

Vorausschauende Instandhaltung für Thermoprozessanlagen – Teil 2: Restlebensdauerprognose

von Hartmut Steck-Winter, Günther Unger

Im zweiten Teil unseres Beitrags berichten wir über unsere neu entwickelte Restlebensdauerprognose zur Vorbereitung und Unterstützung einer präventiven Instandhaltung. Eine praxisnahe Restlebensdauerprognose kann die Instandhaltung bei der Entscheidung unterstützen, ob ein ausfallkritisches Bauteil weiter genutzt werden kann oder ob es präventiv ersetzt werden sollte, weil das Risiko eines Anlagenausfalls zu groß wird. Die Methode verbindet die aus den Weibull-Lebensdauerdaten berechnete Ausfallwahrscheinlichkeit mit dem als Einflussfaktoren messbaren Umfeld- und Prozesseinfluss und mit der realen Beurteilung des Abnutzungsvorrats bei einer angeleiteten Inspektion. Sie steht also auf drei Säulen: statistische Lebensdauerdaten, gemessene Einflussfaktoren und inspizierter Abnutzungsvorrat. Die vorgenannten drei Bestandteile aus Statistik, Messung und Inspektion werden in einem Regelkreis kontinuierlich verbessert.

Vor drei Jahren (2018) hat Aichelin ein Entwicklungsprojekt zur Digitalisierung der Instandhaltung begonnen. Die Planung haben wir im Fachbeitrag „Vorausschauende Instandhaltung mit datengetriebener Zustandsüberwachung“ [1–2] skizziert.

Im Kern geht es dabei um ein digitalisiertes Serviceprodukt für unsere Kunden zur Vorhersage des Ausfallrisikos mit dem Ziel, (ungeplante) kritische Ausfälle durch geplante präventive Instandhaltungsmaßnahmen zu verhindern, zumindest aber die negativen wirtschaftliche Folgen zu reduzieren.

In dem vorliegenden Fachbeitrag berichten wir nun über unsere neu entwickelte Restlebensdauerprognose, englisch Remaining Useful Life (RUL), und das zugehörige Zustandsrückmeldesystem zur Vorbereitung und Unterstützung einer vorausschauenden Instandhaltung, englisch Predictive Maintenance (PdM).

RUL-Prognosen sind ein Kernelement der vorausschauenden Instandhaltung. Das Besondere ist, dass die RUL-Prognose, anders als die Anomalieerkennung, den viel längeren Zeitraum zwischen zwei Jahreswartungen, i. d. R. ca. ein Jahr überbrücken muss.

Bei der Entwicklung sind wir zweigleisig gefahren. Die unter der Federführung von Fraunhofer Austria Research entwickelte RUL-Prognose ist im mobilen Instandhaltungsassistenten #jakob implementiert [3]. Anhand von statistischen Weibull-Lebensdauerdaten und Einflussfaktoren wird die Überlebenswahrscheinlichkeit berechnet und visualisiert.

Die zweite Methode berücksichtigt zur RUL-Prognose zusätzlich auch die starke Korrelation zwischen der Ausfallwahrscheinlichkeit und dem Abnutzungsvorrat¹. Darum geht es in diesem Fachbericht.

Er soll folgende Fragen beantworten:

- Warum benötigen wir für Thermoprozessanlagen eine spezielle RUL-Prognose?
- Was genau soll mit einer RUL-Prognose erreicht werden?
- Welche Rolle spielen statistische Lebensdauerdaten und dynamische Einflussfaktoren?
- Warum sind angeleitete Zustandsrückmeldungen zur Beurteilung des Abnutzungsvorrats so wichtig?
- Und nicht zuletzt: Wie können wir eine RUL-Prognose kontinuierlich verbessern?

Rückblick auf Teil 1: Anomalieerkennung

Zunächst aber ein kurzer Rückblick auf Teil 1 unseres Fachbeitrags, in dem wir unser neu entwickeltes Condition Monitoring (CM) zur Anomalieerkennung vorgestellt haben [4].

Im Vergleich zu Maschinen gibt es bei der Instandhaltung von Thermoprozessanlagen besondere Herausforderungen. Fast alle ausfallkritischen Bauteile sind im Ofen eingebaut. Im Ofen selbst sind aber weder klassisches CM noch ungeplante, kurzfristige Inspektionen möglich. Übliche PdM-Konzepte aus dem Maschinenbau, beispielsweise Anomalieerkennung, meist in Kombination mit flexiblen Serviceintervallen, sind daher nicht auf die Kernbereiche einer Thermoprozessanlagen übertragbar.

Aus diesem Grund haben wir ein für Thermoprozessanlagen geeignetes CM entwickelt. Es basiert auf vier speziell entwickelten Methoden, mit denen wir sozusagen ein virtuelles Beobachtungsloch durch die Ofenwand schlagen. Die Idee dahinter ist, dass sich viele Anomalien (s. g. P-F-Intervalle²) durch wiederholende charakteristische Ereignismuster ankündigen. Sie sind oft eine kausale Abfolge oder Häufung

¹ Eine Korrelation impliziert zwar keinen Kausalzusammenhang, legt ihn diesem Fall aber nahe.

² P-F steht für Problem-Failure.

von mehreren Ereignissen, beispielsweise höhere Stromaufnahmen und Taktzeitüberschreitungen.

Alle Zustandsvariablen einer Baugruppe werden kontinuierlich aufgezeichnet und in einer digitalen adaptierten statistischen Prozesskontrollkarte überwacht. Als IT-Plattform dient unser bewährtes Prozessüberwachungssystem FOCOS³ 4.0.

Unser CM zur Anomalieerkennung hat seine Bewährungsprobe in der Praxis gut bestanden. Die Sensitivität versetzt uns immer wieder selbst in Erstaunen. In einigen Fällen konnten sogar ungenügend geschmierte Antriebssysteme identifiziert werden.

Prolog: Was genau ist PdM?

Bevor wir uns nun dem Thema RUL-Prognosen zuwenden, wollen wir aber erst einmal präzisieren, was wir unter PdM für Thermoprozessanlagen verstehen und wie sich im PdM-Kontext Thermoprozessanlagen von Maschinen unterscheiden.

Nach unserer Definition ist PdM eine (smarte) Instandhaltungsstrategie und -methode, die auf der Analyse von Prozess-, Betriebs-, Maschinen- und Instandhaltungsdaten basiert und sensorbasierendes CM, sensorlose statistische Daten und Methoden, aber auch traditionelle präventive Instandhaltungsstrategien und -methoden einschließt und sich dabei moderner Industrie-4.0-Techniken bedient. PdM ist insofern eine Kombination meist bekannter und einiger neuen Methoden.

Meist sind die Ziele hochgesteckt. Es geht fast immer darum, die Verfügbarkeit der Anlagen zu verbessern und gleichzeitig die präventiven Instandhaltungskosten im Griff zu behalten. Trotzdem ist PdM für viele Instandhaltungspraktikerinnen und -praktiker noch eine reine Zukunftsvision.

PdM ist keine Methode für alles und jeden. Es geht wie so häufig erst einmal um eine Kosten-Nutzenabwägung. Es kommt nämlich auf die Ausfallfolgen an!

Daten, Daten, Daten: Leider nicht immer die richtigen!

Daten sind das neue Öl⁴ der Industrie 4.0, sie sind bei der klassischen Herangehensweise im Maschinenbau auch eine Voraussetzung für PdM. Allerdings sind selbst große Datenmengen allein noch nicht besonders werthaltig, es kommt darauf an, was man mit ihnen machen kann bzw. macht.

Moderne Thermoprozessanlagen mit CM haben gewöhnlich ebenfalls eine Unmenge von Betriebs- und Maschinendaten in ihren Archiven gespeichert, die beispielsweise für eine Anomalieerkennung ausgewertet werden können.

Typischerweise machen sich derartige Anomalien maximal Tage bis einige Stunden vor einem Ausfall bemerkbar. Für kurzfristige Prognosen zur Reduzierung der Ausfallfolgen funktioniert Anomalieerkennung schon ganz gut, wie wir bereits im ersten Teil unserer Fachbeiträge gezeigt haben.

