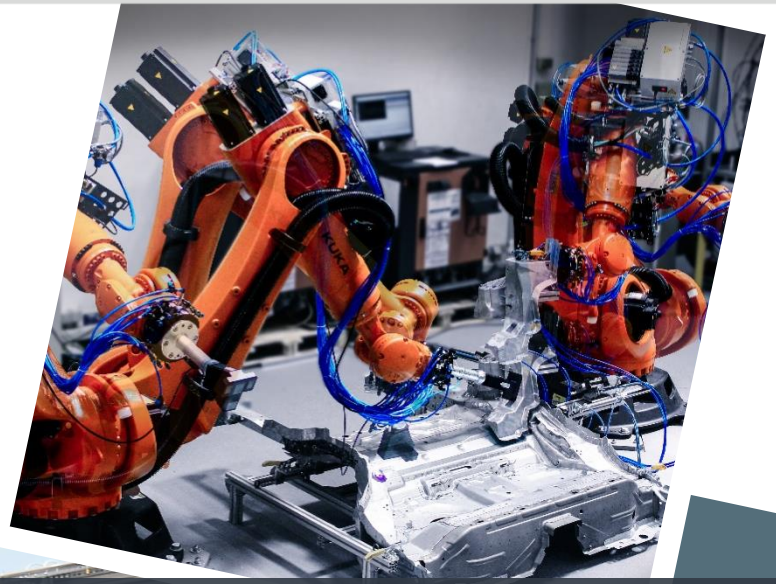
Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Produktionstechnik



ZUSTANDSÜBERWACHUNG MIT HILFE VON MASCHINELLEM LERNEN FÜR WERKZEUGMASCHINENKOMPONENTEN

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

AGENDA

Karlsruher Institut für Technologie

1 **Machine Learning als Strategie**

2 Machine Learning im Kontext der Produktionstechnik

3 Condition Monitoring in Werkzeugmaschinen - Bildbasierte Kugelgewindetriebüberwachung

MACHINE LEARNING ALS STRATEGIE

Potentiale und Bedenken

Karlsruher Institut für Technologie

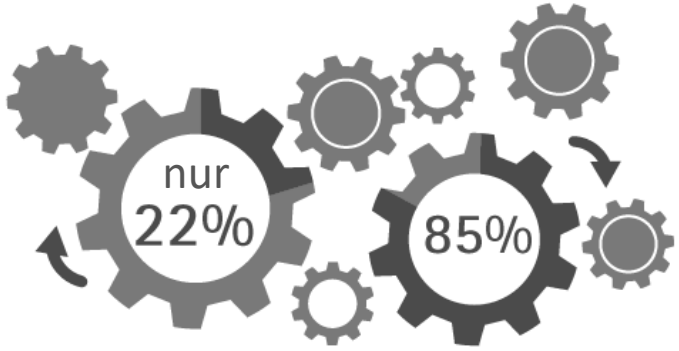
Die meisten Unternehmen erkennen das Potential

85%
erwarten ist Standard in Ihren Fabriken bis 2020

>50%
Erwarten bedeutende Produktivitätssteigerung als Ergebnis

62%
sagen, Sie wollen den Markt selbst mitgestalten

Die Umsetzung findet nur bedingt statt



Haben Maßnahmen zur Realisierung unternommen

beschreiben sich selbst eher als ‚Digitale Follower' oder Nachzügler statt Pioniere

Die meisten Unternehmen haben Vorbehalte

76%
sorgen sich um Datensicherheit

72%
sorgen sich um Systemanfälligkeit

70%
befürchten Mangel an ausgebildeten Fachleuten

Zahlen / Daten / Fakten

Google
hat seinen Energieverbrauch für die Kühlung von Rechenzentren um 40% gesenkt und erhält nun bei gleichem Energieaufwand die 3,5-fache Rechenleistung.

Netflix
Schätzt den Wert seiner personalisierten Empfehlungssoftware auf Basis von Machine Learning auf 1 Milliarde US-Dollar pro Jahr.

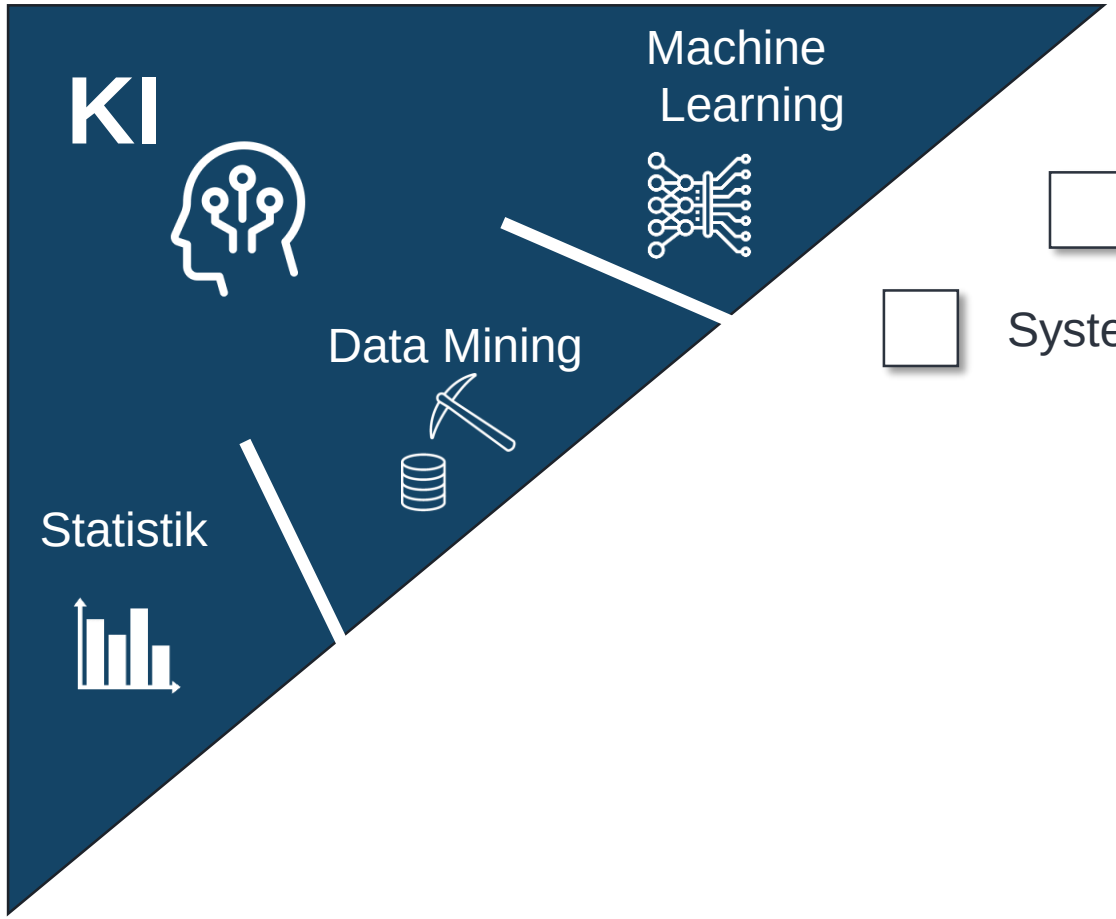
Amazon
hat die Click-to-Ship-Zeit um 225% verkürzt, so dass der
Versand am selben Tag aufgrund von Machine Learning möglich.

PWC
schätzt einen potenziellen Anstieg des globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP) um 14% (15,7 Billionen Dollar) als Folge von KI und Machine Learning bis 2030.

[1], [2], [3], [4], [5]

MACHINE LEARNING ALS STRATEGIE

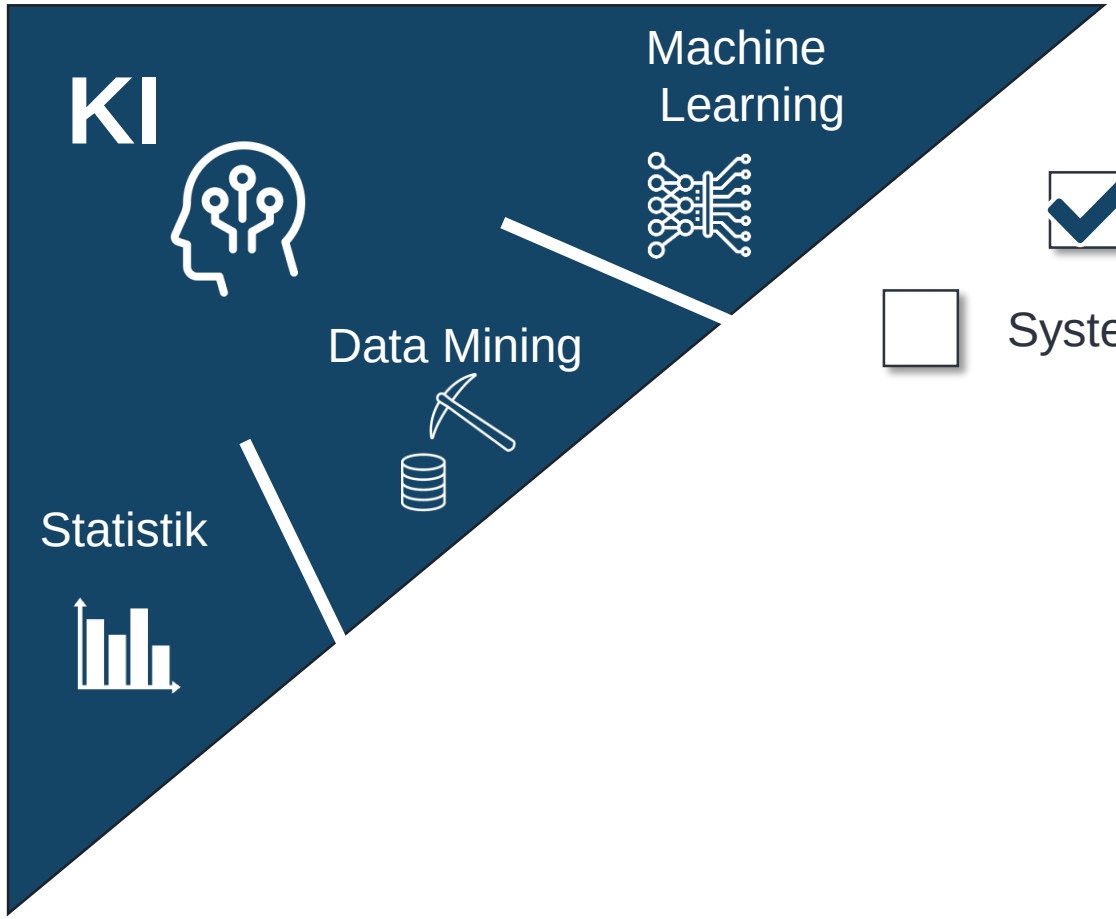
Herausforderung beim Einsatz von Machine Learning



