

Fehler erkennen, bevor sie entstehen

KI-basierte Sensorsysteme für Predictive
Quality & Predictive Maintenance

Einleitung

KI für die ZfP 4.0

Der Begriff »Künstliche Intelligenz« wurde bereits in den 1950er Jahren geprägt, als der britische Mathematiker Alan Turing in einem Fachaufsatz die Frage stellte, ob Maschinen denken können und kurz darauf ein Seminar unter dem Titel »Artificial Intelligence« am Dartmouth College in New Hampshire stattfand. Allerdings verläuft die Entwicklung erfolgreicher KI-Anwendungen erst in den letzten Jahren in dem uns bekannten, atemberaubenden Tempo. Teilweise ist dies sicherlich der rasanten Verbesserung der Rechenleistung zu verdanken – heutige Smartphones beispielsweise sind so leistungsfähig wie die weltweit besten Supercomputer vor 25 Jahren. Mindestens genauso wichtig für den derzeitigen Boom der KI ist die Datenexplosion der letzten Jahre. Denn die Intelligenz einer Maschine hängt vor allem von der ihr zur Verfügung gestellten Datengrundlage ab. Diese Daten werden von Sensoren geliefert, die heutzutage nahezu jeden technologischen Sektor dominieren. Beispielhaft seien hier moderne Smartphones genannt mit integriertem Näherungssensor, Fingerabdrucksensor, GPS, Gyroskop, Beschleunigungsmesser, Barometer und Herzfrequenzsensor.

Auch in produzierenden Unternehmen kommen immer mehr Sensoren zum Einsatz. Im Rahmen von »Industrie 4.0« und dem »Industriellen Internet der Dinge« (IIoT) dienen sie dazu, die Produkt- und Prozessqualität zu verbessern und dadurch Flexibilität und Produktivität zu steigern. Solche Sensoren müssen nicht nur eine hohe Datenverfügbarkeit, sondern auch ausreichende Datenqualität gewährleisten, also sicherstellen, dass die Daten korrekt, konsistent und frei von Störungen sind. Je fortschrittlicher und leistungsfähiger ein Sensor ist, desto relevanter und wertvoller sind die von ihm generierten Daten. Das Fraunhofer IZFP entwickelt seit beinahe 50 Jahren innovative Sensoren, die relevante Informationen über den Werkstoff, das Halbzeug oder die Komponente liefern, ohne diese zu zerstören. »Kognitiv« werden diese Sensoren, wenn sie mit KI verknüpft werden.

Im Vergleich zu konventionellen Auswertemethoden wie physikbasierten analytischen Modellen ermöglicht KI wesentlich präzisere Vorhersagen und robustere Klassifizierungen aus der Analyse von zerstörungsfreien Sensordaten. Dies wurde am Fraunhofer IZFP im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte nachgewiesen. Deren Ergebnisse sind nachfolgend beschrieben.

KI kommt u. a. bei der bildgebenden Prüfung (Röntgen, Ultraschall, Thermographie) zum Einsatz. Anders als klassische Bildverarbeitungsverfahren erlaubt KI auch die Verarbeitung von minderwertigem Bildmaterial, woraus sich weniger hohe Anforderungen an die Hardware (Positioniergenauigkeit, Kontrast, Auflösung u. a.) ergeben. Die Bildauswertung kann in-situ, also unmittelbar durch den kognitiven Sensor selbst erfolgen. Bildinhalte wie Defekte oder Anomalien und Scheinanzeigen werden maschinell erkannt und bewertet. So können funktionale Defekte automatisch von rein kosmetischen Defekten unterschieden werden. Gerade die Interpretation von Prüfungsergebnissen, also die Befundung, ist immer noch eine Herausforderung und erfordert hochqualifizierte Prüfer. Mittlerweile existieren KI-basierte Assistenzsysteme, die es auch wenig geschulten Bedienern ermöglichen, komplizierte Prüfaufgaben qualitätsgerecht auszuführen. KI wird dabei eingesetzt, um strukturierte und unstrukturierte Sensordaten automatisch zu analysieren und daraus Modelle zu generieren, welche die Zusammenhänge zwischen zerstörungsfrei erfassbaren und nur zerstörend messbaren Produkteigenschaften beschreiben. Die auf diese Weise ermittelten Korrelationen erlauben es, Materialeigenschaften wie die Materialhärte zerstörungsfrei zu bestimmen.

Weiterhin werden durch KI solche indirekten Messungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Genauigkeit optimiert. Werden sensorisch erfasste Prozessemissionen mit KI in Echtzeit verarbeitet, können Defekte frühzeitig, schon während ihrer Entstehung erkannt werden. Darüber hinaus erkennt die KI durch den kontinuierlichen Abgleich aktueller Ergebnisse mit historischen Daten Muster, die es ermöglichen, zukünftige Ergebnisse und Trends vorherzusagen. Fehler, Engpässe, Ausfälle und Produktivitätsverluste können rechtzeitig erkannt und durch geeignete Korrekturen vermieden werden. Damit gewährleisten KI-basierte Sensorsysteme, dass Ausschuss gar nicht erst produziert wird (Predictive Quality) und Maschinen nicht mehr ungeplant ausfallen (Predictive Maintenance).

Eine aktuelle Studie des Capgemini Research Institute zeigt, dass Deutschland bei der Einführung von KI in der Fertigungsindustrie heute weltweit führend ist. 69 Prozent der deutschen Fertigungsunternehmen haben mindestens einen KI-Anwendungsfall im Einsatz. In den USA sind es nur 28 Prozent, in China 11 Prozent. Durch seine Forschung trägt das Fraunhofer IZFP dazu bei, dass dieser Innovationsvorsprung noch ausgebaut wird.

