

Vorausschauende Instandhaltung von Thermoprozessanlagen

Predictive maintenance of thermal processing installation

Von Hartmut Steck-Winter

Die grundsätzlichen Anforderungen eines Expertensystems zur Unterstützung der zustandsorientierten vorausschauenden Instandhaltung werden vorgestellt und diskutiert.

Kernfunktion der zustandsorientierten vorausschauenden Instandhaltung ist die Prognose der verbleibenden Lebensdauer eines Betriebsmittels. Der wahrscheinliche Ausfallzeitpunkt soll möglichst genau vorhergesagt werden, um rechtzeitig Instandhaltungsmaßnahmen durchführen zu können und dabei den Abnutzungsvorrat optimal auszuschöpfen. Dazu muss der Alterungsprozess von Betriebsmitteln mit Hilfe von periodischen Inspektionen erfasst, gespeichert und analysiert werden. Darauf aufbauend soll mit Hilfe von mathematischen Modellen der verbleibende Abnutzungsvorrat hinreichend genau abgeschätzt und der optimale Instandhaltungstermin prognostiziert werden.

The basic requirements of an expert system to support the condition-based predictive maintenance will be presented and discussed.

Core function of condition-based predictive maintenance is an assessment of the remaining lifetime. The probable failure date needs to be predicted as accurately as possible, to allow use of expensive equipment to the fullest extent. Thus, together with periodic inspections, the wearing down process of equipment must be recorded, stored in a database and analyzed carefully. To predict the optimal preventive maintenance date with the help of mathematical models the wearing out process needs to be estimated with sufficient accuracy.

Bei der zustandsorientierten vorausschauenden Instandhaltung steht die Frage „Wann wird ein Betriebsmittel ausfallen?“ im Zentrum der Aufmerksamkeit, weil der Abnutzungsvorrat eines Betriebsmittels bis kurz vor seinem Ausfall, mindestens jedoch bis zur nächsten geplanten Wartung, ausgenutzt werden soll.

Der Abnutzungszustand kann entweder näherungsweise berechnet oder durch eine Inspektion der Abnutzungssymptome bestimmt werden. Die erste Möglichkeit wird durch ein Rechenmodell, die zweite durch die Zustandserfassung abgedeckt. Durch die Kombination beider Methoden werden Optimierungen möglich.

In diesem Beitrag werden beide Themenkreise behandelt. Es wird untersucht, welche Anforderungen ein Instandhaltungs-Planungs-System (IPS) erfüllen

muss, das dem Anwender Entscheidungshilfen für die Optimierung der Instandhaltung von Thermoprozessanlagen liefern soll.

Bei der Beschäftigung mit diesem Thema stellt sich natürlich auch gleich zu Beginn die Frage nach der Praxisnähe bzw. Realitätsferne. Immerhin gibt es Instandhaltungsprogramme schon Jahrzehnte, ohne dass sie sich zwischenzeitlich für Thermoprozessanlagen zu einem Standard entwickelt haben.

Beim Blick über den Tellerrand hinaus zeigt sich dann aber doch, dass dieses Thema in einigen Industrien, beispielsweise Kraftwerksanlagen, Personenbeförderungssysteme und insbesondere für Offshore Windenergieanlagen, ganz oben auf der Agenda steht und die aktuelle Diskussion in Wissenschaft und Industrie maßgeblich bestimmt.

Gibt es eine optimale Instandhaltungsstrategie?

In Ausgabe 7-8/2008 der Gaswärme International hat der Autor die Grundlagen und Anforderungen der Instandhaltung von Thermoprozessanlagen beschrieben [1]. Im Folgenden wird auf diesen Beitrag aufgebaut.

Thermoprozessanlagen zeichnen sich bekanntlich insbesondere dadurch aus, dass während der Betriebszeit keine Zustandsüberprüfung der im Ofen eingebauten Betriebsmittel möglich ist und die Instandhaltung auf die Erkenntnisse der letzten Inspektion angewiesen ist. Vor dem Hintergrund, dass für diese Betriebsmittel im Störfall auch keine rasche Zugänglichkeit möglich ist, kommt der Sicherstellung eines Betriebes mit möglichst geringem Ausfallrisiko bis zur nächsten Wartung höchste Bedeutung zu.

Das Instandhaltungsmanagement hat vor diesem Hintergrund die Aufgabe, den Instandhaltungsbedarf zukunftsgerichtet zu erkennen und die Instandhaltungsmaßnahmen kosteneffizient zu planen und zu steuern. Diese Aufgabe wird in der Regel von einer Instandhaltungsstrategie geleitet und ggf. durch ein Instandhaltungs-Planungs-System (IPS) unterstützt.

Instandhaltungsstrategien sind Leitlinien für die Instandhaltung. Sie geben vor, wie und wann die Instandhaltungsplanung auf Ereignisse reagieren muss, um den gewünschten Zustand zu erhalten. Die drei grundlegenden Instandhaltungsstrategien lassen sich anhand der Reaktion auf den Abnutzungszustand unterscheiden:

1. Ereignisorientierte Instandhaltung (Feuerwehrstrategie):

Der Abnutzungsvorrat eines Betriebsmittels wird vollständig ausgeschöpft. Die Instandhaltung reagiert erst nach

Ausfall eines Betriebsmittels. Für Thermoprozessanlagen kommt die geplante ereignisorientierte Instandhaltung nur an peripheren Anlagenteilen, z. B. an Transportbahnen in Frage, bei denen die Produktionsausfallzeit und der Prozesseinfluss gering sind, wenn ein Betriebsmittel ausfällt. Die ereignisorientierte Instandhaltung ist generell unverzichtbar, weil Zufallsausfälle auch an kritischen Betriebsmitteln nicht völlig ausgeschlossen werden können.

2. Periodische Instandhaltung:

Nach Ablauf eines vordefinierten, konstanten Nutzungsparameters (z. B. Zeitspanne, gefahrene Ofentakte) wird ohne Berücksichtigung des noch vorhandenen Abnutzungsvorrats eine Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt. Eine periodische Instandhaltung ist beispielsweise dann angebracht, wenn der Abnutzungszustand eines Betriebsmittels nicht erkennbar, wenn das Ausfallverhalten des Betriebsmittels unbekannt oder der periodische Austausch dieser Betriebsmittel preisgünstiger als eine Inspektion und Wartung ist. Ein nicht zu vernachlässigender Sonderfall der periodischen Instandhaltung ist die Prüfung von Sicherheitseinrichtungen [2].

3. Zustandsorientierte Instandhaltung:

Maßnahmen werden erst dann durchgeführt, wenn der verfügbare Abnutzungsvorrat möglichst weitgehend ausgeschöpft ist, ohne dabei eine Störung zu riskieren. Die zustandsabhängige Strategie gilt für teure oder ausfallkritische Betriebsmittel als Idealkonzept, da sie nicht früher und nicht später instandgesetzt werden als ihr Zustand es tatsächlich verlangt. Durch Erfassen des Ist-Zustands mit anschließendem Soll-Ist-Vergleich

wird versucht, den Abnutzungsvorrat und die Restnutzungsdauer zu bestimmen. Ziel einer modernen zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie ist daher auch, Abnutzung an Betriebsmitteln mit Hilfe von geeigneter Messtechnik, beispielsweise Condition Monitoring Systemen (CMS), während des Betriebs zu erfassen und zu dokumentieren.

Während also die periodische und die zustandsorientierte Instandhaltung zum Ziel haben, die Grenzen des Abnutzungsvorrats nie auszuschöpfen, wird bei der ereignisorientierten Instandhaltung der maximale Abnutzungsvorrat bis zum Ausfall ausgenutzt.

Die starre Verwendung einer einzigen Instandhaltungsstrategie erfüllt die Anforderungen einer Thermoprozessanlage jedoch nicht. Die drei Instandhaltungsstrategien müssen kombiniert werden. Dazu werden die einzelnen Betriebsmittel unter verschiedenen Gesichtspunkten, insbesondere den Störungsfolgen, analysiert. Diese Vorgehensweise ist als Reliability Centered Maintenance (RCM) Methode bekannt. Üblicherweise ist das Ergebnis dieser Analyse die systematische Ableitung einer Instandhaltungsstrategie (zustandsorientiert, periodisch, störungsbedingt), Maßnahmen zur Beschleunigung der Störungsbeseitigung oder aber eine Konstruktionsänderung, beispielsweise Redundanz.

Herausforderungen der vorausschauenden Instandhaltung

Die zustandsbezogene vorausschauende Instandhaltung setzt voraus, dass sich über beobachtbare, besser noch, messbare Zustandsveränderungen oder andere Symptome Rückschlüsse auf den Abnutzungszustand eines Betriebsmittels

ziehen lassen. Beispielsweise kann eine Veränderung der Lagerschwingung einer Welle ein Indikator für die Abnutzung sein.

