

KI-basierte Bewertung von Wirbelstromsignalen zur Klassifizierung von Schleifverbrennungen auf Stahlkugeln

Wolfgang KORPUS¹, Jaroslaw LITAU¹

¹ ibg Prüfcomputer GmbH, Ebermannstadt

Kontakt E-Mail: w.korpus@ibgndt.de

Kurzfassung

Der Nachweis von linienförmigem Schleifbrand auf Stahlkugeln (branchenintern Temper Lines genannt) ist eine regelmäßige und komplexe Aufgabenstellung in der Kugellagerindustrie. Je nach Anwendungsbereich der Kugeln ist das Auftreten von wenigen kurzen Verbrennungslinien (zumeist Anlasszonen mit wenigen Mikrometern Tiefe) zulässig, eine höhere Anzahl kurzer Linien oder längere, teils komplett umlaufende Linien dagegen nicht. Traditionell wird dieses Fehlermerkmal manuell mittels stichprobenbasiertem Nitalätzverfahren und anschließendem Vergleich mit unternehmensinternen Bildstandards abgesichert.

Gestiegene Qualitätsanforderungen der Zielbranchen Windenergie und Bahn bedürfen künftig einer vollautomatischen ZfP-basierten Lösung zur 100% Prüfung. Hier bietet sich das Wirbelstrom-Verfahren mit einer Prüfsonde im Differenzprinzip an, das auch schon als Standard für die Prüfung auf Oberflächenfehler an Kugeln zum Einsatz kommt. Allerdings sind heutige, Schwellwert-basierte Methoden der Auswertung und Interpretation von Wirbelstromsignalen nicht ausreichend, um eine automatische Bewertung und Klassifizierung analog des bisherigen Verfahrens vorzunehmen.

Erste Erfolge liefern hier Machine Learning (ML) Lösungen auf der Basis von neuronalen Netzwerkmodellen, die in der Lage sind, Schleifbrandschäden an Stahlkugeln in ihrer geometrischen Ausprägung zu erkennen und zu klassifizieren. Dazu werden zunächst 100% der Oberfläche jeder Kugel mit einem eddyvisor Wirbelstromprüfgerät und einer 10-MHz-Hochfrequenz-Prüfsonde abgetastet. Nach Abschluss der Prüfung wird das resultierende Wirbelstrom C-Bild zur Auswertung in die speziell trainierte ML-Software zum Scan Processing übertragen. Das Auftreten von Schleifverbrennungen und deren geometrisches Erscheinungsbild auf der Prüfteiloberfläche wird dabei von der Künstlichen Intelligenz (KI) zuverlässig erkannt und den Nitalätz-Bildstandards der Kugelhersteller entsprechend bewertet.

Di.2.A.1 – Künstliche Intelligenz

KI-basierte Bewertung von Wirbelstromsignalen zur Klassifizierung von Schleifverbrennungen auf Stahlkugeln