Dr. Bernd Wolter
Fraunhofer IZFP

Inhalt

Grußwort	1
KI für die ZfP 4.0	1
3D-SmartInspect	4
Intelligentes Assistenzsystem mit interaktiver Visualisierung für die manuelle Prüfung ...	4
AcoustiX	5
Akustisches Sensorsystem zur Montageendkontrolle oder Betriebsüberwachung mittels kognitiver Signalanalyse	5
AM-SoftND	6
Qualitätssicherung und -regelung für Additive Manufacturing (AM) mittels kognitivem Online-Monitoring	6
FML-Kalibrierung	7
Optimierte Vorhersagemodelle für 3MA-PHS-Systeme auf Basis von Federated Machine Learning	7
FSW-Monitoring	8
Echtzeit-Monitoring der Prozessstabilität und Verbindungsgüte beim Rührreißschweißen durch Datenfusion	8
inspECT-PRO	9
Sensorsystem zur schnellen, KI-basierten Sortierprüfung	9
Traceability	10
KI-basierter sensorischer Fingerprint	10
WL-SoftND	11
Multimodale Softsensorik zur gezielten Beeinflussung von Oberflächeneigenschaften bei der Zerspanung	11
X8-Sensorsystem	12
KI-basierte Prozessoptimierung im Stahlwerk – multimodales und intelligentes Sensorsystem zur Hardspotdetektion an Grobblechen	12
Glossar	14
Impressum	16

3D-SmartInspect

Intelligentes Assistenzsystem mit interaktiver Visualisierung für die manuelle Prüfung

Anwendung

Intelligentes System zur Qualitätssicherung von sicherheitsrelevanten Bauteilen oder großen Oberflächen

Ausgangssituation

Bei der im großen Umfang verwendeten Handprüfung hängt die Qualität der Prüfung stark vom Personal und den Umgebungsbedingungen ab. Die korrekte Analyse der Messwerte und die vollständige Erfassung des Prüfbereichs verlangen ein großes Maß an persönlicher Expertise. Zudem ergeben sich hinsichtlich Prüfdurchführung für die Unternehmen erhebliche Herausforderungen. Prüfprotokolle werden bislang handschriftlich erstellt und erkannte Auffälligkeiten auf den Bauteilen selbst markiert. Ein digitaler Zusammenhang zwischen dem Prüfobjekt und der Prüfdurchführung wird dabei nicht hergestellt.

Mit dieser Thematik hat sich das Fraunhofer IZFP befasst und das intelligente Assistenzsystem »3D-SmartInspect« mit kognitiver Signalauswertung entwickelt. Der Prüfprozess wird optisch erfasst, das Trackingmodul verfolgt die Bewegung des Prüfkopfes und protokolliert Prüfpositionen und Messsignale. Die Messsignale werden automatisch KI-gestützt ausgewertet und für das Livebild mit Ortskoordinaten fusioniert. Die registrierten Fehleranzeigen werden auf einem Kontrollbildschirm (Notebook oder Tablet) dargestellt. Eine Augmented Reality (AR) Software ermöglicht zudem die Visualisierung mit einer HoloLens™. Das Ergebnis kann abschließend digital an einen Server oder eine Datenzentrale übermittelt werden.

KI-Ansatz: KI-gestützte Analyse

KI-gestützte Analyse von Wirbelstrom- und Ultraschallsignalen

Vorteile

- Zuverlässige Fehlerdetektion in Messsignalen
- Interaktive Unterstützung des Prüfpersonals im manuellen Prüfprozess
- Digitales Prüfgedächtnis: Automatische Dokumentation der Prüfergebnisse als Nachweis der korrekten Prüfdurchführung gemäß Anforderungen der Qualitätssicherung, einschließlich Übermittlung und Speicherung der ausgewerteten Materialdaten (zentraler Datenspeicher)
- Kombination mit kollaborativer Robotik möglich
- Einbindung weiterer Sensoren auf Grundlage anderer Prüfprinzipien

Anwendungsbereiche

Das Assistenzsystem ist für alle Anwendungsbereiche der Handprüfung geeignet, u. a.

- Luft- und Raumfahrt (sicherheitsrelevante Komponenten)
- Energieanlagen (Turbinen, Generatoren, Hochdruckbehälter etc.)
- Großgerätebau

Reifegrad

Prototyp 3D-SmartInspect ist erfolgreich aufgebaut; die Industrivalidierung wird derzeit durchgeführt.

Verwendete Sensoren

- Ultraschall
- Wirbelstrom
- Optische Sensorik



AcoustiX

Akustisches Sensorsystem zur Montageendkontrolle oder Betriebsüberwachung mittels kognitiver Signalanalyse

Anwendung

Montageendkontrolle der Schneidwerkzeuge von Mähreschern

Ausgangssituation

Maschinen oder Anlagen im industriellen Umfeld verändern bei Defekten ihre Betriebsgeräusche. Erfahrene Spezialisten erkennen anhand dieser Änderungen defekte Komponenten. Derartige Prüfungen unterliegen allerdings subjektiven Einflüssen wie der Ermüdung des Personals oder Störungen durch Umgebungslärm mit der Folge unzuverlässiger Erkennung. Zur Lösung dieser Problematik hat das Fraunhofer IZFP »AcoustiX« entwickelt – ein akustisches Sensorsystem mit kognitiver Signalauswertung.

KI-Ansatz: Algorithmik

Der kognitive Ansatz ähnelt der subjektiven Geräuschbewertung durch einen Menschen, liefert jedoch objektive und reproduzierbare Ergebnisse. Betriebsschwingungen und/oder -geräusche werden durch geeignete Sensoren erfasst und digitalisiert, anschließend in zeitlich kurze Segmente eingeteilt, gefiltert und transformiert. Abschließend werden aufeinanderfolgende Signalabschnitte mit geeigneten mathematischen Methoden verglichen.

Unerwartete Schwingungen oder Geräusche ergeben charakteristische Unterschiede zwischen den Segmenten, was vom System entsprechend angezeigt wird. Die entwickelten Algorithmen benötigen kein Vorwissen. Lediglich zur grundlegenden Softwareparametrisierung sind einige Vergleichssignale erforderlich.

Die Algorithmen spüren somit Auffälligkeiten ohne aufwendiges Anlernen auf. Vielmehr lernt der Algorithmus anhand der Historie des Signals aufeinanderfolgende Signalsegmente zu evaluieren, um das Signal als Ganzes zu beurteilen.