Digitale Maschinendaten für langfristige Prognosen gibt es aber nicht. Dafür gibt es keine Zustandssensoren. Schon gar nicht für die ausfallkritischen Bauteile im Ofen. Diese „analogen“ Daten müssen auf anderen Wegen gewonnen werden.

Aufgabenstellung: RUL-Prognosen vor und bei einer Jahreswartung

Mit der Anomalieerkennung ist also das Problem mit dem langen Zeithorizont zwischen zwei Jahreswartungen noch nicht

gelöst. Die Jahreswartung ist meistens die einzige Möglichkeit für einen periodischen Ersatz oder eine Inspektion der ausfallkritischen Bauteile im Ofen, ohne dass die Anlage ungeplant außer Betrieb genommen werden muss. Dies führt dann auch zu der eigentlichen Aufgabenstellung und der Frage, was genau mit einer RUL-Prognose erreicht werden soll.

Am besten vor, spätestens aber während einer Jahreswartung muss die Instandhaltung meist ohne Hilfsmittel abschätzen, ob ein ausfallkritisches Bauteil noch mindestens bis zum nächstfolgenden Wartungstermin i. d. R. in einem Jahr sicher überlebt. Das heißt der Vorhersagehorizont einer unterstützenden RUL-Prognose muss mindestens ein Jahr umfassen.

Dabei ergibt sich für jedes dieser Bauteile eine Weichenstellung:

- Das Bauteil ist neuwertig, zeigt keine Abnutzungserscheinungen und ist wahrscheinlich noch mehrere Jahre voll funktionsfähig. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich. Die einfachste Entscheidung.
- Das Bauteil wird schon einige Zeit eingesetzt und zeigt Abnutzungserscheinungen. Es ist wahrscheinlich, aber doch nicht ganz sicher, noch einige Zeit, mindestens bis zur nächsten Wartung funktionsstüchtig. Die Instandhaltung steht vor dem Dilemma, das Bauteil ohne Rücksicht auf die Ersatzteilkosten (auch zur eigenen Absicherung) zu ersetzen oder aber ein geringes Ausfallrisiko in Kauf zu nehmen. Oft wird wenigstens ein Ersatzteil disponiert. Die häufigste und auch schwierigste Entscheidung.
- Das Bauteil zeigt deutlich ausgeprägte Abnutzungserscheinungen. Es fällt wahrscheinlich noch vor der nächsten Wartung aus und wird daher präventiv ersetzt. Die sicherste Entscheidung. Mehr kann die Instandhaltung nicht tun.

Was folgt daraus? Überinstandhaltung und vorzeitiger Ersatz kosten den Betreiber viel Geld. Unterinstandhaltung und ein daraus resultierender Ausfall aber noch viel mehr! Wie auch immer, eine Fehlentscheidung ist kostspielig. Ohne technische Unterstützung ist es schwer, den goldenen Mittelweg zu finden.

Die Entscheidung für einen präventiven Bauteilersatz könnte mit einer Inspektionscheckliste zur Beurteilung der Abnutzung und einer datenbasierten RUL-Prognose unterstützt werden. Die zentralen Aufgaben dabei sind, den derzeitigen Abnutzungszustand und die Abnutzungsgrenze sicher zu bestimmen und darauf aufbauend zu berechnen, ob ein Bauteil bis zur nächsten Wartung sicher überlebt oder ob es ersetzt werden muss.

Regelkreis einer RUL-Prognose

Die Instandhaltung von Thermoprozessanlagen benötigt also eine Methode, die es in der Praxis ermöglicht, die wahrscheinliche RUL von ausfallkritischen Bauteilen einfach, sicher und mit einem Zeithorizont von ca. einem Jahr abzuschätzen.

In diesem Kapitel sollen nun die Fragen beantwortet werden, wie eine RUL-Berechnung erfolgt und welche Rolle statistische Lebensdauerdaten, dynamische Einflussfaktoren und Zustandsrückmeldungen des Abnutzungsvorrats dabei spielen.

Die RUL-Prognose wird in einem Regelkreis (**Bild 1**) als kontinuierlicher Prozess bearbeitet. Sie soll die bisherigen individuellen Schätzungen mit höherer Genauigkeit und mehr

³ Die Aichelin-Marke FOCOS steht für Furnace Operating, Control and Optimization System.

⁴ Diese Metapher setzt in einem Artikel des Economist 2017 den Wert der Daten mit dem des Erdöls gleich.

Transparenz ersetzen und kontinuierlich verbessern. Nicht mehr, aber auch nicht weniger.

Die Rolle der Instandhaltung kann dabei nicht überschätzt werden. Eine proaktive Instandhaltung ist und bleibt unersetzbar. Sie kann und sollte aber durch digitale Checklisten und RUL-Prognosen bei ihren Aufgaben unterstützt werden. Freilich fällt dieser Mehrwert nicht nur so vom Himmel. Die Instandhaltung muss auch Arbeit und ihr Wissen investieren.

Die einzelnen Elemente des Regelkreises werden im nun Folgenden im Detail erläutert.

Instandhaltungsplan

Ausgangspunkt jeder präventiven Instandhaltung ist ein baugruppenbezogener Instandhaltungsplan. Er wird auf Basis der Betriebsanleitung und der betrieblichen Erfordernisse i. d. R. von der Instandhaltung erstellt. Qualifizierte Servicelieferanten können dabei unterstützen oder die Aufgabe ganz übernehmen.

Im Instandhaltungsplan werden die instand zuhaltenden Baugruppen, ihre Bauteile, die jeweilige Instandhaltungsstrategie etc. festgelegt. Er sollte maschinenlesbar sein, beispielsweise eine Excel-Tabelle mit Zeilen in Reihenfolge der Instandhaltungstätigkeiten und Spalten mit Maßnahmen und Daten.

Der Instandhaltungsplan enthält auch alle „analogen“ sensorlosen Daten, die für eine RUL-Prognose und Zustandsrückmeldung benötigt werden. Insbesondere:

Instandhaltungsstrategie

PdM ist nicht die allein selig machende Instandhaltungsstrategie. Es gibt keine PdM-Strategie für die gesamte Anlage, sondern eine Mischung aller Instandhaltungsstrategien über alle Bauteile hinweg, je nach Ausfallfolgen oder Werthaltigkeit. Genau genommen muss für jedes Bauteil bzw. jede Bauteilfamilie eine individuelle Instandhaltungsstrategie festgelegt werden. Von den drei klassischen Instandhaltungsstrategien störungsbedingt, periodisch und zustandsorientiert ist nur die letzte für eine vorausschauende Instandhaltung prädestiniert. PdM als Instandhaltungsstrategie sollte zudem nur gewählt werden, wenn der Nutzen den Aufwand rechtfertigt.

Ausfallkritische Bauteile

Nur ausfallkritische oder besonders werthaltige Bauteile rechtfertigen den Aufwand für PdM. Sie sind ausfallkritisch, wenn durch ihren Ausfall ein großer Schaden bzw. hohe Kosten entstehen. Das Schadensausmaß ist im Wesentlichen vom Einbauort bzw. der Reparaturzeit eines Bauteils abhängig. Die größten Ausfallfolgen haben Bauteile im Hochtemperaturofen, die geringsten Bauteile an kalten, frei zugänglichen Anlagenteilen.

Beispielsweise hat ein blockierter Durchstoßer im Härteofen weit größere Ausfallfolgen als die gerissene Antriebskette einer außenliegenden Transportbahn. Im ersten Fall dauert die Reparatur mit dem Abkühlen und Wiederaufheizen des Härteofens mehrere Tage, im zweiten maximal eine Stunde. Der gerechtfertigte Präventionsaufwand ist dementsprechend bei den beiden Beispielen sehr unterschiedlich.

