" val="1204" />
208 <a var="4140" val="1269" />
209 <a var="4235" val="1204" />
210 <a var="3950" val="1196" />

```

length: 5,122,949 Ln: 1 Col: 1 Sel: 0 | 0 Unix (LF) ANSI INS

## Messgrößen

- Ausgewählte Messgrößen**
  - Druck im System
  - Bremsdruck
  - Fahrzeuglast & -geschwindigkeit
  - Ein/Aus-Signale der Kompressoren
- Berechnete Messgrößen**
  - Laufzeit Kompressoren
  - Einschaltdruck
  - Ausschaltdruck
  - Aufpump-Druckdifferenz
- Nicht vorhandene Messgrößen**
  - Temperaturen: Öl, E-Motor, Druckluftbehälter
  - Feuchtigkeit im Druckluftbehälter
  - Leistungsmessung Motor



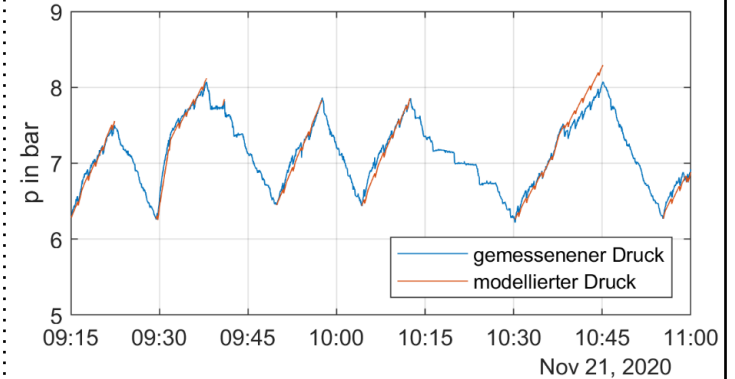
# 5. Modellierung: Systemmodell

## 1. Ansatz

Detektion von **Abweichungen** zwischen Ist-Daten und Systemmodell

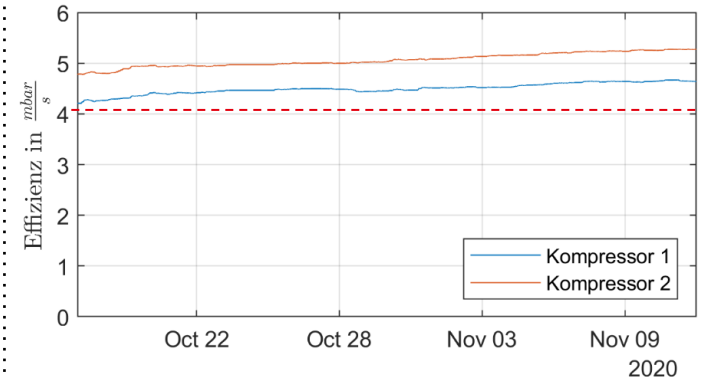
### Systemmodell

- **Systemmodell des Aufpump-Prozesses**
  - Annahme einer konstanten linearen Förderungsrate
  - Temperatureinflüsse werden vernachlässigt
  - Schätzung der IST-Systemparameter mittels Kalman Filter
- **Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systemmodells**
  - Eingang: Ein-/Aus-Signal der Kompressoren, Geschwindigkeit, Bremsdruck
  - Ausgang: Modellierter Druck im System



### Pumpeffizienz

- **Extrahierte Pumpeffizienz einzelner Kompressoren**
