

# Predictive Maintenance in der Realität

*Von der Umsetzung bei der SBB zur Forschung an der ZHAW*



Wilfried Bürzle  
Ehemals SBB, jetzt ZHAW  
ZHAW, Institut für mechanische Systeme



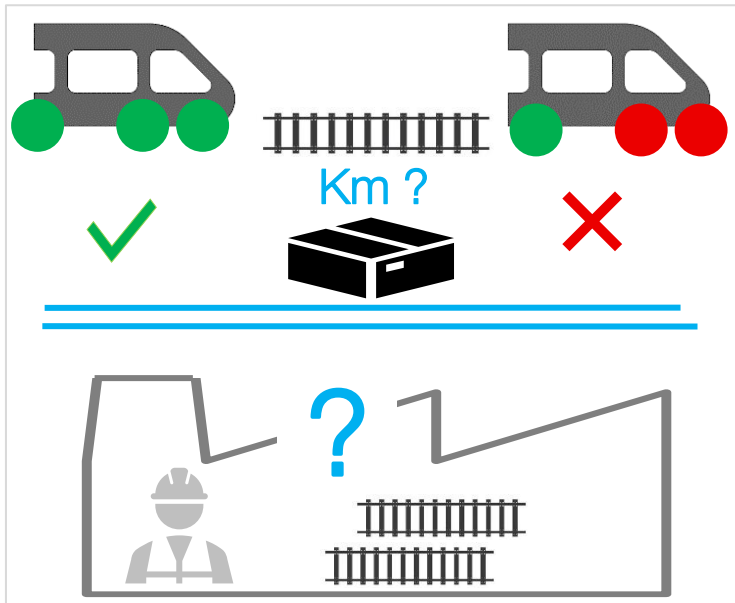
# Ziel: Radsatz Supply Chain im Griff. Mittels Zustandsdaten, neuer Instandhaltungsstrategien & gezielter Steuerung.

Früher



Black Box

- Instandsetzungs-Zeitpunkt & Ressourcenbedarf vorgängig unbekannt.
- Peaks. Supply Chain stockt.

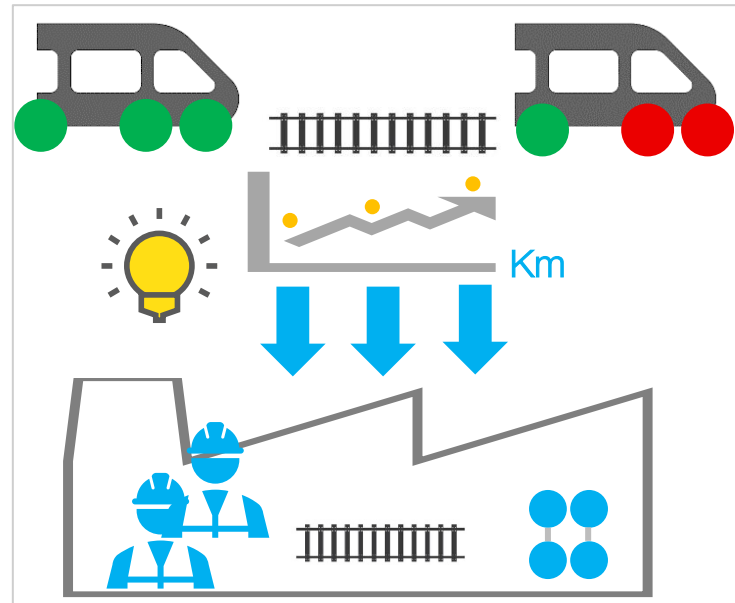


Aufgebaut



Transparenz

- Schadensverläufe & Ressourcenbedarf kennen.
- Handlungsfähig werden. Planbarkeit.