- [ ] Programmiererfahrung
- [ ] Mathematik
- [ ] Systemverständnis

MACHINE LEARNING ALS STRATEGIE

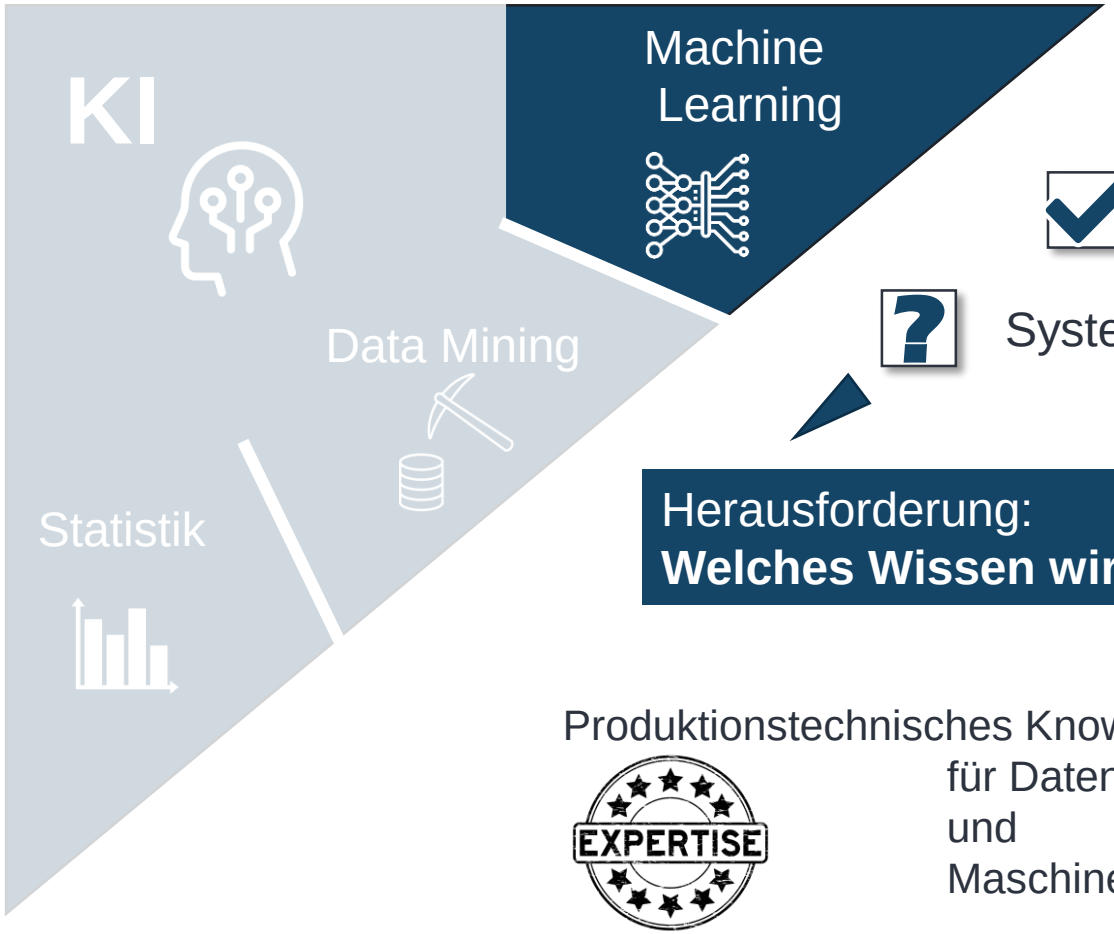
Herausforderung beim Einsatz von Machine Learning



- [x] Programmiererfahrung
- [x] Mathematik
- [ ] Systemverständnis

MACHINE LEARNING ALS STRATEGIE

Herausforderung beim Einsatz von Machine Learning



- ☑ Programmiererfahrung
- ☑ Mathematik
- ? Systemverständnis

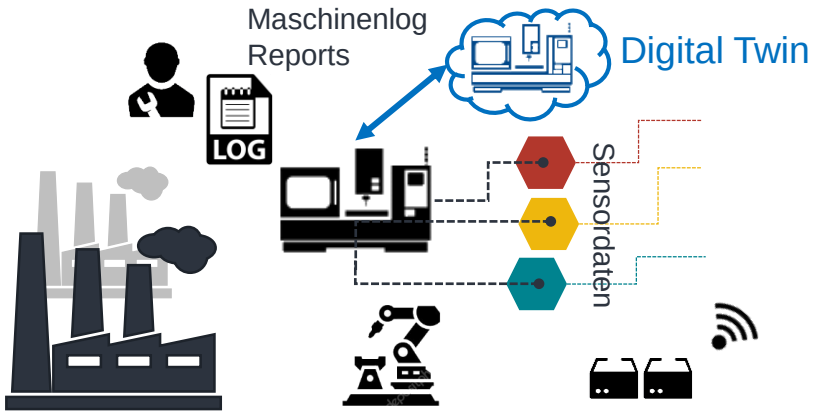
R, NumPy, KNIME, pandas, WEKA, python, MATLAB, TensorFlow, rapidminer, jupyter, Keras

Herausforderung:
Welches Wissen wird benötigt?

Produktionstechnisches Know-How
für Daten aus Prozess
und
Maschinen

EXPERTISE

Herausforderung:
Woher kommen die Daten?



