

Whitepaper

ENTWURF

Bilderkennung zur Beurteilung von Abnutzung und Verschleiß

Aktueller Stand 2025.05.06

Prolog

Bei der Entwicklung unseres mobilen Instandhaltungsassistenten #jakob wurde – hauptsächlich getrieben durch das Interesse eines Entwicklungspartners – ein besonderes Augenmerk auf die Bilderkennung von Bauteilen bzw. Ersatzteilen mit einem iPad oder Smartphone-Kamera gelegt. Dieses Ziel ließ sich jedoch aus mehreren Gründen bei #jakob nicht erfolgreich umsetzen. Zum einen kennen erfahrene, an Thermoprozessanlagen geschulte Servicetechniker die Bauteiltypen meist aus der Praxis und sind eher an den präzisen Bauteildaten interessiert, die für eine konkrete Ersatzteil-Identifizierung benötigt werden. Das bedeutet: Die Bilderkennung müsste in diesem Fall einen direkten Link zur Ersatzteilliste herstellen – eine reine Typenerkennung reicht dafür nicht aus. Dies ist aber nur über den Umweg mit der Betriebsmittelkennzeichnung nur für elektromechanische Bauteile gelungen.

Durch diese Fokussierung wurde die Möglichkeit, die Bilderkennung zur Einschätzung von Abnutzung und Verschleiß einzusetzen, leider von der Projektleitung nicht in Betracht gezogen. Stattdessen haben wir uns bei der Beurteilung des Bauteilzustands ausschließlich auf die Einschätzung unserer Servicetechniker und ein rudimentäres Ampelsystem verlassen, das in der Praxis jedoch keine Akzeptanz gefunden hat, weil es unzureichend ist und nur einen geringen Mehrwert hat.

Worum es in diesem Beitrag geht?

Dieser Beitrag soll Antwort auf folgende Fragen geben:

Wie ist der Stand der Technik in der Bildverarbeitung zur Beurteilung von Abnutzung und Verschleiß?

Welche Rolle spielt die Medizintechnik?

Um welche Bauteile geht es besonders?

Was genau ist Bildverarbeitung in der Instandhaltung? Eine kurze Definition.

Was sind typische Abnutzungs- und Verschleißmerkmale von Bauteilen und ihre Symptome?

In diesem Beitrag verwendete Abkürzungen sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Abkürzung	Benennung
CNN	Convolutional Neural Networks
CT	Computertomographie
CVAT	Computer Vision Annotation Tool
DL	Deep Learning
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
ML	Machine Learning (Maschinelles Lernen)
MRT	Magnetresonanztomographie
PdM	Predictive Maintenance
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SL	Supervised Learning (Überwachtes Lernen)
UL	Unsupervised Learning (Unüberwachtes Lernen)
VI	Visual Inspection (Visuelle Inspektion)
XAI	Explainable Artificial Intelligence (Erklärbare KI)

Tabelle 1: Abkürzungen

Stand der Technik

Zunächst eine kurze Einschätzung zum Stand der Technik: Die Nutzung von Bildverarbeitung zur Einschätzung von Abnutzung und Verschleiß an mechanischen Bauteilen hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Dank der Kombination aus moderner Computer Vision, Deep Learning – insbesondere durch den Einsatz von Convolutional Neural Networks (CNNs) – und klassischen Machine-Learning-Methoden lassen sich heute viele Schadensbilder automatisiert und zuverlässig erkennen. Diese Technologien werden zunehmend für die Zustandsüberwachung von Bauteilen eingesetzt und spielen eine zentrale Rolle in der Qualitätskontrolle und der vorausschauenden Instandhaltung (PdM).

Typische Bildquellen für solche Anwendungen sind hochauflösende Industriekameras, Infrarotkameras zur Erfassung thermischer Veränderungen, 3D- oder Tiefenkameras zur Detektion geometrischer Abweichungen sowie Spezialverfahren wie die Mikroskopie oder sogar Elektronenmikroskopie im Labor. Es kommen auch Endoskope zum Einsatz, um schwer zugängliche Stellen zu inspizieren, aber auch zunehmend die Smartphone-Kamera. Besonders leistungsfähig werden solche Systeme, wenn sie mit weiteren Sensordaten wie Vibration, Temperatur oder Schall kombiniert werden.

Die Bilderkennung konzentriert sich auf typische Verschleißmerkmale wie Oberflächenrisse, Pitting, Abrieb, Verfärbungen durch Oxidation oder Schmiermittelverlust sowie auf Formveränderungen und Mikrostrukturveränderungen. In der Praxis wird häufig mit annotierten Schadensbildern¹ gearbeitet, um Deep-Learning-Modelle gezielt mit Supervised Learning (SL) anzulernen. Aber auch Verfahren zur Anomalieerkennung mit Unsupervised Learning (UL) d.h. ohne die vorherige Beschriftung der Daten gewinnen an Bedeutung, insbesondere wenn große, historisch gewachsene Bildarchive vorliegen.

Die Vorteile dieser Methode liegen auf der Hand: Die Erkennung ist nicht-invasiv, also ohne Ausbau von Bauteilen möglich, sie kann in Echtzeit erfolgen und menschliche Fehler deutlich reduzieren. Zudem ist sie gut skalierbar und eignet sich für industrielle Großanlagen ebenso wie für präzise Labordiagnostik. Dennoch bestehen auch Herausforderungen. So ist die Qualität und Quantität der Bilddaten entscheidend für den Erfolg der Verfahren. Faktoren wie wechselnde Beleuchtung, Verschmutzung oder Reflexionen auf metallischen Oberflächen können die Erkennung erschweren. Zudem sind viele Deep-Learning-Modelle wenig transparent, was die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse einschränkt. Nicht zuletzt müssen Modelle oft domänenspezifisch angepasst werden, da sich Verschleißbilder stark zwischen Branchen und Anwendungen unterscheiden.

Dies ist auch das Hauptthema dieses Beitrags und wird im Weiteren detailliert ausgeführt:

Medizintechnik als Treiber

Was für den Radiologen schon seit langem das Röntgenbild ist, ist für den Instandhalter das zukünftig das Smartphone-Foto – beide suchen mit Künstlicher Intelligenz (KI) Unterstützung im Verborgenen nach frühen Warnzeichen, bevor der Schaden sichtbar wird.