Eine kontinuierliche messtechnische Zustandsüberwachung ist aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen jedoch nur für die wenigsten Betriebsmittel möglich, sodass meistens auf CMS verzichtet wird. Als Entscheidungsgrundlage steht also im Wesentlichen nur subjektives Expertenwissen zur Verfügung. Nicht selten bleibt dem Experten nur das Bauchgefühl, ob das Betriebsmittel mindestens bis zur nächsten Wartung hält oder nicht. Vorausgesetzt wird nämlich immer, dass gleiche Einsatzbedingungen für gleiche Betriebsmittel eine zumindest ähnliche Abnutzung erzeugen. D. h., Schlüsse über den Zustand eines Betriebsmittels werden aus dem Verhalten des Durchschnitts gleichartiger Betriebsmittel unter Annahme analoger Einsatzbedingungen gezogen. Die angenommene Analogie des Abnutzungsverhaltens ist die Grundlage der zustandsbezogenen Instandhaltungsstrategie.

Durch Personalwechsel kann das vorhandene Expertenwissen schnell verloren gehen. Das Expertenwissen personenunabhängig verfügbar zu machen, ist somit eine der zentralen Herausforderungen an die vorausschauende zustandsorientierte Instandhaltung.

Zustandswissen wurde bisher vorrangig in den Köpfen oder bestenfalls in den Notizbüchern der Instandhalter gespeichert. Im günstigsten Fall entsteht bis zur nächsten Revision eine Liste der durchzuführenden Instandhaltungsmaßnahmen. Die professionelle zustandsabhängige Instandhaltung erfordert neue, bessere Methoden, das Zustandswissen zu speichern und zu verarbeiten.

Inspektionen an elektronischen Baugruppen sind in aller Regel wenig effizient. Baugruppen mit automatischer Selbstdiagnose und Fehlermeldung bzw. Anzeige einer eingeschränkten Nutzung können Inspektionen zur Zustandserfassung ganz überflüssig werden lassen. Davon ausgenommen sind jedoch alle Sicherheitseinrichtungen. Die Prüfung von Sicherheitsfunktionen sollte, wie bereits erwähnt, in regelmäßigen Abständen vorgenommen werden [2].

Inspektionen von mechanischen Betriebsmitteln, wie exemplarisch in **Bild 1** dargestellt, sind oft mit längeren Stillstandszeiten verbunden, weil beispiels-



Bild 1:
Inspektion einer
Rollenherdfenanlage

Fig. 1:
Inspection of a roller
hearth furnace

weise Gasaufkohlungs-Ofenanlagen zur Inspektion des Ofenraums entgast und abgekühlt und danach wieder aufgeheizt und konditioniert werden müssen. Alle Inspektions- und Instandhaltungsmaßnahmen müssen aus diesem Grund auf ein relativ kleines Zeitfenster (z. B. eine Jahreswartung) zusammengezogen werden.

Bei jeder Inspektion eines Betriebsmittels muss der Instandhalter also abschätzen, ob der Abnutzungsvorrat des Betriebsmittels noch bis mindestens zum nächst folgenden Wartungstermin ausreicht. Derzeit stehen dem Instandhalter für die Prognose nur wenige Hilfsmittel zur Verfügung. Der Instandhalter trifft diese Entscheidung in der Regel alleine aufgrund seiner Erfahrung.

Nach Ansicht des Autors sollte man sich auch vor Augen halten, dass wahrscheinlich die wenigsten Zustandseinschätzungen quantitativ, d. h. messbar, sind. Eine größere Anzahl von Zustandseinschätzungen wird nur qualitativ sein, beispielsweise neuwertig, gebraucht (aber weiter verwendbar) oder abgenutzt (nicht mehr verwendbar). In nicht wenigen Fällen ist selbst diese Beurteilung noch zu fein. Die Bewertung erfolgt dann alleine per intuitivem Maßstab, ob der noch vorhandene Abnutzungsvorrat bis zur nächsten Wartung ausreicht oder eben nicht. In diesem Fall wird dann auch der festgestellte Abnutzungszustand meist nicht dokumentiert.

Einige in Thermoprozessanlagen eingebaute, typische Betriebsmittel sind in **Bild 2** aufgelistet. Die Auflistung zeigt, dass nur wenige Verschleißmerkmale quantitativ sind.

Selbst wenn sich quantitative Messwerte erheben lassen, wie z. B. die Oberflächentemperaturen einer Ofenwand mit Hilfe der Thermografie, bleibt recht häufig die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Messung und Abnutzungsgrad offen.

Auch die aufgrund der Zustandsbewertung gewählten Instandhaltungsmaßnahmen sind graduell und gehen von Wartungen über Reparaturen bis zur Erneuerung. Die Grenzen sind fließend und hängen nicht selten von dem zur Verfügung stehenden Budget ab.

Bei jeder Zustandsbewertung werden implizit immer auch eine ganze Reihe von anderen Gesichtspunkten berücksichtigt, beispielsweise das Alter des Betriebsmittels, die Erfahrung mit vergleichbaren

Bild 2: Typische Betriebsmittel und deren Verschleißmerkmale
Fig.2: Typical furnace equipment and its wear out characteristics

Betriebsmittel	Abnutzungsmerkmal	Methode zur Feststellung des Abnutzungszustands
Filter, Siebe	Schmutzschicht	Inspektion, (Druckmessung) i.d.R. präventiver Austausch
Wärmetauscher	Verkalkung, Korrosion	Inspektion, Endoskopie, Temperaturmessung
Bremsen, Kupplungen	Abrieb	Inspektion, Messung der Belagdicke
Ausmauerung	Risse, Spalte, Ausbrüche	Inspektion, Thermografie
Stopfbuchsen, Gleitringdichtungen	Keine	Keine, (ggf. Leckgasrate) i.d.R. präventiver Austausch
Pumpen, Ventilatoren, Gasumwälzer	Vibration (Unwucht)	Schwingungsmessung
Elektromechanische Schalter (Kontaktabbbrand)	Kontaktabbbrand	Inspektion, (Widerstand) i.d.R. präventiver Austausch
Lauf- oder Gleitflächen	Rillen, Riefen	Inspektion
Gasbrenner	Abbrand (Zündelektrode) Undichtigkeit (Ventile)	Inspektion ggf. Leckgasrate
Thermoelemente	Drift, EMK	Vergleichsmessung mit Prüferthermoelement

Betriebsmitteln, insbesondere aber die Ausfallfolgen bzw. die Ersatzteilverfügbarkeit. Wenn die Ersatzteilverfügbarkeit nicht mehr sichergestellt werden kann, ist es meist die bessere Alternative, diese Betriebsmittel geplant, d. h. präventiv, auszutauschen, auch wenn der Abnutzungszustand einen weiteren Betrieb noch zulassen würde. Als häufig vorkommendes Beispiel hierfür ist der Ersatz der Steuerungsgeneration Simatic S5 durch Simatic S7 zu nennen [3].

Der besondere Schwierigkeitsgrad der vorausschauenden zustandsorientierten Instandhaltung liegt in der Bestimmung des Abnutzungsvorrats spezifischer Betriebsmittel. Gibt es für Betriebsmittel keine eindeutigen Verschleißmerkmale, hilft nur das Sammeln weiterer Inspektionsergebnisse und Erfahrungen, um aus einem sich dann möglicherweise abzeichnenden Trend eine Prognose ableiten zu können. Die Instandhaltung braucht dazu zum einen Zeit und zum anderen ein System (Datenbank), in dem die Inspektionsergebnisse der einzelnen Verschleißmerkmale gespeichert werden können.

Sind Abnutzung und Ausfallwahrscheinlichkeit berechenbar?

Der zustandsorientierten Instandhaltung fehlt noch ein wichtiges Element! Die zustandsorientierte Instandhaltung muss über die bisherigen Ansätze hinausgehen und die Prognose des Abnutzungsvorrats und des Ausfallzeitpunkts miteinbeziehen [4]. Benötigt werden Prognosemodelle, mit deren Hilfe die Entscheidungen bezüglich Instandhaltungs-, Verbesserungs-, Modernisierungs- oder Ersatzinvestitionsmaßnahmen bewertet werden können und so

letztlich die Entscheidung für oder gegen eine entsprechende Maßnahme unterstützen [5].

In diesem Kapitel werden die beiden wichtigsten Modelle zur Erklärung der Ausfallwahrscheinlichkeit und der Abnutzung vorgestellt. Beide Modelle, bzw. der Versuch einer Synthese der beiden Modelle, sind die Grundlage der in diesem Beitrag vorgeschlagenen Methode zur Prognose des optimalen Instandhaltungstermins.

Das Ausfallverhalten des gesamten Systems, also z. B. einer Thermoprozessanlage, erhält man dann durch eine Verknüpfung der Zuverlässigkeiten der einzelnen Betriebsmittel. Dieser Beitrag ist jedoch auf die Betrachtung einzelner Betriebsmittel beschränkt.

Das Modell des Abnutzungsvorrats

Die Lebensdauer jedes Betriebsmittels ist endlich, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass ein Betriebsmittel irgendwann einmal versagen wird, ist 100 %. Mit zunehmender Betriebsdauer steigt die Wahrscheinlichkeit eines Versagens an. Warum?