AGENDA

1 Machine Learning als Strategie

2 Machine Learning im Kontext der Produktionstechnik

3 Condition Monitoring in Werkzeugmaschinen - Bildbasierte Kugelgewindetriebüberwachung

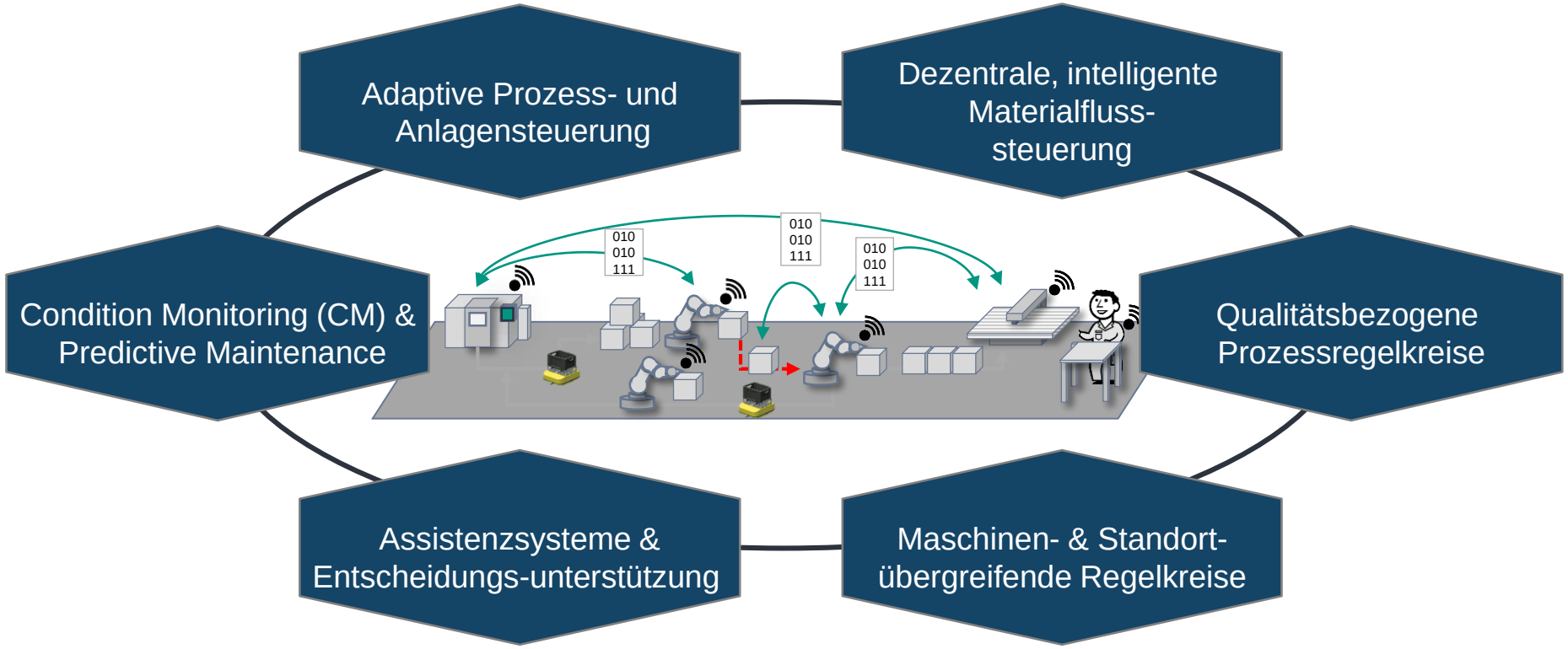
MACHINE LEARNING IM KONTEXT DER PRODUKTIONSTECHNIK

Anwendungsgebiete von Machine Learning am wbk

Ansätze des Maschinellen Lernens ermöglichen …

- Robuste
- Effiziente
- Transparente
- Flexible

Produktionsprozesse



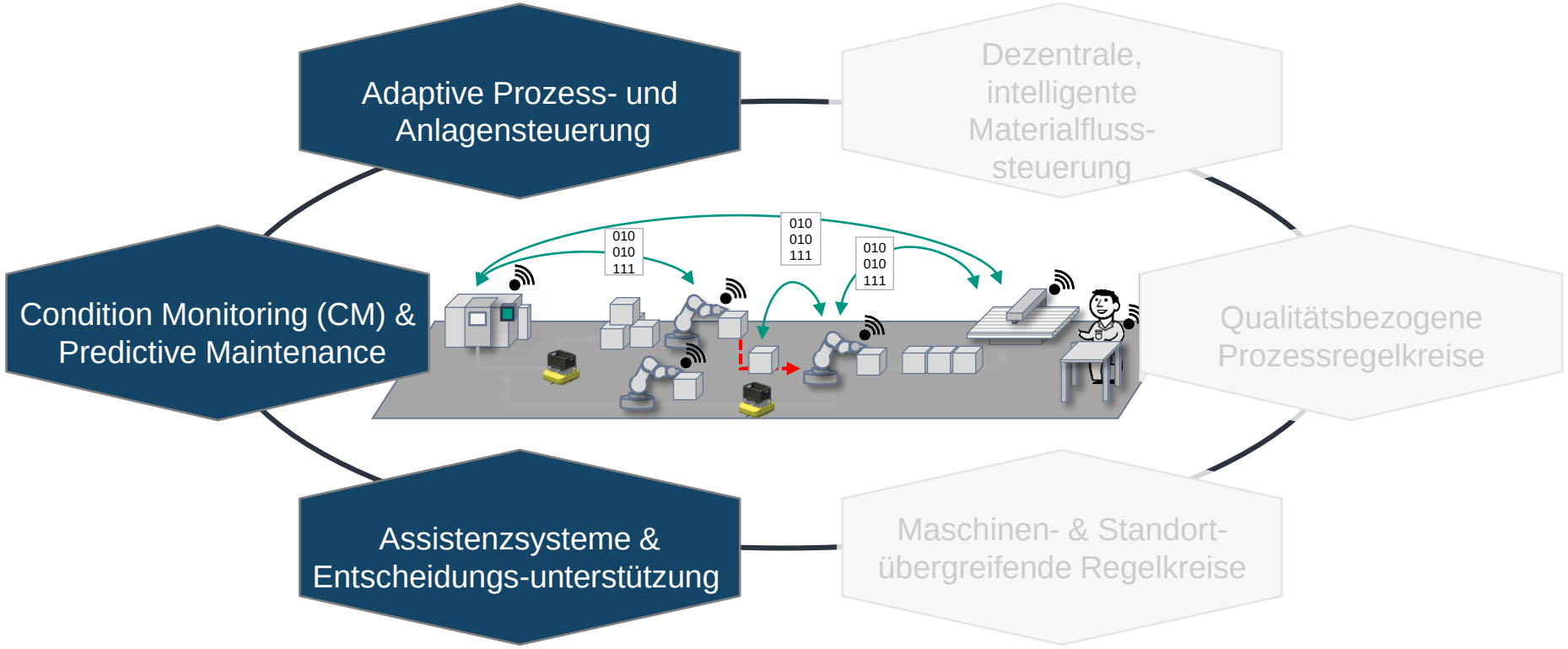
MACHINE LEARNING IM KONTEXT DER PRODUKTIONSTECHNIK

Anwendungsgebiete von Machine Learning am wbk

Ansätze des Maschinellen Lernens ermöglichen …

- Robuste
- Effiziente
- Transparente
- Flexible

Produktionsprozesse

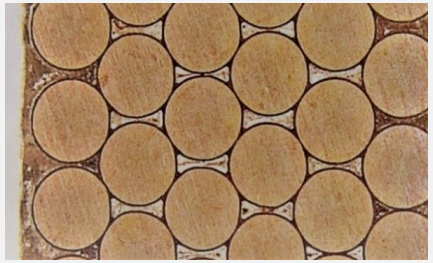


MACHINE LEARNING IM KONTEXT DER PRODUKTIONSTECHNIK

Use Case : Analyse des Lagenaufbaus von Wicklungen in Nuten elektrischer Maschinen

Status Quo

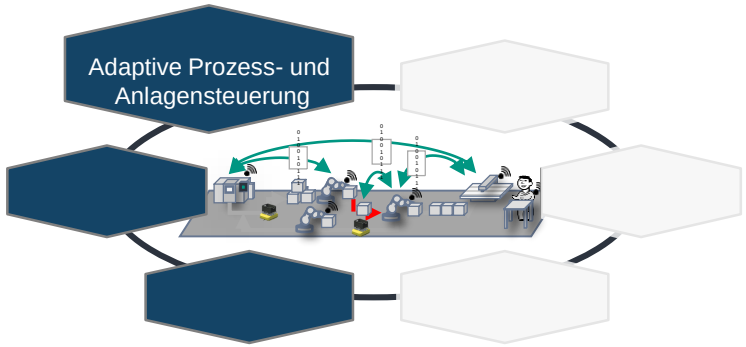
- Aktuell werden zum Lagenaufbau von Drähten in den Nuten elektrischer Maschinen Schliffbilder erstellt.
  - ➢ diskretes und zerstörendes Verfahren
  - ➢ Verlauf der Drähte nur bedingt erfassbar

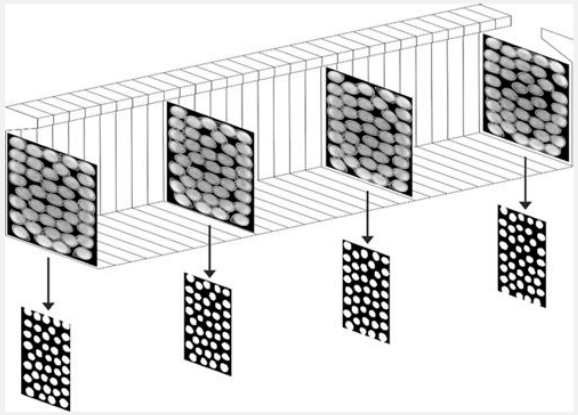


- Der Zusammenhang zwischen dem Lagenaufbau in der Nut und der Leistungsfähigkeit der E-Maschine ist noch nicht umfassend erforscht.
  - ➢ Fehlende umfassende und kontinuierliche Validierungsmöglichkeiten

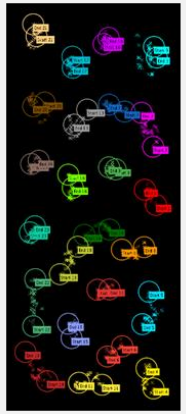
Neuer Ansatz

- Einsatz von Computertomographie zur **kontinuierlichen Erfassung** des Drahtverlaufes
- Das **Segmentierung**sproblem der erzeugten Querschnitte wird durch **Machine Learning** gelöst
- Künstlich Neuronales Netz **AlexNet** wird zur Segmentierung des Bildes eingesetzt

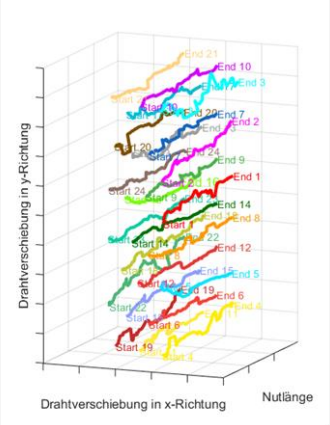




CT-Querschnittsbilder der Statornut



Verschiebung der Drähte in Statornut



Verlauf der Drähte in der Nut

➢ Verwendung von weiteren **ML-Verfahren** um die **Verknüpfung** zwischen **Qualität des Lagenaufbaus** der Maschine und Ihrer **realen Leistungsfähigkeit** herzustellen.

MACHINE LEARNING IM KONTEXT DER PRODUKTIONSTECHNIK

Use Case: Maschinelles Lernen bei der Auslegung von Greifsystemen

Karlsruher Institut für Technologie

Status Quo

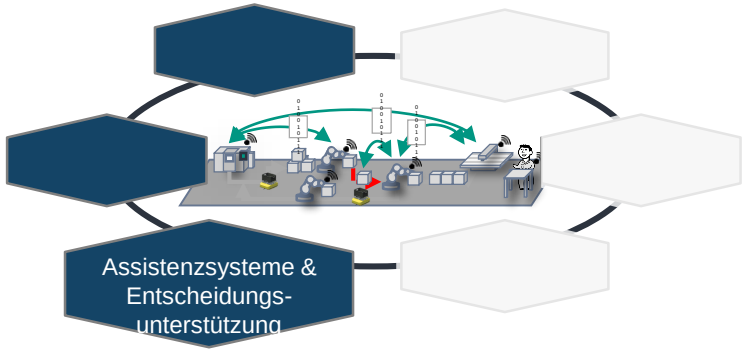
- Handhabung flächiger Bauteile erfordert die strategische Platzierung mehrere Greifer, um unzulässig große Deformationen beim Transport zu vermeiden
- Form und Größe der Bauteile unterscheiden sich stark von Anwendungsfall zu Anwendungsfall
- Auslegung und Anordnung der Greifer für die Handhabung erfolgen oft manuell und basieren dann auf persönlicher Erfahrung

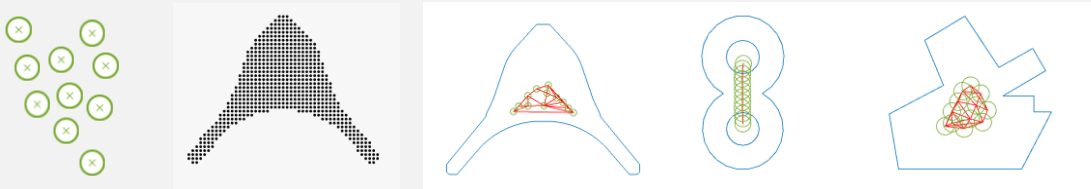
Zielsetzung

- Automatische Konfiguration von Greifer-Anordnungen für ein modulares Handhabungssystem

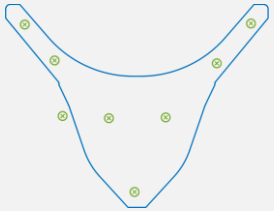
Neuer Ansatz

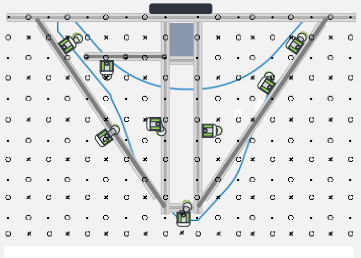
- Konfiguration erfordert primär eine „sinnvolle“ Verteilung einer definierten Anzahl an Greifern auf einem beliebig geformten, flächigen Bauteil. Viele Randbedingungen zu beachten
- Verwendung und Anpassung eines Algorithmus aus dem Bereich der „Self-organizing map“ (Growing Neural Gas) zur Anordnung der Greifer