Die Analogie zwischen medizinischer und technischer Bilderkennung lässt sich treffend anhand der gemeinsamen Grundprinzipien beider Disziplinen darstellen: Beide beruhen auf der präzisen Erfassung, Analyse und Interpretation visueller Informationen, um Zustände zu diagnostizieren, Abnutzungserscheinungen zu identifizieren oder frühzeitig mögliche Schäden zu erkennen. In der Medizin werden Röntgenbilder, MRT- oder CT-Scans genutzt, um strukturelle und funktionelle Veränderungen im menschlichen Körper sichtbar zu machen. Ähnlich verhält es sich in der Technik, wo thermographische Bilder, Mikroskopaufnahmen oder Kamerabilder von Maschinenkomponenten dazu dienen, Anomalien wie Risse, Korrosion oder Materialermüdung zu erkennen.

¹ Annotierte Schadensbilder sind Fotos von Bauteilen, auf denen sichtbare Schäden wie Risse, Korrosion oder Verformungen markiert und mit erklärenden Informationen versehen wurden, um sie für das Training oder die Auswertung durch KI-Systeme nutzbar zu machen.

In beiden Bereichen ist die Bildgebung ein unverzichtbares Diagnosewerkzeug, das es ermöglicht, Informationen zu extrahieren, die mit bloßem Auge nicht erkennbar sind oder übersehen werden. In der Medizin hilft die präzise Analyse von Bildern, wie etwa dem Auffinden von Tumoren oder der Beurteilung von Knochenbrüchen, dabei, den Gesundheitszustand eines Patienten zu beurteilen und Behandlungsmaßnahmen abzuleiten. In ähnlicher Weise ermöglicht die technische Bilderkennung das Erkennen von verschlissenen Bauteilen oder Anomalien in industriellen Anlagen, was dazu beiträgt, Wartungszyklen zu optimieren, Ausfälle zu vermeiden und die Lebensdauer der Maschinen zu verlängern. Beide Disziplinen profitieren zunehmend von der Integration fortschrittlicher Bildverarbeitungstechnologien und KI. In der Medizin wird Künstliche Intelligenz verwendet, um Bilder zu analysieren und sogar potenzielle Krankheitsbilder zu diagnostizieren. In der Technik hingegen hilft KI bei der automatisierten Auswertung von Inspektionsbildern und der frühzeitigen Identifizierung von potenziellen Problemen. So wie die medizinische Bildagnostik nicht nur auf Erfahrung, sondern auch auf computergestützte Unterstützung angewiesen ist, wird auch die technische Bildanalyse immer häufiger durch Algorithmen und maschinelles Lernen verbessert, um präzisere und schnellere Diagnosen zu ermöglichen.

Beide Felder haben gemeinsam, dass sie durch den Einsatz von Bilderkennungstechnologien die Effizienz und Genauigkeit ihrer Diagnosen erheblich steigern und somit einen entscheidenden Beitrag zur Früherkennung und Optimierung der jeweiligen Prozesse leisten.

Bauteile und ihre Abnutzungs- und Verschleißmerkmale

Bei Maschinen und Anlagen gibt es mehrere Bauteile und Baugruppen – **Tabelle 2** zeigt eine Übersicht –, die sich besonders gut als niederschwellige, aber wirksame Möglichkeit für eine visuelle Zustandsüberwachung mittels Bilderkennung eignen. Sie weisen typische Verschleiß- und Abnutzungserscheinungen auf [SteVI], die sich sowohl durch sichtbare Veränderungen an den Bauteilen selbst als auch durch funktionale Auffälligkeiten im Betriebsverhalten bemerkbar machen. Diese Bauteile sind häufig gut sichtbar, gut zugänglich und lassen sich problemlos fotografieren.

Bauteile	Typische Abnutzungs- und Verschleißmerkmale	Symptome
Ausmauerungen aus Schamotte, Faserauskleidungen	Abplatzungen, glänzende Oberflächen, Korrosion, Materialabbau (Verlust der Materialdicke), lose Bauteile, Risse, Ruß, Spalten	Erhöhter Energieverbrauch, instabile Temperaturverläufe, verlängerte Aufheizzeiten, Ungleichmäßige Erwärmung
Dichtungen, Dichtflächen	Abrieb, Brüche Einlaufspuren, Lecks, Risse, Schmiermittelverschmutzungen, Verformungen	Aushärtung, Elastizitätsverlust, Materialermüdung, Versprödung
Elektroheizelemente	Ablagerungen, Brüche, Glühintensität, Korrosion, Oxidation, Verformungen	elektrischer Widerstand, Kontaktprobleme, Temperaturverteilung
Flansche und Schraubverbindungen	Deformationen, Druckstellen, Korrosion, Leckagen, Rost	Gelockerte und überdehnte Schraubenköpfe
Gasbrenner	Deformationen, Düsenöffnung, Lochfraß, Oxidationsschichten, Risse, Verformungen, Verrußung	Anstieg der CO-/NO _x -Werte, ungewöhnliche Geräusche, Zündprobleme
Gasumwälzer	Anbackungen am Propeller, Korrosion, Leckagen, Risse, Verformungen	Geräusche, Vibrationen
Gehäuse, Ofengehäuse	Korrosion, Leckagen, Lochfraß, Rissbildung, Rostbildung	Druckabfall im Ofenraum
Getriebemotoren	Gehäuseverfärbungen, Korrosionsspuren, Leckagen, Ölverlust	Geräusche, Vibrationen
Gleitschienen	Kratzer, Riefen (an Kontaktflächen)	
Ketten, Kettenräder, Stoß- und Ziehketten	Abrieb, Deformation, Kettenschlag, Korrosion, Längung, Materialverlust, Risse, Spiel, Verformungen, Zahnausformung	Geräuschzunahme, Klappern, Materialermüdung, ruckartiger Lauf
Lager, Kugellager, Wälzlager	Anlaufarben Grübchenbildung, Lagerspiel, Materialausbrüche, Pitting, Verfärbungen, Wackeln	Blockieren der Lager, erhöhte Reibung, thermische Überlastung, unruhiger Lauf, Laufgeräusche, Vibrationen
Lüfter, Pumpen, Ventilatoren	Korrosion, Leckagen, Risse, Verformungen	Geräusche, Überlastung, Vibrationen
Sicherheits- und Regeleinrichtungen	Fehlende Plombierungen, Korrosion, Leckagen, Verformungen	Funktions Einschränkungen
Verrohrungen, Pneumatikleitungen	Korrosion, Leckagen, Lochfraß, Risse, Rost, Verfärbungen	Druckabfall, Funktionsstörungen, Geräusche
Wellen	Biegung, Laufspuren, Riefen, Schmiermittelverlust, Spiel	Geräusche, Rundlaufabweichung, Vibration