Abnutzung führt zu physischen Veränderungen wie Verschleiß, Alterung, Korrosion oder Bruch eines Betriebsmittels. Abnutzung kann auf physikalische, chemische oder biologische Mechanismen zurückgeführt werden. Die inhärenten Eigenschaften eines Betriebsmittels wie Material und Verarbeitung sowie externe Einflüsse wie Temperatur und Atmosphäre, insbesondere aber die Gebrauchsdauer, bestimmen das Ausmaß der Abnutzung.

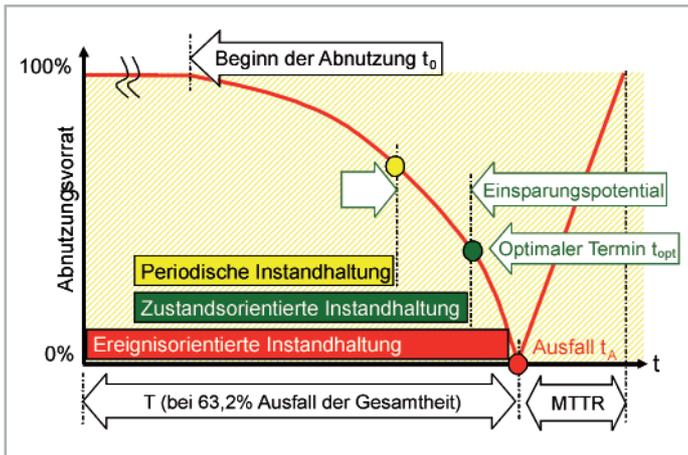


Bild 3: Das Modell des Abnutzungsvorrats
Fig. 3: The model of the equipment wear out margin

Theoretisch nutzen sich Betriebsmittel nicht nur durch ihren Gebrauch mehr oder weniger ab, sie können auch ohne Beanspruchung altern (ruhender Verschleiß, beispielsweise Kunststoffe) und können daher eine bestimmte Lebensdauer nicht überschreiten. Diese Möglichkeit spielt jedoch im Weiteren keine Rolle.

Zur Erklärung der begrenzten Lebensdauer eines Betriebsmittels bedient man sich des in **Bild 3** dargestellten Modells des Abnutzungsvorrats. Unter Abnutzungsvorrat versteht man den Vorrat der möglichen Funktionserfüllungen unter festgelegten Bedingungen, der einer Betrachtungseinheit aufgrund der Herstellung, Instandsetzung oder Verbesserung innewohnt.

Demnach hat jedes technische Gerät einen begrenzten Abnutzungsvorrat, der durch Gebrauch kontinuierlich, jedoch typischerweise nicht linear, im Zeitablauf und durch Extrembeanspruchungen schlagartig bis zum Ende der Funktionsfähigkeit (t_A) verringert wird.

In der Regel ist der reale Abnutzungsverlauf nicht bekannt. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Abnutzungsverlauf einer Exponentialfunktion folgt¹. Der exponentielle Verlauf wird angenommen, weil die Auswirkungen der Alterung auf ein neues Betriebsmittel nicht so groß sind wie auf ein gebrauchtes. So treten eine Zeit lang keinerlei erkennbaren Abnutzungserscheinungen auf. Sind dann aber doch erste Abnutzungserscheinungen entstanden, beschleunigt sich die Abnutzung bis zur Abnutzungsgrenze.

Die Betriebsbedingungen haben einen Einfluss auf das Abnutzungsprofil. Dies hat sehr unterschiedliche Abnutzungsverläufe zur Folge, sodass selbst bei ähnlichen Betriebsbedingungen mit stark streuenden Ausfallzeitpunkten gerechnet werden muss.

Die Schwierigkeit der zustandsabhängigen Instandhaltung ergibt sich aus der Definition der Abnutzungsgrenze bzw. des optimalen Zeitpunkts (t_{opt}) des präventiven Ersatzes des Betriebsmittels,

der ja möglichst kurz vor dem Ausfallzeitpunkt (t_A)² liegen sollte. Je näher der optimale Termin an dem Ausfallzeitpunkt liegt, umso größer ist das Einsparungspotenzial im Vergleich zu einer zustandsunabhängigen periodischen Instandhaltung.

Zu große Instandhaltungsintervalle erhöhen das Risiko für Ausfälle, zu kleine Intervalle haben vermeidbare Kosten zur Folge. Das Instandhaltungsintervall einer periodischen bzw. zustandsorientierten Instandhaltung muss in jedem Fall kleiner als die charakteristische Lebensdauer (T) bzw. die Mean Time Between Failures (MTBF) sein. Bei Betriebsmitteln, die repariert werden können, werden die Ausfallraten oft durch die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen (MTBF) ausgedrückt. Der MTBF ist der Kehrwert der Ausfallrate. Der MTBF gilt nur in der Phase der Zufallsausfälle, d. h. unter der Voraussetzung eines konstanten Verlaufs.

Die die Instandhaltungsstrategie entscheidende mittlere Reparaturzeit (MTRR) ist in diesem Modell ebenfalls berücksichtigt. Ist die MTRR sehr kurz, d. h. wenn ein Ausfall ohne Folgen auf die Produktqualität und die Betriebssicherheit bleibt, dann macht der Aufwand für eine periodische bzw. eine zustandsorientierte Instandhaltung wirtschaftlich keinen Sinn, da in diesem Fall die Ausnutzung des vollständigen Abnutzungsvorrats die bessere Alternative ist.

Nicht berücksichtigt wird bei diesem Modell, dass unterschiedliche Bauteile eines komplexen Betriebsmittels unterschiedliche Grade der Abnutzung aufweisen können. Unbeantwortet bleiben auch die Fragen, wie der Abnutzungsvorrat objektiv zu quantifizieren ist und welche Ausfallwahrscheinlichkeit einem jeden Abnutzungsvorrat zuzuordnen ist. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt das mit dem Abbau des Abnutzungsvorrats ggf. verbundene zunehmende Qualitätsrisiko, das gerade bei verfahrenstechnischen Anlagen nicht unterschätzt werden sollte.

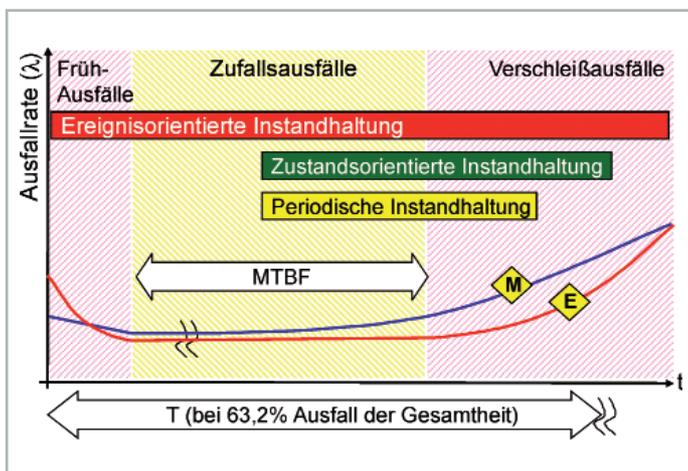


Bild 4: Das Modell der Ausfallrate von Betriebsmitteln
Fig. 4: The model of the equipment failure rate

¹ Für die Berechnung einer progressiv verlaufenden Abnutzung wird in einigen Literaturquellen die Gleichung $S = a \times t^b$ vorgeschlagen, wobei a und b Verschleißbedingungen kennzeichnen.

² Bei mehreren gleichartigen Betriebsmitteln schwankt der Ausfallzeitpunkt t_A immer um einen Mittelwert. Der Ausfallzeitpunkt wird insofern mit der charakteristischen Lebensdauer T gleichgesetzt.

Das Modell der technischen Ausfallrate

Die Ausfallrate kennzeichnet das Risiko, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Betriebsmittel ausfällt, unter der Prämisse, dass es bis zu diesem Zeitpunkt überlebt hat. Bei der Berechnung der Ausfallrate $\lambda(t)$ werden also die bisherigen Ausfälle auf die Summe der noch intakten Betriebsmittel bezogen. Die Berechnung erfolgt in der Regel mit Hilfe der Weibullverteilung.

Wie in **Bild 4** dargestellt, variiert die Ausfallrate über die drei Lebensphasen eines Betriebsmittels. Bei technischen Systemen, so eine verbreitete Annahme, sind die Ausfallraten zu Beginn besonders hoch, weil Konstruktions-, Produktions- und Werkstoffmängel sich schon nach kurzer Zeit auswirken. Die in dieser Phase auftretenden Ausfälle sprechen im Übrigen gegen einen präventiven Austausch im Rahmen einer periodischen Instandhaltung. Betriebsmittel, die die erste Zeit überstanden haben, weisen in der Folgezeit dann zwar nur noch geringe, aber unvermeidliche Ausfallraten (Zufallsausfälle) auf. In der Verschleißphase, zum Ende der Lebensdauer, steigt die Ausfallrate infolge von Abnutzung und Alterung wieder deutlich an. Die grafische Darstellung dieses Ausfallverhaltens über die Zeit folgt der Kontur einer Badewanne, weshalb die Kurve auch Badewannenkurve genannt wird.