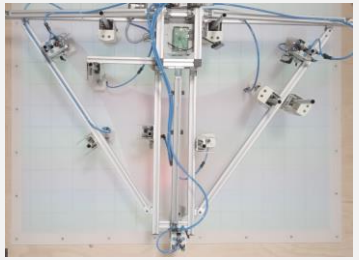




Automatisierte Ableitung von realen Greiferpositionen:







wbk Institut für Produktionstechnik

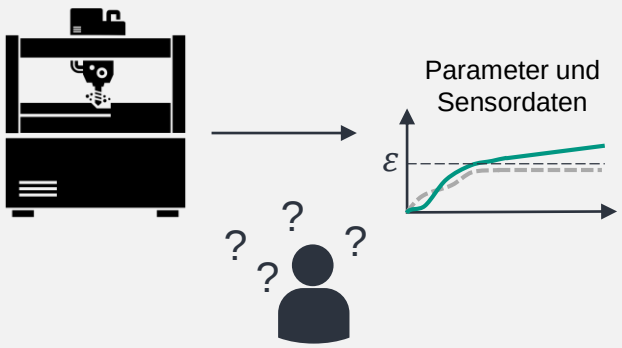
MACHINE LEARNING IM KONTEXT DER PRODUKTIONSTECHNIK

Use Case: Assistenzsystem für die Prozessüberwachung und -Optimierung in einer WZM

Karlsruher Institut für Technologie

Status Quo

- Problematik bei Condition Monitoring und Prozessüberwachung in WZM ist die Definition von Eingriffs- und Alarmgrenzen

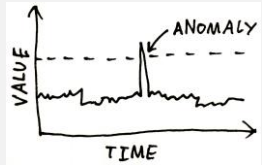


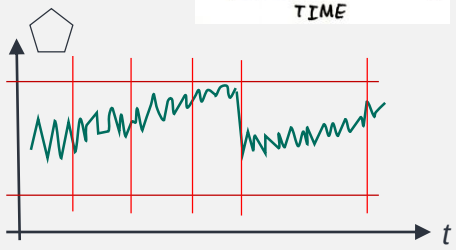
- Die Definition von Grenzwerten ist schwierig für neue Prozesse oder basiert auf Erfahrungswissen von Experten

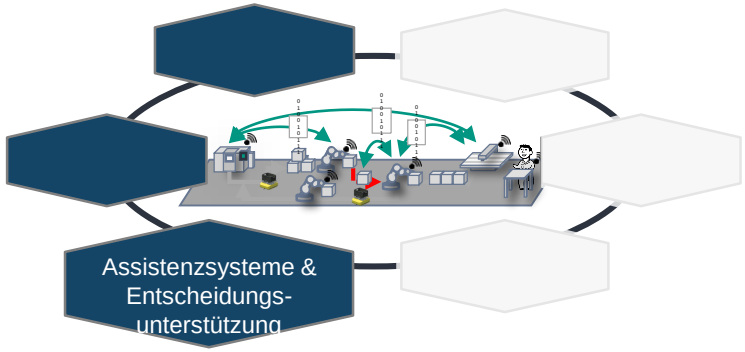
→ fehleranfällig für Prozessänderungen
→ manueller Aufwand für Grenzwertdefinition

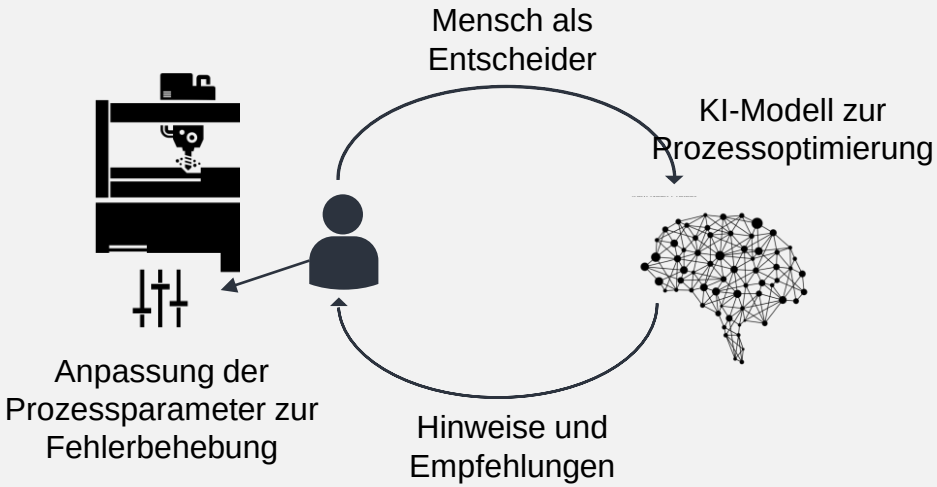
Neuer Ansatz

- Auf Basis von aufgenommen Zeitreihen während dem Betrieb werden vorhandene Signale (Position, Motorstrom, etc.) in Muster zerlegt und für späteren Vergleich auf neue Daten abgelegt
- Durch Mustererkennung wird die Störgröße (Anomalie) in Sensorsignalen identifiziert









- Anwendung:
  Materialschwankungen bei Guss,
  Falsches Rüsten, Werkzeugverschleiß, ...

wbk Institut für Produktionstechnik

MACHINE LEARNING IM KONTEXT DER PRODUKTIONSTECHNIK

Use Case: Lernendes Maschinenmodell für das Schwingungsverhalten von Fräsmaschinen

Status Quo

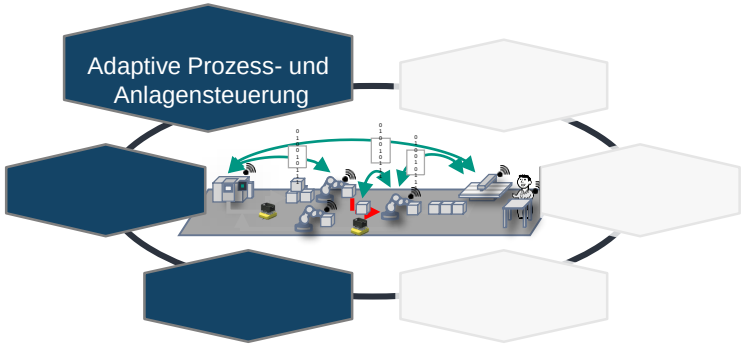
- Das individuelle Schwingungsverhalten von Maschinen beeinflusst die Qualität und Kosten in der Fräsbearbeitung.
- Bisher sind für die Modellierung des Schwingungsverhaltens aufwändige Versuche notwendig.

Zielsetzung

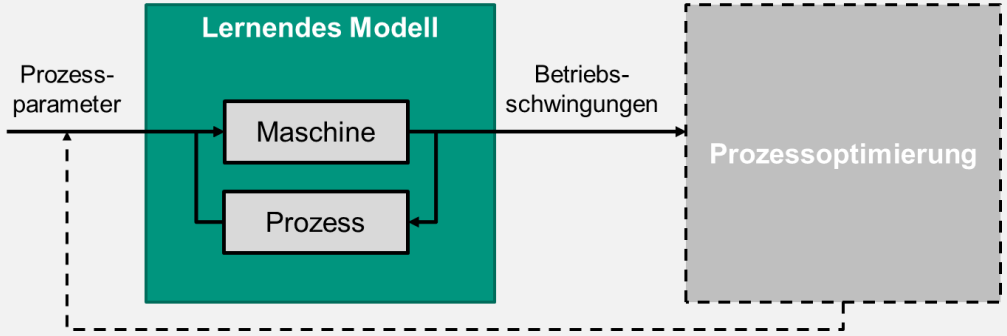
- Automatisierte Modellierung des Schwingungsverhaltens von Fräsmaschinen durch maschinelles Lernen

Neuer Ansatz

- Training mit Betriebsdaten:
  - Steuerungsinterne Daten
  - Beschleunigungssensoren
- Anwendung auf geplante Prozessparameter
  - Vorhersage des Maschinenverhaltens
  - Optimierung schon vor der Produktion des 1. Werkstücks