Vorteile

- Hohe Prüfsicherheit durch objektive, gleichzeitige Bewertung von Signalen mehrerer Sensoren
- Kognitive Qualitätsbewertung ohne explizite Kalibrierung
- Vielfältige Einsatzmöglichkeiten
- Erlaubt permanentes Qualitätsmonitoring
- Deutlich reduzierter Einrichteaufwand
- Schnelle Online-Auswertung
- Individueller, maßgeschneiderter Systemaufbau
- Integration der Auswertelogik in bestehende Prüfsysteme möglich
- Vor-Ort-Machbarkeitsuntersuchungen durch portables System
- Benutzerfreundliche, kundenspezifisch anpassbare Software

Anwendungsbereiche

- Montageendkontrolle von Maschinen oder Anlagen mit beweglichen Teilen
- Betriebsüberwachung in regelmäßigen Intervallen oder permanentes Qualitätsmonitoring zur Überwachung großer, autonom betriebener Maschinen und Anlagen
- Qualitätsbewertung einzelner Baugruppen, die u. a. auf Prüfständen betrieben werden

Reifegrad

Das System ist bei einem Kunden in der Produktionslinie im Dauerbetrieb und erfüllt dort die gestellten Aufgaben zur vollsten Zufriedenheit bei optimaler Zuverlässigkeit.

Verwendete Sensoren

Mikrofone und Körperschallsensoren



Darstellung eines akustischen Signals mit Auffälligkeiten im rot markierten Bereich

AM-SoftND

Qualitätssicherung und -regelung für Additive Manufacturing (AM) mittels kognitivem Online-Monitoring

Anwendung

Regelung der Fertigungsparameter von AM-Anlagen zur Einstellung gewünschter Bauteilqualitäten

Ausgangssituation

Herkömmliche AM-Anlagen geben nur wenig Auskunft über die Qualität des Bauteils während des Prozesses. Das Auftreten von Auffälligkeiten wie Poren, Anbindungsfehlern und Rissen wird erst nach Fertigstellung des Bauteils mittels Metallographie oder mittels Röntgen-Computertomographie (CT) nachgewiesen. Weiterhin ist bisher nur unzureichend geklärt, wie sich die sensorisch erfassten Auffälligkeiten in AM-Bauteilen auf deren Funktionseigenschaften (z. B. mechanische Belastbarkeit) auswirken.

Aktuelle Forschungsprojekte des Fraunhofer IZFP zielen darauf ab, KI-basierte Verfahren zur Fehlerfrüherkennung und zur adaptiven Prozessregelung bei AM-Prozessen zu realisieren.

KI-Ansatz: Algorithmik

Ein wesentlicher Punkt des Lösungsansatzes liegt in der Betrachtung der gesamten Fertigungskette, angefangen bei den technologischen Grundlagen bis zur Anwendung der erstellten Baugruppe. Ausgehend vom CAD-Modell werden erste Simulationsgrößen aus den Fertigungsplänen gewonnen. Der entstehende Datenpool wird durch kontinuierlich erfasste Maschinen- und Sensordaten während des Fertigungsprozesses erweitert. Anschließend erfolgt die Bewertung der Baugruppe durch eine nachgelagerte zerstörungsfreie Prüfung und Belastungstests. Als Resultat steht nun eine Datenbank mit umfassenden Informationen über das Bauteil zur Verfügung.

Die Ergebnisse werden anschließend analysiert, relevante Einflussgrößen identifiziert und klassifiziert. Design-, Simulations-, Maschinen- und Sensordaten werden zu einem digitalen Zwilling des Bauteils kombiniert und mittels geeigneter ML-Algorithmen zur Bestimmung von Fehlerarten, -größen, -positionen und resultierenden Bauteileigenschaften genutzt.

Vorteile

- Reduzierung erforderlicher Nachuntersuchungen
- Verbesserte Bauteilqualität
- Früherkennung von funktionalen Bauteilfehlern
- Reduzierung der Vorversuche zur Prozessoptimierung
- Kostenersparnis durch beschleunigte Produktentwicklungszeit

Anwendungsbereiche

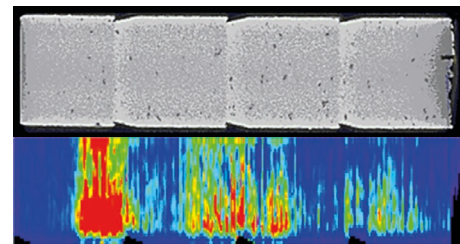
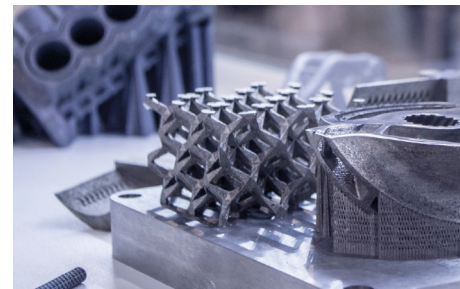
- Pulverbettbasierte AM-Prozesse (LBM, EBM, SLS usw.)
- Auftragsbasierte AM-Prozesse (FFF, LMD, 3DMP usw.)

Reifegrad

Das System befindet sich derzeit in Entwicklung.

Verwendete Sensoren

- Sensoren zur Messung hochfrequenter Schallemissionen
- Thermographie
- Wirbelstrom
- Ultraschall
- Computertomographie



Querschnitt einer Röntgenaufnahme eines AM-Testkörpers aus 4 Würfeln (oben); Querschnitt der Körperschallamplituden in Volumendarstellung (unten)

FML-Kalibrierung

Optimierte Vorhersagemodelle für 3MA-PHS-Systeme auf Basis von Federated Machine Learning

Anwendung

Optimierung der Kalibrierung von verteilten 3MA-Prüfsystemen

Ausgangssituation

Warmumgeformter Stahl (Press-Hardened Steel, PHS) wird in der Automobilindustrie eingesetzt, um Blechbauteile mit extrem hohen Festigkeiten (bis 2000 MPa) herzustellen. Diese werden als Verstärkungselemente der Karosserie eingesetzt. Mit 3MA-PHS steht ein Prüfsystem zur Verfügung, mit dem die Festigkeitseigenschaften des Stahls und die Beschichtungsdicke in diesen Bauteilen zerstörungsfrei vorhergesagt werden können. Voraussetzung ist eine sogenannte Kalibrierung, d. h. die Erstellung eines Vorhersagemodells, mit dem die Zielgröße, z. B. die Härte, aus Messungen der bis zu 41 elektromagnetischen Messgrößen von 3MA bestimmt werden kann (Predictive Analytics). Im Sinne einer optimalen Prognostizierbarkeit ist es notwendig, das Vorhersagemodell lokal anzupassen.