Mechanische Komponenten sind anderen Arten von Verschleiß unterworfen als elektronische oder mechatronische Komponenten. Dies soll mit den unterschiedlichen Kurvenverläufen zum Ausdruck gebracht werden. Kurve E zeigt exemplarisch die Ausfallrate elektronischer und Kurve M die Ausfallrate mechanischer Betriebsmittel.

Die Ausfallrate wird durch die bestimmungsgemäße Verwendung der Betriebsmittel maßgeblich beeinflusst. D. h., schon kurzzeitig auftretende Überbelastungen, beispielsweise fehlende Schmierung, können den Verlauf der Ausfallrate stark beeinflussen.

Das Modell der technischen Ausfallrate zeigt, dass auf eine ereignisorientierte Instandhaltung nicht verzichtet werden kann, weil Früh- und Zufallsausfälle nicht vermeidbar sind und die ereignisorientierte Instandhaltung in diesen Phasen die einzig mögliche Instandhaltungsstrategie ist. So naheliegender das Ausfallverhalten technischer Bauteile entsprechend

der Badewannenkurve auch sein mag, einen ausreichend begründeten Nachweis dafür gibt es nicht. Im Gegenteil. Untersuchungen der Ausfallursachen technischer Bauteile in der Luftfahrtindustrie zeigen ein wesentlich vielfältigeres Bild, in dem die Badewannenkurve fast nicht vorkommt [6]. Die in der sogenannten Badewannenkurve idealisiert dargestellte Entwicklung der Ausfallrate entspricht also nur sehr eingeschränkt der Realität. Es ist festzustellen: Tritt keine zeit- oder zyklusabhängige Abnutzung auf, ist weder eine zustandsorientierte Instandhaltung noch eine Prognose des Instandhaltungstermins möglich.

Thermoprozessanlagen-spezifische Einflussfaktoren

Für das Abnutzungsverhalten eines Betriebsmittels ist neben der Betriebszeit oder den Betriebszyklen eine Anzahl von weiteren thermoprozessanlagen-spezifischen Faktoren verantwortlich. Um eine möglichst genaue Abnutzungsprognose der Betriebsmittel zu erreichen, müssen insbesondere physikalische und chemische Vorgänge berücksichtigt werden.

Diese Verstärkungsfaktoren, beispielsweise Temperatur, C-Pegel und Schadstoffe in der Ofenatmosphäre, beschleunigen den Abnutzungsprozess und somit das Aufbrauchen des Abnutzungs-vorrates. Die Genauigkeit einer Prognose des Instandhaltungstermins wird ganz entscheidend von der Berücksichtigung der Einflussfaktoren sein.

Die Einflussfaktoren werden bei der nachfolgend diskutierten Methode durch eine Dynamisierung der charakteristischen Lebensdauer berücksichtigt. Beispielsweise ist die charakteristische Lebensdauer eines im Ofen eingebauten Betriebsmittels von der Betriebstemperatur abhängig.

Vorausschauende Instandhaltung

In diesem zentralen Kapitel soll der Frage nachgegangen werden, wie mit Hilfe der vorstehend beschriebenen Modelle und mit welchen Methoden eine vorausschauende Instandhaltung in der Praxis realisiert werden kann.

Ziel ist die zuverlässige und praxisgerechte Prognose des Abnutzungsverlaufes und der Restnutzungsdauer von Bauteilen. Eine solche Prognose ist heute noch nicht möglich, da weder gesicherte Erfahrungsdaten noch entsprechende Prognosemodelle existieren. Die Erforschung der Prognosemodelle ist jedoch unabdingbare Voraussetzung zur Entwicklung einer Anleitung zur optimalen vorbeugenden Instandhaltung [5].

Bild 5 zeigt in einer Übersicht die wesentlichen Module eines Instandhaltungs-Planungs-Systems (IPS) zur Unterstützung der vorausschauenden zustandsabhängigen Instandhaltung. Die einzelnen Module des IPS müssen nicht notwendigerweise in ein Gesamtsystem integriert werden. Der Datenaustausch

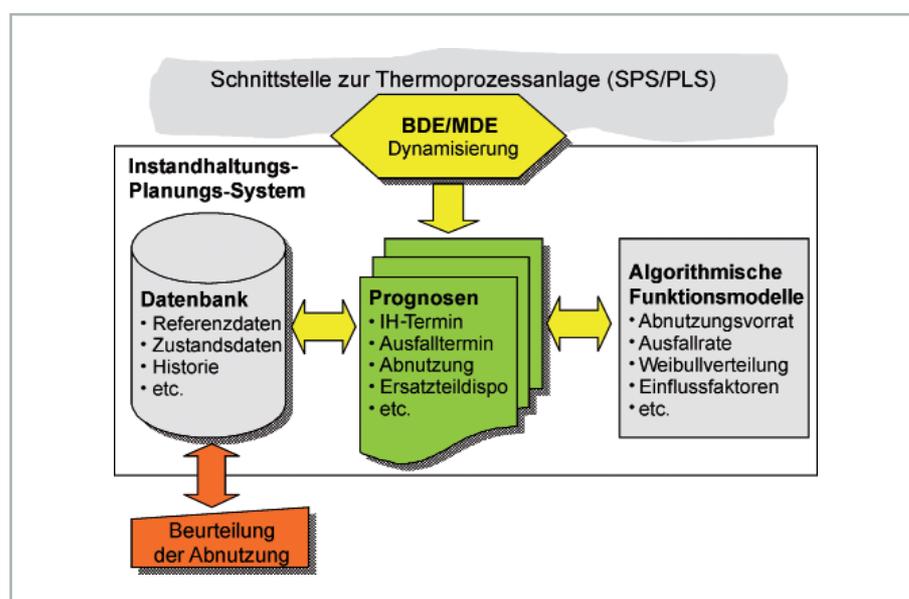


Bild 5: Module eines IPS zur Unterstützung der vorausschauenden Instandhaltung

Fig.5: Modules of an maintenance planning system to support predictive maintenance management

zwischen den Modulen muss dann allerdings manuell erfolgen.

BDE/MDE-Dynamisierung

Das IPS ist mit der Steuerung (SPS) der Thermoprozessanlage über eine BDE/MDE- (Betrieb-Daten-Erfassung/ Maschinen-Daten-Erfassung) Schnittstelle verbunden. Wichtigste Aufgabe der Schnittstelle ist die Dynamisierung der Betriebsdauer bzw. der Betriebszyklen der einzelnen Betriebsmittel sowie die Dynamisierung der Einflussfaktoren.

Die Betriebsdauer oder die Betriebszyklen sind nicht für alle Betriebsmittel innerhalb einer Anlage identisch. D. h., die Betriebszeit oder die Betriebszyklen, je nachdem welcher Parameter Verschleiß verursachend ist, müssen je überwachtem Betriebsmittel dynamisch erfasst werden.

Datenbank mit Referenz- und Zustandsdaten

Jede systematische Verbesserung setzt zunächst eine ausreichende Kenntnis des Istzustandes als auch der Historie voraus. Die in diesem Kontext beiden wichtigsten Eckdaten eines Betriebsmittels sind der Einsatzbeginn („Geburtsstag“) und der Ausfall- bzw. der Austauschtag („Todestag“). Die Historie des Abnutzungsverlaufs zwischen den beiden Daten ist die Basis für das Verständnis des aktuellen Istzustandes. Die Archivierung der Zustandsdaten stellt also sozusagen das Langzeitgedächtnis eines Betriebsmittels dar. Mit den gespeicherten Daten lässt sich einerseits der reale Abnutzungsverlauf nachvollziehen und andererseits eine Ausfallsverteilungstatistik erstellen.

Die Zustandsdatenbank soll keine neuen Erhebungswellen auslösen und Datenfriedhöfe schaffen, sondern auf die wichtigsten Zuverlässigkeitskennwerten, Einsatzdaten und auf das Abnutzungsverhalten beschränkt bleiben. Instandhalter erwarten sich von einem derartigen Wissensspeicher insbesondere Informationen darüber, wann und warum ein Betriebsmittel ausfallen wird [4]. Der Aufbau der Datenbank ist relational³ bzw. hierarchisch:

Die oberste Ebene beinhaltet die Gruppe gleichartiger Betriebsmittel, z. B. alle Gasbrenner eines Typs. Die Gruppenebene ermöglicht unter anderem eine Zusammenfassung und Berechnung gleichartiger Ersatz- und Verschleißtei-

le. Die wesentlichen Kennwerten, z. B. charakteristische Lebensdauer, Weibull-Formfaktor, MTBF, MTTR etc., sind für alle Betriebsmittel gleich, auch wenn die Einsatzdauer und Einsatzbedingungen wahrscheinlich unterschiedlich sind. MTBF-Angaben aus Herstellkatalogen, besonders aber öffentlich zugängliche Weibull-Datenbanken, können erste Anhaltswerte liefern. Aufgrund der verschiedenen Einflussfaktoren, die auf das spezifische Betriebsmittel am jeweiligen Einbauort wirken, entspricht die reale Lebensdauer und Ausfallcharakteristik eines Betriebsmittels aber eher zufällig diesen Angaben. Es wird unerlässlich sein, die Referenzwerte in einem iterativen Prozess schrittweise solange zu verbessern, bis sie die Realität des Einsatzes in einer Thermoprozessanlage hinreichend genau beschreiben.