Versuchsmaschine am wbk



AGENDA

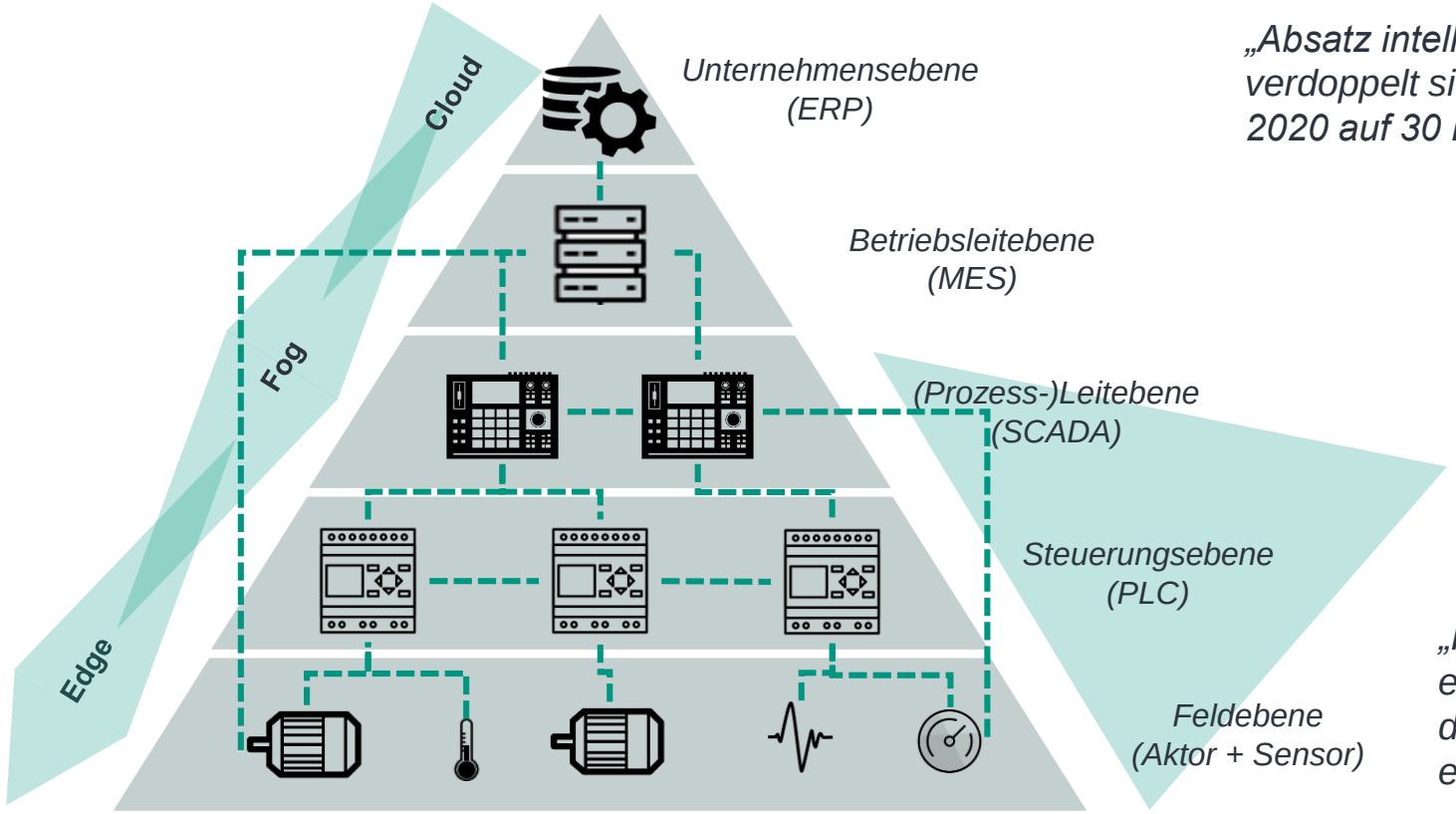
1 Machine Learning als Strategie

2 Machine Learning im Kontext der Produktionstechnik

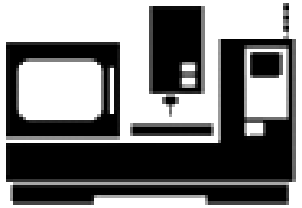
3 Condition Monitoring in Werkzeugmaschinen - Bildbasierte Kugelgewindetriebüberwachung

CONDITION MONITORING IN WERKZEUGMASCHINEN

Woher kommen die Daten?



„Absatz intelligenter Sensoren verdoppelt sich von 2015 bis 2020 auf 30 Milliarden Stück“ [6]



„Gigabit Industrial Ethernet ist Automatisierung in Echtzeit […] Leistung (für) […] Industrie 4.0 […] und die Vernetzung hochgradig datenintensiver Prozesse“ [7]

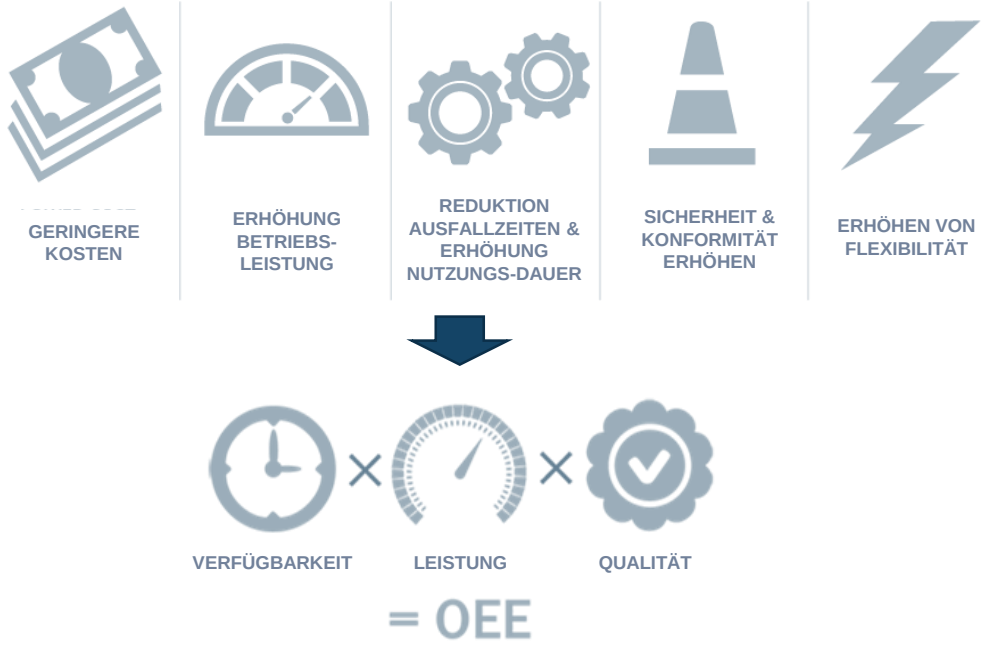
„Integrierte Daten, Datenströme und Big Data entstehen durch die Vernetzung von Maschinen […] durch die große Anzahl an Transaktionen […] in einem nie dagewesenen Ausmaß.“ [8]

Vernetzung, **Industrial Ethernet** und das **IIoT** haben die Anzahl und Größe von Datenströmen und Informationsquellen intensiviert. Die **horizontale** und **vertikale** Kommunikation in der Automatisierungspyramide nimmt zu. Eine weiterhin große Signal-/Informationssenke ist die Werkzeugmaschine.

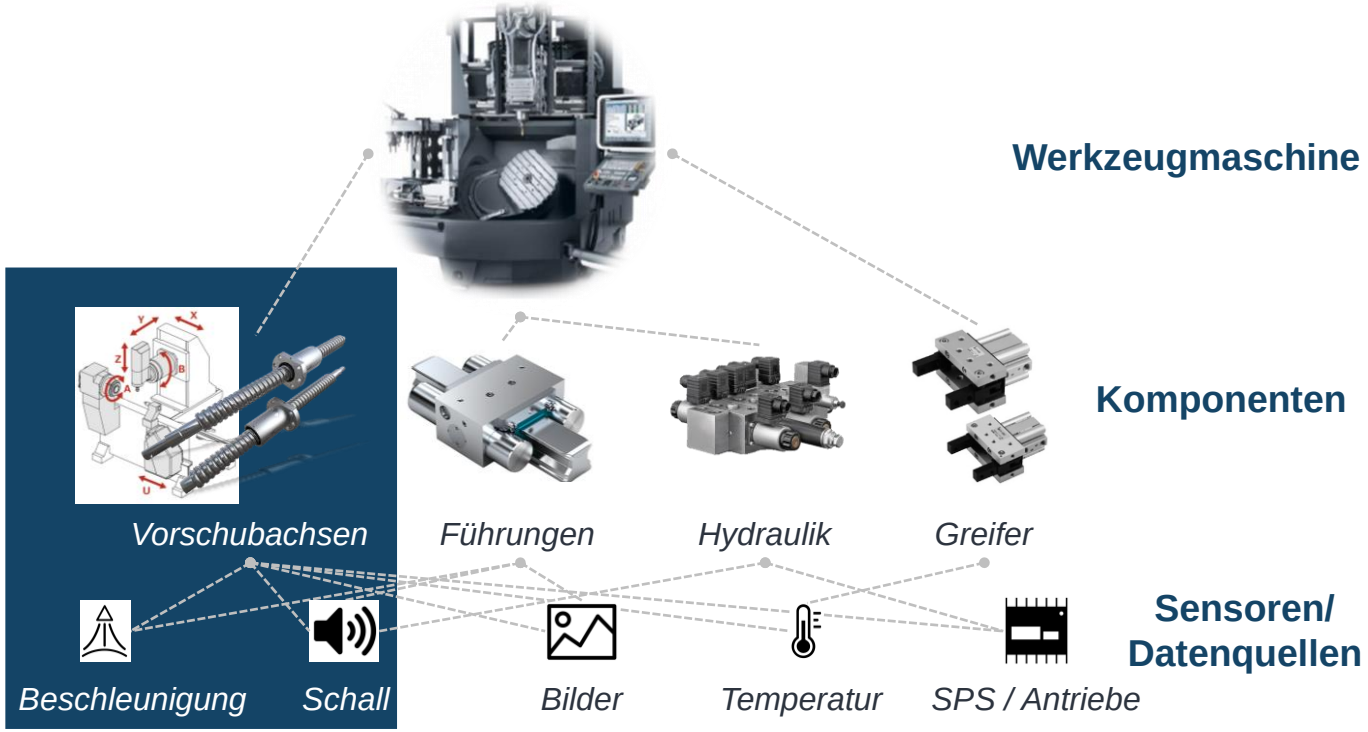
CONDITION MONITORING IN WERKZEUGMASCHINEN

Karlsruher Institut für Technologie

Gründe für Condition Monitoring



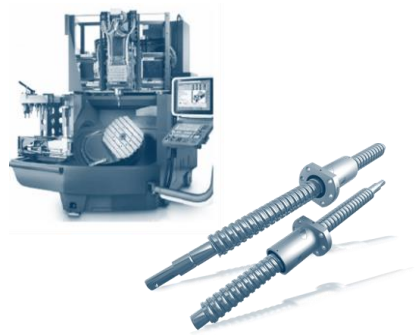
Angriffspunkte für Condition Monitoring

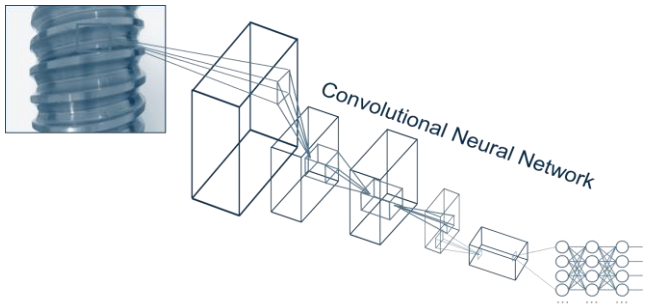


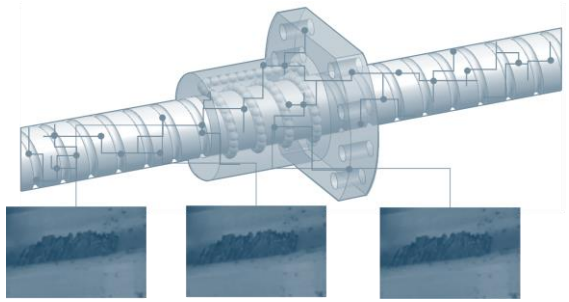
- Existierende CM-Ansätze beschränken sich meist auf die **Vorschubachse** (diese tragen zu **38%** zum **Maschinenausfall** durch **KGT** bei)
- Stand der Technik Ansätze betrachten hierbei **Beschleunigungs-** und (Körper-)**Schallsignale** für die Verschleißüberwachung von Komponenten