Wolfgang Korpus, Jaroslaw Litau
ibg Prüfcomputer GmbH

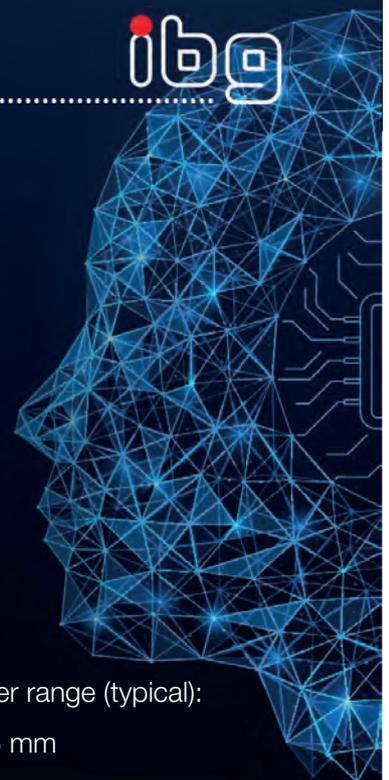


Steel balls - wind turbine bearings

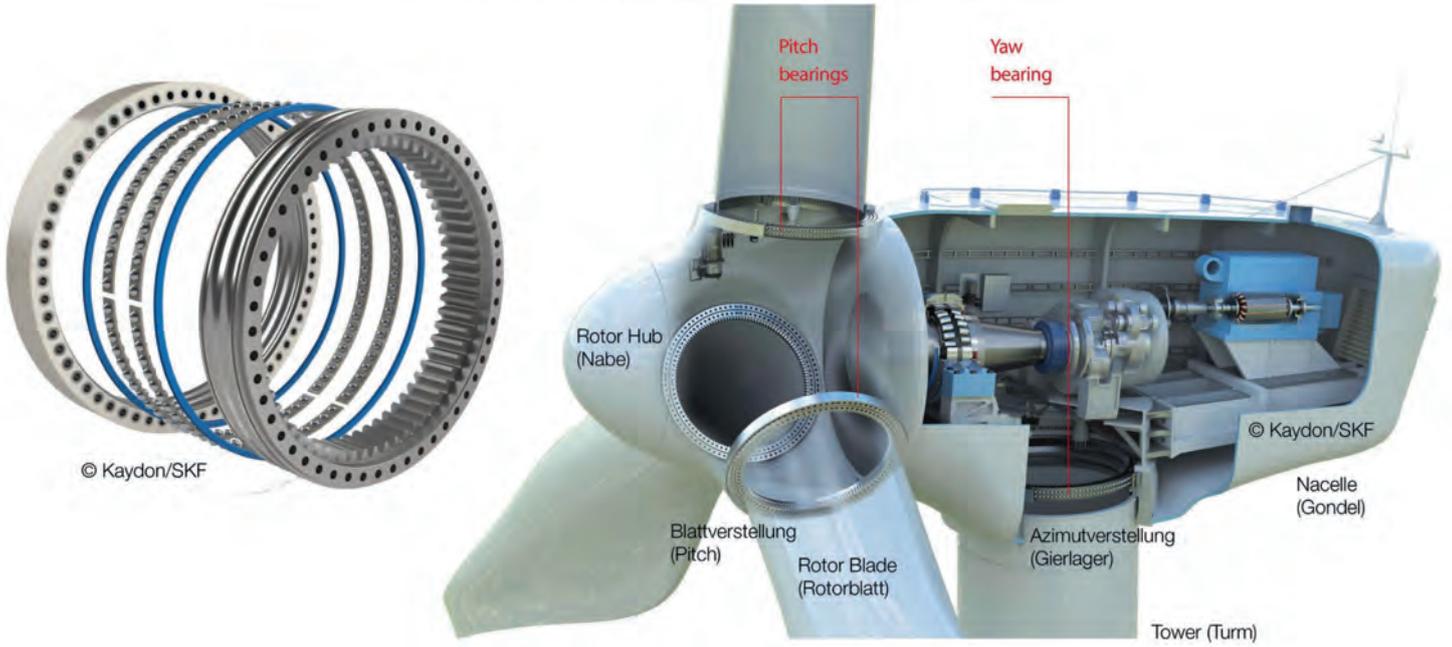
ibg



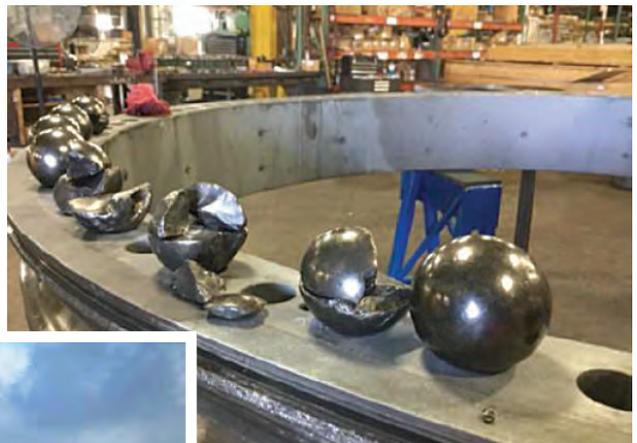
Diameter range (typical):
60 – 75 mm



Steel balls - wind turbine bearings

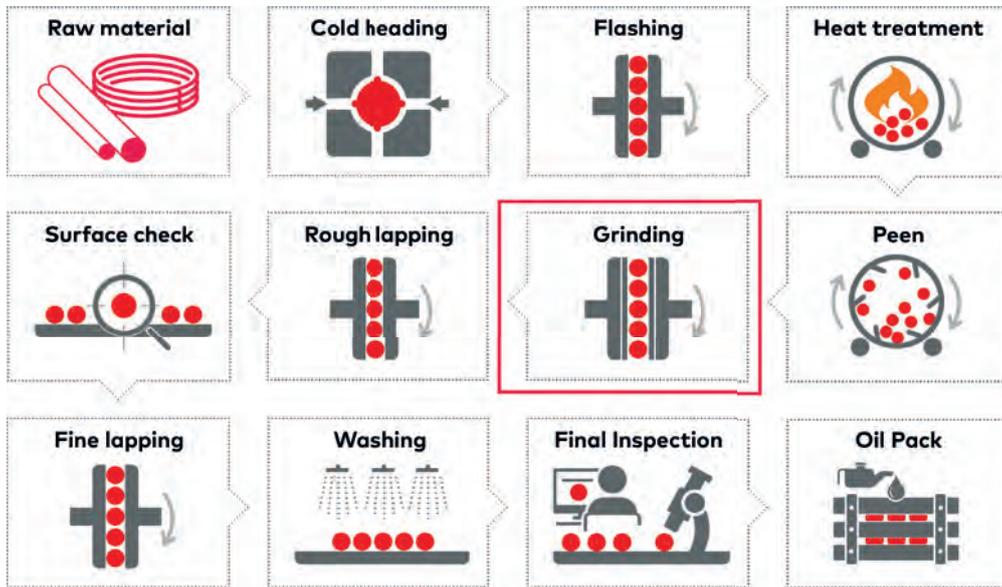


Fractured balls due to surface heat damage



© Kaydon/SKF

Ball production – process flow



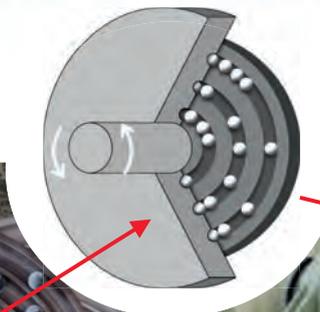
Grinding steel balls - now and then



first Ball Mill - 1883



Grinding Disc



Ball Mill - 2021

Grinding steel balls - Schleifbrand

Typisches Fehlerbild vieler Schleifprozesse:

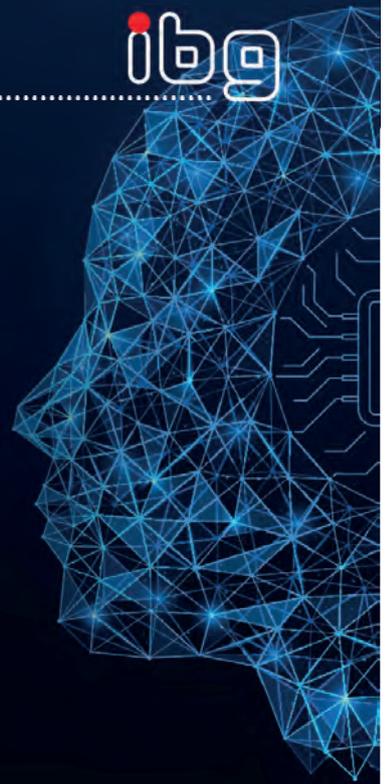
Schleifbrand (hier Temper Lines genannt)

„Lokale Gefügeveränderung durch kurzzeitigen, erneuten Wärmeeintrag nach bereits abgeschlossener Wärmebehandlung.“

Je nach Intensität: nur Anlasszonen oder auch Neuhärte- und Anlasszonen kombiniert

Entstehungsursachen (u.a.)

- Lange, umlaufende Linien: Kugeln reiben aneinander - Prozessparameter nicht optimal
- Kurze, chaotisch verteilte Linien: Schleifscheiben nicht rechtzeitig nachgeführt (Kugeln haben zu viel Freiraum), ursprünglich lange Linien erneut überschliffen
- Flächige Verbrennungszonen: Schleifscheiben-Abstand zu eng, Stehenbleiber vor Fänger



Grinding steel balls - Schleifbrand



kurze, eher chaotisch verteilte Temper Lines



lange, umlaufende Temper Lines



Temper Etch Inspection: Standards Aerospace / Defense - “nothing permitted”

ANSI B3.3 : 1992 - Rolling Element Bearings – Aircraft Engine, Engine Gearbox, and Accessory Applications – Surface Temper Etch

5.3.7 Nitric acid etch

5.3.7.2 External surfaces

... obtain a gray level equivalent to the range between 0.67 to 1.35 inclusive using a Kodak paper gray scale ... as a reference.

6 Acceptance limits

6.2 Critical surfaces

Raceways, sidewalls (also called guide flanges or ribs), balls, and rollers shall not exhibit any overetching outside the gray scale limits, or overtempering, rehardening, or decarburization.

MIL-STD-867D USAF : 2019 - Department of Defense Standard Practice - Temper Etch Inspection

5.5.1.2 The surface shall be visually inspected for indications of heat damage.

a. A surface that has not been heat damaged shall have a uniform grey appearance.

b. Un-tempered (re-hardened) martensite is indicated by light gray to white areas ... shall be cause for rejection.

c. Over-tempered martensite is indicated by light brown to black indications darker ... shall be cause for rejection.



Temper Etch Inspection: Standards Industry - “something permissible”

ISO 14104 : 2017 - Gears - Surface temper etch inspection after grinding, chemical method

Table 4 — Surface temper classification system

Prefix code		
F = Functional surfaces; includes flanks, ground roots, bearing journals and, if specified, other areas.		
N = Non-functional surfaces; includes all other ground surfaces.		
Class code ^a		
Class	Description	Visual appearance, worst area
A	No tempering	Uniform grey colour
B	Light tempering	Narrow (light) indications
(C) (Obsolete class)	(Moderate tempering)	(No longer used)
D	Heavy tempering	Wide (dark) indications
E	Rehardening (Severe overheating)	White area surrounded by black indications
Suffix code ^b		
Level	Maximum percentage of surface area affected ^a	
1	10 %	
2	25 %	
3	Unrestricted	

NOTE Sample classification callouts are as follows:

— FA/NB2: No tempering is allowed on any functional surface, but light tempering on up to 25 % of the area of the worst single non-functional surface, such as a shoulder, is permitted.

— FB2: Light tempering is allowed on up to 25 % of the area of the worst single functional surface. In addition, it implies no restrictions on non-functional surfaces.

Temper Etch Inspection:
Industry Criteria (exemplary) - "something permissible"



Tempered 01



Tempered 01



Tempered 02

Permissible!



Tempered 03



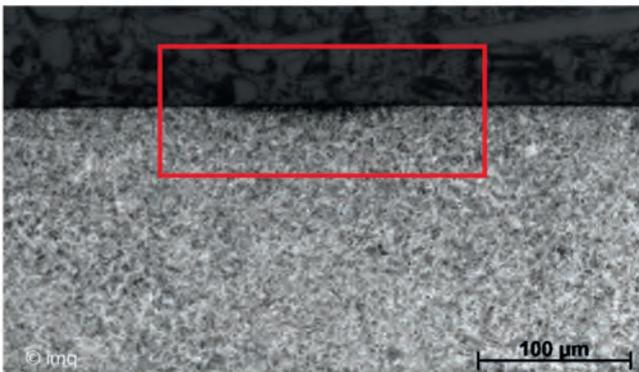
Rehardened



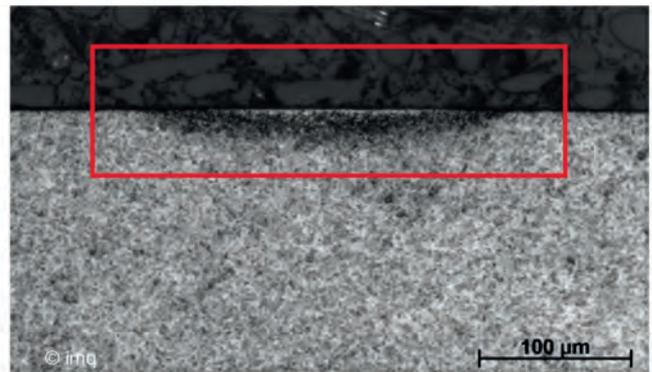
Rehardened

Not permitted!