KI-Ansatz: Machine Learning

Zur Bestimmung des Vorhersagemodells wird üblicherweise eine multiple lineare Regression verwendet. Demnach ist die 3MA-Kalibrierung eine typische Aufgabe für das überwachte maschinelle Lernen (Supervised Learning). Zum Trainieren werden Datensätze verwendet, die jeweils aus dem mit Hilfe eines Referenzverfahrens bestimmten Wert der Zielgröße und den dazugehörigen Werten der 3MA-Messgrößen bestehen. Bei weltweit annähernd 200 Installationen führt dies zu mittlerweile mehr als 50 000 Trainingsdatensätzen (Big Data), die über viele Standorte verteilt sind. Mit Federated Learning können mehrere Prüfsysteme an unterschiedlichen Standorten gemeinsam ein Vorhersagemodell erlernen, während die

Trainingsdaten selbst lokal gespeichert bleiben. Für den Einsatz des maschinellen Lernens müssen dann nicht mehr alle Daten auf einem zentralen Server gespeichert werden. Das individuelle System wird mit dem aktuellen Master-Modell ausgestattet, welches dann anhand der lokalen Trainingsdaten individuell angepasst wird. Dieses individuelle Modell wird auch zentral gespeichert und dient letztlich zur Optimierung des gemeinsam genutzten Master-Modells.

Vorteile

- Stetige Verbesserung aller Vorhersagemodelle durch neue lokale Daten
- Nur Modelle und keine sensiblen Messdaten werden zentral gespeichert
- Nur kleine Datenmengen, daher geringe Hardware-Anforderungen

Anwendungsbereiche

- Bisher nur Automobilkarosseriebau
- Übertragbar auf andere 3MA-Kalibrierungen

Reifegrad

- 3MA-PHS ist in der Industrie etabliert
- Federated Learning ist noch in der Entwicklung

Verwendete Sensoren

3MA-PHS



Ergebnisse	Einstellungen	% rms
Werkstoff: 22MnB5		
Zustand: IO		
Härte: 460 HV		
Rp02: 1053 MPa		
Rm: 1515 MPa		
A50: 5.79 %		
Ag: 3.62 %		

Ergebnisdarstellung

FSW-Monitoring

Echtzeit-Monitoring der Prozessstabilität und Verbindungsgüte beim Rührreibschweißen durch Datenfusion

Anwendung

Überwachung der Prozessstabilität und der Verbindungsgüte beim Rührreibschweißen (Friction Stir Welding, FSW) durch Datenfusion von Prozessparametern, Schallemissionen sowie Expertenwissen

Ausgangssituation

Das Rührreibschweißen gewinnt aufgrund seiner Vorzüge als Festphasen-Fügeprozess immer stärker an industrieller Bedeutung. Nicht zuletzt aufgrund der mechanischen Wechselwirkung des Schweißwerkzeugs mit den zu fügenden Bauteilen sowie der komplexen Kinematik des Prozesses, kommt einer zuverlässigen Prozessüberwachungsstrategie beim FSW ein besonderer Stellenwert zu. Das Fraunhofer IZFP hat hierzu einen intelligenten Ansatz zum Monitoring des FSW-Prozesses entwickelt.

KI-Ansatz: Datenfusion

Durch Datenfusion von Prozessdaten (z. B. Schweißkräfte, Temperaturen) mit dem durch den Prozess emittierten Schall sowie Expertenwissen können Instabilitäten im Prozess zuverlässig erkannt werden, noch bevor es zu nicht tolerierbaren Unregelmäßigkeiten in der Fügezone kommt. Auftretende Prozessschwankungen können anhand des Verlassens eines zuvor definierten Toleranzbandes in den Prozessschallemissionen detektiert werden. Durch KI-basierte Datenauswertung sowie die Kopplung mit maschinenseitigen Daten und Expertenwissen lassen sich zudem Rückschlüsse auf Ort, Dimension sowie Art von drohenden Qualitätsmängeln (Predictive Quality) sowie Aussagen über den Verschleißzustand des Schweißwerkzeugs (Predictive Maintenance) treffen. Aufgrund der Echtzeitfähigkeit können mit diesen Informationen schließlich Strategien für die

Prozessregelung und die Anlageninstandhaltung realisiert werden.

Vorteile

- Ganzheitlicher Monitoring-Ansatz (Prozess, Bauteile, Anlagen, Werkzeuge etc.)
- Echtzeitfähigkeit
- Basis für Regelungskonzepte
- Hohe Zuverlässigkeit durch Nutzung diverser Signalquellen
- Einfache Übertragbarkeit auf alternative Maschinen und Fertigungsverfahren
- Effizienzsteigerung in der Produktion durch Reduktion, Vermeidung von Ausschuss und Ausfallzeiten sowie Planbarkeit von Rüstzeiten

Anwendungsbereiche

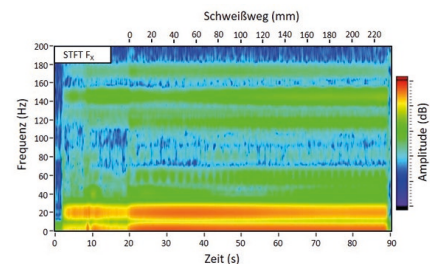
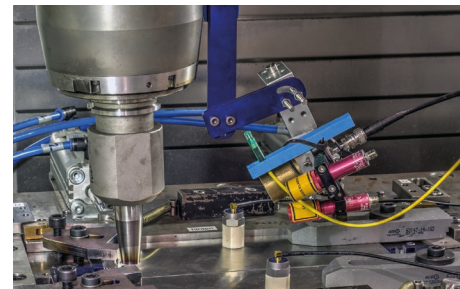
- Automobil, Luft- und Raumfahrt, Bahn, Schiffsbau
- Beurteilung der Verbindungsgüte und der Prozessstabilität bei Fügeverfahren
- Aktuell am Beispiel Rührreibschweißen – übertragbar jedoch auf nahezu jedes Fertigungsverfahren