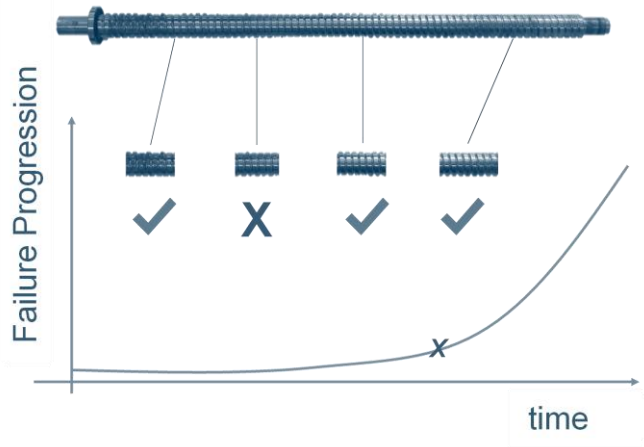
[9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]

BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN









Kugelgewindetrieb + Kamera → Machine Learning → Bildklassifikation → Condition Monitoring

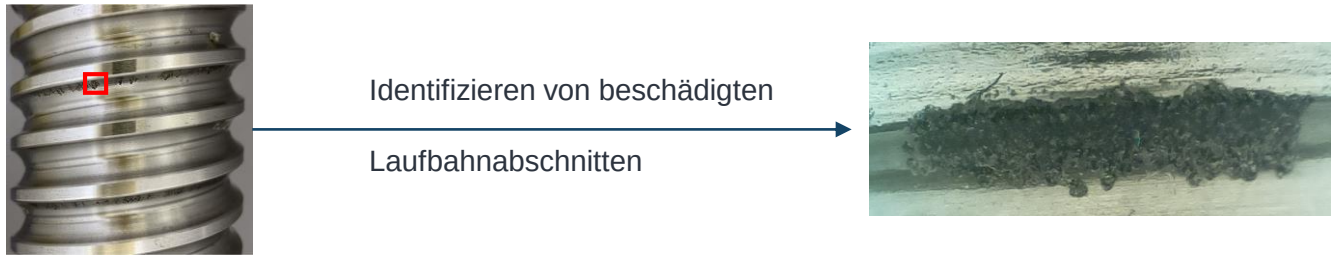
- **Kamera** zeichnet Bilder von der **Spindel** des Kugelgewindetriebs auf
- Diese werden von einem **Convolutional Neural Network (CNN)** nach **Oberflächendefekten** klassifiziert
- Dadurch kann der **Verschleißzustand** des Kugelgewindetriebs diagnostiziert werden → **Condition Monitoring**

BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

Karlsruher Institut für Technologie

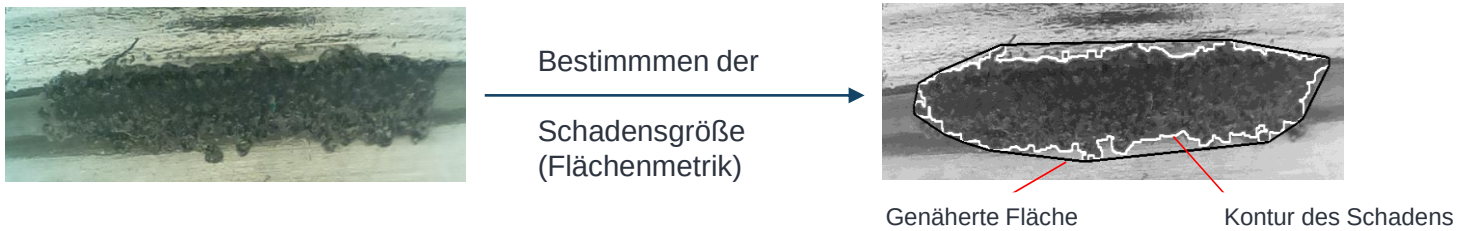
Die Überwachung konzentriert sich auf die Aufzeichnung der Spindeloberfläche und setzt sich aus drei Phasen zusammen:

- 1. Schadensidentifikation (Klasse = Pitting / Ausbrüche)



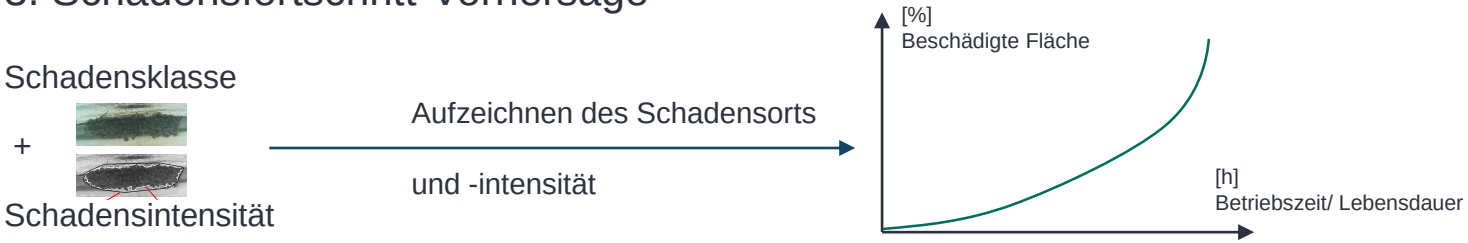
CNN für die Merkmalsextraktion und Klassifikation

- 2. Schadensquantifizierung (Bestimmung der Schadensintensität)



Clustering Algorithmen und Kantendetektion

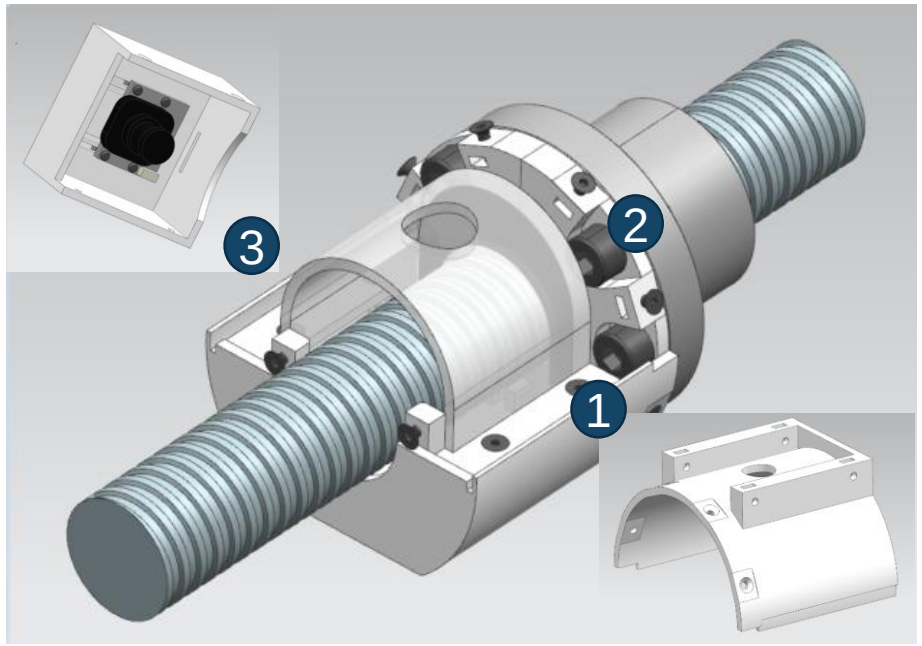
- 3. Schadensfortschritt-Vorhersage

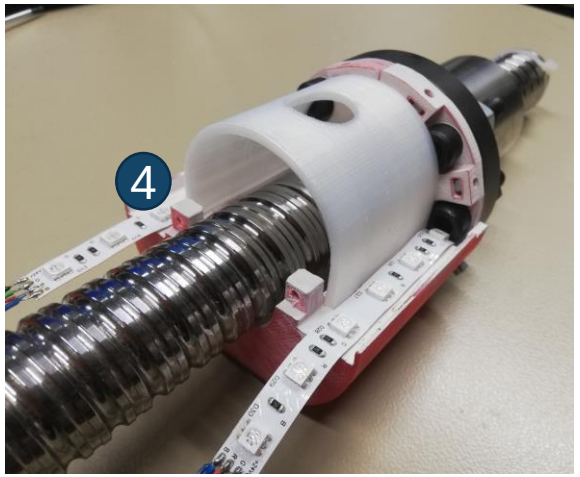


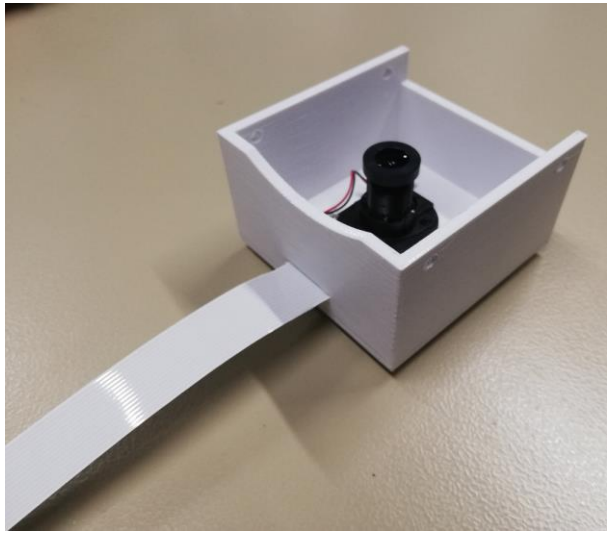
Regressionsmodell für Vorhersagen auf Basis Zeitreihendaten der aufgenommenen Bilder und Lebensdauer Korrelation

BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

Design-Prototyp - Demonstratorobjekt







- *System communicates with machine **PLC** via **OPC-UA** and the camera is operated by a **Raspberry Pi***
- *Evaluation and control is built in **Matlab/Python***

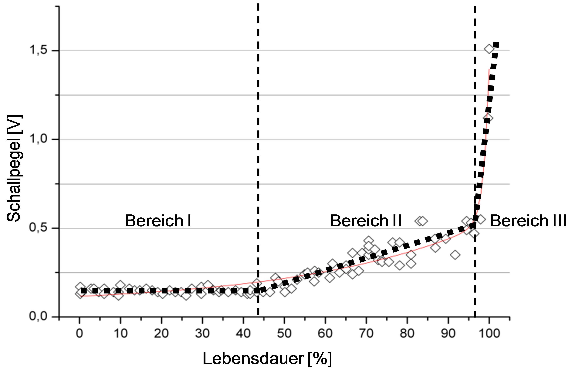
1. *Housing*
2. *Spindle Nut*
3. *Camera System*
4. *Ilumination*