Periodisches Instandhaltungsintervall

Periodische Instandhaltung ist noch immer die am häufigsten verwendete präventive Instandhaltungsstrategie. Das Intervall wird i. d. R. empirisch durch die Instandhaltung festgelegt und ebenfalls durch die Ausfallfolgen bestimmt. Es beantwortet die Frage, nach welcher Zeit Bauteile erfahrungsbasiert präventiv ersetzt werden sollten, auch wenn keine Abnutzung sichtbar ist. Das periodische Instandhaltungsintervall und die im PdM berechnete Lebensdauer sind vorzugsweise, aber nicht notwendigerweise identisch.

Ist jedoch das periodische Instandhaltungsintervall bekannt, können daraus die charakteristische Lebensdauer, der Formfaktor und die zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet werden.

Weibull-Lebensdauerdaten

Die Weibullverteilung als statistische Berechnungsmethode ist besonders für verschleißbehaftete mechanische Bauteile geeignet. Mit den beiden Parametern charakteristische Lebensdauer (T) und dem Formfaktor (b) kann sie nicht nur die Ausfallwahrscheinlichkeit, sondern auch die Ausfallsteilheit (die Form der Ausfallrate) mathematisch beschreiben [5]. Die charakteristische Lebensdauer (T) ist per Definition die Zeit, nachdem 63,2 % einer Gesamtheit vergleichbarer Bauteile⁵ – unabhängig vom Formfaktor – ihre spezifizierte Funktion nicht mehr erfüllen. Der Formfaktor bestimmt die Ausfallsteilheit, er ist kennzeichnend für die mit der Nutzungsdauer ansteigende Ausfallrate⁶.

Die beiden Parameter basieren auf Daten und Erkenntnissen aus der Literatur, Herstellerinformationen und eigenen Erfahrungen. Einen allgemein gültigen Katalog gibt es nicht. Lebensdauerdaten sind daher immer nur als grobe Näherung zu betrachten.

Für Instandhaltungspraktikerinnen und -praktiker sind beide Definitionen ungewohnt. Im Betrieb sind andere Lebensdauerdaten üblicher, beispielsweise die mittlere Zeit zwischen Ausfällen (MTBF), sehr häufig auch der früheste Ausfall, an den sich jemand erinnert. Die charakteristische Lebensdauer hat immer einen höheren Wert als die vorgenannten. Dennoch spricht viel für die Weibull-Verteilung, insbesondere die Möglichkeit, die Ausfallsteilheit darstellen zu können, auch wenn der Formfaktor für die meisten Praktikerinnen und Praktiker zu abstrakt ist. Die Methode muss daher eine Handhabe beinhalten, mit der beide Parameter (T, b) justiert und validiert werden können. Dazu mehr gegen Ende dieses Beitrags.

Zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. Abnutzungsgrenze

Die zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit einer Baugruppe ist kennzeichnend für das Risiko, inwiefern ihre Bauteile noch ihre volle spezifizierte nutzungszeitabhängige Funktionsfähigkeit erfüllen. Je höher die Ausfallfolgen desto geringer die zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit.

Die Abnutzungsgrenze ist neben der Ausfallwahrscheinlichkeit hauptsächlich von spezifischen Abnutzungserscheinungen und deren Ausprägung abhängig.

⁵ Der ungewöhnliche Wert ergibt sich aus der Weibull-Verteilungsfunktion von $1 - e^{-1}$ bei $T = t$.

⁶ Der Verlauf der Ausfallrate wird in der sogenannten Badewannenkurve dargestellt.

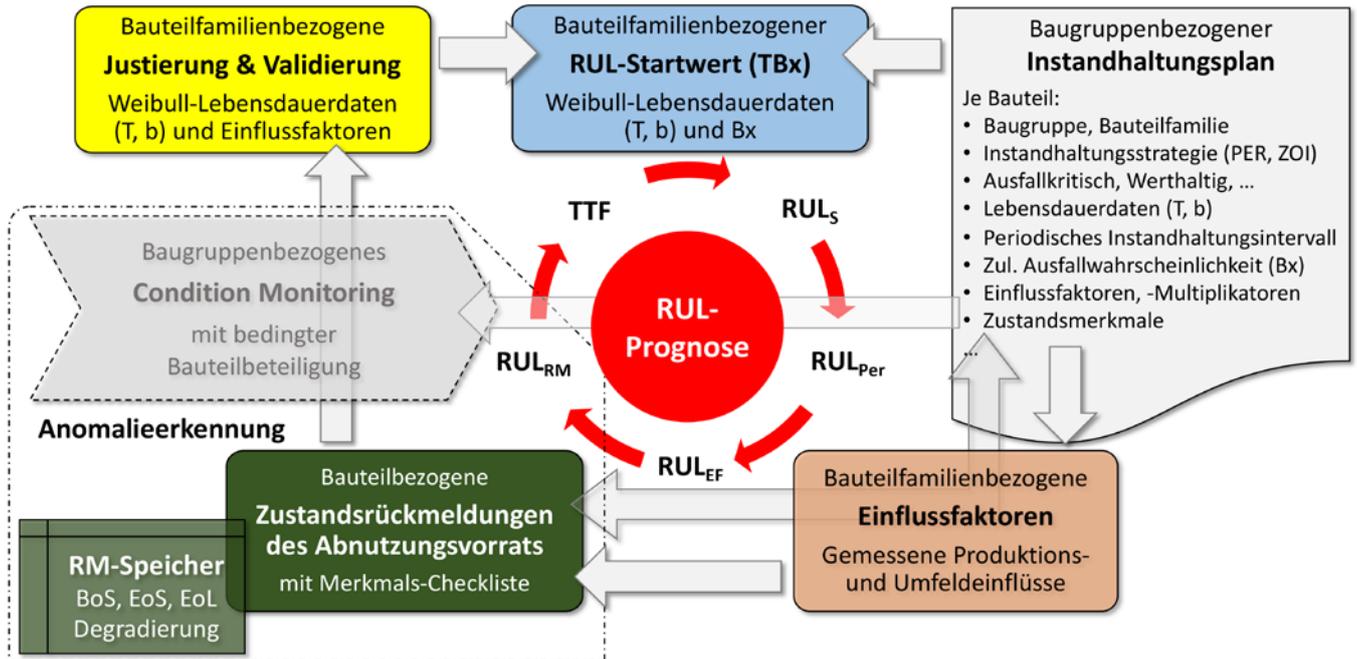


Bild 1: Regelkreis der RUL-Prognosen

RUL_s und RUL_{per}: RUL-Startwert und periodische Instandhaltung

Das erste Element im Regelkreis (Bild 1) ist der RUL-Startwert (RULs) synonym auch spezifische Lebensdauer (T_{Bx}) genannt. Er wird aus der charakteristischen Lebensdauer (T), dem Formfaktor (b) und der zulässigen Ausfallwahrscheinlichkeit (Bx) berechnet. Je geringer die charakteristische Lebensdauer und/oder die zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit desto geringer auch der RUL-Startwert. Aber auch der Formfaktor hat eine große Auswirkung.

Bei der RUL_{per}-Berechnung werden Nutzungszeit oder -zyklen (nicht die kalendarische Zeitdifferenz) vom RUL-Startwert subtrahiert, so wie bei einer rückwärts laufenden Stoppuhr. Eine Digitaluhr mit logischen Verknüpfungen macht daraus jedoch noch kein Digitalisierungsprojekt, sie ist aber ein altbewährtes Mittel zur Unterstützung der periodischen Instandhaltung und eine notwendige Voraussetzung für RUL_{EF}.

RUL_{EF}: Dynamische RUL-Berechnung mit Einflussfaktoren

Im nächsten Element des Regelkreises (Bild 1), der RUL_{EF}-Berechnung, werden nun auch Einflussfaktoren berücksichtigt. Der Unterschied zwischen RUL_{per} und RUL_{EF} kann mit einer Kraftfahrzeug-Wartungsanzeige verdeutlicht werden. Während in älteren Kfz nur die gefahrenen Kilometer (also die Nutzung) für die nächste Wartung eine Rolle spielten, haben heute über Sensoren erfasste dynamische Faktoren, beispielsweise der Fahrstil auch einen Einfluss. RUL_{EF} ist demnach realistischer.