In Transition

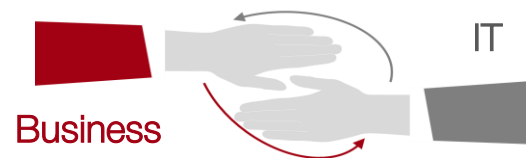
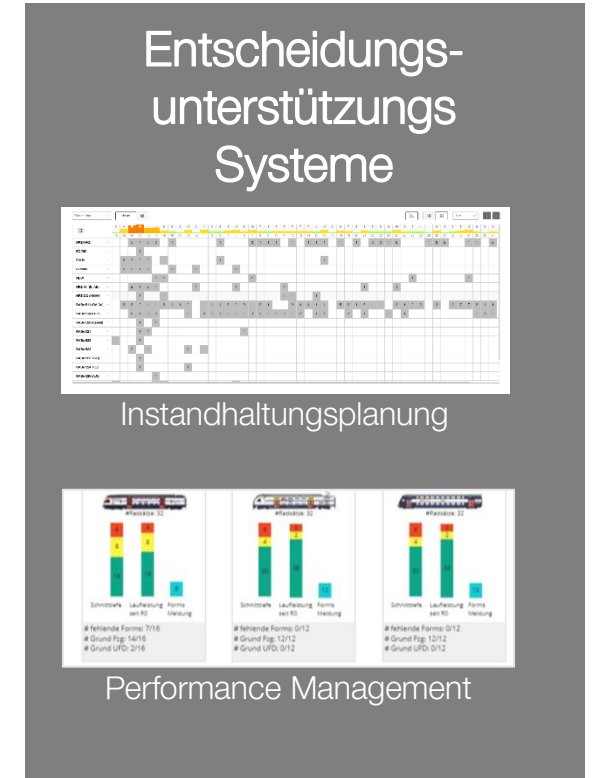
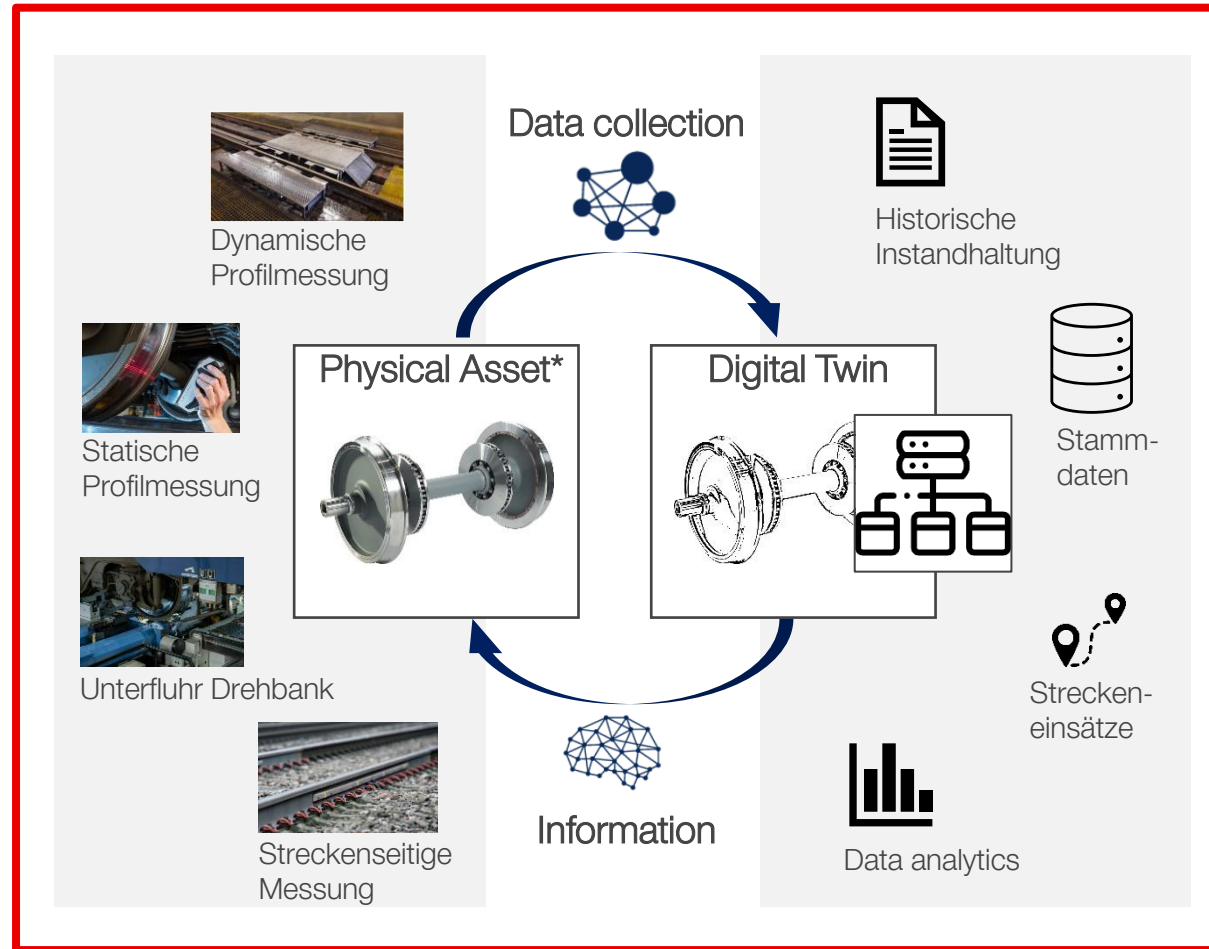
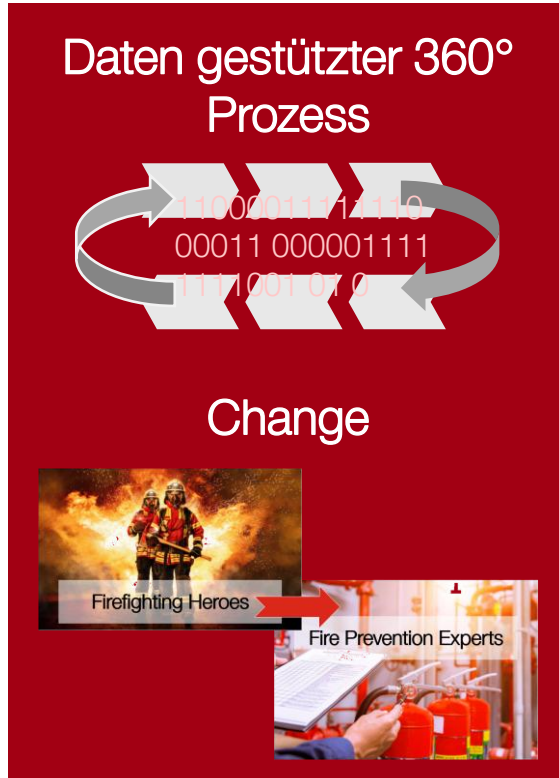
tinder

Matchen & Daraus lernen

- Supply Chain proaktiv steuern.
- Präventive Massnahmen bestimmen.
- Bedarfsgerecht dimensionieren.