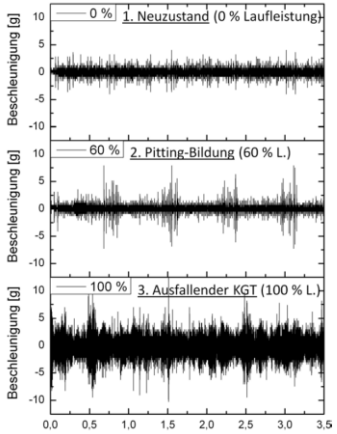
BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

Ausblick

- Bisher etablierte Condition Monitoring Ansätze
  - Extraktion von Merkmalen aus Sensorsignalen und Grenzwertüberwachung (Beschleunigungs- und Körperschallsensoren)
  - Korrelation mit tatsächlichen Verschleiß(-marken) und Komponentenausfall

Schwingungsmerkmale über Kugelgewindetrieb Lebensdauer





Die abgeleiteten Modelle **prognostizieren** die verbleibende **Lebensdauer** auf Basis von **Grenzwert**überschreitungen, die einer bestimmten **nominellen** Lebensdauer **entsprechen**

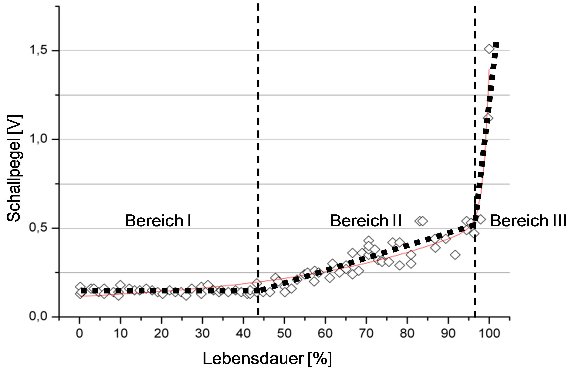
[17], [18]

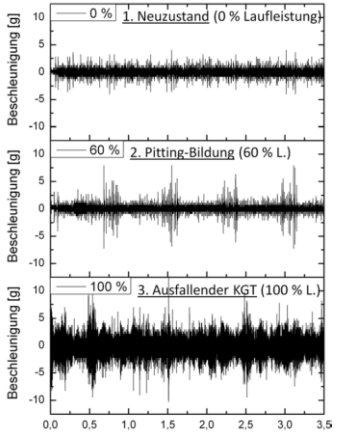
BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

Ausblick

- Bisher etablierte Condition Monitoring Ansätze
  - Extraktion von Merkmalen aus Sensorsignalen und Grenzwertüberwachung (Beschleunigungs- und Körperschallsensoren)
  - Korrelation mit tatsächlichen Verschleiß(-marken) und Komponentenausfall

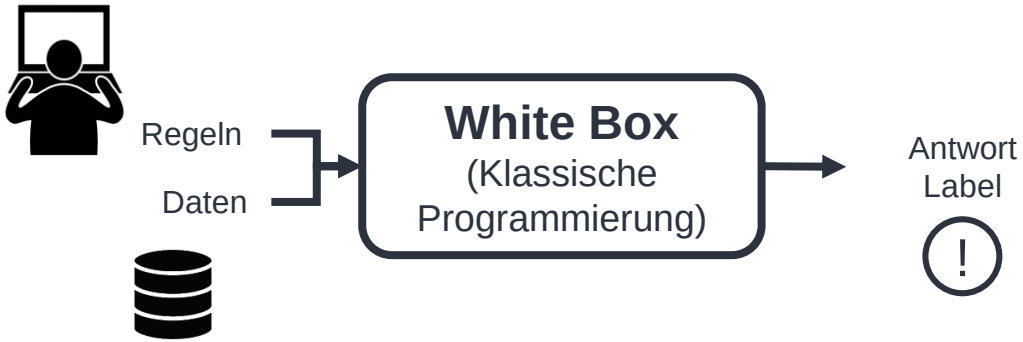
Schwingungsmerkmale über Kugelgewindetrieb Lebensdauer





Die abgeleiteten Modelle **prognostizieren** die verbleibende **Lebensdauer** auf Basis von **Grenzwert**überschreitungen, die einer bestimmten **nominellen** Lebensdauer **entsprechen**

Problematik des White-Box Ansatz:



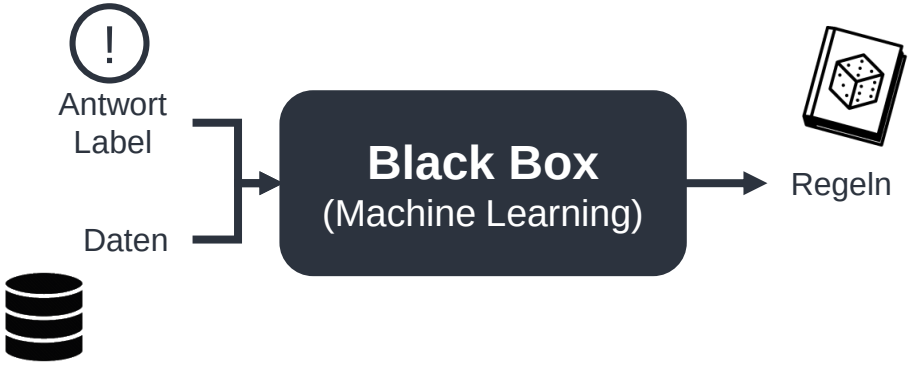
- "**Willkürliche**"/Schwierige Festlegung von Grenzwerten
- **Abhängig** von Maschinenstruktur und Sensorplatzierung
- **Komplexe** Schadensmechanismen und **variierende** Betriebsbedingungen **erschweren** regelbasierte Modellierung
- **Unterscheidung** von verschiedenen Schadensbildern **schwierig** mit nur **einem** Sensorsignal

[17], [18]

BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

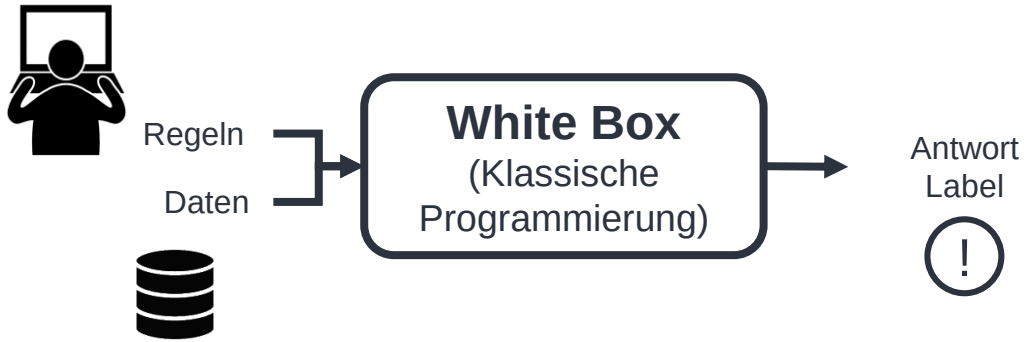
Ausblick

Der Black-Box Ansatz:



- **Grenzwerte** müssen **nicht** definiert werden, Kugelgewindetrieb Zustand wird auf Basis **gefundener Defekte** bewertet
- Bilddaten enthalten **hohe Informationsdichte**
- **Unterstützt** existierende Lösungen für **genauere** Diagnose und Prognose
- **Verschiedene** Schadensbilder können **visuell** unterschieden werden

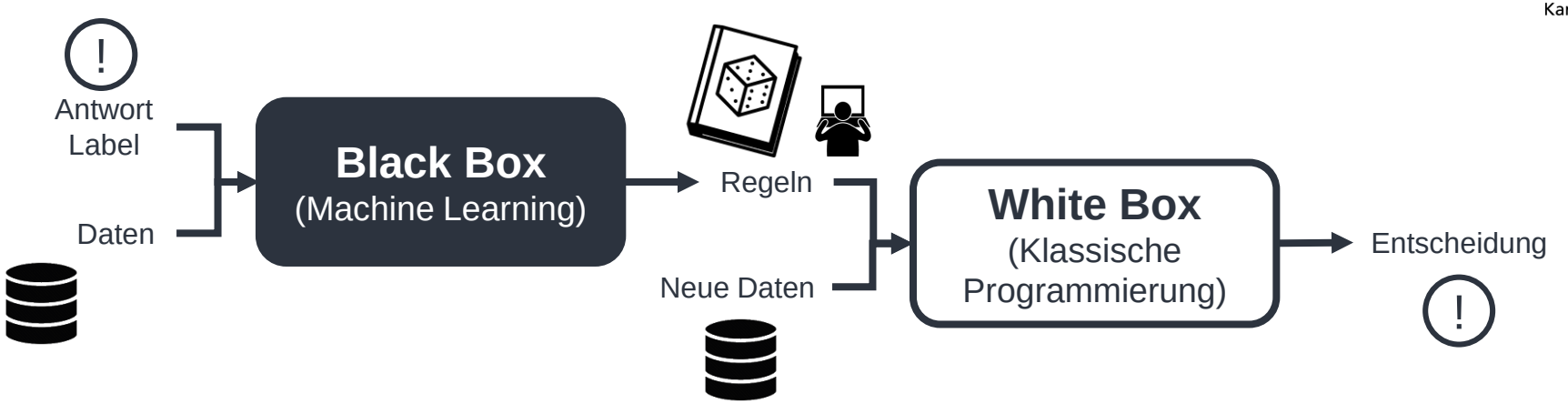
Problematik des White-Box Ansatz:



- "**Willkürliche**"/Schwierige Festlegung von Grenzwerten
- **Abhängig** von Maschinenstruktur und Sensorplatzierung
- **Komplexe** Schadensmechanismen und **variierende** Betriebsbedingungen **erschweren** regelbasierte Modellierung
- **Unterscheidung** von verschiedenen Schadensbildern **schwierig** mit nur **einem** Sensorsignal