Tabelle 2: Bauteile und ihre Abnutzungs- und Verschleißmerkmale

Zu den häufigsten sichtbaren Merkmalen zählen Materialverluste durch Abrieb, insbesondere an stark beanspruchten Kontaktflächen. Auch Riefen und Kratzer treten häufig auf, meist verursacht durch abrasive Partikel im Schmiermittel oder durch unzureichende Schmierung. Korrosionserscheinungen wie Rostbildung oder Lochfraß sind typisch für Bauteile, die Feuchtigkeit oder aggressiven Medien ausgesetzt sind. Eine weitere kritische Erscheinungsform ist das sogenannte Pitting, also die Bildung kleiner Materialausbrüche oder Grübchen, die auf Materialermüdung hindeuten.

Neben solchen Oberflächenschäden treten auch plastische Verformungen auf, etwa als Verbiegungen, gestauchte Kanten oder Eindellungen infolge von Stoßbelastungen oder Dauerüberlastung. Mikrorisse oder feine Anrisse sind ebenfalls typische Verschleißanzeichen, die insbesondere bei wiederkehrenden dynamischen Belastungen in Schweißnähten oder an hoch beanspruchten Bauteilkanten auftreten können. Verfärbungen wie Anlauffarben auf metallischen Oberflächen deuten auf thermische Überbeanspruchung hin und gelten oft als Vorboten struktureller Schädigungen.

Schädigungen durch thermische Beanspruchung

In Thermoprozessanlagen treten neben allgemeinen mechanischen Abnutzungs- und Verschleißmerkmalen auch spezifische, prozesstypische Schädigungen auf, die durch die extreme thermische Beanspruchung, korrosive Atmosphären, thermische Zyklen sowie häufige Temperaturwechsel entstehen. Besonders betroffen sind Bauteile, die im direkten Kontakt mit dem Prozessmedium oder in der Nähe der heißen Zone eingesetzt werden, wie etwa Brenner, Isolationen, Ofenwagen, Transportgestelle, Rollen, Führungen, Ofenbeläge und hitzebeständige Stahlkonstruktionen.

Typische sichtbare Abnutzungsmerkmale in Thermoprozessanlagen sind etwa Verformungen durch Wärmespannungen, Materialverzug, Rissbildungen in feuerfesten Auskleidungen, Abplatzungen bei Schamott- oder Keramikauskleidungen, Oxidationsschichten auf metallischen Bauteilen sowie Schmelz- oder Anlauffarben als Hinweis auf Überhitzung. Bei Brennereinheiten und Abgasleitungen ist zudem Ablagerung von Ruß, Schlacke oder Asche ein häufiges Problem. Auch Korrosion unter Wärmeeinfluss (sogenannte Hochtemperaturkorrosion) kann zu Materialverlusten führen, etwa bei Stahlteilen im Abgasstrom oder bei Bauteilen, die atmosphärischen Schwankungen mit hohem Sauerstoff- oder Feuchtigkeitsgehalt ausgesetzt sind.

Abnutzungs- und Verschleißmerkmale an Bauteilen

Im Folgenden sind einige Beispiele typischer Bauelemente – aber bei Weitem nicht alle – mit deren Abnutzungs- und Verschleißmerkmalen und Symptomen in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt:

Dichtungen und Dichtflächen

Dichtungen und Dichtflächen zählen zu den typischen Verschleißkomponenten in Thermoprozessanlagen, da sie thermischen, mechanischen und oft auch chemischen Belastungen ausgesetzt sind. Sie sind für bildgestützte Inspektionsverfahren gut geeignet, da sich ihr Zustand häufig anhand sichtbarer Merkmale beurteilen lässt. Typische Abnutzungs- und Schadensmerkmale sind Materialermüdung, Versprödung, Rissbildung, Verformungen, Aushärtung, Elastizitätsverlust, Brüche oder Abrieb. Bei dynamisch beanspruchten Dichtungen, etwa an Wellen oder Schwenkstellen, treten zudem häufig Einlaufspuren, Lecks oder Schmiermittelverschmutzungen auf. Bei montierten Dichtungen lassen sich Undichtigkeiten oft anhand von Leckspuren, Öl- oder Rußablagerungen, Hitzeschäden, Lichtspalten oder ungleichmäßigen Schließflächen erkennen. Die optische Detektion solcher Merkmale – beispielsweise durch KI-gestützte Bilderkennung – ermöglicht eine frühzeitige Diagnose von Funktionsverlusten, Energieverlusten oder sicherheitsrelevanten Leckagen. Auch ein Nachlassen der Anpresskraft durch Setzverhalten oder thermomechanische Relaxation lässt sich teilweise indirekt durch Bildvergleiche oder thermografische Auswertungen erkennen.

Elektroinstallation

Die Elektroinstallation ist ein relevantes Anwendungsfeld für die visuelle Inspektion, insbesondere im Bereich von Sensorik, Verkabelung, Anschlusskästen und Steckverbindungen. Typische Abnutzungs- und Verschleißmerkmale sind abgerissene oder freiliegende Leitungen, gequetschte oder geknickte Kabel, beschädigte oder spröde Isolierungen, thermische Verfärbungen durch Überlastung, Brandspuren, gebrochene Isolierträger sowie korrodierte oder oxidierte Kontakte. Auch lockere Klemmen, gelöste Zugentlastungen oder unvollständig verriegelte Steckverbindungen stellen potenzielle Fehlerquellen dar. Solche Auffälligkeiten lassen sich durch gezielte Nahaufnahmen mit Smartphone- oder Inspektionskameras dokumentieren. KI-gestützte Bildanalyse kann diese Veränderungen automatisiert bewerten, mit definierten Fehlerbildern abgleichen und entsprechende Warnhinweise generieren. Auf diese Weise lässt sich die elektrische Betriebssicherheit effektiv überwachen und das Risiko von Kurzschlüssen, Kontaktverlusten oder Brandgefahr deutlich reduzieren.

