

Instandhaltungskennzahlen für Thermoprozessanlagen

von **Hartmut Steck-Winter**

Die sichere und möglichst kosteneffiziente Nutzung der Maschinen und Anlagen steht im Mittelpunkt jeder professionellen Instandhaltungsstrategie. Dies ist nur in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess möglich, an dem Hersteller und Betreiber gleichermaßen beteiligt sind und bei dem der Ausgangszustand und der Verbesserungsprozess mit Kennzahlen messbar gemacht werden. Bekannte und bewährte technische Kennzahlen der Instandhaltung sind insbesondere die übergeordneten OEE und Verfügbarkeitsberechnungen nach VDI 3423. Zuverlässigkeitskenngrößen auf Bauteilebene werden bisher eher selten als Kennzahlen verwendet.

Maintenance metrics for thermal processing systems

The safe and most cost-efficient use of machinery and equipment is at the heart of every professional maintenance strategy. This is possible only in a continuous improvement process in which manufacturers and customers are involved alike and where the initial state and the improvement process will be made visible with performance indicators. Known and proven maintenance technical performance indicators are in particular the overarching OEE and also availability calculations according to VDI 3423. However, reliability data on component level are still rarely used as performance indicators.

Kennzahlen sind unbestritten wichtige Steuerungsinstrumente, nicht nur in der Betriebswirtschaft. Kennzahlen eröffnen auch in der Instandhaltung von Thermoprozessanlagen erhebliche Chancen und Verbesserungspotenziale.

Aus unserer täglichen Praxis wissen wir, dass der Wirkungsgrad von Thermoprozessanlagen verbessert werden kann, wenn wir erst einmal angefangen haben zu messen. Es gilt: Was man nicht messen kann, kann man auch nicht verbessern, aber auch umgekehrt! Betriebs- und Maschinendatenerfassung und technische Kennzahlen können uns dabei helfen.

Kennzahlen ermöglichen der Instandhaltung, Schwachstellen und Effizienzverluste aufzudecken und die den Erfolg der Änderungsmaßnahmen sowohl intern als auch im externen Vergleich zu messen.

STRUKTURMODELL (KENNZAHLENHIERARCHIE)

Die in diesem Beitrag beschriebenen Kennzahlen sind in ein Anlagenstrukturmodell (**Bild 1**) eingebettet. Das

Strukturmodell reicht über mehrere Ebenen vom Gesamtsystem über Teilanlagen und Baugruppen bis hin zu einzelnen Bauteilen.

Auf der Anlagenebene werden die OEE-Kennzahlen und auf der Teilanlagenebene die adaptierten Verfügbarkeitskennzahlen und die Ausfallzeiten erfasst.

Auf der Baugruppen- und Bauteilebene des Strukturmodells sind Informationen zur Beschreibung der Zuverlässigkeit der wichtigen Bauteile (Ersatzteile) hinterlegt.

Dieser Beitrag ist auf technische Kennzahlen, deren Herleitung, deren Begründung und besonders auf deren Anwendung für Thermoprozessanlagen beschränkt. Auf Kosten- und Personalkennzahlen wird nicht eingegangen.

INSTANDHALTUNG VON THERMO-PROZESSANLAGEN

Bei der Instandhaltung von Thermoprozessanlagen gilt es einige Besonderheiten zu beachten, die in der Regel zu einem risikobasierenden Instandhaltungsstrategiemix mit der Zielgröße geringste Gesamtkosten führen. D.h.