Reifegrad

Ergebnis eines internen Forschungsprojektes; erste Studien zur industriellen Umsetzung in Planung

Verwendete Sensoren

- Nutzung vorhandener Prozesssensorik (Temperatur, Drehmomente, Kräfte etc.)
- Körper- und Luftschall-Piezosensoren
- Lasermikrofone



Beispiel des Frequenzspektrums (STFT) der Prozesskraft in Vorschubrichtung

inspECT-PRO

Sensorsystem zur schnellen, KI-basierten Sortierprüfung

Anwendung

Schnelle Bauteilkontrolle in unterschiedlichen Produktionsschritten zur Gewährleistung der Produktqualität und Sicherstellung des reibungslosen Produktionsprozesses

Ausgangssituation

Im automatisierten Fertigungsprozess wird die Effizienz und Wirtschaftlichkeit u. a. durch die Qualität der Produkte bestimmt. Massenteile werden hauptsächlich als Schüttgut angeliefert und der weiterverarbeitenden Maschine zugeführt. Um Anlagenstörungen zu vermeiden und die geforderte Qualität sicherzustellen, ist es notwendig, eine Prüfung jedes Teils durchzuführen; statistische QS-Methoden können dies nicht leisten. Das Detektieren von Defekten, die Materialzusammensetzung sowie der Zustand des Vergütungsprozesses (Härtung) sind qualitätsbeeinflussend und können mit dem Wirbelstromverfahren kontrolliert werden.

KI-Ansatz: Machine Learning

Unter Zuhilfenahme von Machine Learning-Algorithmen wird eine Echtzeitauswertung auf der Prüfhardware ermöglicht. Angewendet wird hier u. a. die multiple lineare Regressionsanalyse. Die dadurch erstellten Regressionshyperebenen dienen dann als Vorhersagewerte für die zu beobachtenden Zielgrößen wie elektrische Leitfähigkeit, Härte oder Schichtdicke. Mit Klassifikationsalgorithmen wird ein weiteres Ziel angestrebt: Bietet die Regression eine Vorhersage über die Zielgröße eines Messwertes, so liefert die Klassifikation eine Aussage über die Gruppenzugehörigkeit eines Messwertes. So können z. B. fehlerhafte Schrauben mit Riss einer anderen Klasse zugeordnet werden wie fehlerfreie Schrauben. Mit OPC UA (Open Platform Communication Unified Architecture) können die Ergebnisse dann schnell den entsprechenden

Knotenpunkten zugeführt werden. Die Kombination beider Methoden erlaubt eine sichere und schnelle Unterscheidung unterschiedlicher Bauteilmerkmale.

Vorteile

- Einfache Klassifizierung relevanter Bauteilmerkmale
- Sehr schnelle Prüfung, innerhalb weniger Millisekunden
- Lückenlose Dokumentation aller Bauteile
- Schnelle Integration in Produktionslinien durch OPC UA
- Wartungsarmer Betrieb
- Einfache Weitergabe von Informationen an andere Produktionsmaschinen und dadurch Möglichkeit der Prozessoptimierung

Anwendungsbereiche

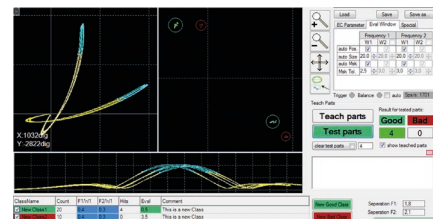
- Prüfung von Masseteilen im Produktionsprozess zur Gewährleistung durchgehender Qualität
- Kontrolle von Bauteilspezifikationen zur Sicherstellung ausfallfreier nachgelagerter Fertigungsschritte
- Möglichkeit der Produktionsoptimierung durch Implementierung eines Feedbackpfades zur Prozesssteuerung

Reifegrad

Sortierprüfsysteme sind seit vielen Jahren wartungsarm im Dauereinsatz.

Verwendete Sensoren

Elektromagnetische Wirbelstromsensoren



Machine Learning-Software

Traceability

KI-basierter sensorischer Fingerprint

Anwendung

Identifikation und Rückverfolgung von Halbzeugen und Bauteilen in Fertigungslinien

Ausgangssituation

Konventionelle Objektkennzeichnungen (z. B. Barcodes, RFID) können produktionsbedingt meist nicht dauerhaft und unbeschädigt auf dem zu identifizierenden Objekt verbleiben. Generell sind optisch erfassbare Merkmale auf der Objektoberfläche nur begrenzt für die Rückverfolgung verwendbar. Ändert sich die Oberfläche während eines Verarbeitungsschrittes zu stark, ist eine Identifikation im Anschluss nicht mehr möglich. Es fehlt also an sensorischen Verfahren, die eine durchgängige Traceability der Bauteile erlauben, wenn diese während ihrer Verarbeitung z. B. durch Umformung, spanende Bearbeitung oder Beschichtung tiefgreifend verändert wurden.

Das Fraunhofer IZFP setzt an dieser Stelle an und nutzt sensorische Verfahren, um das Bauteil anhand intrinsischer Merkmale, wie Werkstoffeigenschaften oder tolerierbaren »Fehlern« aus dem Bauteilinneren zu identifizieren. Jede Unregelmäßigkeit im Gefüge des Bauteils wie Korngrenzen/-größen, Einschlüsse, Spannungen etc. hat Einfluss auf das Messsignal und erlaubt die Aufnahme der intrinsischen Struktur des individuellen Bauteils.