Alle Bauteile unterliegen während ihrer Nutzung einbaortsabhängigen Einflussfaktoren. Sie verkürzen oder verlängern die „normale“ Nutzungsdauer, die nur bei Referenzbedingungen gilt. Referenzbedingungen sind am ehesten als der „normale“ Gebrauch einer Anlage zu beschreiben.

Grundsätzlich wird zwischen Einflüssen bedingt durch das Produktionsprogramm und dem Umfeld, beispielsweise Offentemperaturen, Temperaturwechsel, Umgebungstemperaturen etc. und Einflüssen der Instandhaltungs- und Bauteilqualität

differenziert. Während Erstere sich messen lassen, können qualitative Faktoren nur empirisch bestimmt werden. Die Erfassung der messbaren Einflussfaktoren erfolgt über das Prozessüberwachungssystem FOCOS.

In der Praxis zeigt sich, dass sich Einflussfaktoren recht drastisch auf die RUL auswirken können. Beispielsweise kann ein werthaltiges Gasstrahlrohr bei einer durchschnittlichen Temperatur von 940 °C nur viel kürzer als bei 920 °C Referenztemperatur genutzt werden.

Dieser Zusammenhang wird beispielhaft in **Bild 2** dargestellt. Die RUL_{EF}-Prognose nach einem Jahr ($t = 1,0$, schwarze senkrechte Linie) bis zur Abnutzungsgrenze nach $(6,5 - 1,0) = 5,5$ Jahren (doppelte braune senkrechte Linie) wird mit den aktuellen durchschnittlichen Einflussfaktoren (rote Linie) berechnet. Im Kontrast zu RUL_{per} mit Referenzbedingungen (graue Linie), d. h. ohne Einflussfaktoren, ist sie um 0,6 Jahre kürzer. Zu Beginn (bei $t = 0$) sind RUL_{per} und RUL_{EF} noch gleich groß, entfernen sich mit der Nutzungszeit zunehmend voneinander. Einflussfaktoren sind also auch nutzungszeitabhängig.

Die Spanne zwischen den minimal und maximal möglichen Einflussfaktoren wird durch die beiden gestrichelten roten Linien illustriert. Sie verringert sich mit zunehmender Nutzungsdauer.

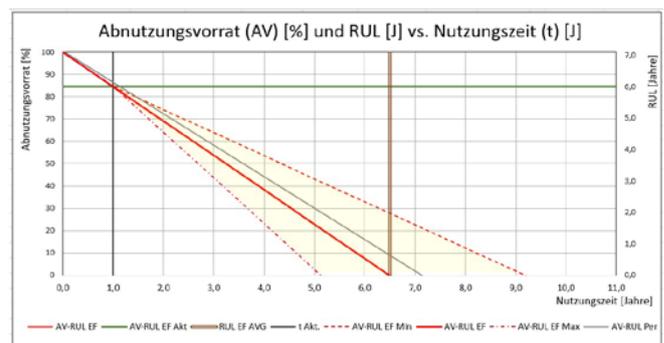


Bild 2: Abnutzungsvorrat-/RUL-Prognose mit dynamischen Einflussfaktoren

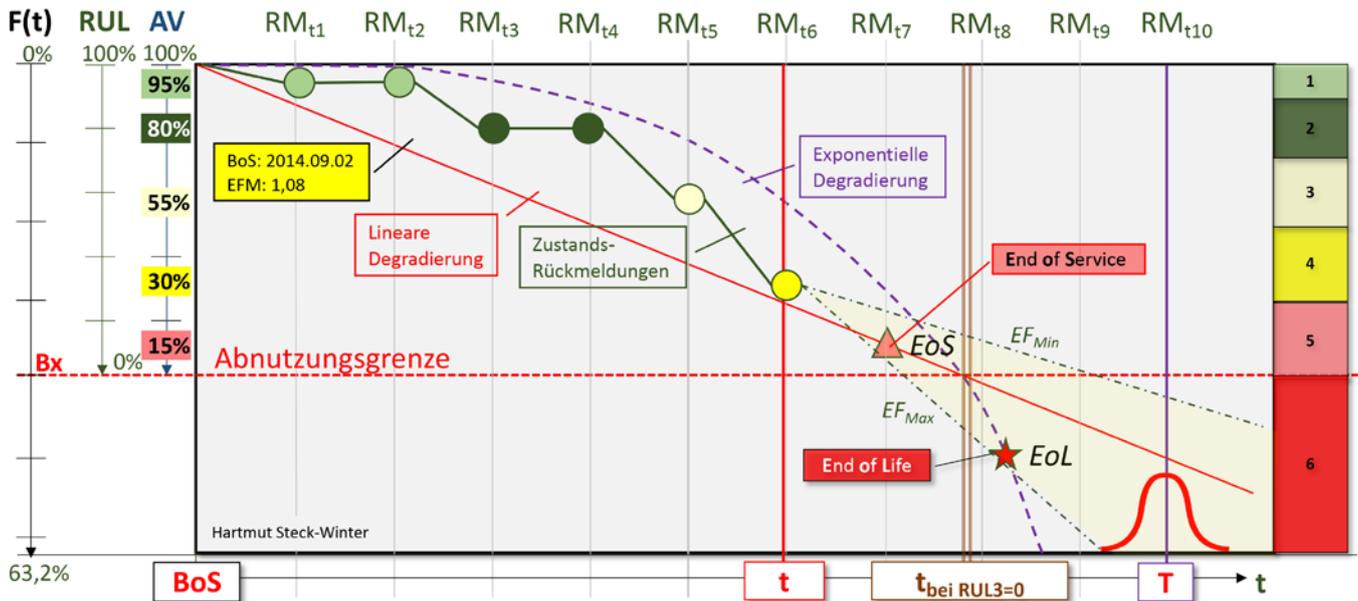


Bild 3: Das Prinzip des Abnutzungsvorrats

Exkurs: Abnutzungsvorrat und Zustandsrückmeldungen

Bevor wir uns dem zentralen Element im Regelkreis – der RUL_{RM} -Prognose – zuwenden, folgt nun ein Exkurs zur Definition und Bedeutung von Abnutzungsvorrat und Zustandsrückmeldungen. Sie sind für die in diesem Beitrag beschriebenen Vorgehen grundlegend.

Das Prinzip des Abnutzungsvorrats nach DIN 31051:2003-06 ist schon lange bekannt. Auch die zustandsorientierte Instandhaltung nach VDI 2888:1999-12 ist keine neue Erfindung. Zustandsorientierte Instandhaltung basiert auf der Erfassung von physikalischen Abnutzungszuständen gefolgt von einer Zustandsbewertung. Physikalische Abnutzungs- und Verschleißzustände – synonym auch zustandsbeschreibende Merkmale genannt – sind messbare bzw. sicht- oder zählbare Veränderungen eines Bauteils, beispielsweise Deformation, Löcher, Materialabtragung, Mulden, Rattermarken, Riefen, Risse etc. Zustandsorientierte Instandhaltung setzt immer eine quantifizierbare Abnutzung voraus.

In Bild 3 sind die wichtigsten Bestandteile des Prinzips dargestellt.

Abnutzungsvorrat

Jedem Bauteil steht eine bestimmte Vorratsmenge an Funktionserfüllungen, im weiteren Abnutzungsvorrat genannt, zur Verfügung. Die „Messbarkeit“ des Abnutzungsvorrats wird durch die drei vertikalen Skalen auf der linken Seite Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$, Restlebensdauer (RUL) und Abnutzungsvorrat (AV) verdeutlicht. Allerdings sind weder der wahre Abnutzungszustand noch die Abnutzungsgrenze auf einer Skala am Bauteil ablesbar. Sie können nur bei einer Inspektion anhand der für ein Bauteil vorher definierten spezifischen Merkmale beurteilt werden.

Die rechte vertikale Skala zeigt den einer Zustandsbeurteilung „zugeordneten Abnutzungsvorrat“ mit sechs Ampelfarben von hellgrün (1,0) bis dunkelrot (6,0).