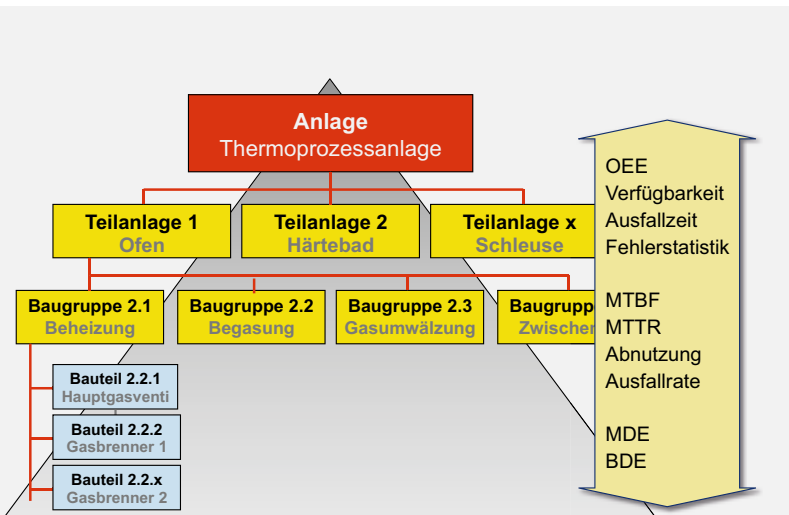


Bild 1: Strukturmodell der Instandhaltungskennzahlen

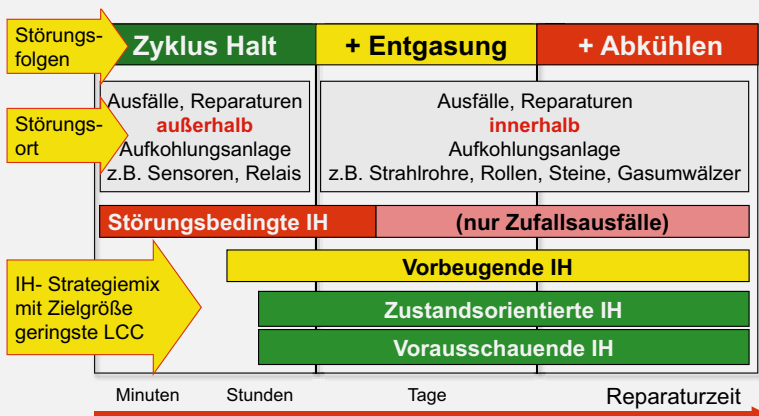


Bild 2: Risikobasierender Instandhaltungsstrategiemix für Thermo-
prozessanlagen



Bild 3: Bestandteile der Gesamtanlageneffektivität (OEE)

eine präventive Instandhaltung wird dann durchgeführt, wenn die Gesamtkosten geringer als bei einer nicht planbaren störungsbedingten Instandhaltung sind.

Wie in **Bild 2** dargestellt wird die Reparaturzeitdauer einer Störung durch den Fehlerort bestimmt. Im Gegensatz zu Maschinen kann bei Thermoprocessanlagen nach einer Störung innerhalb der Ofenanlage zu der reinen Instandsetzungszeitdauer auch noch die Zeitdauer zum Abkühlen, Wiederaufheizen und zur Konditionierung der Ofenatmosphäre hinzu kommen. Diese „Wartezeit“ kann ein Vielfaches der reinen Instandsetzungszeitdauer betragen.

Damit wird auch die Instandhaltungsstrategie im Wesentlichen durch den Störungsart bestimmt. Vorbeugend und Zustandsorientiert muss immer dann instand gehalten werden, wenn eine Störung ein längeres Produktionsausfallsrisiko birgt. Dies betrifft also vorrangig Bauteile im Ofen, beispielsweise Strahlrohre oder Gasumwälzer.

Die störungsbedingte Instandhaltung ist trotzdem unvermeidbar, sollte jedoch als Instandhaltungsstrategie auf schnell austauschbare Bauteile außerhalb der Ofenanlage, beispielsweise Sensoren oder Relais, und auf die unvermeidbaren Zufallsausfälle begrenzt werden.

Eine weitere Eigenheit sollte man sich bei beim Ausfall von Bauteilen in Thermoprocessanlagen auch noch immer bewusst machen. Anders als bei einer Maschine läuft der Thermoprocess trotz Ausfall weiter. D.h. neben den Leistungsverlusten können auch noch erhebliche Qualitätsverluste auftreten. Diese Besonderheiten müssen natürlich in den vorgeschlagenen Kennzahlen ihren Niederschlag finden.

DIE GESAMTANLAGENEFFEKTIVITÄT

Die Gesamtanlageneffektivität (OEE) ist eine Kennzahl, mit dem Verluste einer Maschine oder Anlage aufgedeckt werden können [1]. Die OEE (**Tabelle 1**) steht an der Spitze des vorangegangenen Strukturmodells (Bild 1). Die ideale, absolut effektive Anlage sollte ununterbrochen mit maximalem Durchsatz produzieren, ohne auch nur ein fehlerhaftes Produkt herzustellen. Dieses Ideal kann in der Praxis nicht erreicht werden, weil, wie in **Bild 3** dargestellt, Verfügbarkeitsverluste, Leistungsverluste und Qualitätsverluste auftreten.

Die OEE-Berechnung entsprechend Gleichung (1) in Tabelle 1 liefert zunächst keine Erkenntnisse über die Ursachen auftretender Verluste. Sie zeigt aber die Richtung für mögliche Verbesserungsmaßnahmen auf. Die Schlüsselstrategie zur Verbesserung der OEE liegt in der Verringerung der Verluste. Die drei Verlustquellen sollen im Weiteren näher betrachtet werden:

Verfügbarkeitsgrad

Der Verfügbarkeitsgrad ergibt sich nach Gleichung (2) in Tabelle 1 dargestellt aus dem Quotienten aus Nutzungs-

zeit und Planbelegungszeit. Unter Verfügbarkeitsverlust ist daher der Zeitraum zu verstehen, in dem die Anlage für die Produktion hätte genutzt werden können, indem jedoch keine Produkte hergestellt wurden.

Störungen sind ein Grund für den Verlust an Produktionszeit. Die Ursache der Störung kann sowohl eine technische als auch eine organisatorische Störung sein.

Produktionszeit geht auch verloren, wenn die Anlage hätte laufen können, jedoch nicht genutzt wird. Die Anlage „wartet“ beispielsweise während einer Temperaturumstellung oder während der Wartung.