KI-Ansatz: Machine Learning (ML)

Aus den aufgenommenen Daten der intrinsischen Struktur lassen sich Features extrahieren, welche markante Merkmale der Struktur des Bauteils repräsentieren. Durch Vergleich dieser Features mit denen anderer Bauteile kann ein geeigneter Klassifikator das Bauteil identifizieren. Realisierbar ist dies mittels neuronaler Netze zum automatischen Extrahieren von Features und gleichzeitiger Identifikation

des Bauteils oder aber auch mittels klassischer ML-Verfahren, welche Features nach Expertenwissen extrahieren und diese anschließend mit einem Klassifikator zur Identifizierung nutzen. Die höhere Abstrahierung von Features bei der Nutzung neuronaler Netze verspricht bei geeignetem Training genauere Ergebnisse. Der verwendete KI-Ansatz wird gemeinsam mit dem Fraunhofer IWU und ITWM im Rahmen eines WISA-Projektes entwickelt.

Vorteile

- Rückverfolgbarkeit jedes Bauteils
- Keine zusätzlichen Objektkennzeichnungen notwendig
- Zuverlässige Erkennung von Produktfälschungen
- Lückenlose Dokumentation der Bauteilhistorie
- Signifikante Optimierungspotenziale für die Qualitätssicherung

Anwendungsbereiche

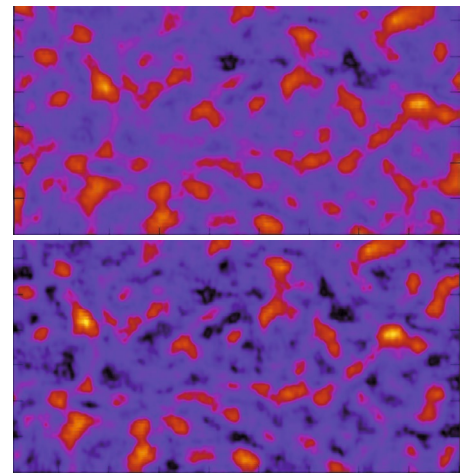
- Potenziell jedes elektrisch leitfähige Bauteil
- Umformteile (aktuell)
- Implementierbar in beliebige Prozessketten (perspektivisch)

Reifegrad

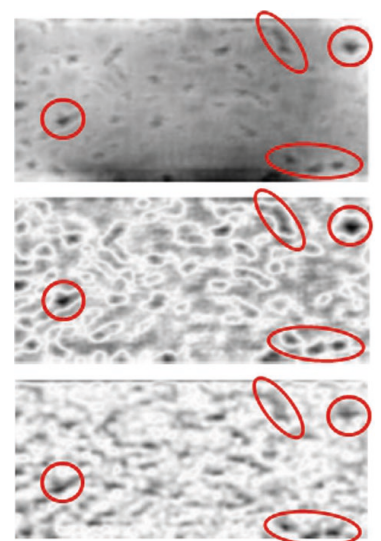
Forschungsprojekt mit ersten vielversprechenden Ergebnissen

Verwendete Sensoren

Elektromagnetische Verfahren



Elektromagnetische Messung einer Zugprobe vor Verformung (unten); elektromagnetische Messung der Zugprobe nach ca. 5 Prozent Streckung (oben)



Identifizierung eines Bauteils nach verschiedenen Umformungsstufen anhand bestimmter Mikrostruktur-Merkmale

WL-SoftND

Multimodale Softsensorik zur gezielten Beeinflussung von Oberflächeneigenschaften bei der Zerspaltung

Anwendung

Echtzeiterfassung von Oberflächeneigenschaften von 42CrMo4 während des Drehprozesses

Ausgangssituation

Im industriellen Umfeld sind unter anderem Maschinen, Anlagen, Rohmaterialien natürlichen Schwankungen ausgesetzt, die einen direkten Einfluss auf den Herstellungsprozess haben.

Die Herausforderung bei Zerspaltungsprozessen ist es, die Ausbildung randschichtnaher thermisch induzierter weißer Schichten (White Layer) und der mit ihnen einhergehenden nachteiligen Zugeigenspannungszustände zu vermeiden. Dagegen sind mechanisch induzierte weiße Schichten, welche mit Druckeigenspannungen einhergehen, vorteilhaft. Zur Lösung dieser Problematik entwickelt das Fraunhofer IZFP echtzeitfähige Überwachungssysteme.

KI-Ansatz: Softsensor

Der ganzheitliche Ansatz verknüpft Simulations-, Prozess- und Expertenwissen; eine zerstörungsfreie Prüfsensorik ermöglicht darüber hinaus eine Datenfusion. Diese bildet das modulare Grundgerüst für den Aufbau eines Softsensors, welcher das entsprechende fusionierte Zerspaltungssystemmodell beinhaltet.

Statistische Versuchsplanung erlaubt das Ermitteln aller relevanten Prozesszustände, von fehlerfreien Zuständen (i.O.) bis fehlerhaften Zuständen (n.i.O.). Im Anschluss wird der Softsensor auf Basis der Zerspaltungsprozessdaten antrainiert.

Der Softsensor ist nun einsatzfähig und bildet die kognitive Instanz, um als Beobachter die Zustände des dynamischen Systems zu

schätzen und im Sinne von »Predictive Maintenance« eingreifen zu können.

Vorteile

- Gezielte Einstellung der geforderten Oberflächeneigenschaften (White Layer und/ oder Eigenspannungen) durch Regelung des Drehprozesses
- Prüfsicherheit, Vollständigkeit, Genauigkeit, Widerspruchsfreiheit durch multidimensionale Softsensorik
- Echtzeit-/Online-Qualitätsüberwachung (Monitoring)
- Schnittstellen zu MES, Prüfsystemen oder Werkzeugmaschinen
- Individueller, maßgeschneiderter Systemaufbau
- Integration der multidimensionalen Softsensorik in bestehende Systeme

Anwendungsbereiche

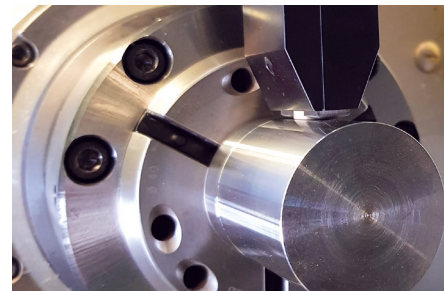
- Permanente Betriebsüberwachung und Qualitätsmonitoring von einzelnen Maschinen/Anlagen oder ganzer Fertigungsstraßen
- Qualitätsbewertung einzelner Baugruppen, die u. a. auf Prüfständen betrieben werden