Temper Etch Inspection:
Metallografischer Querschliff



Anlasszone - Tiefe 7 µm



Neuhärtezone - Tiefe 4 µm
mit umgebender Anlasszone - Tiefe 30 µm



OK oder **NOK** gemäß geometrischer Ausprägung



immer **NOK**

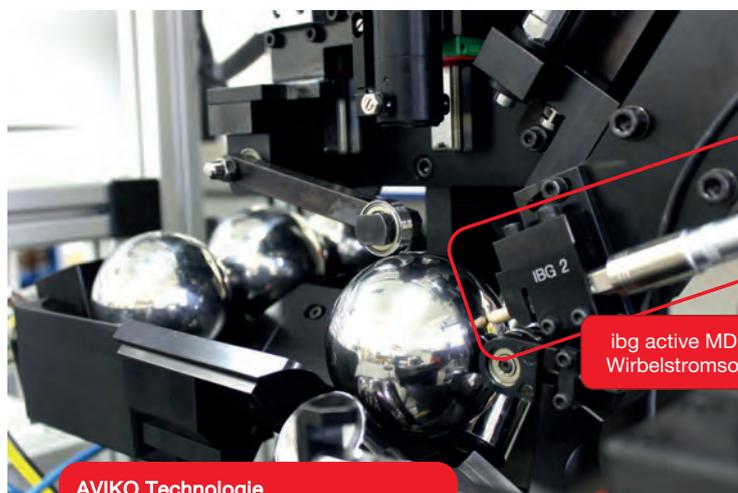
Wie kann die Wirbelstrom-Eindringtiefe gesteuert werden? Prüffrequenz!

$$\text{Eindringtiefe [mm]} = \frac{503}{\sqrt{\text{Prüffrequenz [Hz]} \times \text{elektr. Leitfähigkeit [MS/m]} \times \text{rel. Permeabilität}}}$$

$$\text{Eindringtiefe [mm]} = \frac{503}{\sqrt{10.000.000 \text{ Hz} \times 5 \frac{\text{MS}}{\text{m}} \times 100}} = 0,007 \text{ mm}$$



Prüffrequenz 10 MHz
maximaler Informationsgewinn aus
Schleifbrand mit 5-10 µm Tiefe



ibg active MD HF
Wirbelstromsonde

AVIKO Technologie

- entwickelt in der CSSR
- seit den 60er Jahren Weltstandard für die 100% Rissprüfung von Kugeln

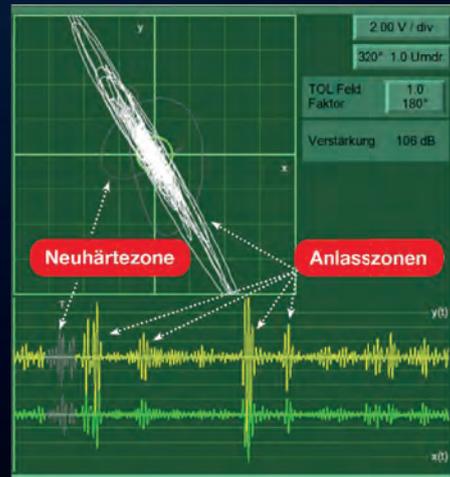
Wirbelstromprüfung - Grenzen heutiger Technologie



60 mm Kugel - Anlasszone Tiefe 20 µm

Einfache Aufgabe für heutige Prüfgeräte mit 10 MHz Sonde:

- keine Temper Lines zulässig
- Neuhärtezonen verboten

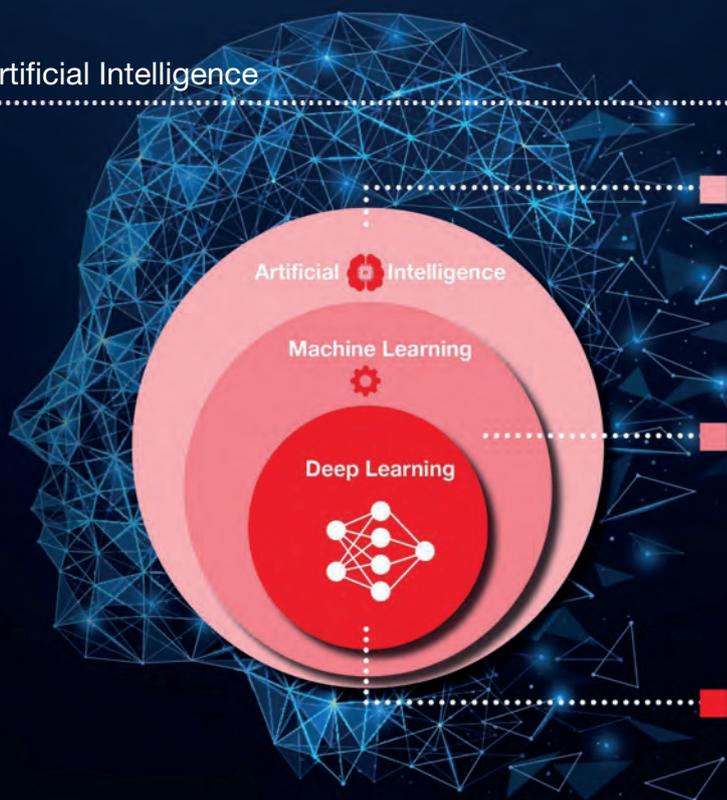


60 mm Kugel - Neuhärtezone und Anlasszonen

Mit aktueller Grenzen-basierter Prüftechnik unlösbar:

- Temper Lines bis zu einem gewissen Grad zulässig
- Neuhärtezonen verboten

Artificial Intelligence



ARTIFICIAL INTELLIGENCE

A technique which enables machines to mimic human behavior.