Fördertechnik

Fördertechnik wie Rollenbahnen, Gurtförderer oder Kettenzüge, die für die Be- und Entladung der Anlage verwendet werden, bietet ebenfalls zahlreiche visuell erfassbare Verschleißmerkmale, beispielsweise ungleichmäßig gespannte Gurte, Laufabweichungen, Abriebspuren oder blockierende Rollen.

Gasbrenner, Elektroheizungen und Strahlrohre

Elektroheizungen sowie Gasbrenner und deren Brennerkomponenten wie Brennerlanzen und Flammrohre zählen zu den typischen Bauteilen, die sich besonders gut für die visuelle Inspektion im Rahmen der Wartung eignen. Gasbrenner unterliegen aufgrund der hohen thermischen Belastung und des direkten Kontakts mit der Flamme einem intensiven Verschleiß. Häufig auftretende Anzeichen sind Korrosion, Risse, Materialabplatzungen, Verformungen oder Ablagerungen – insbesondere von Oxiden oder Rückständen aus dem Prozessgas. Diese Veränderungen sind meist gut sichtbar, wenn die Anlage außer Betrieb ist und für die Wartung geöffnet wurde. Eine regelmäßige fotografische Dokumentation erlaubt dabei den Vergleich mit früheren Zuständen, um fortschreitende Schädigungen frühzeitig zu erkennen.

Auch Elektroheizelemente sind geeignete Kandidaten für eine visuelle oder kameragestützte Überwachung. Typische Anzeichen beginnenden Verschleißes sind Veränderungen in der Glühintensität, ungleichmäßiges oder asymmetrisches Aufheizen, lokale Verfärbungen, sichtbare Brüche, Verformungen oder Ablagerungen auf der Oberfläche. Diese Merkmale deuten häufig auf Überhitzung, Isolationsprobleme oder eine bevorstehende Unterbrechung des Heizkreises hin.

Kupplungen und Wellen

Kupplungen und Wellen sind typischen mechanischen Belastungen wie Torsion, Biegung und Vibration ausgesetzt und unterliegen dadurch einem kontinuierlichen Verschleiß. Erste Anzeichen beginnender Schäden können Schmiermittelverlust, feine Riefen, Laufspuren oder Abtragungen auf den Gleit- oder Wälzflächen sein. Weitere visuell oder messtechnisch erfassbare Symptome sind Korrosionsansätze, Materialverformungen, Rissbildungen – insbesondere an Passfedernuten oder Kerbstellen – sowie Lager- oder Lagersitzverschleiß. Zusätzlich kann Spiel im Antriebsstrang, Unwucht oder eine erhöhte Rundlaufabweichung infolge von Ausrichtungsfehlern oder Materialermüdung auftreten. Thermische Auffälligkeiten, wie punktuelle Überhitzungen an Lagern, Dichtstellen oder Kupplungselementen, weisen häufig auf mangelnde Schmierung, erhöhten Reibwiderstand oder bereits bestehende Schäden hin. Funktionale Symptome, etwa ungewöhnliche Betriebsgeräusche, erhöhte Schwingungspegel oder temperaturabhängige Veränderungen im Betriebsverhalten, ergänzen das Bild.

Basis zuvor gespeicherter Referenzbilder und vordefinierter Schadensmuster lassen sich Abweichungen vom Sollzustand bewerten und klassifizieren. In Kombination mit thermografischen oder vibrationsanalytischen Daten kann der Zustand rotierender Baugruppen noch präziser erfasst werden, um frühzeitig Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten und ungeplante Stillstände zu vermeiden.

Gasumwälzer und Ventilatoren

Gasumwälzer und Ventilatoren in Thermoprozessanlagen zeigen im Betrieb und bei der Sichtkontrolle verschiedene äußerlich erkennbare Abnutzungs- und Verschleißmerkmale. Häufige visuelle Hinweise sind Staub- und Schmutzansammlungen an Kühlrippen, Lüftungsschlitzen oder im Ansaugbereich, die auf eine eingeschränkte Luftzirkulation und mögliche Überhitzung hindeuten können. Öl- oder Fettsuren an Dichtstellen deuten auf beginnende Leckagen oder Lagerschäden hin. Rissbildung an Gehäusen, Verformungen von Lüfterrädern oder Unwuchten durch ungleichmäßige Abnutzung oder Ablagerungen an den Schaufeln sind weitere typische Anzeichen für mechanische Probleme. Korrosionsansätze an Schraubverbindungen, Schutzgittern oder am Motorgehäuse sind ebenfalls nicht ungewöhnlich.

Funktional lassen sich erste Schäden häufig durch verändertes Schwingungsverhalten, zunehmende Geräuschentwicklung – etwa Schleif-, Klapper- oder Brummgeräusche – sowie unregelmäßige Laufcharakteristik erkennen. Auch eine ungleichmäßige Drehbewegung oder Vibrationen im Stillstand (Restlauf) können auf eine Unwucht oder Lagerprobleme hinweisen. Die visuelle Dokumentation mittels Smartphone-Kamera ist bei diesen Geräten aufgrund ihrer guten Zugänglichkeit nicht nur einfach, sondern auch zeit- und kosteneffizient. In Kombination mit KI-gestützter Bildauswertung lassen sich selbst kleine Anomalien wie feine Risse, Farbveränderungen oder untypische Verschmutzungsmuster frühzeitig erkennen und dokumentieren.

Verrohrungen, Pneumatikleitungen

Verrohrungen in Thermoprozessanlagen unterliegen durch thermische Ausdehnung, Vibrationen und mechanische Spannungen einer fortschreitenden Materialermüdung. Häufige Schäden sind Korrosionsansätze, Materialverfärbungen durch Hitzeeinwirkung, feine oder fortgeschrittene Rissbildungen sowie Leckspuren infolge von Undichtigkeiten an Schweißnähten, Dichtstellen oder Flanschverbindungen. Auch lose oder deformierte Rohrschellen, gelockerte Verschraubungen oder auffälliger Rohrverzug durch thermische Relativbewegungen gehören zu den früh sichtbaren Anzeichen. Diese Defekte lassen sich im Rahmen einer visuellen Inspektion mit einfachen Mitteln wie einer Smartphone-Kamera erfassen und dokumentieren.