  - Unterschiedliche Pumpeffizienz der Kompressoren
  - Zeitlicher Trend zu höheren Pumpeffizienzen
- **Detektion der Abweichungen & Alarmierung**
  - Unterschreiten eines absoluten oder relativen Grenzwertes
  - Überschreiten einer erlaubten Änderungsrate

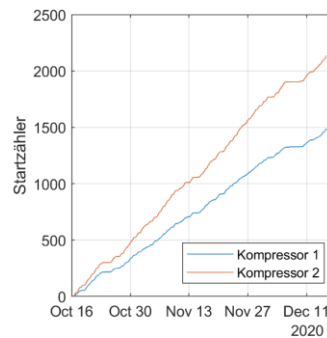
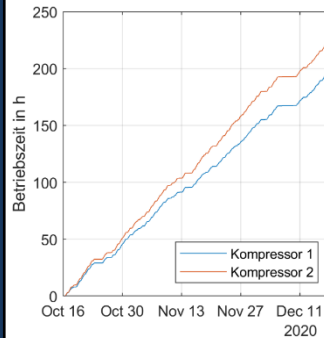


# 5. Modellierung: Schädigungsakkumulation

Beschreibung

Kompressor 2 hat  
**14% höhere Betriebszeit**  
**43% mehr Starts**

Diagramme

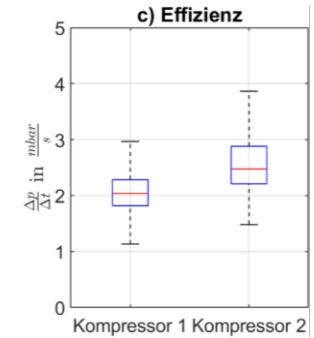
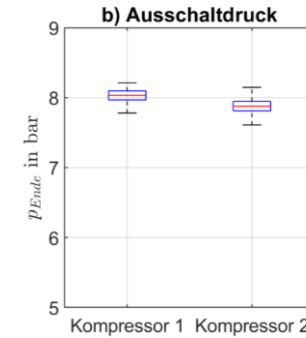
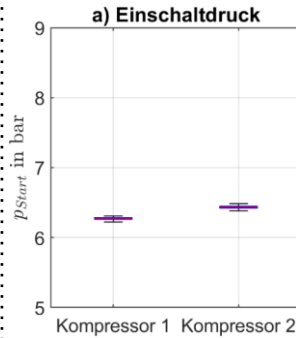


Unterschiedlicher Arbeitsbereiche (SOLL = 6,5 – 8 bar) & Effizienzen

Kompressor 1: **6,3 – 8,1 bar**

Kompressor 2: **6,4 – 7,9 bar**

Kompressor 2: **20% effizienter (mbar/s)**



Indikation

## ▪ Abschätzung der Restlebensdauer:

Modellierung der Lebensdauer mittels  
Schädigungsakkumulation durch Betriebszeit &  
Startanzahl und Kalibrierung durch Wartungsbefunde

## ▪ Identifikation schädigungstreibender Zustände:

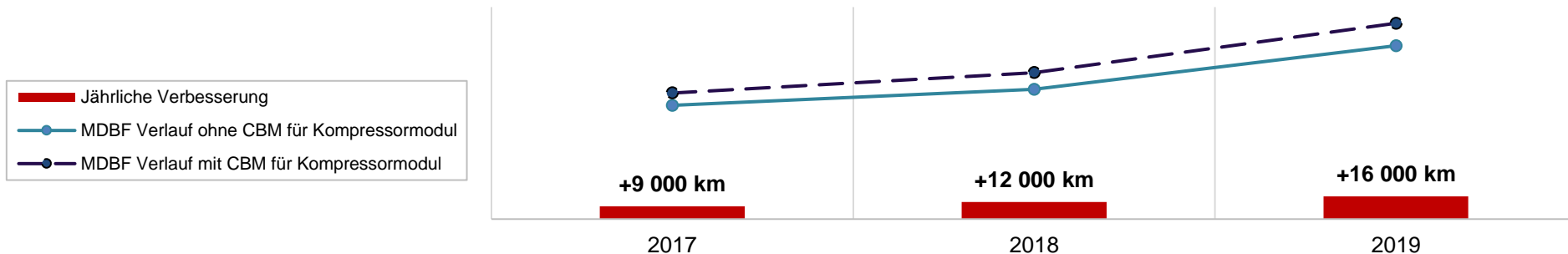
- Unterschiedliche Einstellung der Druckschalter → Anfälligkeit für Überhitzung bzw. Verschleiß
- Geringe Betriebszeit & Starts trotz niedriger Pumpeffizienz (Kompressor 1) → div. Defekte