Die mittlere Ebene ermöglicht die Identifizierung eines konkreten Betriebsmittels anhand des Betriebsmittelkennzeichens. Einsatzdauer und Einflussfaktoren werden für jedes Betriebsmittel separat erfasst und ausgewertet.

In der unteren Ebene wird der Abnutzungszustand der dem Verschleiß unterworfenen Bauteile eines Betriebsmittels erfasst. Die Zustandsbeurteilung erfolgt anhand der zugeordneten Inspektionsvorgaben.

Der grundlegende Widerspruch der Datenerfassung in der Praxis liegt darin, dass Daten über das Ausfallverhalten von Betriebsmitteln nur dann gesammelt werden können, wenn die Instandhaltung Ausfälle nicht präventiv verhindert. Dies ist aber der Kern der zustandsorientierten Instandhaltung. Erfahrungsdaten über das Ausfallverhalten ausfallkritischer Betriebsmittel können daher nur sehr selten gewonnen werden [6]. Dieser Widerspruch ist auch Teil der Erklärung, warum die schon seit langer Zeit zur Verfügung stehenden Instandhaltungsdatenbanken so wenig Zuspruch finden. Ein wichtiges Ziel ist daher, diesen Widerspruch aufzulösen.

Bestimmung unbekannter Zuverlässigkeitskennwerte

Die vorausschauende Instandhaltung benötigt Daten über das Verschleißverhalten der verschiedenen Betriebsmittel. Da diese Daten für thermoprozessanlagentypische Betriebsmittel oft nicht bekannt sind, muss die Instandhaltung

diese Daten erst erheben. Dies ist kein geringes Problem. Zum einen, weil Betriebsmittel meist schon vor ihrem Ausfall präventiv ausgetauscht werden und ihre vermeintliche Restlebensdauer nach dem Austausch nur geschätzt werden kann. Zum anderen kann bei einem für Thermoprozessanlagen üblichen jährlichen Wartungsintervall auch keine präzise Aussage darüber gemacht werden, zu welchem Zeitpunkt (im vergangenen Jahr) und mit welcher Progression sich eine festgestellte Schädigung entwickelt hat. Es ist also beides schwierig, sowohl Aussagen über das Verschleißverhalten als auch über die charakteristische Lebensdauer zu treffen. Die einzigen Lebenszeitdaten, die mit hoher Präzision gewonnen werden können, sind die Totalausfälle. Diese sind aber, eine gut organisierte Instandhaltung vorausgesetzt, hauptsächlich Früh- und Zufallsausfälle, die lange Zeit vor der Verschleißphase auftreten. Die in der Literatur beschriebene übliche Methode zur Bestimmung der charakteristischen Lebensdauer und des Formfaktors mithilfe eines Weibullnetzes auf Basis erfasster Ausfalldaten ist daher ungeeignet und muss entsprechend adaptiert werden.

Der Instandhalter muss mit dieser Unschärfe leben und trotzdem versuchen, die Datenbasis zu erweitern. Eine Aussage über das Ausfallverhalten bzw. über die Zuverlässigkeit kann nämlich auch dann gemacht werden, wenn keine „Ausfälle“ auftreten. Voraussetzung ist, dass eine Anzahl von Betriebsmitteln, die aus Risikominimierungsgründen immer relativ gering sein wird, eine längere Einsatzdauer durchlaufen als es im normalen Betrieb geplant ist. Dabei gilt die Regel, dass die Datenqualität weniger „Proben“ mit längerer Testzeit besser ist als die vieler „Proben“ mit relativ kurzen Testzeiten [7]. Aus der so gewonnenen „Überlebensrate“ lassen sich die weiteren Zuverlässigkeitskennwerte berechnen.

Betreiber und Hersteller von Thermoprozessanlagen müssen der Erfassung von Zuverlässigkeitskennwerten größere

³ Relationen in einer Datenbank sind Verbindungen zwischen Daten, die als zweidimensionale Tabelle dargestellt werden. Die Verbindungen werden durch Schlüssel definiert. Zwischen Daten und Tabellen können beliebige Relationen eingetragen werden.

	$f(t) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$ <p>Gleichung 1</p>	<p>Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte f(t)</p> <p>Die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte f(t) gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Betriebsmittel zu einem bestimmten Zeitpunkt ausfällt. Die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte berechnet sich aus dem Anstieg der Ausfallwahrscheinlichkeit F(t) im Zeitintervall Δt.</p>
	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$ <p>Gleichung 2</p> $R(t) = 1 - F(t)$ <p>Gleichung 3</p>	<p>Ausfallwahrscheinlichkeit F(t) und Überlebenswahrscheinlichkeit R(t)</p> <p>Die Ausfallwahrscheinlichkeit F(t) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Betriebsmittel bis zur Zeit t ausfällt. Die Überlebenswahrscheinlichkeit R(t), synonym auch Überlebensrate genannt, ist die Umkehrung der Ausfallwahrscheinlichkeit.</p>
	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$ <p>Gleichung 4</p> $\lambda(t) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$ <p>Gleichung 5</p>	<p>Ausfallrate λ(t)</p> <p>Die meist verwendete Kenngröße für die Zuverlässigkeit von Betriebsmitteln ist die Ausfallrate. Sie gibt an, wie viele Betriebsmittel in einer Zeiteinheit durchschnittlich ausfallen. Sie wird in Ausfall pro Zeiteinheit angegeben. Die Ausfallrate wird oft als Badewannenkurve graphisch dargestellt.</p>

Bild 6: Funktionen und Gleichungen der Weibullverteilung
Fig.6: Functions and equations of the Weibull distribution

Aufmerksamkeit schenken und an der Verbreiterung der Datenbasis arbeiten.

Algorithmische Funktionsmodule

Die in **Bild 6** dargestellten algorithmischen Funktionen ermitteln das Ausfallverhalten eines Betriebsmittels mit Hilfe der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie. Mathematik ergänzt Erfahrung! Das Ausfallverhalten der einzelnen Betriebsmittel wird mithilfe der Weibullverteilung beschrieben.

Für eine Zuverlässigkeitsprognose mit Hilfe der Weibullverteilung sind nur die charakteristische Lebensdauer und der das Ausfallverhalten kennzeichnende Formfaktor notwendig:

Charakteristische Lebensdauer

Die charakteristische Lebensdauer T, synonym auch Maßstabsfaktor oder Eta Faktor genannt, ist per Definition die Zeit, nach der 63,2% der betrachteten Betriebsmittel ausgefallen sind. Die charakteristische Lebensdauer ist also nicht identisch mit der MTBF⁴ (siehe auch Bild 4).

Bei elektromechanischen Betriebsmitteln wird die charakteristische Lebens-

dauer im Wesentlichen von der Anzahl der Schaltzyklen und der Belastung bestimmt. Bei Dauerläufern ist die Einschaltdauer die bestimmende Größe.

Einflussfaktoren setzen die charakteristische Lebensdauer herab. Wartungsmaßnahmen können die Abnutzung verzögern und verlängern dadurch die charakteristische Lebensdauer. Die charakteristische Lebensdauer ist in der im Weiteren vorgeschlagenen Methode keine Konstante, sondern eine von Einflussfaktoren abhängige Variable.

Formfaktor

Trägt man die Ausfallwahrscheinlichkeit in % über die Zeit auf einem Raster mit logarithmischer Lebensdauerskala (dem sogenannten Weibull-Lebensdauernetz) auf und legt durch diese eine Gerade, dann ist Steigung der Ausgleichsgerade der Formparameter b, synonym auch Weibull-Exponent oder Beta Faktor genannt. Der Formparameter bestimmt die Kurvenform der Ausfallrate (siehe auch Bild 4).

Manchmal sind alte Betriebsmittel besser als neue, weil bei neuen Betriebsmitteln zu Beginn Kinderkrankheiten auftreten

und es einige Zeit dauert, bis die unzuverlässigen Betriebsmittel beseitigt wurden. In der Frühausfallphase mit abnehmender Ausfallrate ist $b < 1$.

Häufig haben alte Betriebsmittel die gleiche Ausfallrate wie neue. Die Ausfälle sind dann rein zufällig. Dies schließt schon aus wirtschaftlichen Gründen eine vorbeugende Instandhaltung aus. Mit einem präventiven Betriebsmittelaustausch kann nichts gewonnen werden. In der Phase der Zufallsausfälle mit konstantem Kurvenverlauf, d. h. bei konstanter Ausfallrate, ist $b = 1$.