Auch Pneumatikleitungen, wie sie etwa für die Ansteuerung von Klappen, Türen oder Vorschubmechanismen verwendet werden, lassen sich visuell überwachen. Typische Abnutzungsmerkmale sind Leckspuren durch Undichtigkeiten an Steckverbindungen oder Schläuchen, Materialermüdung an Biegestellen, spröde oder ausgehärtete Schlauchabschnitte, Knickstellen infolge fehlerhafter Verlegung sowie ungewöhnliche Ablagerungen oder mechanische Scheuerspuren an Kontaktflächen. Ebenso können sich Druckabfälle oder Funktionsstörungen durch akustische Hinweise (Zischgeräusche) bemerkbar machen, die auf optisch erfassbare Ursachen zurückzuführen sind.

Getriebemotoren

Getriebemotoren weisen im Laufe ihrer Betriebszeit verschiedene äußerlich und funktional erkennbare Abnutzungs- und Verschleißmerkmale auf. Sichtbare Anzeichen sind beispielsweise Staub- und Schmutzansammlungen an den Kühlrippen, die auf unzureichende Wärmeabfuhr hindeuten können, sowie Ölfilme oder Leckagen an Wellendichtungen und Gehäusefugen, die auf beginnenden Dichtungsverschleiß oder Überdruck im Getriebe schließen lassen. Weitere visuelle Symptome sind Korrosionsspuren, Gehäuseverfärbungen durch thermische Überlastung oder Materialverformungen durch mechanische Krafteinwirkung.

Funktionale Auffälligkeiten zeigen sich durch ungewöhnliche Schwingungsmuster, Vibrationen oder Betriebsgeräusche, insbesondere bei Lastwechseln. Ein erhöhter Geräuschpegel kann auf Zahnschäden, Lagerdefekte oder mangelhafte Schmierung hinweisen. Auch ein asymmetrischer Temperaturverlauf am Gehäuse oder übermäßige Erwärmung einzelner Baugruppen – etwa des Motors oder der Lager – kann auf innere Schäden oder Überlastung hindeuten.

Eine kontinuierliche visuelle und sensorbasierte Überwachung, ergänzt durch bildgebende Verfahren oder KI-gestützte Auswertung von Zustandsdaten, ermöglicht es, frühzeitig Abweichungen zu erkennen und drohende Ausfälle durch gezielte Wartungsmaßnahmen zu vermeiden.

Ketten, Kettenräder sowie Stoß- und Ziehketten

Ketten, Kettenräder sowie Stoß- und Ziehketten unterliegen im industriellen Einsatz kontinuierlichem mechanischem Verschleiß, der sich durch verschiedene visuell und funktional erkennbare Merkmale äußert. Zu den typischen Abnutzungsmerkmalen zählen gelängte Kettenglieder infolge Materialermüdung, eingelaufene Bolzen oder Buchsen, ungleichmäßiger Gliederabstand sowie korrodierte oder verunreinigte Oberflächen. Kettenräder zeigen oft eingelaufene Zahnflanken, asymmetrische Zahnprofile oder plastische Verformungen der Zähne. Ein zunehmendes Spiel zwischen Kette und Kettenrad führt zu unrundem Lauf, Ruckeln oder Schwingungen im Betrieb. Stoß- und Ziehketten, die in besonders belasteten Transportmechanismen zum Einsatz kommen, können durch Risse, Materialausbrüche, Dehnung oder seitliche Verformungen beeinträchtigt werden. Weitere Symptome für fortgeschrittenen Verschleiß sind Geräuschzunahme im Betrieb, unregelmäßiger Bewegungsablauf oder mangelhafter Kraftschluss. Eine visuelle Kontrolle, unterstützt durch bildbasierte KI-Systeme, kann frühzeitig Schäden wie Materialrisse, verbogene Glieder, mangelhafte Schmierung oder beginnende Korrosion erkennen und mit gespeicherten Referenzzuständen abgleichen, um drohende Ausfälle rechtzeitig zu identifizieren.

Lager, insbesondere Kugel- und Wälzlager

Lager, insbesondere Kugel- und Wälzlager, unterliegen im laufenden Betrieb vielfältigen mechanischen und thermischen Belastungen, die mit der Zeit zu typischen Abnutzungs- und Verschleißmerkmalen führen. Erste Anzeichen beginnender Schäden sind häufig feine Riefen oder Laufspuren auf den Wälzflächen, punktuelle Materialausbrüche (Pittings), Schmiermittelverlust oder Verfärbungen durch Überhitzung. Korrosionsansätze, insbesondere bei mangelhafter Abdichtung oder längerer Stillstandszeit, sind visuell gut erkennbar. Fortgeschrittener Verschleiß zeigt sich durch unruhigen Lauf, erhöhtes Spiel, Laufgeräusche, Vibrationen oder gar Blockieren der Lager. Thermische Auffälligkeiten – etwa durch punktuelle Überhitzung infolge unzureichender Schmierung oder innerer Reibung – lassen sich mit Thermografie oder Infrarotaufnahmen erfassen. Sichtbare Anzeichen wie Öl- oder Fettschlieren, Verunreinigungen, Deformationen an Lagerringen oder beschädigte Dichtungen können ebenfalls Hinweise auf drohende Ausfälle geben. Moderne KI-gestützte Bilderkennung kann solche äußeren Merkmale automatisiert erfassen, mit vordefinierten Schadensmustern abgleichen und zur Zustandsbewertung heranziehen, um eine vorausschauende Instandhaltung zu unterstützen.

Ofenauskleidungen: Ausmauerungen und Faserisolierungen

Ofenauskleidungen sind eine der wichtigsten Baugruppen in Thermoprozessanlagen – etwa Ausmauerungen aus Schamottesteinen oder Faserisolierungen. Aufgrund der kontinuierlichen thermischen und thermochemischen Belastung weisen sie häufig typische Schädigungen wie Risse, Spalten, Abplatzungen oder Materialverluste auf. Auch Veränderungen wie Verfärbungen, glänzende Oberflächen infolge von Sinterung, lose Bauteile oder Rußablagerungen können Hinweise auf Verschleiß oder Betriebsstörungen geben. Solche Schäden sind häufig visuell eindeutig erkennbar.