# Ergebnis

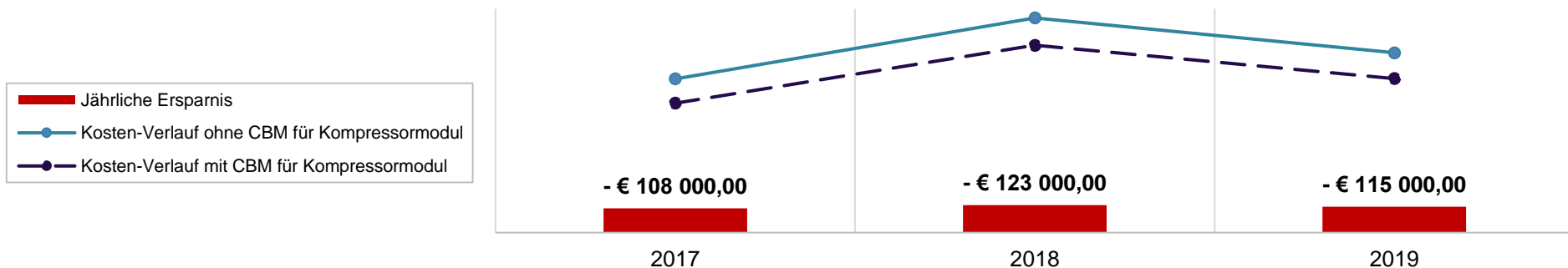
## Annahme

1. Predictive Maintenance NUR beim Druckluftsystem
2. Hochrechnung auf gesamte V-Zug Flotte
3. Treffsicherheit von 90%

### Mean Distance Between Failure (MDBF) für V-Zug



### Störungsbehebungskosten für V-Zug



# Fazit

## Ergebnisse *(PoC V-Zug Druckluftsystem)*

- ✓ Zuversichtliche Schädigungs- & Systemmodelle
- ✓ Retrofit ist rentabel → **+9000km** zw. 2 Störungen & **-100.000€ p.a.** Störungserhebungskosten

## Erfolgskriterien *(Learnings)*

- !! Die richtigen Daten erheben → Big Data ≠ Right Data
- !! System-/Domänen Wissen → Jedes System ist speziell

## Big Picture *(Skalierung auf CBM-taugliche Gesamtflotte)*

- 😊 - **rd. 33%** Störungen p.a.
- 😊 - **rd. 7,5 Mio.€** Störungsbehebung p.a.

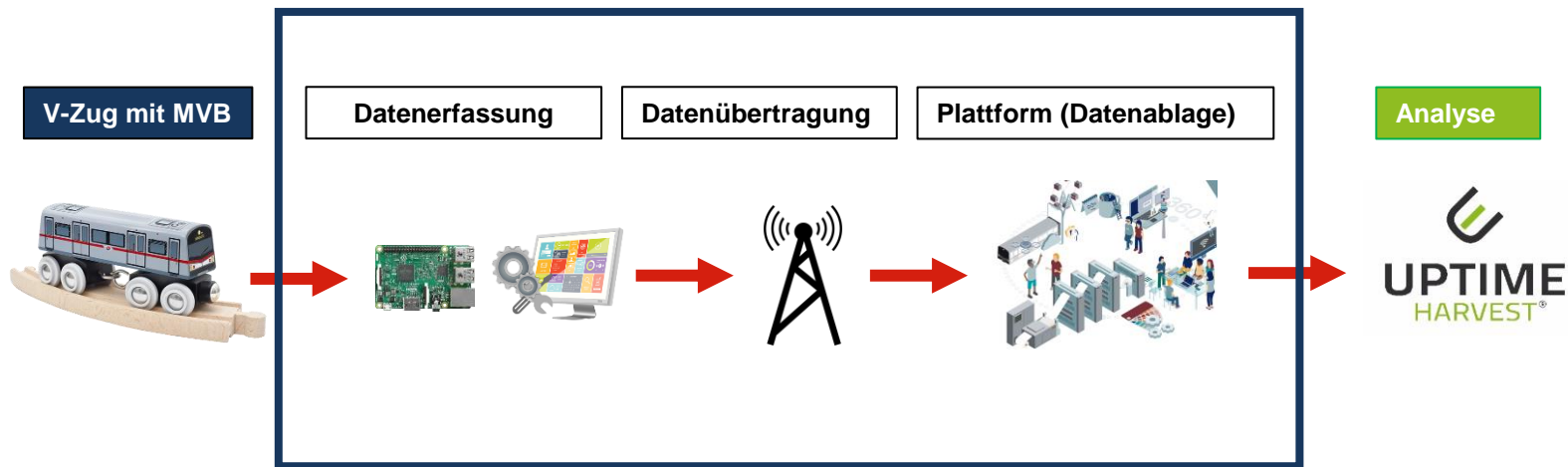




# Ausblick

## Automatisierung der PoC Lösung

- Ausweitung Datenerfassung und Monitoring auf 5 V-Züge
- Automatisierung des Datenprozesses
- Organisatorische Einbettung in den Wartungsprozess





**Die Stadt gehört dir.**

WIENER LINIEN | WIEN ENERGIE | WIENER NETZE | WIENER LOKALBAHNEN | WIPARK | WIEN IT  
BESTATTUNG WIEN | FRIEDHÖFE WIEN | UPSTREAM MOBILITY | FACILITYCOMFORT | GWSG

WIENER STADTWERKE GRUPPE