Oft, so die übliche Annahme, nutzen sich Betriebsmittel durch Gebrauch ab und fallen mit steigender Betriebsdauer zunehmend aus. In der Verschleißphase mit ansteigender Ausfallrate ist der Formfaktor $b > 1$. Je höher der Formfaktor, umso später, aber auch umso steiler der Anstieg der Ausfallrate bezogen auf die charakteristische Lebensdauer. Bei

⁴ Die Literatur ist diesbezüglich etwas uneinheitlich. Per Definition ist die Ausfallrate der Kehrwert des MTBF bei konstantem Verlauf, also nur in der Zufallsausfallphase. Ersatzweise kann der MTBF jedoch als Ausgangswert dienen.

hohen Formfaktoren (z. B. $b > 5$) ist zustandsabhängige Instandhaltung mit regulärem Inspektionsintervall nicht mehr möglich, weil der Zeitraum zwischen der ersten Feststellung von Verschleiß bis zum Ausfall zu kurz ist (jedenfalls kürzer als das übliche Jahreswartungsintervall). Teure Betriebsmittel mit großen Formfaktoren und langer MTTR sind prädestiniert für eine permanente Überwachung mit Condition Monitoring Systemen.

Die Kenntnis des Formfaktors erlaubt also eine geradezu quantifizierbare Entscheidung der jeweiligen Instandhaltungsstrategie.

Verzögerungszeit

Die Verzögerungszeit t_0 , synonym auch Lageparameter oder Gamma Faktor genannt, bestimmt den Zeitpunkt, an dem die Verschleißausfälle beginnen. Bei der zweiparametrischen Weibullverteilung und auch in den meisten Weibull-Datenbanken wird auf die Verzögerungszeit verzichtet.

Berechnungsbeispiel mit der Weibullfunktion in Excel

Die Weibullfunktion in Excel kann die Ausfalldichte und die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Betriebsmittels berechnen. Die nicht leicht zu verstehende Syntax

ist: „fx = WEIBULL (x; Alpha; Beta; Kumuliert)“.

x ist die Betriebszeit t, für die entweder die Dichtefunktion f(t) oder die Wahrscheinlichkeitsfunktion F(t) berechnet werden soll. Alpha ist der Parameter für die charakteristische Lebensdauer T. Beta ist der Wert des Formparameters b. Kumuliert ist der Schalter mit dem zwischen Dichtefunktion (WAHR) und Wahrscheinlichkeitsfunktion (FALSCH) umgeschaltet werden kann.

Die Berechnung soll in **Bild 7** näher erläutert werden. Dargestellt ist eine Excel-Tabelle. Zelle A3 enthält den Formfaktor b mit dem Wert 3,5. Zelle B3 enthält die charakteristische Lebensdauer T mit 48 Monaten. Diese beiden Parameter werden in allen Berechnungen verwendet. Die beiden Zellen sind daher mit dem Dollarzeichen fixiert (A\$3; B\$3).

Die Betriebsdauer t ist in Spalte D, Zelle D3 bis D29 aufgeführt. Untersucht wird der Zeitraum von 3 bis zu 81 Monaten.

Die Ausfalldichte f(t) in Spalte G wird mit der Funktion „=WEIBULL(Dx; A\$3; B\$3; FALSCH)“ berechnet, wobei Dx den jeweiligen Wert der Betriebsdauer, also von 3 bis 81 Monaten, repräsentiert. Der Berechnung liegt Gleichung 1 (in Bild 6) zugrunde.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit F (t) in Spalte H wird mit der Funktion „=WEIBULL(Dx; A\$3; B\$3; WAHR)“ berechnet, wobei Dx wieder den jeweiligen Wert der Betriebsdauer repräsentiert.

Der Berechnung liegt Gleichung 2 (in Bild 6) zugrunde. Bei der charakteristischen Lebensdauer von 48 Monaten liegt die Ausfallwahrscheinlichkeit bei 63 % (Zelle H18).

Die Überlebensrate R(t) in Spalte I lässt sich sehr einfach mit der Gleichung 3 (in Bild 6) bestimmen.

Ebenso einfach lässt sich mit den nun vorhandenen Ergebnissen in Spalte F noch die Ausfallrate nach Gleichung 4 (Bild 6) aus den beiden vorgenannten Ergebnissen der Ausfalldichte f(t) und der Ausfallwahrscheinlichkeit F(t), bzw. der Überlebensrate R(t) berechnen. Alternativ könnte auch Gleichung 5 (Bild 6) verwendet werden.

Zuverlässigkeitsprognose

Die praktische Anwendung soll an einem absichtlich trivialen Beispiel erläutert werden. Die charakteristische Lebensdauer der zur Beheizung eines Härteofens eingesetzten Elektroheizeinsätze sei mit 48 Monaten angenommen. Aus der Erfahrung sei weiterhin die Ausfallcharakteristik mit einem Formfaktor =3,5 (siehe auch Berechnungsbeispiel Bild 7) bekannt. Im Härteofen seien 25 Elektroheizeinsätze eingebaut. Die Betriebsbedingungen dieser Elektroheizeinsätze sind vergleichbar.

Der Instandhalter sucht nun eine Antwort auf die Ausfallwahrscheinlichkeit dieser Elektroheizeinsätze für den Betrachtungszeitraum drei bis vier Jahre (36 bis 48 Monate) nach Inbetriebnahme.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit F(t) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, wie viele Elektroheizeinsätze zu einem bestimmten Zeitpunkt bereits ausgefallen sind. Zum Betrachtungszeitraum 36 Monate nach Inbetriebnahme beträgt die Ausfallwahrscheinlichkeit, wie aus Bild 7, Zelle H14 ersichtlich, 31 %.

Ein Jahr später, d.h. also nach 48 Monaten (Bild 7, Zelle H18), sind statistisch betrachtet 63 % der Elektroheizeinsätze ausgefallen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit zeigt dementsprechend auch einen steilen Anstieg. Die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte (Bild 7, Zelle G14-18) in diesem Zeitraum ist entsprechend hoch.



Bild 7: Berechnungsbeispiel mit der Weibullfunktion in Excel

Fig.7: Example of a calculation with the Weibull function in Excel

Prognose des Ersatzteilbedarfs

Die erste spannende Frage für den Instandhalter ist: „Wie viele Ersatzteile muss ich wann disponieren?“

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ nach 36 Monaten ($T = 75\%$) beträgt 31 %. Bei angenommenen 25 Elektroheizeinsätzen sind also statistisch betrachtet bis dahin 7,5 Elektroheizeinsätze ausgefallen. Zum Ende des Betrachtungszeitraums nach 48 Monaten ($T = 100\%$) sind es dann bereits 63 % von 25 also 15,75 Elektroheizeinsätze. Mit dieser einfachen Rechnung kann der Instandhalter dann den Ersatzteilbedarf disponieren.

Die Auswirkung des das Verschleißverhalten kennzeichnenden Formfaktors wird aus **Bild 8** deutlich. Während in vorgenanntem Beispiel die Ausfallwahrscheinlichkeit bei einem Formfaktor von 3,5 nach 75 % der charakteristischen Lebensdauer noch 31 % betrug, sind es bei einem Formfaktor von 1,0 zum gleichen Zeitpunkt 53 %. Die Größenordnung dieses Unterschieds alleine zeigt schon, dass es sich unter den gegebenen ökonomischen Zwängen auch bei der Ersatzteilbevorratung lohnt, sich mit diesen Methoden zu beschäftigen.

In der betrieblichen Praxis ist die Berechnung des Ersatzteilbedarfs deutlich komplexer, weil sich schon nach kurzer Zeit eine Mischung unterschiedlicher Betriebszeiten und Einflussfaktoren einstellt. Die charakteristische Lebensdauer hat dann unterschiedliche Startzeitpunkte und, durch die Einflussfaktoren bedingt, auch unterschiedliche Werte. Gerade in der Handhabung dieser Komplexität liegt einer der großen Vorteile der datenbankgestützten IPS.

Abnutzungsprognose

Zu Recht wird der Leser nun einwenden, dass bei der vorstehenden Betrachtung bei der die Ausfall- und Überlebensrate mit der Weibullverteilung bestimmt werden, kein praktischer Bezug zum realen Abnutzungszustand der einzelnen Betriebsmittel vorhanden ist und auch nichts darüber gesagt wird, wie die Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Betriebsmittel ist. Es fehlt noch das betriebsmittelspezifische Bindeglied zwischen Ausfallrate und Abnutzung.