Ofentüren

Auch Türmechaniken an Ofentüren, die regelmäßig thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, zeigen durch wiederholte Beanspruchung typische Verschleißerscheinungen wie Risse, Undichtigkeiten oder Deformationen, die gut fotografiert werden können.

Schraubverbindungen, Flansche

Flansche und Schraubverbindungen liefern wichtige visuelle Hinweise auf Wartungsbedarf, da sie mechanischen, thermischen und oft auch chemischen Belastungen unterliegen. Typische Abnutzungs- und Verschleißmerkmale sind Rost- oder Korrosionsspuren an Schrauben und Dichtflächen, Ölleckagen entlang von Flanschverbindungen, unregelmäßige Druckstellen an Flanschdichtungen, sowie gelockerte,

überdehnte oder deformierte Schraubenköpfe. Weitere visuelle Hinweise auf Funktionsverlust können fehlende Schrauben, gebrochene oder gestauchte Unterlegscheiben sowie axialer Versatz der Flanschhälften sein. Moderne bildbasierte Systeme sind in der Lage, solche Auffälligkeiten zuverlässig zu erkennen und mit früheren Zuständen zu vergleichen, um eine vorausschauende Instandhaltung zu unterstützen.

Schutzabdeckungen und sicherheitsrelevante Einrichtungen

Schutzabdeckungen und sicherheitsrelevante Einrichtungen wie Türverriegelungen, Not-Halt-Einrichtungen oder Schutzgitter lassen sich visuell auf ihren ordnungsgemäßen Zustand prüfen. Typische Auffälligkeiten sind lose, fehlende oder falsch montierte Abdeckungen, mechanische Beschädigungen wie Risse oder Verformungen, nicht geschlossene Verriegelungen sowie Manipulationsspuren wie aufgebohrte Schrauben, verbogene Halteklammern oder provisorisch überbrückte Sicherheitsschalter. Auch Verschmutzungen oder Fremdkörper in beweglichen Teilen der Schutzeinrichtung können die Funktion beeinträchtigen und sollten visuell dokumentiert werden. KI-gestützte Bilderkennung kann automatisiert erkennen, ob eine Abdeckung korrekt montiert ist, ob unzulässige Öffnungen bestehen oder Sicherheitsbereiche manipuliert wurden. Diese Art der optischen Kontrolle lässt sich einfach mit einem Smartphone durchführen und kann Bestandteil eines digitalen Sicherheitsrundgangs sein – inklusive automatisierter Protokollierung, Zeitstempelung und Archivierung der Bilddaten zur Dokumentation von Betriebssicherheit und gesetzeskonformer Anlagenführung.

Sicherheits- und Regeleinrichtungen

Sicherheits- und Regeleinrichtungen, wie Sicherheitsventile, Druckminderer, Stellventile oder Absperrorgane, eignen sich gut für die visuelle Inspektion, da Schäden an diesen Bauteilen das Prozess- oder Anlagensicherheitsniveau unmittelbar beeinträchtigen können. Auch wenn sie häufig weniger stark mechanisch beansprucht werden als rotierende Systeme, können dennoch typische Abnutzungsmerkmale wie Korrosionsansätze an Gehäusen, Hebeln oder Federn, festgesetzte oder blockierte Ventilstellungen, sichtbare Verformungen, Leckagen an Dichtflächen oder Verschmutzungen durch Mediumaustritt auftreten. Bei Druckventilen kann auch ein verfärbter oder erhitzter Austrittsbereich auf thermische Fehlbelastungen hinweisen. Zusätzlich sind gelockerte Verschraubungen, fehlende Plombierungen, verdrehte Anschlussleitungen oder untypische Ablagerungen potenzielle Hinweise auf beginnende Funktionseinschränkungen. Die regelmäßige visuelle Kontrolle – idealerweise ergänzt durch Bildvergleiche mit dokumentierten Sollzuständen – erlaubt hier eine frühzeitige Identifikation sicherheitskritischer Entwicklungen.

Symptome

Funktionale Symptome zeigen sich begleitend zu den sichtbaren Merkmalen, die im laufenden Betrieb Hinweise auf beginnenden oder fortgeschrittenen Verschleiß geben. Dazu zählen beispielsweise Vibrationen und ungewöhnliche Geräusche – wie Klappern, Brummen oder Kreischen. Auch ein Verlust an Kraftübertragung, etwa durch Riemenschlupf oder ineffiziente Getriebe oder Haarrisse in Gehäusen, zählen zu den typischen Symptomen.

Funktionale Symptome, die auf solche Verschleißphänomene hinweisen, sind unter anderem instabile Temperaturverläufe im Prozessraum, ungleichmäßige Erwärmung, verringerter Wirkungsgrad, erhöhter Gas- oder Energieverbrauch, unerklärliche Prozessschwankungen, ungewöhnliche Geräuschentwicklungen (z. B. durch lose oder verformte Einbauteile), veränderte Druckverhältnisse im Ofenraum sowie mechanisches Klemmen oder Blockieren von Transportmechanismen. Auch verlängerte Aufheizzeiten, oder eine zunehmende Vibration können Hinweise auf ablaufende Abnutzungsprozesse sein.

Bildverarbeitung

Im Folgenden erfolgt nur, beginnend mit Definitionen eine Beschreibung der wesentlichen Komponenten der Bildverarbeitung:

Definitionen

Bildverarbeitung (Image Processing) ist der Oberbegriff für alle Schritte zur Analyse und Auswertung von Bilddaten.

Die **Bilderfassung** bezeichnet den Vorgang, bei dem ein visuelles Abbild eines Objekts mit Hilfe geeigneter Sensoren aufgenommen wird – zum Beispiel durch Digitalkameras, Smartphone-Kameras, Thermografiesysteme, Röntengeräte oder industrielle Kameras. Ziel ist es, Rohdaten in Form von digitalen Bilddateien zu erzeugen, die anschließend analysiert werden können.

Die **Bildanalyse** (Image Analysis) bezieht sich auf das Herausfiltern relevanter Informationen aus einem Bild, z. B. Konturerkennung, Größenmessung, Fehlerlokalisierung. Die **Bilderkennung** ist ein Teilbereich der Bildanalyse und umfasst die automatische Interpretation der Bilderfassung. Ziel ist es, bedeutungsvolle Informationen aus einem Bild zu extrahieren – etwa Objekte, Muster, Merkmale oder Abweichungen zu identifizieren und zu klassifizieren. Bildanalyse und Bilderkennung werden oft synonym verwendet.