Wartezeit kann auch durch Probleme bei der Beschickung oder bei der Entladung verketteter Anlagen auftreten. Dieser Verlust entsteht dann jedoch ursächlich an anderer Stelle. Diese sogenannten Linienbeschränkungen sollte man in jedem Fall im Auge behalten, da diese zu erheblichen Wartezeiten führen kann.

In der Regel wird die Verfügbarkeit nach VDI 3432 [2] berechnet. Dies wird im nachfolgenden Kapitel Verfügbarkeit und Verlustquellen noch weiter ausgeführt.

Leistungsgrad

Der Leistungsgrad berechnet sich nach Gleichung (3) in Tabelle 1 aus dem Verhältnis von realer und geplanter Mengenleistung bei ungestörtem Betrieb. Ein Leistungsverlust bedeutet, dass die Anlage nicht mit maximaler Mengenleistung läuft.

Kurzstillstände werden meist durch kleine Störungen verursacht, z. B. verdrehte Chargenträger, die sich auf Transportstrecken festsetzen. Wiederholte kurze Stillstände können die Durchsatzleistung einer Anlage drastisch einschränken.

Leistungsverluste durch verlängerte Taktabfolge oder geringere Beladung werden häufig ignoriert oder unterschätzt. Möglicherweise läuft die Wärmebehandlung mit gedrosselter Leistung reibungsloser. So werden Kurzstillstände, Grenzwertverletzungen oder sogar Störungen vermieden und die Qualität bleibt auf dem gewünschten Niveau. Nicht selten entscheidet sich der Betreiber intuitiv für den Verlust „reduzierte Leistung“, um andere Verluste zu vermeiden.

Qualitätsgrad

Der Qualitätsgrad ist nach Gleichung (4) in Tabelle 1 ein Maß für die Menge der produzierten Güter entsprechend den spezifizierten Qualitätsanforderungen. Qualitätsverluste entstehen, wenn die Anlage nicht einwandfreie Güter produziert. Man unterscheidet mit Ausschuss und Nacharbeit zwei Arten von Qualitätsverlusten.

Im Vergleich zu Maschinen liegt die Besonderheit vieler thermochemischer Wärmebehandlungsprozesse darin, dass beispielsweise beim Einsatzhärten der Wärmebehandlungsprozess bei einer Störung nicht einfach unterbrochen werden kann, sondern fortschreitet. So

Tabelle 1: OEE-Kennzahlen

(1)	$OEE = \text{Verfügbarkeit} \times \text{Effektivität} \times \text{Qualitätsrate}$
(2)	$\text{Verfügbarkeitsgrad} = \frac{\text{Nutzungszeit}}{\text{Planbelegungszeit}}$
(3)	$\text{Leistungsgrad} = \frac{\text{Ausbringung}}{\text{Nutzungszeit}}$
(4)	$\text{Qualitätsgrad} = \frac{\text{Gutproduktion}}{\text{Ausbringung}}$

kann eine Störung im Transportsystem einer Durchlaufofenanlage nach relativ kurzer Zeit zur „Überkohlung“ führen.

D.h. gerade bei Thermoprozessanlagen verursachen Störungen im Ablauf häufig Ausschuss und Nacharbeit. In der Regel kann der tatsächliche Qualitätsverlust aber erst nach der Wärmebehandlung festgestellt und entschieden werden, ob und wenn ja welche Art der Nacharbeit erforderlich ist oder ob gar Ausschuss produziert wurde.

Störungen im Ablauf können, moderne Steuerungssysteme vorausgesetzt, in der Regel automatisch erfasst und die betroffenen Chargen elektronisch markiert werden. Nach dem Durchlauf durch die Thermoprozessanlage können (müssen) diese Chargen automatisch ausgeschleust werden. Solchermaßen ausgerüstete Anlagen können dann zumindest die Qualitätsverluste reduzieren.

VERFÜGBARKEIT UND VERLUSTQUELLEN

Für die Instandhaltung hat die Aufrechterhaltung einer hohen Verfügbarkeit traditionell eine herausgehobene Stellung. Die Verfügbarkeit kann sowohl vergangenheitsbezogen als auch zukunftsbezogen betrachtet werden. Die vergangenheitsbezogene Betrachtung ist beispielsweise für den Nachweis der vereinbarten Anforderungen

Tabelle 2: Verfügbarkeitskennzahlen nach VDI 3432

(5)	$T_B = T_N + T_O + T_T + T_W$
(6)	$V_T = \left(1 - \frac{T_T}{T_B}\right) \times 100\%$
(7)	$V_{T(\text{Thermo})} = \left(1 - \frac{T_T - T_K}{T_B}\right) \times 100\%$
wobei	
T_B : Belegungszeit	
T_K : Konditionierzeit der Ofenanlage	
T_N : Nutzungszeit	
T_O : Organisatorische Ausfallzeit	
T_T : Technische Ausfallzeit	
T_W : Wartungszeit	
V_T : Technische Verfügbarkeit	
$V_{T(\text{Thermo})}$: VT einer Thermoprozessanlage	

zwischen Hersteller und Betreiber relevant. Im Gegensatz dazu ist die Prognose die Basis der Kapazitätsplanung und der Instandhaltungsplanung.