Auf der unteren horizontalen Achse ist die Nutzungsdauer (t) seit Nutzungsbeginn (BoS) bis zur charakteristischen

Lebensdauer (T) dargestellt. Theoretisch sind bis dahin 63,2 % einer Gesamtheit vergleichbarer Bauteile ausgefallen.

Die obere horizontale Skala zeigt die Zustandsrückmeldungen (RM) während der Nutzungsdauer. Die Instandhaltung ist dafür verantwortlich, den Abbau des Abnutzungsvorrates zu beobachten und rückzumelden, insbesondere aber und den abgebauten Vorrat unter Berücksichtigung der zulässigen Ausfallwahrscheinlichkeit wieder zu ersetzen.

Zum Beginn der Nutzung (BoS) sind noch der volle Abnutzungsvorrat ($AV = 100\%$), die maximale Restlebensdauer ($RUL = 100\%$ von T_{Bx}) und die geringste Ausfallwahrscheinlichkeit ($F(t) = 0\%$) vorhanden. Zwischen der Ausfallwahrscheinlichkeit, der RUL und dem Abnutzungsvorrat besteht eine sehr starke Korrelation.

Während der Nutzung wird der Abnutzungsvorrat degradiert. Nach der Literatur und Erfahrung ist ein exponentieller Verlauf der Degradierung am wahrscheinlichsten (gestrichelte lila Kurve). Die Degradierung korreliert mit dem Weibull-Formfaktor, bzw. dem ebenfalls exponentiellen Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit.

Abnutzungsgrenze

Die Abnutzungsvorratsgrenze (AVG) ist selbst bei zustandsorientiert instandgehaltenen Bauteilen meist nicht bekannt. Sie wird einerseits von den Ausprägungen der für ein Bauteil festgelegten Abnutzungsmerkmale und andererseits durch die nutzungszeitabhängige zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit ($F(t)$) bestimmt. Verringert sich der Abnutzungsvorrat unter die Abnutzungsgrenze, ist mit zunehmenden Verschleißausfällen zu rechnen⁷. Wird ein Bauteil zu früh ersetzt, bleibt der zu diesem Zeitpunkt noch vorhandene Abnutzungsvorrat ungenutzt. Zustandsorientierte und vorausschauende Instandhaltung haben eben auch einen hohen wirtschaftlichen Nutzen. Die Festlegung der Abnutzungsgrenze sollte daher nicht erst bei der laufenden Inspektion, sondern weit im Vorfeld durch erfahrene Instandhalterinnen und Instandhalter ähnlich einer FMEA erfolgen und mit baugruppenspezifischen, digitalen Checklisten standardisiert werden.

7 Auch bei noch vorhandenem Abnutzungsvorrat treten auf niedrigem Niveau immer mal wieder Zufallsausfälle auf.

Zustandsrückmeldungen

Während der Nutzung erfolgen i. d. R. bei den Jahreswartungen regelmäßige Zustandsrückmeldungen (RM_{tx}) des Abnutzungsvorrats eines Bauteils. Leider sind sie für viele Instandhalterinnen und Instandhalter oft nur ein zusätzlicher Zeitaufwand, der Mehrwert erschließt sich ihnen (noch) nicht. Ohne Zustandsrückmeldungen läuft aber eine realitätsnahe RUL-Prognose ins Leere.

Eine geeignete Zustandsrückmeldung muss digitalisiert, nachvollziehbar, am besten bedienergeführt mit bauteilspezifischen Checklisten erfolgen. Sie beinhaltet sowohl eine Zustandserfassung mithilfe spezifischer Abnutzungsmerkmale und deren Ausprägungen, beispielsweise „Riefen“ als Merkmal und „viele“ als Ausprägung als auch eine Zustandsbewertung. Bei der Zustandsbewertung wird der Abnutzung ein Schulnotenwert von 1 bis 6 zugeordnet und mit Ampelfarben visualisiert. Je realitätsnäher und feinstufiger die Zustandsbewertung desto besser die spätere Güte der RUL-Prognose. Bei der Bewertung des Abnutzungsvorrats sollte sich die Instandhaltung jedenfalls nicht nur auf das Bauchgefühl verlassen.

Die Ausführung des Rückmeldesystems ist ganz entscheidend für die Akzeptanz der Instandhaltung. Es sind mehrere Ausführungsvarianten möglich. Im einfachsten Fall erfolgen Rückmeldungen mit dem Desktop direkt in den Instandhaltungsplan einer Jahreswartung. Besser sollte das Rückmeldesystem der Instandhaltung aber ermöglichen die Daten, die sie braucht und erfasst, in einer selbstkonfigurierbaren agilen App, beispielsweise auf einem Pad oder einem Smartphone zu bearbeiten.

Die Instandhaltung muss ihre Zustandsrückmeldungen ohne Medienbrüche gut dokumentieren. Sonst droht ein zu großer Interpretationsspielraum, sprich: zwei Instandhalterinnen und Instandhalter – drei Meinungen! Die Zustandsrückmeldung muss die Nachbearbeitung von Checklisten, Fotos, Messwerten, Statusänderungen, Serviceberichten und Ersatzteillogistik unterstützen. Dadurch erhält sie auch einen Mehrwert für die Instandhaltung selbst. Sie kann im Laufe der Zeit zu einem Wissensmanagement ausgebaut werden, das mit einer punktgenauen Bedienung bei der Zustandserfassung der Instandhaltung Spezialistenwissen zur Verfügung stellt.

Rückmeldespeicher

Das womöglich Wichtigste ist aber die Beharrlichkeit der Instandhaltung. Zustandsrückmeldungen des Abnutzungsvorrats über mehrere Bauteil-Lebenszyklen hinweg sind eine sehr langwierige Angelegenheit, deren Mehrwert sich erst im Laufe der Zeit entfaltet. Alle Rückmeldungen sollten in einem RM-Speicher ähnlich einem Fahrtenschreiber oder einer Black Box gesammelt werden. Sie können dann auch für vergleichende Auswertungen und zum maschinellen Lernen genutzt werden.

RUL_{RM}: RUL-Prognose mit Zustandsrückmeldungen

Nach der Theorie im vorstehenden Exkurs nun die praktische Umsetzung mit RUL_{RM}, die auch Zustandsrückmeldungen des Abnutzungsvorrats in die Berechnung mit einbezieht.

Im in **Bild 4** dargestellten Diagramm werden die beiden bereits erläuterten AV-/RUL_{Per/EF}-Prognosen, die neu hinzugekommene AV-/RUL_{RM}-Prognose mit Zustandsrückmeldungen und die Degradierung in einer Gesamtschau dargestellt.

Anzeigen im Diagramm:

- Graue schräge Linie: Abnutzungsvorrat vs. RUL_{Per} (AV-RUL_{Per}) mit linearer Degradierung, aber ohne Einflussfaktoren
- Rote schräge Linie: Abnutzungsvorrat vs. RUL_{EF} (AV-RUL_{EF}) mit linearer Degradierung und durchschnittlichen Einflussfaktoren
- Lila Kurve: Abnutzungsvorrat (AV-Deg_{Exp}) mit exponentieller Degradierung und durchschnittlichen Einflussfaktoren
- Grüne Kurve: Abnutzungsvorrat vs. RUL_{RM} (AV-RUL_{RM}) mit exponentieller Degradierung, Zustandsrückmeldungen und durchschnittlichen Einflussfaktoren
- Farbige Punkte auf grüner Kurve: Zustandsrückmeldungen $RM(t)$ in Ampelfarben
- Grüne gestrichelte Kurven: Abnutzungsverlauf vs. RUL_{RM} mit minimalen und maximalen EF- Grenzwerten (AV-RUL_{RM Min} und AV-RUL_{RM Max}.)
- Grüne waagrechte Linie: Aktueller Abnutzungsvorrat (AV-RUL_{RM Akt})
- Braune doppelte senkrechte Linie: RUL_{RM}-Prognose bis Abnutzungsvorratsgrenze (RUL_{RM AVG})
- Schwarze senkrechte Linie: Aktuelle Nutzungszeit (t_{Akt}).