MACHINE LEARNING

Subset of AI technique which uses statistical methods to enable machines to improve with experience.

DEEP LEARNING

Subset of Machine Learning which makes computation of multi-layer neural network feasible.

Artificial Intelligence

AI refers to computing systems which are capable of performing tasks that humans are very good at.



Machine Learning is the application of statistical methods to enable computer systems to learn from the data towards an end goal.



Deep Learning refers to the field of neural networks with several hidden layers.



Non-exhaustive list



Classical AI
 Rule Based Systems, Search Algorithms, Depth First, Breadth First, A* algorithm, Propositional Calculus, Predicate Calculus Logic

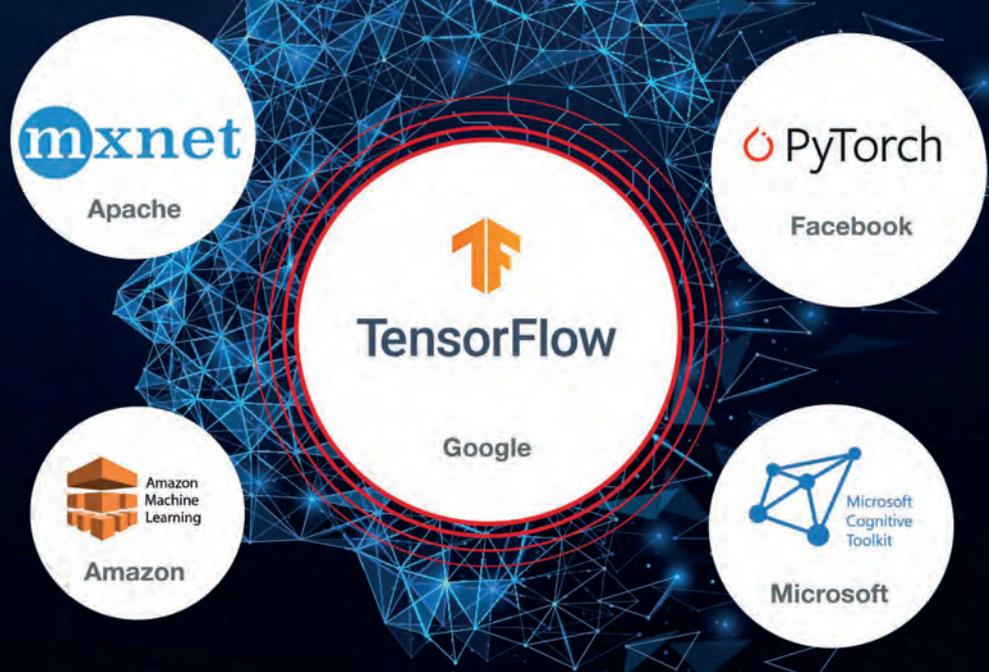


Machine Learning
 Support Vector Machine, Decision Trees, Gradient Boosting, Principal Component Analysis, Logistic Regression, Linear Regression, K-means Clustering