Die VDI-Richtlinie 3432 [2] dient zur Ermittlung der tatsächlichen Ausfallzeiten (**Tabelle 2**). In der Regel (so auch in diesem Beitrag) wird die vergangenheitsbezogene Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen nach diesem Regelwerk ermittelt. Im Gegensatz dazu werden in der VDI-Richtlinie 4004 [3] erwartete (zukunftsorientierte) Verfügbarkeitsgrößen (**Tabelle 3**) definiert.

Wie in **Bild 4** dargestellt, wird zur Berechnung der vergangenheitsbezogenen Verfügbarkeiten, z.B. die Gewährleistungsfrist zum Nachweis vertraglicher Vereinbarungen, zunächst der Betrachtungszeitraum festgelegt. Die Belegungszeit TB (Gleichung (5) in Tabelle 2) bildet die Bezugsgröße für alle Verfügbarkeitskennzahlen.

Technische Verfügbarkeit

In der Regel wird die technische Verfügbarkeit, wie nach Gleichung (6) in Tabelle 2 dargestellt, als Summe der technischen Ausfallzeiten im Verhältnis zur Belegungszeit in Prozent dargestellt. Die technischen Ausfallzeiten werden durch Ausfälle und Störungen, also ungeplante Instandsetzungen, verursacht. Während der technischen Ausfallzeit produziert die Anlage nicht. Störungen sind also nur dann der technischen Ausfallzeit zuzurechnen, wenn die Störung zum Produktionsausfall führt.

Die technische Verfügbarkeit zeigt unter anderem auch, wie qualitativ hochwertig und servicefreundlich eine Anlage konstruiert wurde. Die technische Verfügbarkeit wird häufig als Gewährleistungsparameter bei der Beschaffung von neuen Anlagen vereinbart. Nach Ablauf der Gewährleistung wird die technische Verfügbarkeit zunehmend zu einem Leistungsparameter der Instandhaltung.

Bei technischen Störungen fallen häufig Wartezeiten an [4]. Man kann davon ausgehen, dass Wartezeiten manchmal ein Vielfaches von der reinen IH-Zeit betragen

und deshalb einen großen Einfluss auf die technische Verfügbarkeit haben. In der Wartezeit steckt ein hohes Verbesserungspotenzial, das ausschließlich von der Instandhaltung beeinflusst werden kann, denn nur sie kann die Wartezeit verringern, beispielsweise durch kurze Reaktionszeiten und insbesondere der Bevorratung der wichtigen Ersatzteile. Ist die Anlage mit einem Fehlerdiagnose- oder einem Teleservicesystem ausgerüstet, kann sich die Dauer der Störung verkürzen, weil die Fehlersuche beschleunigt werden kann [5].

Wenn der Störungsort innerhalb einer Ofenanlage liegt, dann kommen zu der eigentlichen Reparaturzeit die noch wesentlich längeren Abkühl-, Wiederaufheiz- und Konditionierzeiten (TT4) hinzu. Es wird empfohlen, diese Zeiten getrennt zu erfassen, weil anderenfalls keine faire Vergleichbarkeit mit Maschinen und Anlagen möglich ist, die nicht über diese Besonderheit verfügen und die Einhaltung von Verfügbarkeitszusagen dann alleine davon abhängt, ob eine solche Störung aufgetreten ist oder nicht. Bei der Berechnung der thermoprozessanlagen-spezifischen technischen Verfügbarkeit nach Gleichung (7) in Tabelle 2 wird dementsprechend die technische Ausfallzeit um die Konditionierzeit (Abkühlen, Aufheizen, Konditionieren) vermindert.

Prognose der technischen Verfügbarkeit

Der Erwartungswert der technischen Verfügbarkeit A(E) stützt sich auf die mittlere ausfallfreie Zeit (MTBF) und die mittlere Reparaturzeit (MTTR) zur Prognose der Wahrscheinlichkeit, die Anlage in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen. Eine hohe MTBF bedeutet eine hohe Zuverlässigkeit bzw. eine niedrige Ausfallrate. Die technische Ausfallzeit entspricht in dieser Perspektive der mittleren Reparaturzeit (MTTR) plus der Zeit für die vorbeugende Instandhaltung (MRDP). Dieser Zusammenhang wird aus Gleichung (8) in Tabelle 3 deutlich.

MTTR und MRDP werden umso kürzer ausfallen, je instandhaltungsfreundlicher die Anlage ist. Aus Gleichung (8) in Tabelle 3 wird dann auch deutlich, dass die Instandhaltung drei Stellhebel nutzen kann, um die Verfügbarkeit zu optimieren: Steigerung der Zuverlässigkeit (MTBF), Verkürzung der Instandhaltungszeit (MTTR) sowie die Zeit für die vorbeugende Instandhaltung (MRDP). Dabei liegt es auf der Hand, dass sich MTBF und MRDP gegenseitig beeinflussen und somit ein optimaler Kompromiss gefunden werden muss.