Reifegrad

- Forschungsvorhaben gemeinsam mit weiteren Partnern im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP2086 (SCHU 1010/65-1, LA 2351/46-1, WO 903/4-1)

Verwendete Sensoren

- Mikromagnetik (3MA)
- Hochfrequente Luftschallsensorik
- Hochfrequente Körperschallsensorik
- Dynamometer mit multidimensionaler Kraftmessung
- Temperatursensoren



X8-Sensorsystem

KI-basierte Prozessoptimierung im Stahlwerk – multimodales und intelligentes Sensorsystem zur Hardspotdetektion an Grobblechen

Anwendung

Prozessoptimierung im Stahlwerk

Ausgangssituation

Lokale Aufhärtungen (engl. Hardspots) reduzieren nachweislich die Lebensdauer von Gaspipelines. Entweichendes Erdgas als Folge von Leckagen belastet die Umwelt; der Austausch der Pipeline und die dadurch resultierenden Produktionsausfälle verursachen wirtschaftliche Schäden in Milliardenhöhe. Durch eine rechtzeitige Erkennung dieser Hardspots können betroffene Grobbleche vor Auslieferung an den Endkunden bereits im Stahlwerk nachbearbeitet und bei Bedarf aussortiert werden.

KI-Ansatz: Intelligente Signalverarbeitung

Mit dem Ziel der Prozessoptimierung im Stahlwerk wurde am Fraunhofer IZFP das mikromagnetische, KI-basierte X8-Sensorsystem entwickelt. Dieses nutzt Effekte in der magnetischen Hysterese und extrahiert aus den verfügbaren Rohdaten magnetische Fingerabdrücke und charakteristische Merkmale zum Monitoring des Grundmaterials und zur Detektion der Hardspots. Die Entwicklung eines für den Menschen intuitiv nachvollziehbaren »Nearest-Neighbor-Algorithmus« kombiniert mit intelligenter Signalverarbeitung erlaubt die zuverlässige Detektion der Hardspots sogar unter den im Stahlwerk herrschenden Umgebungsbedingungen.

Mittels intelligenter Signalverarbeitung benötigt das X8-Sensorsystem kein A-Priori-Training – es lernt im laufenden Betrieb. Dadurch können auch unbekannte Stahlsorten oder Hardspotausprägungen im Prozess detektiert und bewertet werden.

Darüber hinaus erfolgt eine Online-Plausibilitätsprüfung des Systems. Liegt die Sensorabhebung außerhalb des spezifizierten Bereichs und muss gegebenenfalls nachgeregelt werden, liegt ein schleichender Sensorverschleiß oder ein Sensordefekt vor? All diese Zustände werden vom X8-Sensorsystem erkannt und mit der Bewertung des Grobblechs an den Bediener weitergeleitet.

Vorteile

- Zuverlässige Online-Detektion von Hardspots an Grobblechen im Stahlwerk
- Für den Bediener intuitive Bewertung der Hardspots im Sinne der Erklärbarkeit von KI-Algorithmen
- Kein A-Priori-Training, X8-Sensorsystem lernt im Betrieb
- Anzahl der Sensorkanäle frei skalierbar

Anwendungsbereiche

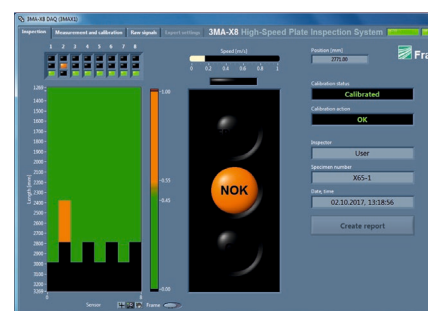
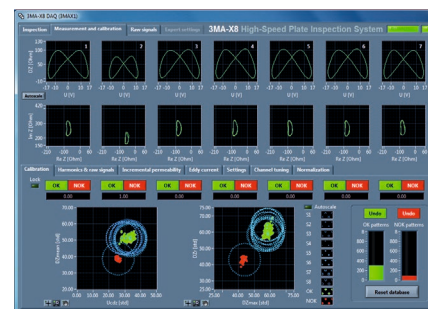
- Online-Hardspotdetektion an Grobblechen
- Übertragung auf weitere Anwendungen mit dem Ziel, Inhomogenitäten zu detektieren

Reifegrad

Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich (TRL8)

Verwendete Sensoren

- 3MA-X8
- Infrarot-Tempersensoren



Oben: Extrahierte Merkmale für Grundmaterial (grün) und Hardspot (rot);

Unten: Ergebnisanzeige für ein achtkanaliges X8-Sensorsystem



**Kognitive
Sensorsysteme.
Effiziente
Prozesse.**

Glossar

Einige wichtige Definitionen

42CrMo4

Ein gängiger Chrom-Molybdän-Stahl (Stahl-Nummer 1.7225), der in der Regel nach dem Vergüten verwendet wird, mit hoher Intensität und hoher Härtebarkeit

3D

Dreidimensional

3DMP®

Ein 3D-Druckverfahren der Firma GEFER-TEC, dessen Ausgangsmaterialien in Form von Drähten statt Pulver vorliegen

3MA

»Mikromagnetische Multiparameter-, Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse« – ein vom Fraunhofer IZFP entwickeltes Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Randschichtcharakterisierung

Additive Fertigung, Additive Manufacturing (AM)

Zusammenfassender Begriff für Technologien, mit denen 3D-Objekte durch den schichtweisen Materialauftrag erstellt werden können (sogenannter »3D-Druck«)

Assistenzsystem

Alle Informationen und Funktionen, die einen Benutzer beim Gebrauch eines Produktes unterstützen

Augmented Reality

Computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung

EBM

Electron Beam Melting, ein additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von metallischen Bauteilen aus dem Pulverbett

FFF

Fused Filament Fabrication, ein additives Fertigungsverfahren; frei verwendbares Synonym für das 3D-Druckverfahren »Fused Deposition Modeling«® (FDM), bei dem ein Werkstück schichtweise aus einem schmelzfähigen Kunststoff oder aus geschmolzenem Metall aufgebaut wird

Hysterese, magnetische

Beschreibt den bei ferromagnetischen Werkstoffen stark nichtlinearen Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte B und der magnetischen Feldstärke H

Kalibrierung

Meint hier die Erstellung der Korrelationsfunktion, die den kausalen Zusammenhang zwischen einer Zielgröße und den zerstörungsfreien Messgrößen beschreibt. Ist die Korrelationsfunktion bekannt, können Werte der Zielgröße aus den gemessenen Werten der zerstörungsfreien Messgrößen bestimmt werden. Die Korrelationsfunktionen werden üblicherweise experimentell bestimmt.