Die **Merkmalsextraktion** (Feature Extraction) ist der technische Vorgang zur Identifikation und Quantifizierung relevanter Bildmerkmale (Kanten, Farbwerte, Texturen, Muster), die als Grundlage für eine Klassifikation dienen.

Bildannotation (image annotation) ist der Prozess des Markierens, Beschreibens oder Kategorisierens von Bildinhalten, um sie für maschinelles Lernen – insbesondere für Computer Vision und Deep-Learning-Modelle – nutzbar zu machen. Sie ist ein zentraler Schritt beim Training von KI-Systemen zur Bilderkennung, etwa zur Erkennung von Verschleiß.

Bildklassifikation ist die Zuordnung eines gesamten Bildes oder Bildausschnitts zu einer vordefinierten Klasse (z. B. „intakt“ vs. „beschädigt“).

Zusammengefasst: Die Bilderfassung erzeugt digitale Bilddaten, während die Bilderkennung oder Bildanalyse diese Daten inhaltlich interpretiert – unter anderem mit Hilfe von Bildannotation (bei überwachten Lernverfahren) und Merkmalsextraktion. Auf dieser Grundlage ermöglicht die Bildklassifikation die Zuordnung von Bildinhalten zu bestimmten Kategorien und erlaubt so Schlussfolgerungen über den Zustand des betrachteten Objekts.

Workflow: Von der Bilderfassung bis zur Bildklassifikation

Wie sich dies alles zusammenfügt wird in diesem Kapitel beschrieben:

Bilderfassung und Fotodokumentationsanleitung

Die Nutzung von Smartphone-Kameras zur bildbasierten Dokumentation von Bauteilzuständen durch Servicetechniker stellt eine praxisnahe, technisch sinnvolle Lösung dar. Moderne Geräte – gegebenenfalls ergänzt durch Makroobjektive oder externe LED-Beleuchtung – ermöglichen überraschend präzise Aufnahmen von Oberflächenschäden, Rissen, Verfärbungen oder Korrosion. In Verbindung mit KI-gestützter Bildverarbeitung, insbesondere durch CNNs, lässt sich dieser Ansatz zu einem effektiven Werkzeug der vorausschauenden Instandhaltung (PdM) weiterentwickeln – und zwar auch in industriellen Bereichen, die nicht primär zur Hochtechnologie zählen.

Die so erzeugten Bilder dienen nicht nur der Momentaufnahme, sondern speichern wertvolles Erfahrungswissen: Sie dokumentieren typische Schadenszonen, sinnvolle Blickwinkel und relevante Kontexte für die spätere Auswertung.

Durch einfache organisatorische Maßnahmen – etwa eine standardisierte Fotodokumentationsanleitung mit Vorgaben zu Anzahl, Perspektive, Beleuchtung oder Maßstab – kann die Qualität und Konsistenz der Bilddaten deutlich gesteigert werden. Die strukturierte Speicherung in einem zentralen Cloud- oder Wartungssystem mit Zeitstempel, Anlagen-ID und Metadaten erlaubt eine systematische Verwaltung und spätere Rückverfolgbarkeit.

Auf dieser Grundlage entsteht ein digitaler Workflow: Servicetechniker erfassen relevante Bauteile direkt vor Ort mit dem Smartphone, wobei jedes Bild idealerweise mit Zusatzinformationen wie Bauteiltyp, Standort, Betriebszustand der Anlage oder auffälligen Beobachtungen versehen wird – entweder direkt per App oder durch benannte Bilddateien mit begleitender Excel-Tabelle. Die gesammelten Bilder werden in einer Bilddatenbank zentral abgelegt, etwa in einer Cloudlösung oder auf einem unternehmensinternen Portal. Ein durchdachtes Ordnersystem – sortiert nach Anlagennummer, Bauteilgruppe oder Datum – erleichtert die spätere Auswertung erheblich.

Bildvorverarbeitung

Für die Bildvorverarbeitung und die Schadensdetektion haben sich insbesondere Open-Source-Tools bewährt. OpenCV dient der Bildbereinigung, etwa zur Kantenerkennung oder Filterung von Lichtreflexen bei metallischen Oberflächen. In Kombination mit YOLOv5 oder YOLOv8 lassen sich Schadensmuster wie Risse, Verformungen oder Materialabtrag in Echtzeit erkennen und klassifizieren. Diese Modelle lassen sich auf Edge Devices wie dem NVIDIA Jetson betreiben, was eine dezentrale Auswertung direkt an der Anlage ermöglicht.

Bildannotation

Für den Aufbau eines Trainingsdatensatzes müssen die aufgenommenen Bilder annotiert, also mit Schadensmarkierungen und -klassen versehen werden. Dies erfolgt beispielsweise mit den Tools LabelImg oder CVAT (Computer Vision Annotation Tool). Während LabelImg für kleinere Datenmengen geeignet ist, erlaubt CVAT kollaboratives Arbeiten und ist ideal für umfangreiche Bildbestände. Empfehlenswert ist die Durchführung der Annotation durch technikaffine Mitarbeitende, ergänzt durch eine Vier-Augen-Prüfung zur Sicherstellung der Datenqualität.

Training

Sobald eine ausreichende Zahl annotierter Bilder – idealerweise mehrere Hundert pro Schadensart – vorliegt, beginnt das Training des Erkennungsmodells, etwa mit YOLOv8. Dabei können die Trainingsdaten auf Plattformen wie Roboflow vorbereitet werden, wo sich Bilder automatisch zuschneiden, augmentieren (z. B. durch Drehen, Rauschüberlagerung oder Schärfen) und konvertieren lassen. Das eigentliche Training kann lokal oder in der Cloud erfolgen und wird mit Erkennungsmodellen wie Ultralytics YOLO oder PyTorch durchgeführt, die eine gute Dokumentation und Reproduzierbarkeit bieten.

Im praktischen Einsatz kann das trainierte Modell beispielsweise auf einem NVIDIA Jetson Nano betrieben werden. Das System analysiert Bilder – sei es direkt von einer montierten Kamera oder hochgeladen vom Smartphone – lokal und liefert automatisiertes Feedback, etwa durch visuelle Markierung der erkannten Schäden oder generierte Wartungsvorschläge. Eine ständige Internetverbindung ist hierfür nicht erforderlich, was den dezentralen Einsatz auch in infrastrukturschwachen Umgebungen erleichtert.