Operationelle (praktische) Verfügbarkeit

Die operationelle Verfügbarkeit nach VDI 3423 ist identisch mit der Nutzungszeit TN, also die Zeit, in der die Anlage tatsächlich betrieben werden kann. Sie ergibt sich aus der theoretischen Verfügbarkeit abzüglich der organisatorischen Ausfallzeiten TO.

Tabelle 3: Verfügbarkeitskennzahlen nach VDI 4004

(8)	$A_{(e)} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MRDP}$
(9)	$A_{(p)} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MRDA + MRDL}$
wobei	
A _(E) : Technische Verfügbarkeit (Erwartungswert)	
A _(P) : Praktische Verfügbarkeit (Erwartungswert)	
MTBF: Mean Time Between Failure	
MRDA: Mean Related Downtime for Administration	
MRDL: Mean Related Downtime for Logistic	
MRDP: Mean Related Downtime for Preventive Maintenance	
MTTR: Mean Time to Repair	

Die organisatorischen Ausfallzeiten werden durch Mängel in der Organisation, Administration und Logistik (beispielsweise Produktionsumstellung) während des Betriebs verursacht. Sie liegen im Verantwortungsbereich des Anlagenbetreibers.

Für Thermoprosessanlagen mit relativ langen Umstellzeiten ist es sinnvoll, der Empfehlung in der VDI 3423 zu folgen und einzelne organisatorische Ausfallzeiten, insbesondere für Auftrags- oder Teilewechsel mit Sortentrennungen und Sollwertänderungen (Rezeptwechsel), getrennt zu erfassen. Bei einem Teilewechsel, selbst wenn sich die Sollwerte nicht ändern, muss beispielsweise bei Durchlaufanlagen für Schüttgut, z.B. Band- oder Schneckenofenanlagen, eine ausreichende Trennlücke gefahren werden, weil unter allen Umständen Teilevermischungen vermieden werden müssen [5].

Umstellungen bringen in Durchlauf-Thermoprosessanlagen typischerweise einen sehr hohen Produktionsausfall mit sich, weil beispielsweise für eine Temperaturumstellung die jeweiligen Heizzonen zunächst leer gefahren werden müssen und erst dann die Sollwerte umgestellt werden können. Erst nachdem der Istwert wieder innerhalb der zulässigen Grenzen des neuen Sollwertes liegt, kann die Anlage wieder beschickt werden. Thermoprosessanlagen sind daher häufig mit entsprechenden Programmen ausgerüstet, die solche Umstellungen automatisch optimal steuern.

ZUVERLÄSSIGKEIT VON BAUTEILEN

Nachdem der Blick bisher auf das Ganze, also auf Kennzahlen zur Beurteilung einer Thermoprosessanlage an sich, gerichtet war, soll nun eine Untersuchung möglicher Zuverlässigkeitskennzahlen ihrer Bestandteile, d.h. der Baugruppen bzw. Bauteile erfolgen.

Bei der Betrachtung der Zuverlässigkeit von Bauteilen genügt es in der Regel, sich auf die Bauteile bzw. Ersatzteile zu beschränken, deren Ausfälle mit gravierenden Folgen verbunden sind. Aus der Sicht der Instandhaltung gibt es im Wesentlichen drei Perspektiven der Zuverlässigkeit von Bauteilen, die mit Kennzahlen beschrieben werden könnten.

Bei der ersten Sichtweise verringert sich die Zuverlässigkeit eines spezifischen (einzelnen) Bauteils durch Gebrauch, weil der in dem Bauteil innewohnende Abnutzungsvorrat solange aufgezehrt wird, bis das Bauteil ausfällt. Die dieser Sichtweise zu Grunde liegende Theorie ist im Modell des Abnutzungsvorrats beschrieben. In der Praxis begründet sich die zustandsorientierte Instandhaltung aus dieser Perspektive.

Bei der zweiten Sichtweise bedingt der Gebrauch eine bauteiltypische Verschlechterung der Zuverlässigkeit. Die zu Grunde liegende Theorie ist das Modell der Ausfallrate. Diese Sichtweise kommt in der Zuverlässigkeitsstatistik

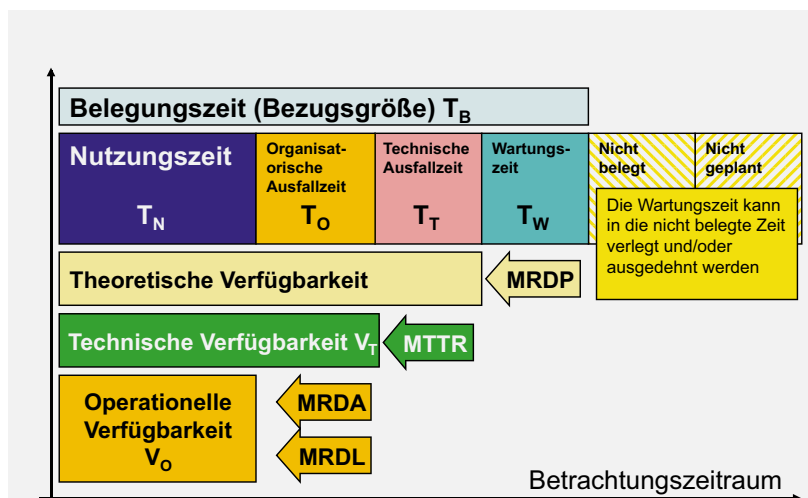


Bild 4: Verfügbarkeitsarten und Verfügbarkeitsverluste

und insbesondere bei der vorausschauenden Instandhaltung zum Tragen.