KI, AI

Künstliche Intelligenz (englisch Artificial Intelligence): Teilgebiet der Informatik, das sich mit der Automatisierung intelligenter

Verhaltens und mit maschinellem Lernen befasst; im weiteren Sinne Methoden oder Maschinen, die auf Grundlage dieser beiden Aspekte funktionieren

Kollaborative Roboter

Roboter, die in unmittelbarer Nähe von Menschen und mit ihnen gemeinsam arbeiten. Dies setzt voraus, dass die Roboter keine Verletzungen bei Menschen hervorrufen können. Zäune und andere Schutzeinrichtungen sind dann nicht erforderlich.

Kognition

Von einem verhaltenssteuernden System ausgeführte Umgestaltung von Informationen; die Summe aller Denk- und Wahrnehmungsvorgänge und deren mentale Ergebnisse (Wissen, Einstellungen, Überzeugungen, Erwartungen), wobei Kognition bewusst wie beim Lösen einer Rechenaufgabe oder unbewusst wie beim Bilden einer Meinung ablaufen können

LBM

Laser Beam Melting, ein additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus metallischen Pulvern

LMD

Laser Metal Deposition, ein additives Fertigungsverfahren, bei dem auf einer metallischen Bauteiloberfläche durch einen Laser ein Schmelzbad erzeugt wird, in das Metallpulver eingebracht wird

Lineare Regressionsanalyse

Statistisches Analyseverfahren, um Beziehungen zwischen einer abhängigen Variablen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen in einem Modell zu beschreiben

Machine Learning

Generierung von Wissen durch eine Maschine durch Erfahrung und deren Verarbeitung auf Grundlage statistischer Modelle; das System lernt aus Beispielen (Trainingsdaten) und kann diese nach Beendigung der Lernphase verallgemeinern

Beim Federated Machine Learning wird versucht, für die Trainingsdaten auf dezentrale Datenquellen zurückzugreifen.

MES

Manufacturing Execution System; computerbasiertes System zur Begleitung und Dokumentation der Transformation von Rohmaterialien zu fertigen Gütern im Produktionsprozess

Monitoring

Überwachung von Vorgängen, im industriellen Kontext meist mittels technischer Hilfsmittel

Multimodal

Fähigkeit eines sensorbasierten Prüfungssystems, gleichzeitig Sensoren einzubinden, die unterschiedliche physikalische Prinzipien benutzen

Predictive Maintenance

Proaktive Wartung von Maschinen und Anlagen auf Grundlage von mit Sensoren erfassten Messwerten und Daten mit dem Ziel, Ausfallzeiten niedrig zu halten oder möglichst ganz zu vermeiden

Rührreibschweißen

Ein Schweißverfahren aus der Gruppe des Pressschweißens, bei dem zwei einander berührende Teile unter Druck relativ zueinander bewegt werden. Durch die entstehende Reibung kommt es an den Kontaktflächen zur Erwärmung und Plastifizierung des Materials.

SLM

Selektives Laserschmelzen (Selective Laser Melting) ist ein additives Fertigungsverfahren (AM), mit dem räumliche Strukturen durch vollständiges Aufschmelzen mit einem Laser aus einem pulverförmigen, metallischen Ausgangsstoff hergestellt werden.

SLS

Selektives Lasersintern (Selective Laser Sintering) ist ein additives Fertigungsverfahren, mit dem räumliche Strukturen durch Sintern mit einem Laser aus einem pulverförmigen Ausgangsstoff (meist Kunststoff) hergestellt werden.

Tracking

Nachverfolgung oder dynamische Zuordnung; umfasst alle Einzelmethoden, die bei der Verfolgung von Objekten angewendet werden

TRL

Technology Readiness Level; Skala zur Abschätzung des technischen Reifegrades eines Produkts während seiner Entwicklungsphase

WISA

»Wissenschaftsorientierte strategische Allianzen«, eine spezielle Form der internen Projektförderung der Fraunhofer-Gesellschaft

Impressum

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e. V.**
Hansastraße 27 c
80686 München

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
Campus E3 1
66123 Saarbrücken
Telefon: +49 681 9302 0
info@izfp.fraunhofer.de
www.izfp.fraunhofer.de
Hinweise zur Anfahrt finden Sie unter »Kontakt« auf unserer
Webpräsenz www.izfp.fraunhofer.de

Institutsleitung

Prof. Dr. Bernd Valeske (geschäftsführend)
Prof. Dr. Randolph Hanke

Unternehmenskommunikation

Dipl.-Übers. Sabine Poitevin-Burbes
+49 681 9302 3869
sabine.poitevin-burbes@izfp.fraunhofer.de

Redaktionsteam

Dipl.-Übers. Sabine Poitevin-Burbes
Dr. Bernd Wolter
Roger Pfau

Layout, Satz, Bildverarbeitung

Dipl.-Übers. Sabine Poitevin-Burbes
Roger Pfau
Mediaserv GmbH

Druck

Krüger Druck+Verlag GmbH & Co. KG

Bildquellen

© AdobeStock / Alexander Limbach: Coverseite
© AdobeStock / K!NGW!N: S. 13
© Fraunhofer IZFP / Uwe Bellhäuser: S. 4, 5, 7, 9
© Shutterstock / Marina Grigorivna: S. 6
Alle weiteren Bilder und Graphiken:
© Fraunhofer IZFP / Fraunhofer-Gesellschaft
Abdruck und Vervielfältigung jeder Art nur mit Genehmigung
des Herausgebers
© 2020 Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren
IZFP, Saarbrücken
Dokumentenummer izfp22.03.1.2de