# Realisierung der Vision durch drei wesentliche Elemente



# Fahrzeugkalender zeigt zukünftigen Instandhaltungsbedarf



## Fahrzeugkalender



	12	14	19	25	22	28	32	29	14	27	28	33	29	29	31	33	31
	KW 23	KW 24	KW 25	KW 26	KW 27	KW 28	KW 29	KW 30	KW 31	KW 32	KW 33	KW 34	KW 35	KW 36	KW 37	KW 38	KW 39
DPZ (Einzelfahrze...											1 Total 1 LDG						
DPZ (Komp)	1 Geplant	2 Total 2 Geplant 2 TDG 1 Fällig		1 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG 2 Fällig	2 Total 2 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG	1 Total 1 TDG			3 Total 3 TDG	3 Total 3 TDG	1 Total 1 TDG	4 Total 1 LDG 3 TDG	2 Total 1 TDG 1 T914	2 Total 2 TDG	2 Total 2 TDG
DPZ/HVZ	1 Total 1 TDG	1 Geplant			1 Total 1 LDG							1 Total 2 Fällig	1 Total 1 TDG		1 Total 1 TDG	1 Total 1 TDG	1 Total 1 LDG
DTZ	2 Total 1 Geplant 1 TDG 1 Fällig	1 Total 2 Geplant 1 TDG 1 Fällig	1 Geplant	1 Total 1 Geplant 1 LDG 2 Fällig	1 Fällig		1 Total 1 TDG			1 Total 1 TDG		1 Total 1 TDG		1 Total 1 LDG 1 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	1 Total 1 LDG	3 Total 2 LDG 1 TDG
ETR 610								1 Total 1 T913 1 T914		1 T901							
EWIV	2 Total 3 Geplant 1 LDG 2 Fällig	1 Fällig	1 Total 2 Fällig	3 Total 4 Fällig	1 Total 1 Fällig	3 Total 3 Fällig				1 Total 1 T913 1 T914						1 Total 1 T913 1 T914	1 Total 1 T913 1 T914
IC2000	3 Geplant 1 Fällig	1 Geplant	2 Total 1 T913 1 T914 4 Fällig	1 Total 2 Fällig	1 Total 1 LDG	2 Total 2 Fällig	1 Total 1 T913 1 T914				1 T914		3 Total 4 T913 3 T914	1 Total 1 T914	1 Total 1 LDG	1 Total 1 T913	1 Total 1 LDG 1 T913 1 T914
ICN	3 Geplant	1 Geplant 2 Fällig							1 TDG					1 Total 2 T913 2 T914	1 Total 1 TDG		
NPZ	3 Total 1 Geplant 2 LDG 1 TDG	1 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG	4 Total 1 LDG 3 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	1 Total 1 LDG	1 Total 1 LDG	2 Total 2 TDG	1 Total 1 LDG 1 TDG	3 Total 1 LDG 2 TDG		2 Total 1 LDG 1 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	3 Total 1 LDG 4 TDG	3 Total 3 TDG	4 Total 4 TDG
RABDe/RABe 502	2 Geplant 1 Fällig	1 Total 4 Geplant 1 TDG 3 Fällig	1 Total 1 Fällig	1 Total 1 LDG 2 TDG		1 Total 1 LDG	4 Total 4 TDG		1 Total 1 TDG		4 Total 4 TDG	3 Total 3 TDG 1 T914	2 Total 2 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG 1 T913	1 TDG	2 Total 2 LDG	1 Total 1 LDG
RABe 501	1 Geplant																
RABe 503	1 Geplant			1 Total 1 T913 1 T914		1 T901 1 T913 1 T914			1 T901 1 T913 1 T914		1 Total 1 T901 1 T913 1 T914		1 T901 1 T913 1 T914				
RABe 511	3 Geplant	1 Total 4 Geplant 6 Fällig	1 TDG 1 Fällig	3 Total 2 TDG 2 Fällig	2 Total 2 TDG	1 Total 1 LDG 1 TDG	3 Total 3 TDG	2 Total 2 TDG	2 Total 2 TDG		1 Total 1 TDG	3 Total 1 LDG 3 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	1 T913 1 T914	1 Total 1 TDG	1 Total 1 LDG 1 TDG	3 Total 4 TDG