Dazu kommt noch als Dritte die Schwachstellenperspektive mit dem Fokus auf die Störungshäufigkeit eines spezifischen Bauteils. Obwohl die meisten Instandhalter aus gutem Grund zuerst diese Perspektive einnehmen, hat sie mit Abnutzung nichts zu tun. Eine zu große Störungshäufigkeit ist immer ein Zeichen für Schwachstellen. Diese sollten immer konsequent beseitigt werden, weil sie andernfalls alle weiteren Optimierungen im Keim ersticken.

Abnutzungsvorrat

Richten wir also zuerst den Blick auf ein spezifisches Bauteil. Die Zuverlässigkeit ist dann eng verknüpft mit dem in diesem Bauteil vorhandenen Abnutzungsvorrat, der durch die Nutzung solange verringert wird, bis der Abnutzungsvorrat aufgebraucht ist und es zum Ausfall kommt [6]. Die Messung des bereits aufgezehrten Abnutzungsvorrats und die sich dann anschließende Zustandsbeurteilung erfolgt bei Inspektionen.

Das Modell des Abnutzungsvorrats ist die theoretische Grundlage sowohl der zustandsabhängigen Instandhaltung als auch von Condition Monitoring Systemen. Es setzt voraus, dass sich mit fortschreitender Abnutzung bewertbare Symptome (beispielsweise Schwingungen) einstellen.

Ist die Reparaturzeit (MTTR) 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.

Ausfallrate

Die zweite Perspektive mit dem Modell der Ausfallrate richtet den Blick auf eine Anzahl baugleicher Teile und zieht daraus wieder Rückschlüsse auf ein spezifisches Bauteil. Die Ausfallrate zeigt, wie sich das Ausfallverhalten mehrerer gleicher Bauteile unter vergleichbaren Einsatzbedingungen über die Zeit verhält. Man spricht daher auch von Lebensdauerverteilungen, bzw. der Badewannenkurve.

Die Ausfallrate ist sozusagen die Antwort auf die häufig gestellte Frage der Instandhalter „Wie lange hält diese Art Bauteile üblicherweise durch?“. Ausfallraten sind also zweifellos wichtige Kennzahlen der Zuverlässigkeit. Sie haben die Dimension 1/Zeiteinheit. Oft wird auch der Begriff FIT (Failures in Time) verwendet.

Das Schöne an der Ausfallrate ist ihre mathematische Berechenbarkeit und ihre Eignung für Zuverlässigkeitskennzahlen. Eine häufig verwendete Berechnungsmethode ist die Weibullverteilung. Der wichtigste Vorteil der Weibullverteilung gegenüber anderen Lebensdauerverteilungen ist, dass selbst kleine Stichproben mit wenigen Ausfällen immer noch ordentliche Aussagen liefern.

Die zweiparametrische Weibullverteilung berechnet die Verteilung der erwarteten Ausfälle während der Betriebsdauer (t) mit Hilfe von zwei Parametern, der charakteristischen Lebensdauer und einem Formfaktor (**Tabelle 4**).

Die charakteristische Lebensdauer (T) ist die Nutzungsdauer, nach der knapp 2/3 (exakt 63,2 %) einer Stichprobe unter vergleichbaren Bedingungen ausgefallen sind. Die charakteristische Lebensdauer skaliert also die Verteilung auf der Zeitachse.

Tabelle 4: Zuverlässigkeitskennzahlen

(10)	$f(t) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$
(11)	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$
(12)	$R(t) = 1 - F(t)$
(13)	$\lambda(t) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$
(14)	$MTBF = \frac{1}{\lambda}$ wenn λ konstant

wobei
f(t): Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte
F(t): Ausfallwahrscheinlichkeit
R(t): Überlebenswahrscheinlichkeit
b: Formfaktor
T: Charakteristische Lebensdauer
 λ : Ausfallrate
MTBF: Mean Time Between Failure

Der Formfaktor (b) bestimmt die Kurvenform der Ausfallrate. Ist der Formfaktor kleiner als 1, dann fällt die Ausfallrate ab. Frühausfälle lassen sich so darstellen und berechnen. Ist der Formfaktor 1, dann ist die Ausfallrate konstant. Der Formfaktor 1 gilt daher für Zufallsausfälle. Formfaktoren größer 1 bis ca. 4 mit ansteigenden Ausfallraten kennzeichnen Verschleiß- und Ermüdungsausfälle.