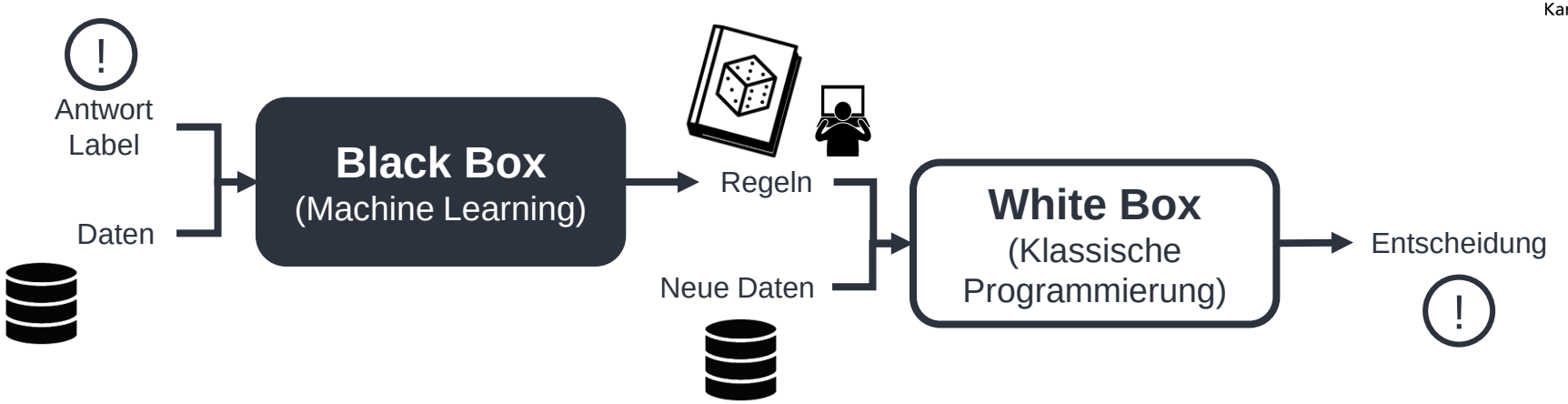
BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

Ausblick



BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

Ausblick



- In Kombination ergeben sich neue Möglichkeiten

Schwingungssignale
von Komponente

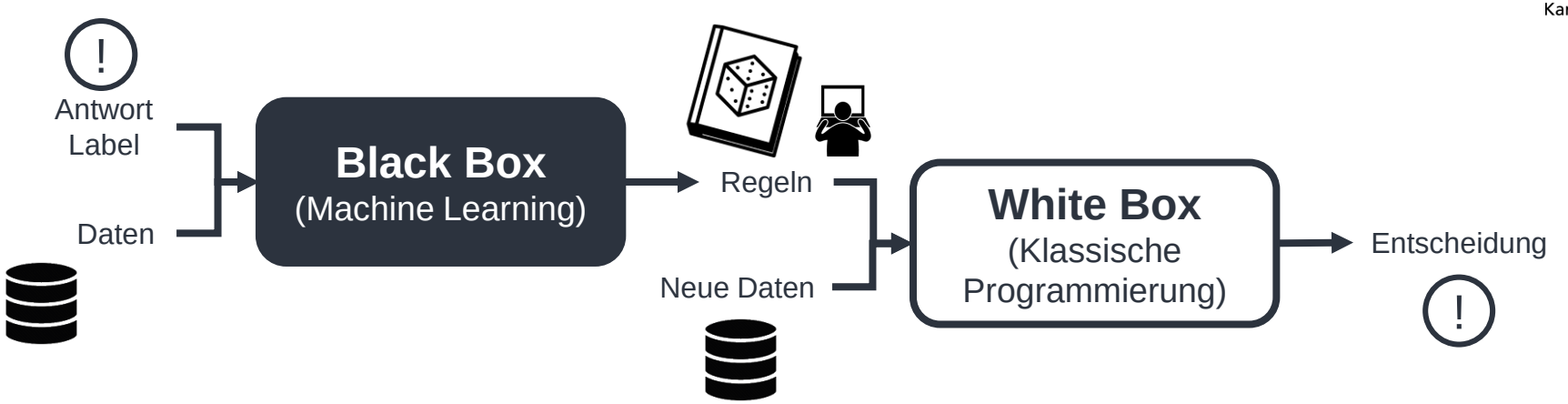
+

Bilddaten mit
Machine Learning

Zuordnung von Schadensbild
zu Schwingungen, die Produktionsergebnis
beeinträchtigen
→ Grenzwertdefinition wird greifbar gemacht

BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

Ausblick



- In Kombination ergeben sich neue Möglichkeiten

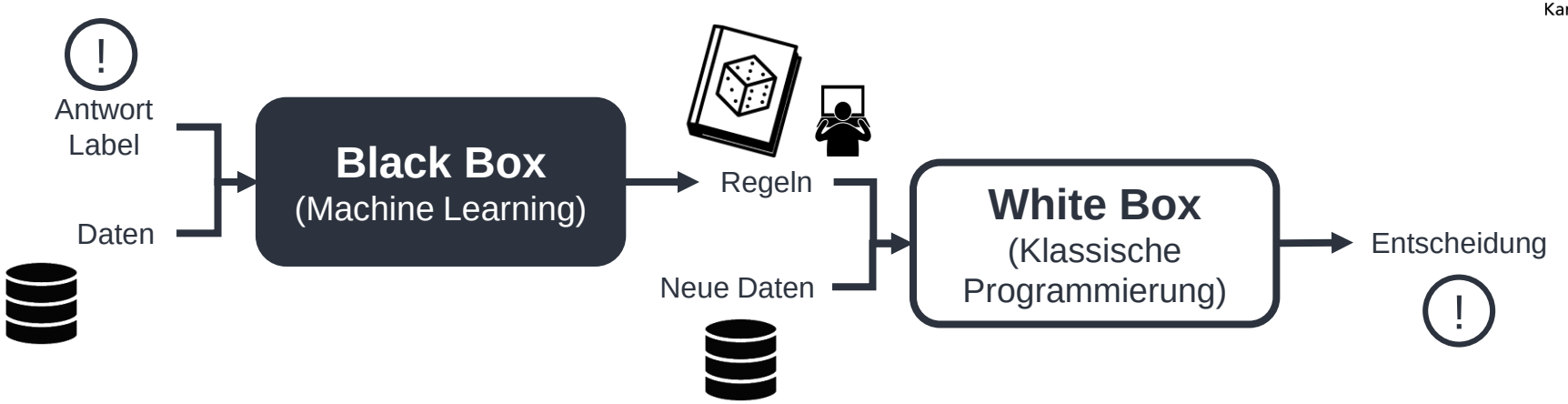
Bilddaten mit Machine Learning

+ Schwingungssignale von Komponente → Zuordnung von Schadensbild zu Schwingungen, die Produktionsergebnis beeinträchtigen → Grenzwertdefinition wird greifbar gemacht

+ Steifigkeitsmessung des Kugelgewindetrieb → Laufbahnaufnahmen der Spindel gibt Aufschluss über Vorspannungsverlust durch Flankenabnahme

BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

Ausblick



- In Kombination ergeben sich neue Möglichkeiten

Bilddaten mit Machine Learning

+ Schwingungssignale von Komponente → Zuordnung von Schadensbild zu Schwingungen, die Produktionsergebnis beeinträchtigen → Grenzwertdefinition wird greifbar gemacht

+ Steifigkeitsmessung des Kugelgewindetrieb → Laufbahnaufnahmen der Spindel gibt Aufschluss über Vorspannungsverlust durch Flankenabnahme

+ Axialkraft und Drehzahl (Nominelle Lebensdauer) → Zusammenhang zwischen Lastkollektiv und Schadensbilder

BILDBASIERTE ÜBERWACHUNG VON KUGELGEWINDETRIEBEN

Karlsruher Institut für Technologie

EMO Hannover

wbk Institut für Produktionstechnik

mav industrie 4.0 area

16. – 21. September 2019

Halle 9 Stand F32

QUELLEN

Literatur und Internetdokumente:

[1] https://www.accenture.com/_acnmedia/pdf-13/accenture-connected-industrial-workforce-infographic.pdf
[2] https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/advanced%20electronics/our%20insights/how%20artificial%20intelligence%20can%20deliver%20real%20value%20to%20companies/mgi-artificial-intelligence-discussion-paper.ashx
[3] https://press.pwc.com/News-releases/ai-to-drive-gdp-gains-of--15.7-trillion-with-productivity--personalisation-improvements/s/3cc702e4-9cac-4a17-85b9-71769fba82a6
[4] https://deepmind.com/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-40/
[5] https://www.vario-software.de/ecommerce/marktplaetze/amazon/
[6] https://www.rolandberger.com/de/Media/Absatz-intelligenter-Sensoren-verdoppelt-sich-von-2015-bis-2020-auf-30-Milliarde.html
[7] https://www.hannovermesse.de/de/news/gigabit-industrial-ethernet-ist-automatisierung-in-echtzeit-61568.xhtml
[8] https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-und-digitale-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=5
[9] http://www.smcpneumatics.com
[10] Statista (2018), Verteilung der Betriebskosten bei Werkzeugmaschinen in Deutschland im Jahr 2010.
[11] https://maschinendiagnose.de/motivation.htm
[12] https://www.novotek.com/en/solutions/overall-equipment-effectiveness/explanation-of-oee
[13] https://www.starrag.com/de-de/v/model-range/schaufel-und-bliskbearbeitungszentren/9/machine/lx-021/28
[14] https://www.ptsautomation.de/dev/produkte/handelsprodukte/lineartechnik/profilschienenfuehrungen/rollenschienenfuehrungen/
[15] https://www.rodriguez.de/produkte/lineartechnik/kugelgewindetriebe/
[16] https://mav.industrie.de/peripherie/anlagen-verfahren/hydraulik-schlaegt-den-elektrischen-antrieb/
[17] Schopp, M. (2009), Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben. 2009, Shaker, Aachen. ISBN: 978-3-8322-8733-7.
[18] Hennrich, H. (2013), Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe. Dissertation, KIT, Karlsruhe, wbk.

Icons:

https://cdn3.iconfinder.com/data/icons/math-physics/512/Chart_D-512.png
https://cdn2.iconfinder.com/data/icons/artificial-intelligence-ai-color/64/diagram-deep-learning-machine-network-nural-512.png
https://cdn3.iconfinder.com/data/icons/personality-traits-2-solid/128/strong_sturdy_robust_oaky_powerful-512.png
https://cdn1.iconfinder.com/data/icons/logistics-2-1/33/logistics-24-512.png
https://www.iconfinder.com/icons/3404374/gdpr_general_data_protection_regulation_transparency_transparent_zoom_icon
https://www.alamy.com/grunge-black-expertise-with-star-icon-round-rubber-stamp-on-white-background-image243042451.html
https://static.thenounproject.com/png/118262-200.png
https://thumbs.dreamstime.com/b/stellen-sie-ikonen-der-werkzeugmaschine-ein-47209561.jpg
https://de.cleanpng.com/png-sfss8g/

wbk Institut für Produktionstechnik