# Fahrzeugkalender zeigt zukünftigen Instandhaltungsbedarf



## Fahrzeugkalender



Filter

Heute



Fahrzeuge

Flotten

120 Tage



	12	14	19	25	22	28	32	25	14	27	28	33	25	29	31	33	31
	KW 23	KW 24	KW 25	KW 26	KW 27	KW 28	KW 29	KW 30	KW 31	KW 32	KW 33	KW 34	KW 35	KW 36	KW 37	KW 38	KW 39
DPZ (Einzelfahrze...											1 Total 1 LDG						
DPZ (Komp)	1 Geplant	2 Total 2 Geplant 2 TDG 1 Fällig		1 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG 2 Fällig	2 Total 1 TDG 1 Fällig	2 Total 2 TDG	1 Total 1 TDG			3 Total 3 TDG	3 Total 3 TDG	1 Total 1 TDG	4 Total 1 LDG 3 TDG	2 Total 1 TDG 1 T914	2 Total 2 TDG	2 Total 2 TDG
DPZ/HVZ	1 Total 1 TDG	1 Geplant			1 Total 1 LDG							1 Total 2 Fällig	1 Total 1 TDG		1 Total 1 TDG	1 Total 1 TDG	1 Total 1 LDG
DTZ	2 Total 1 Geplant 1 TDG 1 Fällig	1 Total 2 Geplant 1 LDG 1 Fällig	1 Geplant	1 Total 1 Geplant 2 Fällig	1 Fällig		1 Total 1 TDG			1 Total 1 TDG		1 Total 1 TDG		1 Total 1 LDG 1 TDG	2 Total 1 LDG 1 TDG	1 Total 1 LDG	3 Total 2 LDG 1 TDG
94 85 0514061-6 DTZ / At1 514 LDG: 25.5.24 TDG: 28.8.25 RSL: 17.1.26 RST: 18.11.28 R0: 25.6.24 T913: 01.1.26 T914: 01.1.26				R0 Fällig													
94 85 0514007-9 DTZ / At1 514 TDG: 27.9.24 RST: 05.1.28 R0: 05.6.24 T913: 16.2.25 T914: 16.2.25	R0 Fällig																R0 TDG
94 85 0514004-6 DTZ / Bt4 514 TDG: 08.6.24 RST: 27.6.29 T913: 03.6.25 T914: 03.6.25	R0 TDG																
94 85 0514048-3 DTZ / B2 514 LDG: 12.6.24 RSL: 30.1.31 T913: 05.2.28 T914: 05.2.28		R0 LDG															
94 85 0514016-0 DTZ / At1 514 TDG: 16.7.24 RST: 30.7.28 T913: 20.12.25 T914: 20.12.25							R0 TDG										
94 85 0514057-4 DTZ / B3 514 LDG: 29.9.24 TDG: 09.8.24 RSL: 30.4.26 RST: 10.5.29 T913: 20.7.26 T914: 20.7.26										R0 TDG							R0 LDG




94 85 0514061-6 (RABe 514 (DTZ)/ At1 514)

Sicht R0 andere Instandhaltung

⌵



R0 PlanenR0 löschen

			
94 85 1514061-4	94 85 2514061-2	94 85 3514061-0	94 85 4514061-8
<div><div>TDG1</div><div>TDG2</div></div>	<div><div>LDG1</div><div>LDG2</div></div>	<div><div>LDG2</div><div>LDG1</div></div>	<div><div>TDG2</div><div>TDG1</div></div>
<div><div>12</div><div>34</div></div>	<div><div>1234</div></div>	<div><div>4321</div></div>	<div><div>4321</div></div>
<div><div>TRS1 TRS2</div><div>TRS2 TRS1</div></div>	<div><div>LRS1 LRS2</div><div>LRS2 LRS1</div></div>	<div><div>LRS1 LRS2</div><div>LRS2 LRS1</div></div>	<div><div>TRS1 TRS2</div><div>TRS2 TRS1</div></div>
<div>-</div>	<div>-</div>	<div>-</div>	<div>-</div>
<div>25. Juni 2425. Juni 24</div>	<div>-</div>	<div>-</div>	<div>-</div>
<div>31. Aug. 2528. Aug. 25</div>	<div>25. Mai 2410. Sept. 25</div>	<div>15. Okt. 2614. Juli 24</div>	<div>4. Sept. 2529. Aug. 25</div>
<div>12'01412'014</div>	<div>-5'023255'265</div>	<div>475'20722'593</div>	<div>252'071248'486</div>
<div>918918906907</div>	<div>879876915915</div>	<div>895895882878</div>	<div>896896917917</div>
<div>R0R0</div>	<div>R0R0</div>	<div>R0R0</div>	<div>R0R0</div>
<div>367'975367'975</div>	<div>242'583242'583</div>	<div>242'583242'583</div>	<div>367'975551'835</div>
<div>78'14178'141</div>	<div>210'302210'302</div>	<div>210'302210'302</div>	<div>78'14178'141</div>
<div>n. V.</div>	<div>n. V.</div>	<div>n. V.</div>	<div>n. V.</div>
<div>-</div>	<div>-</div>	<div>-</div>	<div>-</div>
<div>-</div>	<div>-</div>	<div>-</div>	<div>-</div>
<div>🔧🔧</div>	<div>🔧🔧</div>	<div>🔧🔧</div>	<div>🔧🔧</div>