Je höher der Formfaktor, umso später, aber auch umso steiler der Anstieg der Ausfallrate. Bei 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). Die Kenntnis des Formfaktors erlaubt also eine geradezu quantifizierbare Entscheidung der jeweiligen Instandhaltungsstrategie.

Sowohl der Formfaktor als auch die charakteristische Lebensdauer sind daher auch für sich alleine als Kennzahlen interessant.

Die erwartete Zuverlässigkeit eines Bauteils kann mit Hilfe der Weibullfunktion in Excel recht einfach berechnet werden, wenn neben der charakteristischen Lebensdauer und dem Formfaktor auch die Betriebszeiten der entsprechenden Bauteile (siehe MDE/BDE) bekannt sind [6].

MTBF / MTTF

Recht häufig wird die erwartete Zuverlässigkeit von Bauteilen mit der MTBF als Kennzahl definiert. Sie gilt für Bauteile, die instand gesetzt werden können. Für Bauteile, die nicht repariert werden können, ist die korrekte Bezeichnung MTTR (Mean Time to Failure). Ansonsten können beide Begriffe synonym verwendet werden.

Die MTBF stellt einen statistischen Mittelwert für die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Ausfällen dar. Die MTBF bezieht sich immer auf die Phase mit konstanter Ausfallrate (d.h. ohne Früh- und Spätausfälle) und ist nur dort gültig. Streng genommen ist also der MTBF für mechanische Bauteile mit Verschleißverhalten nicht geeignet. Bekannte MTBF-Werte können jedoch ersatzweise anstelle der charakteristischen Lebensdauer verwendet werden.

Der Kehrwert der MTBF ist die Ausfallrate (vgl. Gleichung (14) in Tabelle 4). Je höher die MTBF, desto seltener fällt die entsprechende Komponente aus bzw. desto zuverlässiger ist sie.

Störungsstatistik

Die dritte Perspektive mit dem Blick auf die Störungshäufigkeit liefert weitere wichtige Kennzahlen. Störungsstatistiken enthalten Informationen über Art, Dauer, Häufigkeit und Ursache von Störungen. Störungsstatistiken sind ein gutes Werkzeug zur Erkennung von Schwachstellen. So können der Umfang und der Zeitpunkt von Instand-

haltungsmaßnahmen beispielsweise auch an der Störungshäufigkeit oder an der Störungsdauer orientiert werden [5].

Die Ursachen chronischer Störungen können mit Hilfe der Statistik lokalisiert und in Folge nachhaltig behoben werden. Es muss vermieden werden, Schwachstellen instand zu halten. Wartungs- und Reparaturzeiten werden dadurch minimiert, was dann auch zu einer besseren Verfügbarkeit führt.

Datenerfassung

Gegenüber manuellen Aufschreibungen spart eine teilautomatisierte Betriebs- und Maschinendatenerfassung Zeit und ist zudem genauer und weniger manipulationsanfällig. Auswertungen und Reports können in Sekundenschnelle erstellt werden.

Betriebsdatenerfassung

Mit Hilfe der BDE werden z.B. Maschinenzustände (Leerfahren, Rezeptwechsel, etc.), organisatorische Stillstandsgründe (z.B. Auftrags-, Personal- und Materialmangel), technische Störungen und Wartungsmaßnahmen erfasst.

Bild 5 zeigt die mögliche Erfassung der Ausfallzeiten einer Durchlauf-Thermoprozessanlage in Anlehnung an VDI 3423, jedoch mit Berücksichtigung der thermoprozessanlagen-spezifischen Besonderheiten. Es liegt auf der Hand, dass die Erfassung der Betriebs- und Ausfallzeiten nur teilweise automatisch erfolgen kann und dass einige Ausfallsursachen manuell angewählt werden müssen. Von den angewählten Ausfallsursachen kann immer nur eine aktiv sein.

Maschinendatenerfassung

Maschinendatenerfassung (MDE) hat die Aufgabe, maschinennahe Statusinformationen zu erfassen und ohne Zeitverlust bestimmten Analysen oder Bauteilen zuzuordnen. MDE liefert die Daten für die Betriebsdauer in Zuverlässigkeitsprognosen.

Einfachste Art der MDE sind fortlaufende Betriebsstunden- und Betriebszyklenzähler. Weitere typische Maschinendaten sind Störungsmeldungen, Betriebsarten und Prozessdaten.

MDE auf Bauteilebene ist die Ausgangsvoraussetzung für die präventive oder zustandsorientierte Instandhaltung [6]. Ohne MDE ist eine präventive Instandhaltung oder eine am Gebrauch orientierte Zuverlässigkeitsprognose schlicht nicht möglich, weil dann die Bezugsbasis fehlt.

Ofenbetriebsjournal

Bei Thermoprozessanlagen mit modernen Steuerungen und Prozessleitsystemen werden die Betriebs- und Maschinendaten in einem Journal protokolliert, das über eine Schnittstelle auch von übergeordneten Systemen ausgewertet werden kann.