Erfolgte Zustandsrückmeldungen werden mit sechs Ampelfarben visualisiert. Jede Farbe entspricht einem Abnutzungsvorrat, beispielsweise Ampel hellgrün (Zustand 1) 95 %, Ampel hellgelb (Zustand 3) 55 % oder Ampel gelb (Zustand 4) 30 %.

Der Nutzen des Diagramms für die Instandhaltung liegt auf der Hand. Es zeigt die Prognose aus verschiedenen Perspektiven, was früher war, was aktuell ist und was zukünftig sein wird. Auf das Letztere kommt es bei der RUL-Prognose vor allem an.

Das Problem der Zustandsrückmeldungen zeigt sich im Unterschied zwischen RUL_{EF} und der exponentiellen Degradierungskurve (lila). Der Abnutzungsvorrat wird nicht linear, sondern exponentiell zur Nutzungszeit (t) abgebaut, d. h. die Degradierung nimmt mit der Nutzungszeit überproportional zu. Beispielsweise sind nach 50 % der theoretischen Nutzungsdauer (bei $t = 3,25$) erst ca. 15 % des Abnutzungsvorrats aufgebraucht, im Gegensatz dazu sind im letzten Jahr der Nutzungszeit (bei $t = 5,5$) noch ca. 40 % des Abnutzungsvorrats vorhanden, die nun innerhalb eines Jahres verbraucht werden. Bedingt durch das exponentielle Wachstum der Degradierung wird der Abnutzungsvorrat zum Ende der erwartbaren Nutzungszeit also rasend schnell abgebaut. In der RUL_{RM}-Prognose wird daher der Abnutzungsvorrat mit einer Modellierung der Degradierung „nach unten korrigiert“, weil sonst die Zustandsbewertungen am Ende der Nutzungszeit eine viel zu lange RUL vorgaukeln würden.

In der Sprache der Mathematik ist mit der Modellierung zu jedem Zeitpunkt der Erwartungswert des Abnutzungsvorrats bekannt und kann mit einer Zustandsrückmeldung verglichen und verrechnet werden. Das Ergebnis ist dann eine realitätsnähere AV-/RUL_{RM}-Prognose.

Das exponentielle Wachstum der Degradierung verdeutlicht auch das in der Aufgabenstellung bereits beschriebene Dilemma der Instandhaltung bei der Zustandsbewertung und erklärt ihre häufigen Entscheidungen zum „sicheren“ präventiven Bauteilersatz.

Einfluss der Zustandsrückmeldungen und Abklingfunktion

Geeignete Zustandsrückmeldungen haben also einen großen Einfluss. Sie erfolgen entweder bei jeder Jahreswar-

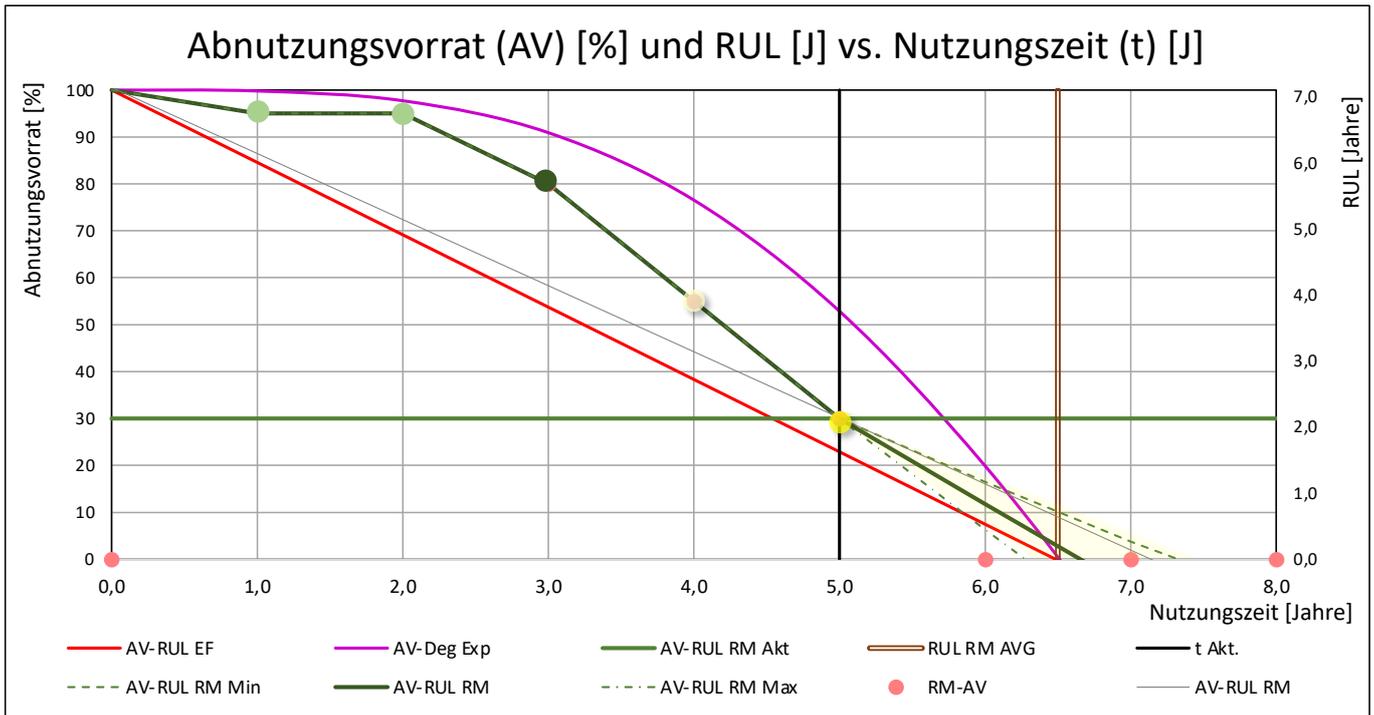


Bild 4: Abnutzungsvorrat-/RUL-Prognose mit Degradierung und Rückmeldungen

tung, bei jeder sich bietenden Gelegenheit, freilich recht häufig aber auch nicht. Die Vorhersage muss in jedem Fall plausible Ergebnisse liefern. Dabei spielt die Abklingfunktion eine wichtige Rolle. Sie ist eine parametrierbare mathematische Funktion und hat grob gesagt das Bestreben sich bei fehlenden Rückmeldungen der linearen RUL_{EF} anzunähern. Dies kann je nach Parametrierung entweder auf dem schnellsten Weg als Gerade oder in Kurvenform der Degradierung erfolgen.

Der enorme Einfluss der Zustandsrückmeldungen und der Abklingfunktion auf eine RUL-Prognose soll in zwei Beispielen verdeutlicht werden:

Im ersten Beispiel (Bild 5) wurde das Bauteil zwei Jahre genutzt ($t = 2$, schwarze senkrechte Linie). Der modellierte Erwartungswert des Abnutzungsvorrats (lila Kurve, AV-AVK) ist 96 %. Der reale Abnutzungsvorrat bei der letzten Rückmeldung RM_{t_2} ist 95 % (waagrechte grüne Linie).

RUL_{EF} (rote Linie) und RUL_{RM} (grüne Kurve) sind an der Abnutzungsgrenze (bei $AV = 0\%$, braune doppelte senkrechte Linie) jeweils $(6,5 - 2,0 =) 4,5$ Jahre. Die Abklingfunktion hat in der Zeit ohne Zustandsrückmeldungen eine vollständige Annäherung der beiden RUL-Prognosen bewirkt.

Im zweiten Beispiel (Bild 6) wurde das Bauteil vier Jahre genutzt ($t = 4$, schwarze senkrechte Linie). Der modellierte Erwartungswert des Abnutzungsvorrats (lila Kurve, AV-Deg_{Exp}) ist 77 %. Der reale Abnutzungsvorrat bei der letzten Rückmeldung (RM_{t_4}) ist 15 % (waagrechte grüne Linie). Die Differenz zwischen Rückmeldung und Erwartungswert ist dementsprechend sehr groß.