Details

S1-R0 Meldungen

✉ 2024-04-18

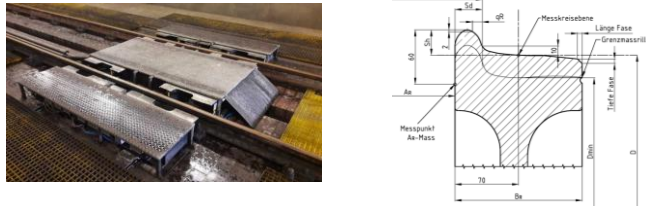
+Radsatz WE1R Nebengeräusche

# Prognosemodelle: von klassischer Statistik zu Machine Learning

## Profilverschleiss

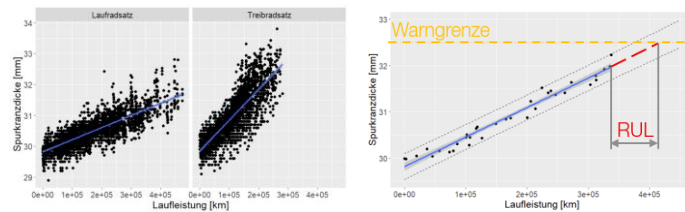
Ziel: Prognose der verbleibenden Einsatzdauer (RUL) bis Warngrenze

Daten: Radsatz Profilmessung



Prognosemodell:

- Multivariate Regression
- Berücksichtigung von fünf Profildimensionen, Laufleistung, Radsatztyp



→ Einfach, robust, interpretierbar

## Laufflächendefekte

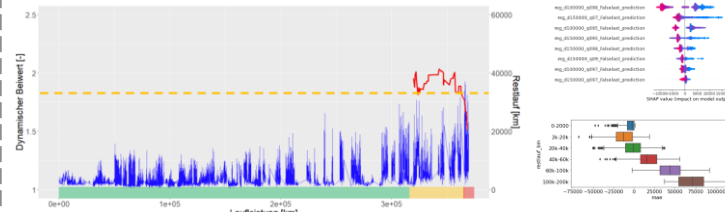
Ziel: Erkennung von Laufflächenschäden und Prognose der verbleibenden Einsatzdauer

Daten: Dyn. Beiwert



Prognosemodell:

- Manuelles Feature Engineering über gleitendem Fenster
- LightGBM Regressor

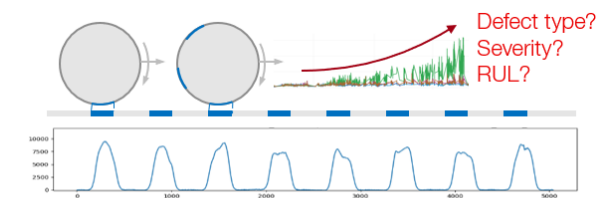


→ Rechenintensiv, komplex

## Schadensdiagnose und -prognose

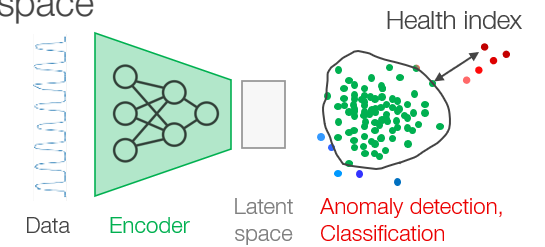
Ziel: Erkennung, Klassifikation, Bewertung und Prognose von Schäden

Daten: DMS, Beschleunigung



Prognosemodell:

- Feature Engineering mittels Autoencoder
- Anomalie Erkennung und Klassifikation in latent space



→ Vielversprechend, sehr komplex

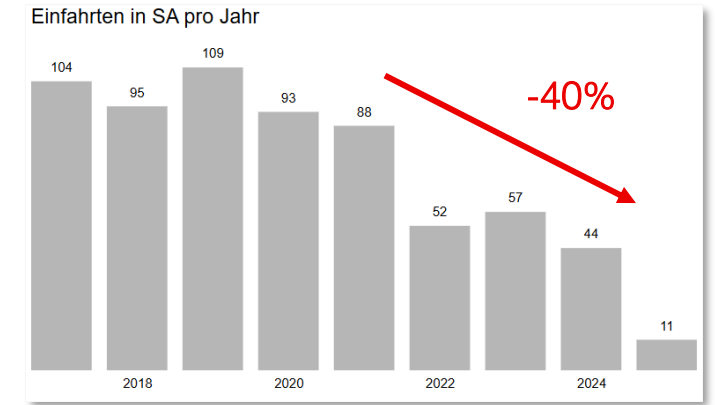
Rombach, K et al.. Contrastive Learning for Fault Detection and Diagnostics in the Context of Changing Operating Conditions and Novel Fault Types. *Sensors* 2021, 21, 3550.

# Prognosemodelle und Digitale Zwilling sind Mittel zum Zweck

**Erfolg:** Reduktion der Werkstattaufenthalte auf Allzeittief!

**Digitalisierung benötigt angepasste Geschäftsprozesse**

- Mehrwert durch aktive Steuerung der Prozesse
- Implementierung ist sehr interdisziplinär