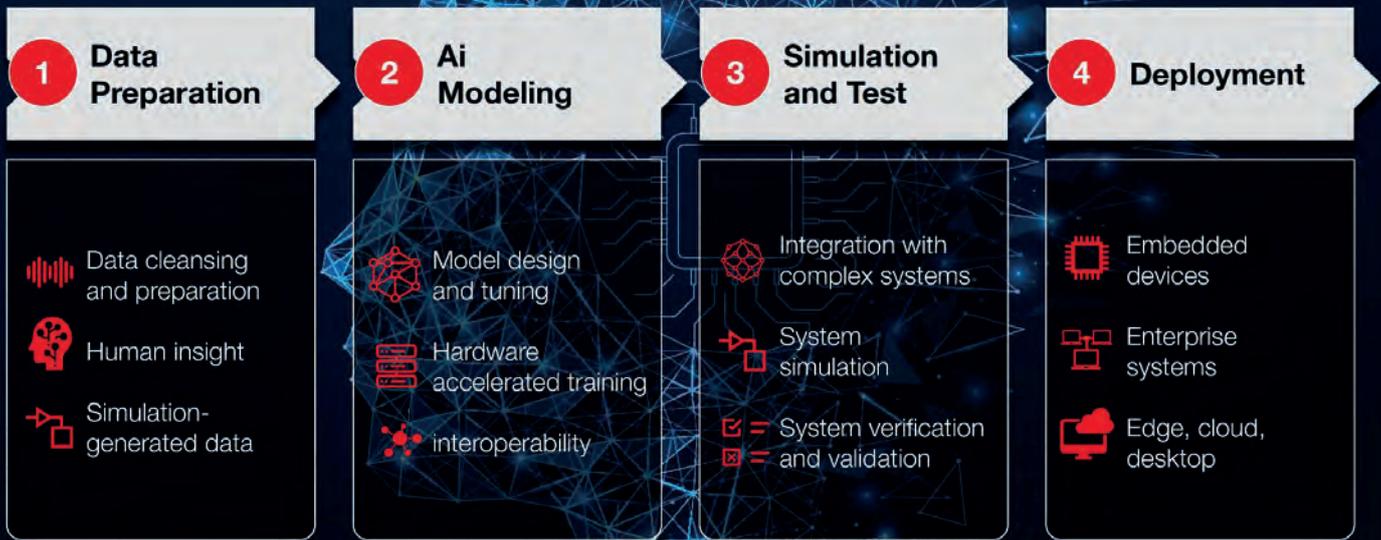


Deep Learning
 Recurrent Neural Networks, **Convolutional Neural Networks**, Deep Reinforcement Learning with Deep-Q Learning, capsules & GANs.

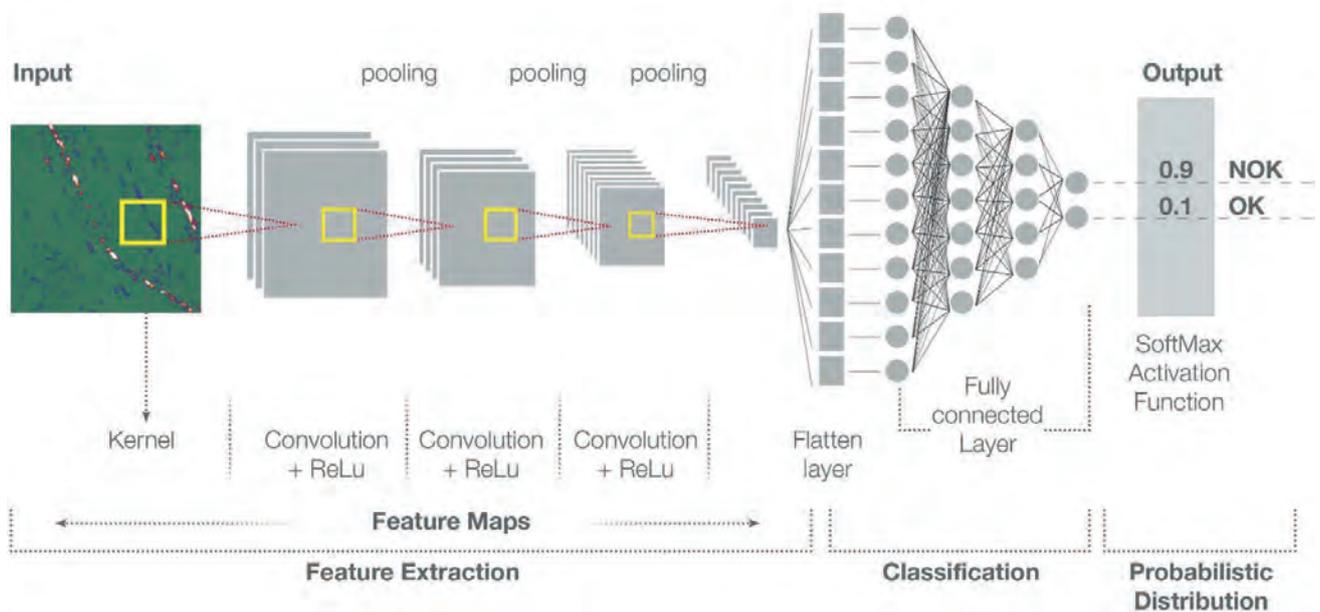
Artificial Intelligence - ML/DL frameworks



Ai workflow

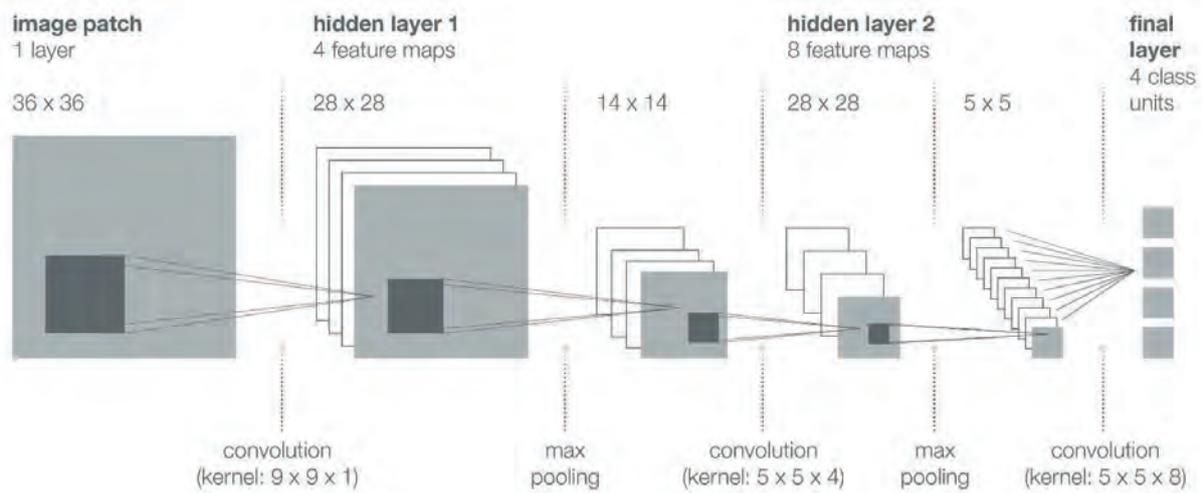


Convolutional Neural Network (CNN)