Segmentierung und Merkmalsextraktion

Ein wesentlicher Schritt der Bildverarbeitung ist die Segmentierung – also die Trennung relevanter Bildbereiche (etwa Risszonen) vom Hintergrund. Hierzu kommen klassische Verfahren der Kanten- oder Konturerkennung zum Einsatz, ergänzt durch moderne Deep-Learning-Techniken. Aus den segmentierten Regionen werden anschließend Merkmale extrahiert, darunter geometrische Kennwerte wie Länge, Breite oder Tiefe von Rissen und Abplatzungen, Texturmerkmale (z. B. Rauigkeit oder Oberflächenmuster)

sowie Farb- und Helligkeitsverteilungen, die auf thermische Belastung oder Materialermüdung hinweisen können.

Klassifikation

Diese Merkmale bilden die Grundlage für die Klassifikation, bei der Algorithmen aus der Mustererkennung und dem maschinellen Lernen zum Einsatz kommen – von k-Nächste-Nachbarn und Entscheidungsbäumen bis hin zu CNNs. Während der Trainingsphase lernen diese Modelle anhand manuell klassifizierter Beispiele, neue Bilder korrekt einzuordnen. Ziel ist eine möglichst präzise, wiederholbare und automatisierte Schadensbewertung.

Die Ergebnisse der Klassifikation lassen sich visuell aufbereiten – etwa durch farbcodierte Overlays oder Heatmaps –, um eine fundierte Entscheidungsunterstützung im Rahmen von Wartungsstrategien zu ermöglichen. Farbcodierte Overlays sind transparente Bildebenen, die bestimmte Informationen wie Schadstellen oder Zustandsklassen visuell hervorheben. Farben wie Rot, Gelb oder Grün machen unterschiedliche Bedeutungen auf einen Blick erkennbar: Rot kann etwa einen kritischen Schaden kennzeichnen, Gelb einen beginnenden Verschleiß und Grün einen unauffälligen Zustand. Solche Overlays werden häufig von Erkennungsmodellen wie YOLO automatisch erzeugt und in digitalen Wartungstools angezeigt, sodass Fachpersonal den Bauteilzustand schnell und zuverlässig einschätzen kann.

Heatmaps wiederum visualisieren Datenwerte mittels Farbverläufen, um Unterschiede in Intensität oder Häufigkeit intuitiv darzustellen. In der bildgestützten Analyse heben sie beispielsweise thermisch belastete, mechanisch beanspruchte oder besonders stark genutzte Bereiche hervor. In der KI-gestützten Schadensdetektion zeigen sie oft die Gewichtung des neuronalen Netzes – also jene Bildzonen, die für die Entscheidung besonders relevant waren. Dadurch wird die Arbeitsweise des Modells nachvollziehbar und das Vertrauen in die Ergebnisse gestärkt. Heatmaps unterstützen darüber hinaus die Qualitätskontrolle, Prozessoptimierung und Wartungsplanung, indem sie kritische Zonen farblich hervorheben und gezielte Maßnahmen ermöglichen.

Fazit und Ausblick

Es zeigt sich, dass die Bildverarbeitung, besonders mit der Smartphone-Kamera zur Bilderfassung ein leistungsfähiges Werkzeug zur Zustandsbeurteilung mechanischer Bauteile geworden ist – mit wachsender industrieller Relevanz und großem Potenzial für die Zukunft der Instandhaltung.

Insgesamt entsteht durch die Kombination aus mobiler Bildaufnahme, systematischer Annotation und KI-gestützter Auswertung eine skalierbare, praxisnahe und wirtschaftlich attraktive Lösung für die Abnutzungs- und Verschleißbeurteilung von Bauteilen – insbesondere in industriellen Umgebungen mit hohen thermischen oder mechanischen Belastungen. Sie erlaubt nicht nur eine objektive Bewertung des aktuellen Zustands, sondern auch die frühzeitige Erkennung von Ausfällen, die bedarfsgerechte Wartungsplanung und die Steigerung der Anlagenverfügbarkeit.

Ein Trend geht in Richtung Edge Computing², bei dem die Bildverarbeitung direkt auf der Kamera oder lokalen Recheneinheiten erfolgt, was Echtzeitanwendungen ermöglicht. Mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger Mobilfunknetze kann dieser Trend aber auch in eine online Lösung umschlagen. Auch Ansätze der erklärbaren künstlichen Intelligenz (Explainable AI) gewinnen an Bedeutung, um das Vertrauen in automatisierte Systeme zu stärken. Zunehmend werden auch multimodale Systeme entwickelt, die Bilddaten mit akustischen oder thermischen Messgrößen kombinieren. In Kombination mit

² Edge Computing bezeichnet die dezentrale Datenverarbeitung direkt an der Quelle – also etwa in Sensoren, Kameras oder Maschinen – um Latenzzeiten zu minimieren, Netzwerklast zu reduzieren und schnelle Entscheidungen in Echtzeit zu ermöglichen.

digitalen Zwillingen [SteDT], die das physische Verhalten eines Bauteils simulieren, eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Zustandsprognose und Lebensdauerabschätzung.

Hersteller- und Marken Verweise

[CVAT] <https://www.cvat.ai/>

[ENCORD] <https://encord.com/>

[YOLOv8] <https://yolov8.com/>

[OpenCV] <https://opencv.org/>

[LabelImg] <https://pypi.org/project/labelImg/1.5.2/>

[NVIDA] <https://www.nvidia.com/de-de/>

Literatur

[SteStöErsatzteil] Steck-Winter, H.; Stöling, C: Ersatzteilplanung für Thermoprozessanlagen, gwi - gaswärme international, Vulkan Verlag, vol. 65, no. 03, 2016 pp. 55-65

[FilSteWissensmanagement] Filounek, A.; Steck-Winter, H.: Wissensmanagement bei der Instandhaltung von Thermoprozessanlagen, gwi - gaswärme international, Vulkan Verlag, vol. 63, no. 03, 2014 pp. 53-62

[SteVI] Steck-Winter, H.: Vorausschauende Instandhaltung von Thermoprozessanlagen, gwi - gaswärme international, Vulkan Verlag vol. 60, no. 03, 2011, pp. 141-152

[SteDT]