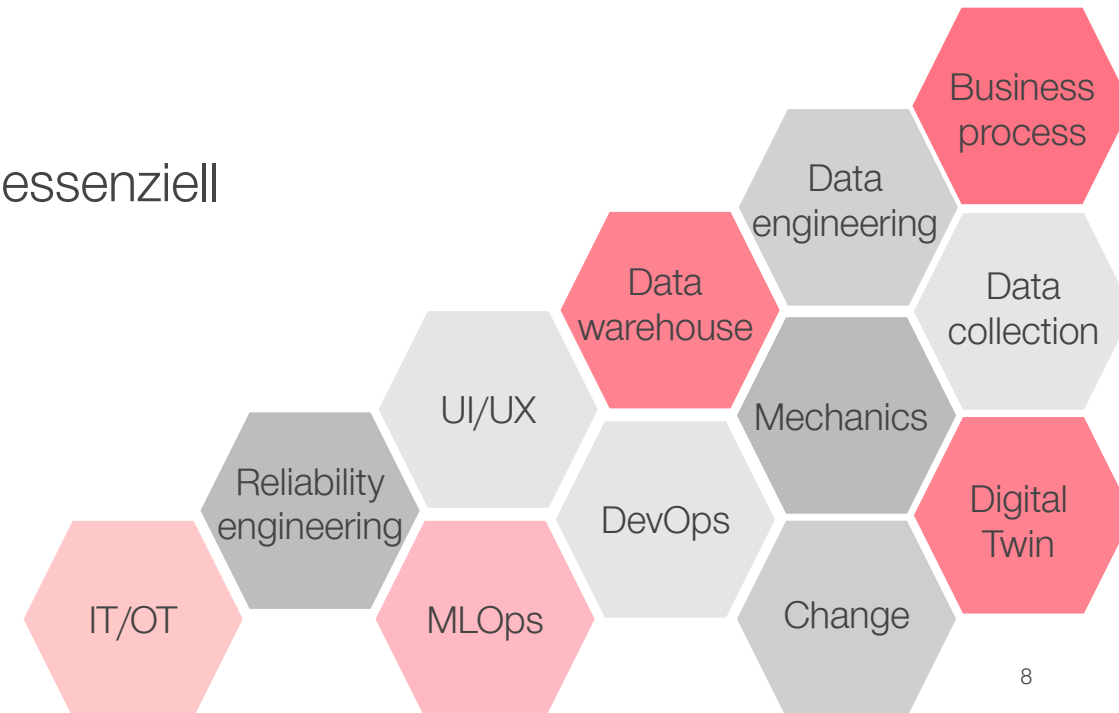


**Prognosemodelle generieren Mehrwert**

- Ermöglichen proaktive Planung und Steuerung
- Einfachheit, Robustheit und Interpretierbarkeit sind essenziell
- ... aber, statistische Modelle sind phänomenologisch, datengetrieben, nicht kausal

*"All the impressive achievements of deep learning amount to just curve fitting."*

Judea Pearl





# Kausales Verständnis nötig, um Probleme ursächlich zu lösen

Rollkontaktermüdung (RCF) ist bei einigen Flotten eine **Herausforderung**

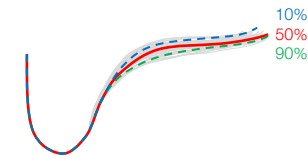
- Betrifft “nur” 5% der Radsätze, verursacht aber 90% der Radsatzbearbeitungen
- Defekte geschehen “irgendwann”, schwierig zu prognostizieren → Reaktive IH
- Detailliertes Verständnis von Rollmaterial, Infrastruktur und Einsatzbedingungen notwendig → ganzheitliche Bewertung unter spezifischen Gegebenheiten



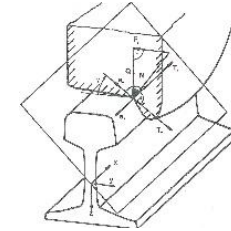
## Rollmaterial



Profilmessung



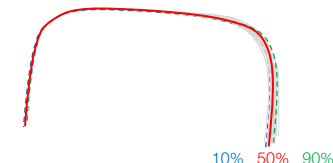
Profilverschleiss und Schadensstatistik



## Infrastruktur

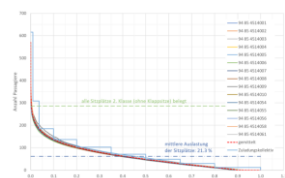
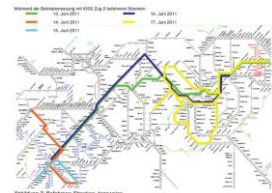