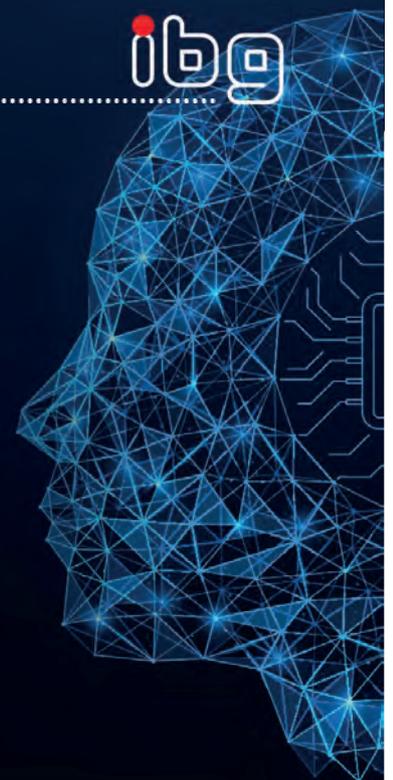
Convolutional Neural Network (CNN)

The Secret Sauce (just an example...)



CNN Training - 60 mm balls

Model	Convolutional Neural Network 2D
Input	ET C-Scan Screenshots
Output	2 classes – OK / NOK probability combined (max. 100%)
Training data	1147 OK / 2093 NOK
Validation data	153 OK / 771 NOK
Time / training run	20 min (hardware with Ai accelerator NVIDIA GPU)
Model development	2 weeks
Final accuracy	99,7 % total
Generic Model?	Yes, for steel balls so far



CNN - Supervised vs. Unsupervised Training

	Input	Unsupervised	Supervised
NOK			
NOK			
OK			

Unsupervised

Heiliger Gral der Ai
Training nur mit OK Teilen

Supervised

Training mit OK & NOK Teilen

Potenziell weitere Stufe:
Fehlerbereiche im Bild markieren

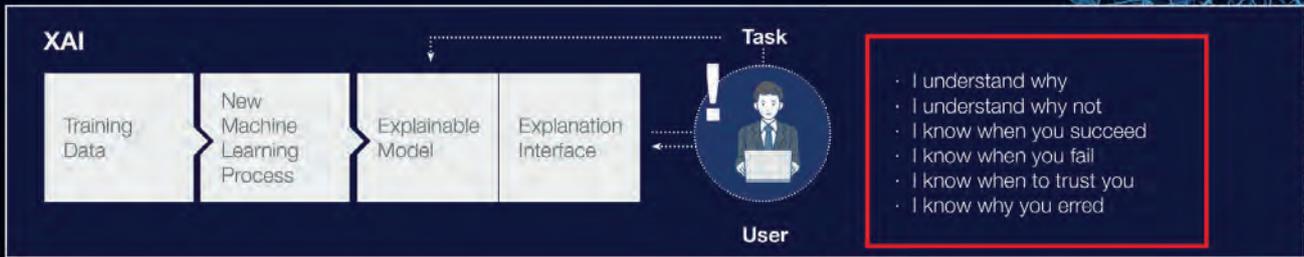
Artificial Intelligence & trust



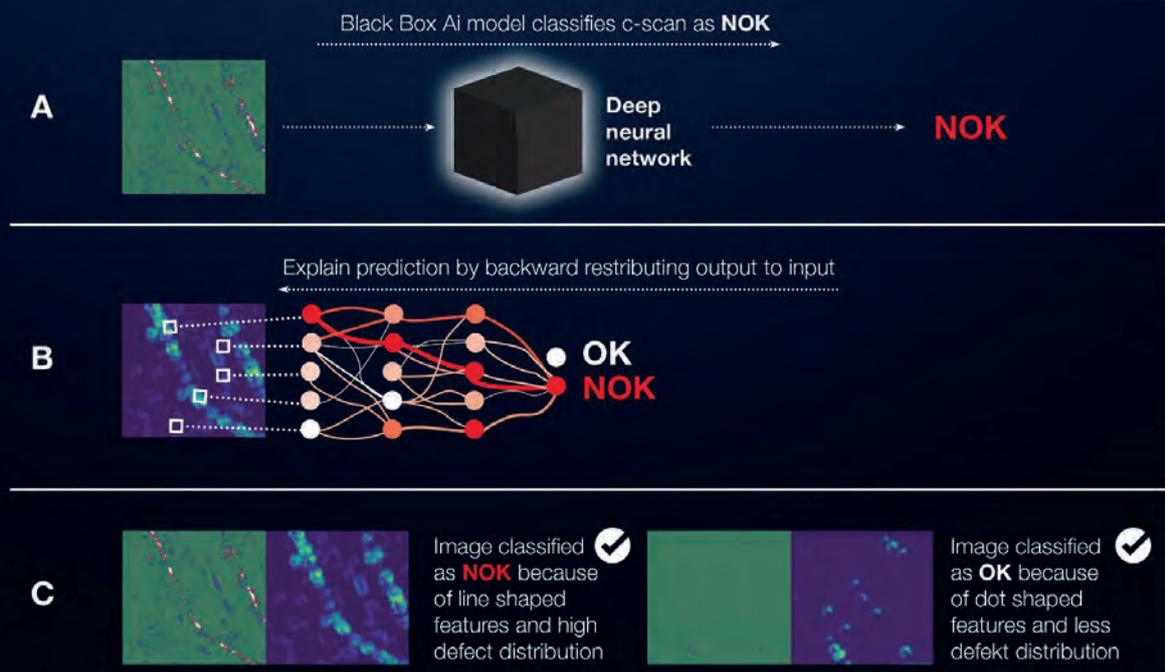
Ai result: NOK
Ai probability: 96%

OK... but why?
Can I trust you?