Die zweite Frage, die sich der Instandhalter stellt, ist daher: „Wann ist die Abnutzungsgrenze eines konkreten Betriebsmittels erreicht?“

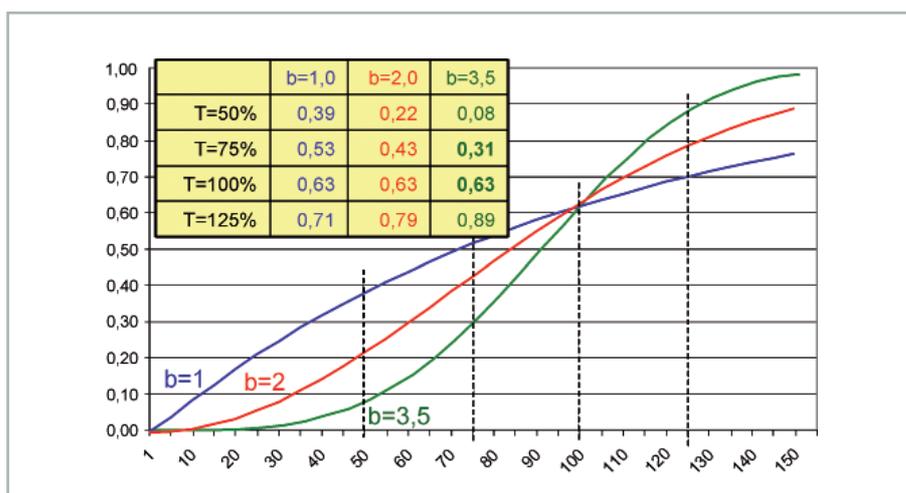


Bild 8: Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Formfaktors

Fig. 8: Failure probability as a function of the shape factors

Zur Lösung der Problematik wird das in **Bild 9** dargestellte Modell für eine mathematisch gestützte Prognose der noch erwartbaren Lebensdauer vorgeschlagen.

Nach Ansicht des Autors korrelieren die Funktionen der Weibullverteilung und der Abnutzungsvorrat in einem zur Lösung der Aufgabenstellung hinreichendem Maße. Der angenommene Abnutzungsvorrat $V(t)$ wird daher in einer von der Überlebensrate abgeleiteten Funktion dargestellt. Der Abnutzungsvorrat wird dadurch ebenfalls quantifizierbar.

Abnutzungsvorrat und charakteristische Lebensdauer werden auf Werte zwischen 0 und 100 % normiert. Die charakteristische Lebensdauer bestimmt den erwarteten Ausfallzeitpunkt t_A . Der optimale Instandhaltungstermin t_{opt} wird bei einer Überlebensrate von 37 % an-

genommen (es könnte auch jede andere Überlebensrate sein) und bestimmt somit die imaginäre Abnutzungsgrenze. Bei einer Ausfallrate mit Formfaktor 3,5, wie beispielhaft in Bild 9 dargestellt, werden dann knapp 90 % der charakteristischen Lebensdauer genutzt.

Bild 10 zeigt den Verlauf der prognostizierten Abnutzung in Abhängigkeit von der Ausfallrate bei verschiedenen Formfaktoren.

Die dargestellten Kurvenverläufe sollten jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass es sich hierbei um ein Konstrukt ohne empirischen Nachweis handelt. Der Nachweis ist schon deswegen schwierig, weil, wie bereits einleitend ausgeführt, Abnutzungsmerkmale mit den Mitteln des Instandhalters oft gar nicht messbar sind.

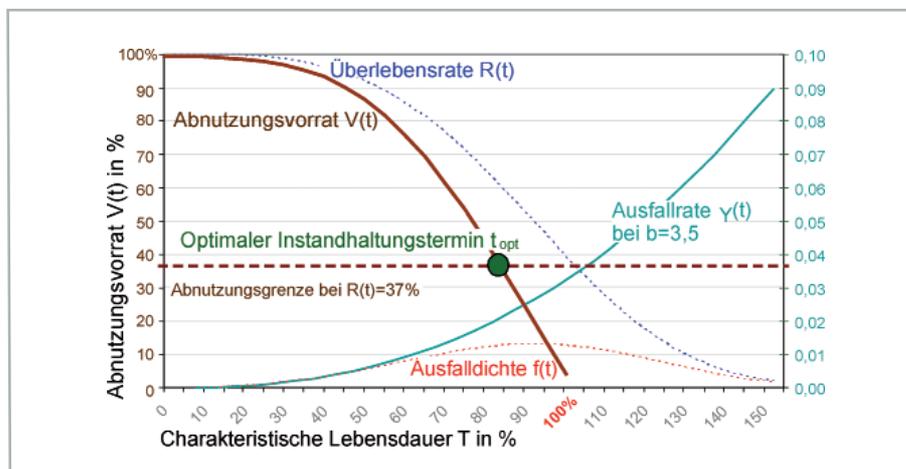


Bild 9: Prognosemodell der Abnutzung

Fig.9: Model of wear out prediction

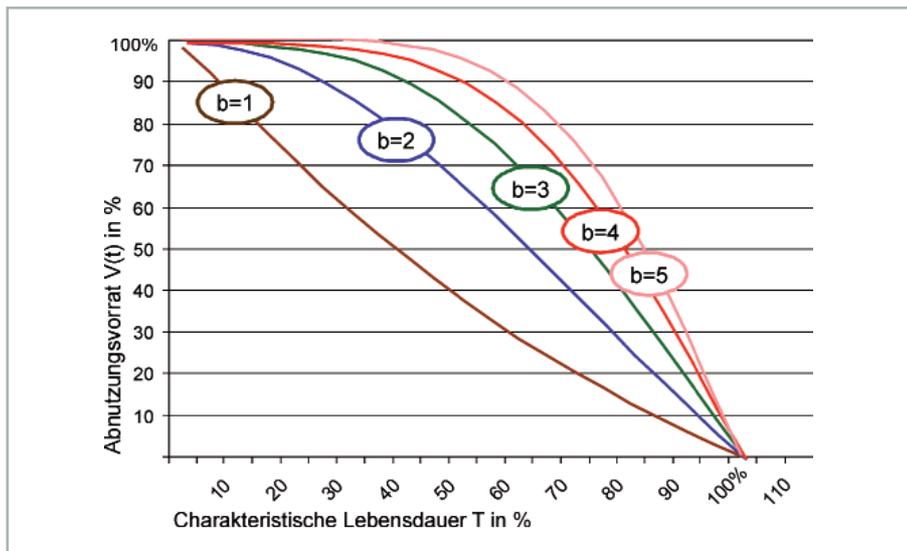


Bild 10: Prognosemodell der Abnutzung mit verschiedenen Formfaktoren

Fig.10: Wear out prediction model with different shape factors

Zustandsmodell der Abnutzung

Der real noch vorhandene Abnutzungsvorrat eines Betriebsmittels muss während der Betriebszeit so oft als wirtschaftlich vertretbar, mindestens jedoch einmal mit dem in Bild 11 dargestellten Zustandsmodell mit Hilfe einer geeigneten Messmethode quantifiziert werden. Es gilt die Faustregel: Je höher die Folgen eines Ausfalls, desto öfter sollte eine Zustandsbeurteilung erfolgen. Aus rein wirtschaftlichen Erwägungen erfolgt die Zustandsbewertung jedoch meist nur im Jahreswartungsintervall.

Prinzipiell sollte sich das Inspektionsintervall nach dem sogenannten P-F In-

tervall richten. Als P-F Intervall wird im RCM(Reliability Centered Maintenance)-Jargon die Zeit zwischen der Entdeckung einer potenziellen Störung (P) und ihrem Eintritt (F) bezeichnet. Das Inspektionsintervall sollte dann kleiner als das halbe P-F Intervall sein. Wenn das halbe P-F Intervall kürzer ist als das wirtschaftliche vertretbare Inspektionsintervall, dann ist die zustandsabhängige Instandhaltungsstrategie für dieses Betriebsmittel nicht geeignet.

Die Zustandsbewertung erfordert ein hohes Maß an Expertenwissen. Dabei ist die Mitarbeit qualifizierter Instandhalter unerlässlich.

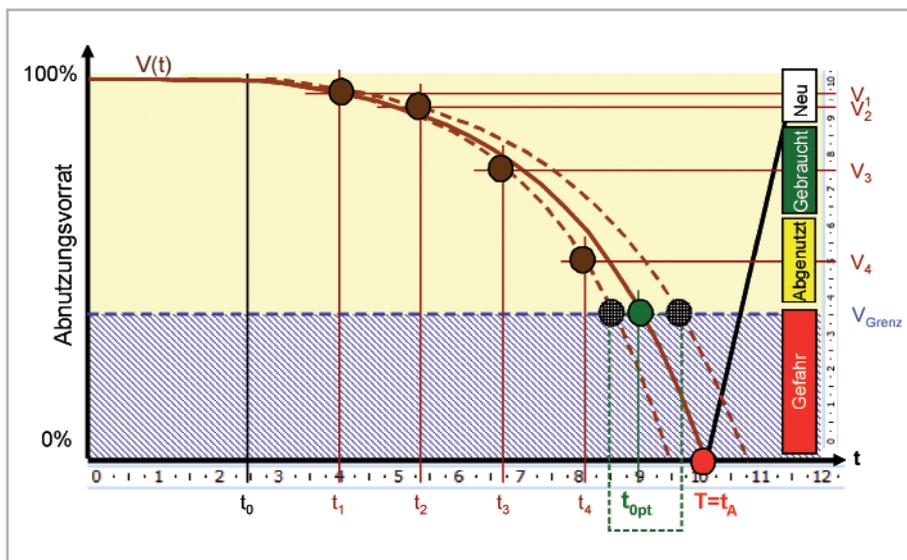


Bild 11: Zustandsmodell der Abnutzung mit Inspektionen

Fig.11: Model of an inspection based lifetime prediction

In der Datenbank sind die Abnutzungsmerkmale zusammen mit den Inspektionsverfahren gespeichert, die der Instandhalter bei der Zustandsbeurteilung anwenden soll. Damit wird eine strukturierte, reproduzierbare Vorgehensweise sichergestellt, ohne dass zustandsrelevante Informationen ungenügend bewertet oder übersehen werden [7].