Diagnosefahrzeug

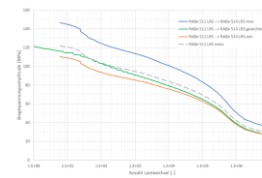


Gleisstatistik

## Einsatzbedingung



Belastung



Beanspruchung

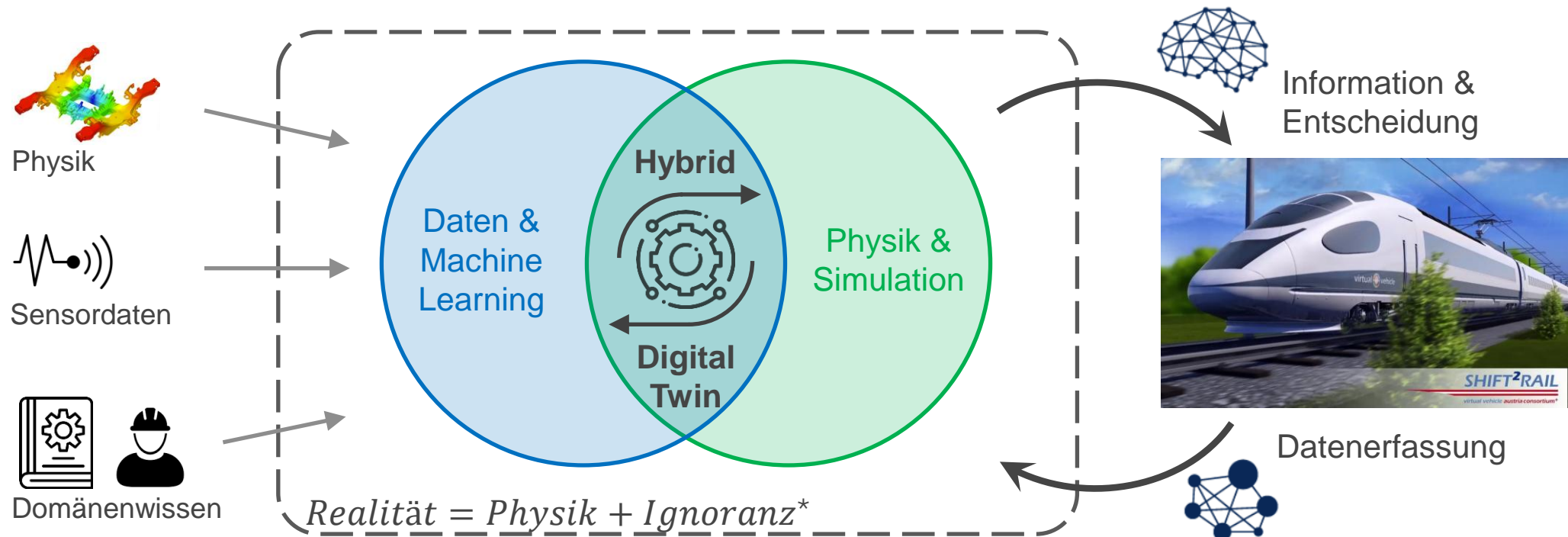
## RCF Assessment

- Mehrkörper-System Dynamik
- Kontaktmechanik mit repräsentativer Rad-Schienen Paarung
- Ermüdungsmodelle (Rissinitiierung) für Bewertung

# Hybride digitale Zwillinge für zustandsbasierte & prädiktive Instandhaltung mit mehr Kausalität

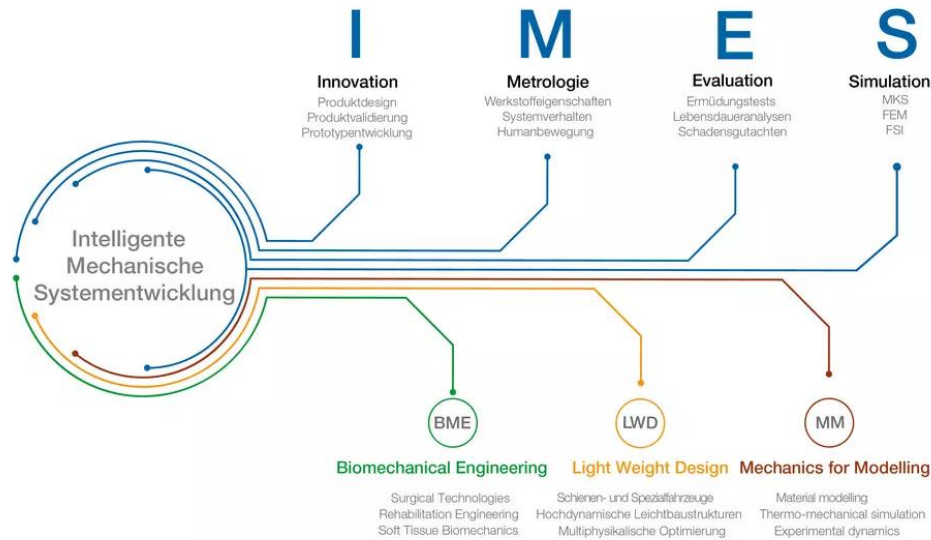
## Hybride Digitale Zwillinge für Zustandsbeschreibung, Diagnose, Prognose, Optimierung

- Hybride digitale Zwillinge kombinieren Physik und Machine Learning
- In Realität:
  - Wenig Sensorik, wenig Daten
  - Wenig, gut dokumentierte Schäden
  - Fehlende Betriebszustände in Daten



## 3 Fachbereiche, 35 Mitarbeitende

- Strukturmechanik, Simulation und Optimierung
- Schienenfahrzeugtechnik



<https://www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/imes>

## Leistungsbereiche & Zusammenarbeit

### 1) Bachelorstudium Maschinentechnik

- Ausbildung: Technische Mechanik, FEM, Leichtbau
- Vertiefung: Mechanische Schienenfahrzeugtechnik

### 2) Weiterbildung

- **CAS Mechanische Schienenfahrzeugtechnik**, zusammen mit CH-Bahnbranche

### 3) Projekte im Drittmittelgeschäft

- Dienstleistungen:
  - Gutachten zu Festigkeit
  - Schadensanalysen
  - Betriebslastmessung
- Angewandte Forschung & Entwicklung
  - Zusammen mit Industriepartnern
  - Unterstützt durch Innosuisse, Eureka, etc.