RUL_{EF} ist $(6,5 - 4,0 =) 2,5$ Jahre, aber RUL_{RM} ist nur noch $(5,3 - 4,0 =) 1,3$ Jahre bis zur Abnutzungsgrenze (bei $AV = 0\%$, braune doppelte senkrechte Linie). Rechnet man zur RUL_{RM} -Prognose noch eine Prognoseunsicherheit hinzu (rote Einfärbung), wird deutlich, dass das Bauteil

sofort, d. h. gegenüber RUL_{EF} schon zwei Jahre früher bei der derzeit laufenden Jahreswartung ersetzt werden muss.

Spannweite der Einflussfaktoren

In den vorstehenden Beispielen kann auch die Veränderung der Spannweite der Einflussfaktoren beobachtet werden (gelbe Füllung). Sie ist von den minimalen und maximalen Grenzen der Einflussfaktoren und der Nutzungszeit abhängig. Bis zur aktuellen Nutzungszeit wirkt sich der Durchschnittswert der bisherigen Einflussfaktoren aus. Erst ab dem aktuellen Zeitpunkt können sich veränderte Einflussfaktoren innerhalb der Grenzwerte auf die Vorhersage auswirken.

Im ersten Beispiel (Bild 5) ist die Spannweite noch recht groß. Sie sieht aus wie ein auf dem Kopf stehender Trichter und reicht ausgehend von der aktuellen Nutzungszeit ($t = 2$) von minimal 5,5 bis zu maximal 8,8 Jahren.

Im zweiten Beispiel (Bild 6) ist die Spannweite schon sehr klein, weil sich die Zeit, in der sich geänderte Einflussfaktoren noch auswirken können, um die Nutzungsdauer ($t = 4$) verringert hat und auch der Abnutzungsvorrat ($AV = 15\%$) nur noch gering ist. Sie reicht von minimal 5,0 bis zu maximal 6,7 Jahren.

Die Spannweite hat nichts mit Genauigkeit oder Toleranzen zu tun. Sie zeigt nur die Möglichkeiten auf, in denen eine RUL-Prognose in ihren durch die Einflussfaktoren vorgegebenen Grenzen variieren kann.

TTF: Einbindung Condition Monitoring

Im letzten Element des Regelkreises (Bild 1) wird das CM in die Vorhersage eingebunden. CM wirkt wie ein Fieberthermometer. Hat ein Bauteil in einer ausfallkritischen Baugruppe schon „Krankheitssymptome“ (d. h. eine Anomalie), muss rasch interveniert werden, um die Folgen zu begrenzen. Es ist dann nur noch eine Frage der Zeit bis zum Ausfall (TTF = Time

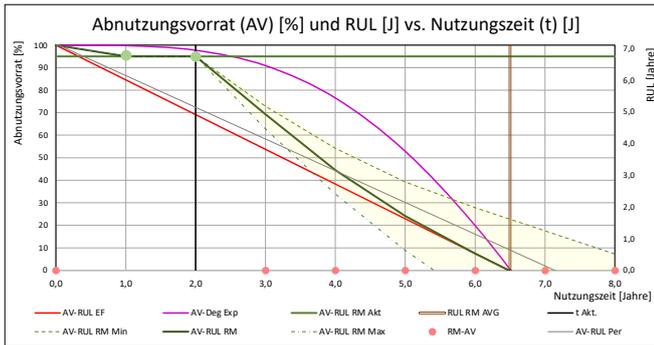


Bild 5: Abnutzungsvorrat-/RUL-Prognose mit zwei Rückmeldungen

to Failure). Wie genau eine Anomalieerkennung funktioniert, haben wir bereits im ersten Teil unseres Beitrags ausgeführt.

Prognoseunsicherheit

Nachdem nun alle Elemente des Regelkreises dargelegt wurden, stellt sich die Frage, ob das anfänglich genannte Ziel – höhere Genauigkeit und mehr Transparenz – erreicht werden konnte.

„Prognosen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen.“ Dieses beliebte Bonmot enthält aber schon ein großes Stück Weisheit. Je weiter entfernt die Zukunft ist, umso höher die Prognoseunsicherheit. Ein Zeithorizont von mehr als einem Jahr ist zweifellos grenzwertig. Allerdings erwarten wir genau dies von unseren Servicetechnikern bei einer Jahreswartung, bisher auch ohne Hilfsmittel.

Die Genauigkeit einer RUL-Prognose wird durch die drei technischen Elemente Lebensdauerdaten, Einflussfaktoren und Zustandsrückmeldungen des Abnutzungsvorrats bestimmt. Der Zeithorizont kommt hinzu. Zu Beginn sind die Lebensdauerdaten und Einflussfaktormultiplikatoren nur „informierte“ Experten-Schätzungen. Die Ungenauigkeit jedes einzelnen Elements ist noch hoch und kann sich im schlechtesten Fall mit den anderen addieren. Mit dem inkrementellen Prozess wird jedoch gegengesteuert und die Genauigkeit kontinuierlich verbessert. Über mehrere Lebenszyklen hinweg lässt sich dann die Prognoseunsicherheit verringern.

Justierung und Validierung der Lebensdauerdaten

Dies führt uns auch zur Antwort auf die letzte Frage, wie wir die Lebensdauerdaten justieren und validieren können.

Dies geht einfacher als gedacht. Charakteristische Lebensdauer und Formfaktor müssen einigermaßen mit den Zustandsrückmeldungen übereinstimmen. Je deckungsgleicher sie sind, umso geringer der Fehler in den Lebensdauerdaten. Dies soll nachfolgend beispielhaft veranschaulicht werden:

Zunächst werden, wie in **Bild 7** dargestellt, bei Jahreswartungen (grüne Kurve, AV-RUL_{RM}) alle Zustandsrückmeldungen bis zur Abnutzungsgrenze aufgezeichnet. Das heißt ein Bauteil wird dabei so lange genutzt, bis die festgelegten Zustandsmerkmale mit hoher Ausprägung sichtbar sind.

Die bis zur Abnutzungsgrenze abgelaufene Nutzungsdauer, im Beispiel 6,0 Jahre, entspricht dem Produkt der spezifischen Lebensdauer und des Einflussfaktormultiplikators. Bei bekannter zulässiger Ausfallwahrscheinlichkeit kann daraus die charakteristische Lebensdauer (T) zurückgerechnet und justiert oder validiert werden.

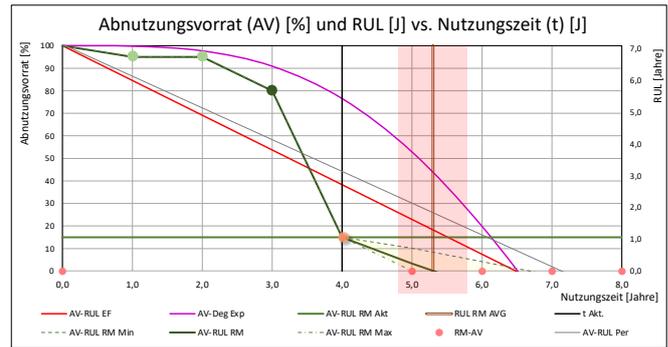


Bild 6: Abnutzungsvorrat-/RUL-Prognose mit vier Rückmeldungen

Über die „Verschiebung“ der Degradierungskurve im Vergleich zu den Zustandsrückmeldungen kann auch der Formfaktor sehr einfach und praxisnah überprüft werden. Ist der Verlauf der Zustandsrückmeldungen (grüne Kurve, AV-RUL_{RM}) nahezu identisch mit der Degradierungskurve (lila Kurve, AV-Deg_{Exp. 2,0}), ist der Formfaktor ($b = 2,0$) optimal. Bei der blauen strichpunktierten Kurve (AV-Deg_{Exp. 1,5}) ist der Formfaktor ($b = 1,5$) zu klein. Sie ist über die gesamte Nutzungsdauer nach links verschoben. Im Gegensatz dazu ist bei der roten gestrichelten Kurve (AV-Deg_{Exp. 3,5}) der Formfaktor ($b = 3,5$) deutlich zu groß. Sie ist über die gesamte Nutzungsdauer nach rechts verschoben.