In der Theorie wäre die quantitative Beurteilung des Abnutzungszustands zwischen zwei Inspektionsintervallen wünschenswert. Beispielsweise hat sich der Abnutzungsvorrat im Zeitintervall von t_2 nach t_3 von $V_2 = \text{ca. } 90\%$ auf $V_3 = \text{ca. } 80\%$ reduziert. Eine quantitative Beurteilung wird aber eher selten möglich sein, weil es bisher nur wenig geeignete Messverfahren, wie beispielsweise die Schwingungsmessung, gibt. Eine qualitative Bewertung ist dann aber immer noch besser als gar keine!

Die charakteristische Lebensdauer wird wie bereits ausgeführt als Variable betrachtet, die bei gegebenem Formfaktor den Endpunkt eines Kurvenverlaufs bildet, der durch den bei der Inspektion festgestellten Abnutzungsvorrat führt. D.h. nach jeder Inspektion (Bild 8, Zeitpunkte $t_1/V_1, t_2/V_2, t_3/V_3$ und t_4/V_4) wird der wahrscheinliche Ausfallzeitpunkt $t_A=T$ neu berechnet. Diese Methode lässt nach Ansicht des Autors deutlich präzisere Prognose erwarten, als die heute eher übliche Bestimmung aus dem Delta aus Zeitfortschritt und Abnutzungsvorrat. Der Beweis steht aber noch aus.

Die kontinuierliche Sammlung von Zustandsdaten, egal ob qualitativ oder quantitativ, wird aber in jedem Fall dazu beitragen, die vorhandenen Wissenslücken zu verkleinern, und dem Instandhalter schon nach kurzer Zeit wertvolle Informationen liefern.

Planung des optimalen Instandhaltungstermins

Während das Prognosemodell der Abnutzung auf Basis der in der Datenbank vorhandenen Kenndaten von Beginn an die Voraussagen berechnet, liefert das Zustandsmodell die erste, auf realen Zustandsdaten basierende, Terminprognose erst nach der ersten Inspektion. Durch Kombination beider Modelle können Fehleinschätzungen reduziert werden, da die Zustandsinspektion die statistische Unsicherheit des Prognosemodells vermindert. Beide Modelle sind insofern auch eine Kombination aus Theorie und

Praxis. Die Planung und Steuerung von Instandhaltungsaufträgen kann nun auf die Terminprognosen der einzelnen Betriebsmittel aufbauen.

Der früheste Instandhaltungsbeginn markiert den Zeitpunkt, an dem aus technischer Sicht frühestens Instandhaltungsmaßnahmen ergriffen werden müssen. Es ist möglich, aber unwirtschaftlich, Instandhaltungsmaßnahmen vor diesem Zeitpunkt durchzuführen.

Der späteste Beginn markiert den Zeitpunkt, an dem Instandhaltungsmaßnahmen ergriffen werden müssen, um die Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels weiterhin zu gewährleisten. Ein Verschieben von Instandhaltungsmaßnahmen über diesen Zeitpunkt hinaus ist mit einem höheren Ausfallrisiko verbunden.

Wie auch immer, der späteste Beginn der Instandhaltung eines Betriebsmittels muss immer vor dem nächsten Wartungstermin der Gesamtanlage liegen, weil eine zustandsorientierte Instandhaltung im Ofen eingebauter Betriebsmittel sonst nicht möglich ist.

Die weitere Planung des Instandhaltungstermins bzw. das Zusammenwirken aller notwendigen Instandhaltungsaktivitäten auf diesen Termin gehört zur Standardfunktionalität von IPS, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

Fazit und Ausblick

Abschließend soll nochmals auf die einleitende Fragestellung „Sind Abnutzung und Ausfallzeitpunkt eines Betriebsmittels berechenbar?“ zurückgekommen werden:

Der zentrale Schwierigkeitsgrad der vorausschauenden zustandsorientierten Instandhaltung liegt in Bestimmung des Abnutzungsvorrats spezifischer Betriebsmittel. Gibt es keine messbare Abnutzung, dann ist für diese Betriebsmittel auch keine zustandsbasierende Ausfallprognose möglich. Dies sollte die Instandhalter aber nicht daran hindern, die vorausschauende zustandsorientierte Instandhaltung für die hierfür geeigneten Betriebsmittel weiter zu entwickeln

und sich ein weiteres Instrument im „Werkzeugkasten des Instandhaltungsmanagements“ zu schaffen. Die Instandhaltung muss sich die Erarbeitung von quantitativen Methoden zum Ziel setzen. Intuition alleine ist keine gute Entscheidungsgrundlage für das Instandhaltungsmanagement teurer Anlagen.

Die in diesem Beitrag als Antwort auf die vorgenannte Fragestellung diskutierte Methode versucht den gemeinsamen Nenner der beiden Modelle Ausfallrate und Abnutzung zu finden und den Abnutzungsvorrat in Abhängigkeit von der Ausfallrate zu quantifizieren.

Die vorgeschlagene Methode ist praxisorientiert und für den Instandhalter handhabbar. Lediglich mit zwei, der Weibull-Analyse entnommenen, nachvollziehbaren Parametern, der charakteristischen Lebensdauer und einem Faktor für das Verschleißverhalten, kann der theoretische Abnutzungsvorrat eines Betriebsmittels über die Zeit beschrieben werden. Zusammen mit den in einer Datenbank gesammelten Zustands-

Anzeige

daten wird somit eine Optimierung der Instandhaltungsstrategie, eine Minimierung der Ausfallrisiken und der Kosten und eine Erhöhung der Einsatzdauer durch bessere Nutzung des Abnutzungsvorrats möglich.

Die reale Bewertung des Abnutzungszustands einzelner Betriebsmittel erfolgt anhand definierter objektiver Inspektionskriterien. Der Abnutzungszustand wird dabei, wenn möglich, durch einen quantitativen Wert wiedergegeben. Alternativ ist auch eine qualitative Bewertung des Abnutzungsvorrats möglich. Der Abnutzungsgrad wird somit als Kennzahl in einer mathematischen Methode verfügbar.

Die sowohl auf Inspektion als auch auf einem Rechenmodell basierende Prognose ermöglicht, sich besser auf Betriebsmittelausfälle einzustellen bzw. diese zu vermeiden. Die Instandhaltung wird dadurch besser planbar. Zudem können zusätzliche Inspektionen eingeleitet werden, sobald die Prognose auf einen zu erwartenden Betriebsmittelausfall hindeutet [4].

Die Betrachtung des abnutzungsabhängigen Ausfallverhaltens einzelner Betriebsmittel ist ein erster Schritt auf dem Weg zu einer Verfügbarkeitsprognose einer gesamten Anlage. Nach Ansicht des Autors ist hierfür die Zeit aber noch nicht reif, da selbst bei der Entwicklung von Methoden zur Quantifizierung des Abnutzungsvorrats und zur Prognose des Ausfallverhaltens von einzelnen Betriebsmitteln noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Literatur

- [1] Steck-Winter, H.: Integratives Instandhaltungsmanagement von Thermoprozessanlagen
- [2] Steck-Winter, H.; Treptow, F.: Sicherer Betrieb von Thermoprozessanlagen mit Schutzgasatmosphären. *Gaswärme International*, 4/2010, Seite 250-262, Vulkan Verlag Essen, 2010
- [3] Steck-Winter, H.; Treptow, F.: Sicherer Betrieb von Thermoprozessanlagen mit Schutzgasatmosphären. *Gaswärme International*, 4/2010, Seite 250-262, Vulkan Verlag Essen, 2010
- [4] Schuh, G.; Winter, C.P.; Lorenz, B.: Integration von Echtzeitsimulation und Zustandsüberwachung zur Bauteilzustandsprognose und Fehleranalyse für die Instandhaltung. RWTH Aachen, 2008
- [5] Kuhn, A.; Schuh, G.; Stahl, B.: Nachhaltige Instandhaltung. Ergebnisbericht der vom BMBF geförderten Untersuchung „Nachhaltige Instandhaltung“ VDMA Verlag, Frankfurt, 2006
- [6] Moubray, J.: *Reliability-centered Maintenance*. Butterworth-Heinemann, Oxford, London, 1991
- [7] Barringer, P.E.: *Predict Failures*. Proceedings of IMEC 2004 International Mechanical Engineering Conference December 5-8, Kuwait, 2004

Dr. Hartmut Steck-Winter, MBA
Aichelin Service GmbH,
Ludwigsburg

Tel.: 07141/643 71 04
hartmut.steck-winter@
aichelin.com