### 4) Studienarbeiten

- Ca. 20 Studienarbeiten (Bachelor, Master) pro Jahr

# CAS Mechanische Schienenfahrzeugtechnik

## Weiterbildung durch vier Module

- In enger Zusammenarbeit mit dem Verband öffentlicher Verkehr (VöV) entwickelt
- Module können auch als einzelne Weiterbildungen besucht werden

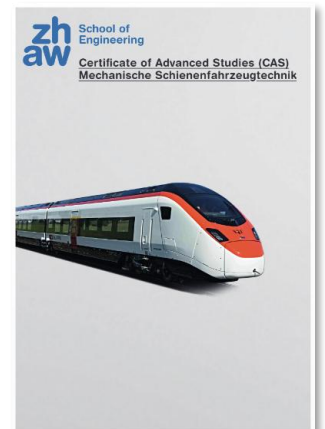
Modul	Inhalt
A: Grundlagen Schienenfahrzeuge und Betrieb	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einführung und Allgemeines, rechtliche Grundlagen</li><li>• Bewegungswiderstände von Schienenfahrzeugen</li><li>• Zugförderung, Z-v-Diagramm, Antriebscharakteristika</li><li>• Antriebstechnologien (Diesel und elektrisch)</li><li>• Bahnproduktion und Rollmaterial-Management</li></ul>
B: Mechanische Hauptkomponenten	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zug- und Stosseinrichtungen</li><li>• Drehgestelle und Radsätze</li><li>• Klimatisierung von Innenräumen</li><li>• Korrosionsschutz, Beschichtung, Aussenreinigung</li><li>• Wagenkasten und Festigkeit nach EN 12663 bzw. EN 15227</li><li>• Schweißen im Schienenfahrzeugbau EN 15085</li></ul>
C: Interaktion Rad-Schiene	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lichtraumprofil und Fahrzeugbegrenzungslinie</li><li>• Kräfte zwischen Schiene und Rad, Rad-Schiene-Kontakt</li><li>• Sinuslauf, Laufstabilität und Laufdynamik</li><li>• Bogenlauf und Gleisüberhöhung</li><li>• Entgleisen durch Aufklettern, Heumannscher Einser</li></ul>
D: Spezialesysteme	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bremseinrichtungen</li><li>• Einstiegsysteme</li></ul>

## Methodik

- Starker Praxisbezug durch Vorlesung, Exkursion, Gruppenarbeiten
- 50% Lehranteil IMES
- 50% externe Referenten aus der Bahnbranche (RhB, SBB, zb, Stadler, BAV)

## Kosten und Dauer

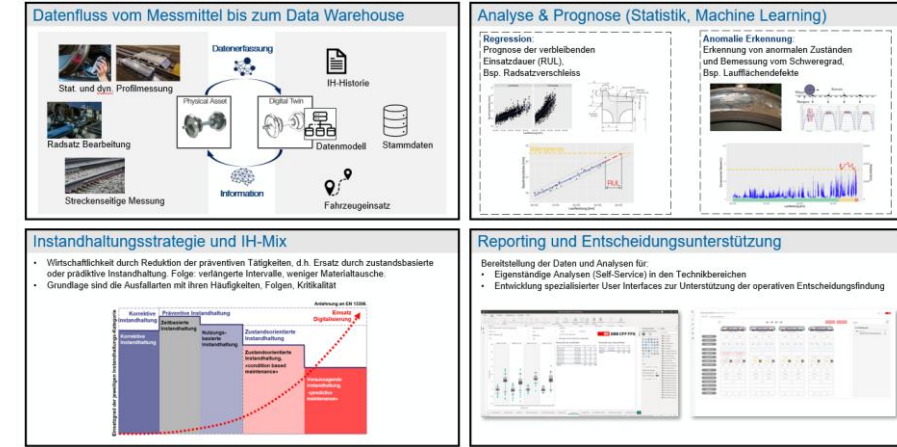
- Dauer: 6 Monate
- Umfang: 12 ETCS, d.h. 8 Lektionen pro Woche
- Kosten: CHF 6'900.-





# Predictive Maintenance in der Praxis

- 1) Predictive Maintenance ist viel mehr als nur ein Prognosemodell
  - Eine IH-Strategie eingebettet in einen IH-Mix
  - Massgebend sind Ausfallarten, Häufigkeiten und Folgen
  - Es braucht eine Methode (RCM, Reliability Engineering) zur Definition vom IH-Mix
- 2) Datenmanagement ist sehr komplex und aufwändig
- 3) Prozessgestaltung und Kultur der Veränderung
  - Vertrauen in Daten und Modelle
  - Agile Softwareentwicklung zwischen Business und IT
  - Veränderungswille und Führung sind notwendig







Danke, merci & grazie.

Zürcher Hochschule für  
Angewandte Wissenschaften

**School of Engineering**

IMES Institut für Mechanische Systeme

Dr. Wilfried Bürzle

Technikumstrasse 9  
Postfach  
CH-8401 Winterthur

Tel: +41 58 934 48 32

E-Mail: [wilfried.buerzle@zhaw.ch](mailto:wilfried.buerzle@zhaw.ch)  
[www.zhaw.ch/imes](http://www.zhaw.ch/imes)