Explainable Ai (XAI)



ibg workflow with XAI



ibg workflow

1. Steel Ball ET testing on AVIKO 60100 with eddyvisor
2. C-scan raw data export by eddyXporter
3. Redraw C-scan on Ai PC
4. Processing C-scan by Ai
5. XAi processing
6. XAi result projection on C-scan



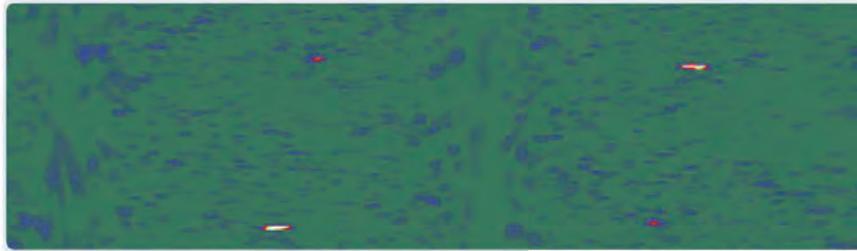
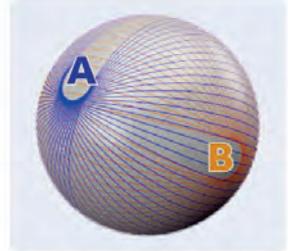
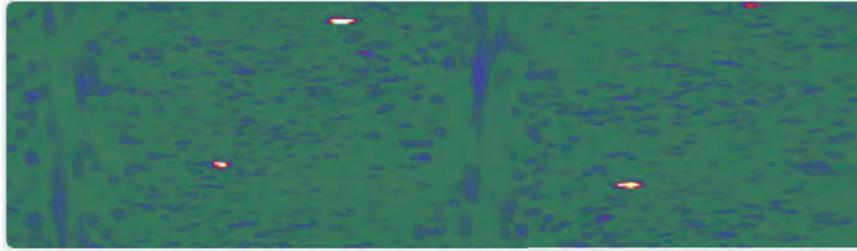
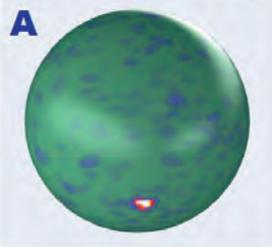
AVIKO 60100 Ai



AVIKO Q2 | 60100
Ø 60.02 mm **OK**

SCALE 0.4  5.0

LOGIC AI NOK  80 or eddyvisor NOK  3



Transmitter:	10.0 MHz
Band pass:	2.5 kHz
Scale:	0.4 - 5.0
AI result:	NOK
AI probability:	2 / 80
eddyvisor max. separation:	15.50











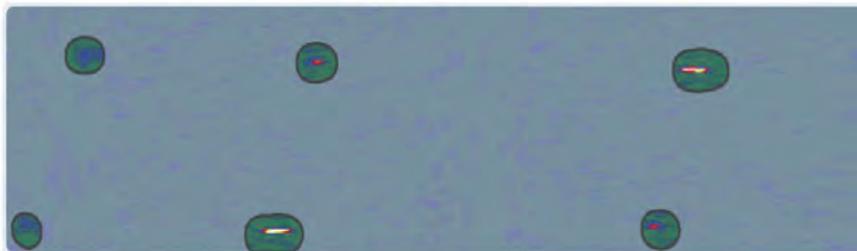
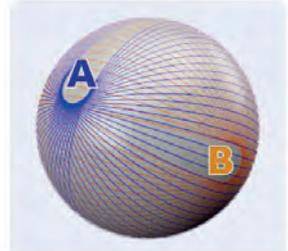
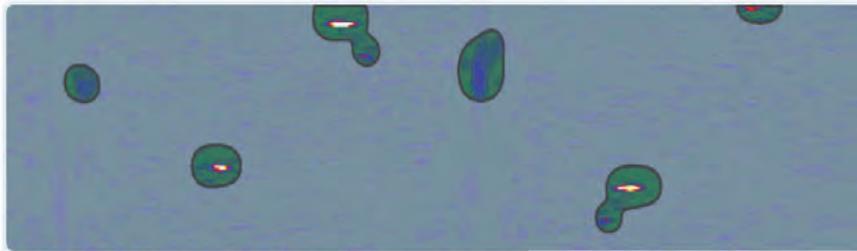
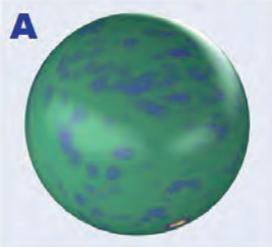



START

AVIKO Q2 | 60100
Ø 60.02 mm **OK**

SCALE 0.4  5.0

LOGIC AI NOK  80 or eddyvisor NOK  3



Transmitter:	10.0 MHz
Band pass:	2.5 kHz
Scale:	0.4 - 5.0
AI result:	NOK
AI probability:	2 / 80
eddyvisor max. separation:	15.50














START



ibg Ai Software &
AVIKO 60100 Ai ball tester
released in May 2022
during Control fair

World's first Eddy Current Ai
product on the market