Zustandsrückmeldungen über mehrere Lebenszyklen und Anlagen

Mit der Zeit können die im RM-Speicher gesammelten Zustandsrückmeldungen mehrerer Lebenszyklen zu einem Streudiagramm aus vielen Abnutzungsverläufen zusammengefasst werden. Bei einer Gesamtschau zeigt sich dann auch die Varianz der Lebensdauerdaten, der Degradierung und der Merkmalsausprägungen. Ein solches Streudiagramm ermöglicht dann auf breiterer Basis eine empirische Validierung der Lebensdauerdaten und Einflussfaktoren, sowie die Darstellung typischer Degradierungsverläufe im Wissensmanagement der Instandhaltung. Wer beispielsweise den „normalen“ Verlauf der Degradierung eines ausfallkritischen Bauteils kennt, kann über den Daumen gepeilt schon einige Jahre im Voraus seine wahrscheinliche Nutzungszeit vorhersagen.

Aufwand versus Nutzen

Die beschriebene RUL-Prognose ist sensorlos. Sie verursacht, vorausgesetzt FOCOS ist bereits vorhanden, keinen weiteren Hardwareaufwand und kann in einer Beta-Version für den PC, beispielsweise zusammen mit einem Aichelin-Serviceplan genutzt werden.

Eine naheliegende Anwendungsmöglichkeit ist die Unterstützung einer Jahreswartung und Ersatzteilbedarfsplanung mit einer Auflistung aller ausfallkritischen Bauteile mit RUL-Prognose, Ausfallwahrscheinlichkeit etc. Mit einer etwas aufwendigeren mobilen Ausführung des Rückmeldesystems kann die Zustandserfassung bedienergeführt und Zustandsrückmeldungen an Ort und Stelle erfolgen.

Schwieriger ist es, den Aufwand gegen den Nutzen, also die Wirtschaftlichkeit, abzuwägen, weil der ROI schon wegen des Präventionsparadoxes schwer nachweisbar ist. Trotzdem, der wirtschaftliche Mehrwert ist einer der wichtigsten Gründe

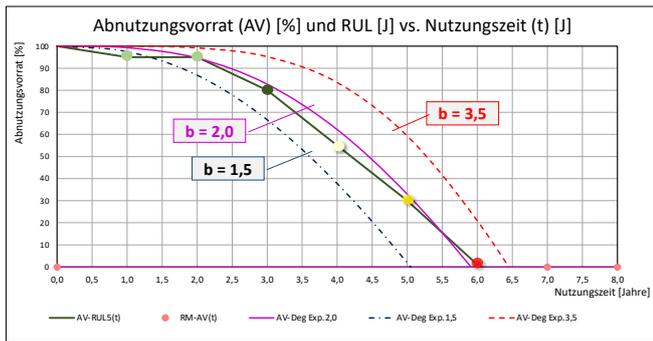


Bild 7: Justierung und Validierung des Formfaktors

für alle PdM-Anwendungen. Betriebswirtschaftlich geht es bei PdM immer um eine Verbesserung der technischen Verfügbarkeit bei gleichzeitig geringeren Instandhaltungskosten. Letztendlich steht es außer Frage, dass schon ein einziger „verhinderter“ Ausfall eine Investition in eine vorausschauende Instandhaltung mehr als rechtfertigt.

Fazit und Ausblick

Thermoprozessanlagen sind nicht nur etwas wärmere Maschinen. Bewährte PdM-Konzepte aus dem Maschinenbau sind daher nicht auf die Kernbereiche von Thermoprozessanlagen übertragbar. Wegen der sehr hohen Ausfallfolgen müssen Ausfälle mit fast allen Mitteln verhindert werden. Dazu ist neben einer Anomalieerkennung eine weit vorausschauende RUL-Prognose mit einem Vorhersagehorizont von mindestens einem Jahr ein Schlüsselement.

Die RUL-Prognose für Thermoprozessanlagen steht auf drei Säulen: statistische Lebensdauerdaten, gemessene Einflussfaktoren und angeleitete Zustandsrückmeldungen des Abnutzungsvorrats. Sie werden in einem Regelkreis kontinuierlich nachgeschärft. Die Methode kann die Instandhaltung bei der Entscheidung unterstützen, ob ein ausfallkritisches Bauteil präventiv ersetzt werden sollte oder noch weiter betrieben werden kann. Einfachheit und Praxisnähe zeichnet die Methode aus.

Eine RUL-Prognose ist nicht nur ein mathematisches Problem. Eher das Gegenteil. Die aktive Mitwirkung der Instandhaltung bei der Zustandsrückmeldungen hat eine herausragende Bedeutung. Sie ist Schwachstelle und Stärke gleichermaßen. Ohne geeignete Zustandsrückmeldungen läuft jede RUL-Prognose ins Leere. Sie sind die „Eichgewichte“ der Lebensdauerdaten, der Einflussfaktoren und des CM.

Künstliche Intelligenz (KI) spielt heute für Zustandsbewertungen und RUL-Prognosen noch keine große Rolle. Bei KI durchforsten Algorithmen große Datenmengen, um daraus eigenständige Schlussfolgerungen zu ziehen und maschinell zu lernen. Es ist zwar naheliegend, die Kamera eines Smart-

phones zusammen mit KI zur Erfassung und Beurteilung des Abnutzungszustands zu verwenden, es darf dabei aber nicht vergessen werden, dass KI sehr viele Lernbeispiele benötigt, um daraus ein Abnutzungsmuster zu erkennen. Davon sind wir aber noch meilenweit entfernt. Perspektivisch wird KI aber einen Quantensprung bei der Zustandsbewertung ermöglichen.

Zugegeben, die hier beschriebene Methode ist also noch lange nicht perfekt. Sie ist so einfach wie möglich, aber auch nur so komplex wie nötig. Jetzt zu beginnen ist wichtiger als Perfektion. Der Übergang zwischen Digitalisierung und KI ist fließend. Nur wenn digitale Daten und Prozesse vorhanden sind, funktioniert KI als zweiter Schritt. Wer sich also jetzt in diese Richtung bewegt, wird in Zukunft nicht im Abseits stehen und ohne allzu großen zusätzlichen Aufwand von den Weiterentwicklungen der vorausschauenden Instandhaltung profitieren können. Die wichtigsten Voraussetzungen dafür sind das Erfassen, Digitalisieren, Speichern, Analysieren und Bewerten von Zustandsdaten.

Literatur

- [1] Steck-Winter, H.; Stölting, C.; Unger, G.: Vorausschauende Instandhaltung mit datengetriebener Zustandsüberwachung – Teil 1. gwi – gaswärme international 66 (2017), Nr. 5, S. 87-95
- [2] Steck-Winter, H.; Stölting, C.; Unger, G.: Vorausschauende Instandhaltung mit datengetriebener Zustandsüberwachung – Teil 2. PROZESSWÄRME 1 (2018), Nr. 3, S. 49-58
- [3] Kovacs, K.; et al.: Innovative Servicekonzepte durch prädiktive Instandhaltung. ÖVIA-Konferenz, Leoben, 2021
- [4] Steck-Winter, Unger, G.: Vorausschauende Instandhaltung von Thermoprozessanlagen Praxisbericht Teil 1 – Anomalieerkennung. PROZESSWÄRME 3 (2020), Nr. 7, S. 39-47
- [5] Steck-Winter, H.: Vorausschauende Instandhaltung von Thermoprozessanlagen. gwi – gaswärme international 60 (2011), Nr. 3, S. 141-152

Autoren



Dr. Hartmut Steck-Winter, MBA
Vormals Aichelin Service GmbH
Ludwigsburg
+49 (0)176 / 9787-3726
steck-winter@gmx.de



Ing. Günther Unger
Aichelin GmbH
Mödling, Österreich
+43 (0)2236 / 23646-275
guenther.unger@aichelin.com