Typischerweise werden alle Statusveränderungen, beispielsweise Stillstandsgründe oder Betriebsartwechsel, mit einem Echtzeit-, Betriebszeit- und Taktanzahlstempel protokolliert. Aus der Zählerdifferenz können so auch noch nachträglich Instandhaltungsdaten und Kennzahlen gewonnen werden. Das Journal kann auch zusätzliche Hinweise auf Prüf- und Wartungsintervalle beim Erreichen bestimmter Taktanzahlen oder Betriebszeiten beinhalten und die Verbindung zu der Instandhaltungsplanung herstellen.

Praxisprobleme der Datenerfassung

Das größte Problem in der Praxis ist die Erfassung und Dokumentation des Ausfallverhaltens durch Instandhaltungsexperten. Zur Beseitigung dieser Informationslücke müssen Hersteller und Betreiber enger zusammenarbeiten, denn beide, Hersteller und Betreiber, beschäftigen sich mit der Zuverlässigkeit von Bauteilen.

Hersteller verfügen über Berechnungsergebnisse aus der Konstruktion, können Gewährleistungsfälle mehrerer Anlagen bei unterschiedlichen Betreibern auswerten und den Ersatzteilbedarf analysieren. Die Auswertung des Ersatzteilbedarfs als Kenngröße für das Ausfallverhalten ist jedoch mit großen Fehlern behaftet, weil Lagerhaltung, Drittanbieter, Substitutionen, etc. die Information verfälschen.

Während der Nutzung der Anlage, insbesondere nach Ablauf der Gewährleistungsfrist, nehmen der Informationsstand des Herstellers und seine Möglichkeit, Lebens-

	Ausfallzeit (keine Produktion) wegen:	VDI 3423	Erfassung
T ₀₁	Mangelnde Bedienungsfähigkeit	1.1.1	Manuell
T _{02A}	Linienbeschränkung Einlauf (Aufgabe)		Auto
T _{02A}	Linienbeschränkung Auslauf (Abgabe)		Auto
T _{04R}	Auftrags- und Rezeptwechsel		Auto
T ₀₅	Warten z. B. auf Ersatzteile, Instandhaltung	1.1.1	Manuell
T ₀₆	Bereitstellungsbetrieb (Wochenende)		Auto
T ₇₁	Störungsbedingter Ausfall (Einlauf gesperrt)	1.1.2	Auto
T ₇₂	Störungsbedingtes Ausschleusen		Auto
T ₇₃	Störungsbeseitigung, Probelauf nach Störung	1.1.2	Manuell
T ₇₄	Abkühlen, Wiederaufheizen, Formieren		Manuell
T _{W1}	Geplante Instandhaltung	1.1.3	Manuell

Bild 5: Erfassung der Ausfallzeiten

dauerdaten zu erfassen, ständig ab. Nur Ausfälle, die bekannt werden, können noch ausgewertet werden.

Im Gegensatz zum Hersteller hat der Betreiber in der frühen Einsatzphase zwar nur geringe Möglichkeiten diese Daten zu erhalten, lernt aber mit zunehmender Betriebsdauer dazu.

Instandhalter beim Betreiber verfügen über reale Informationen über Einsatzbedingungen, Lebensdauern, Instandhaltungsmaßnahmen, Instandhaltungsaufwand, Ersatzteilbedarf und Diagnosen des jeweiligen Schädigungszustands. Die Qualität dieser Daten ist in hohem Maße abhängig von der Disziplin des Instandhaltungspersonals, die diese Daten bei jeder sich bietenden Gelegenheit dokumentieren müssen. Nicht dokumentiert ist wie nicht gemacht!

FAZIT

Kennzahlen sind dazu prädestiniert, Zusammenhänge transparent zu machen, unabhängig davon, ob dabei um rückwirkende Analyse oder zukunftsgerichtete Prognose geht.

Die übergeordnete OEE und auch die Verfügbarkeitskennzahlen sind für Thermoprossessanlagen gut geeignet, wenn es darum geht, sowohl den Wirkungsgrad als auch Verlustquellen aufzuzeigen. Beide Kennzahlfamilien können auf Knopfdruck auch automatisch berechnet und visualisiert werden, wenn die Anlagensteuerung die Betriebsdaten und Ausfallzeiten bereit stellt.

Kennzahlen und Vorgehensweisen für Zuverlässigkeitsprognosen auf Baugruppenebene stehen jedoch noch ganz am Anfang. Entsprechende Zuverlässigkeitsdaten für eine vorausschauende Instandhaltung von Thermoprossessanlagen sind derzeit nur unvollständig vorhanden.

Betreiber und Instandhalter müssen bei der Erfassung von Zuverlässigkeitsdaten, beispielsweise bei einer Wartung oder nach einem Bauteilausfall, auch neue Wege der Zusammenarbeit finden, damit die dabei erworbenen Kenntnisse nicht verloren gehen und noch vorhandenen Informationslücken rasch geschlossen werden können. Nicht dokumentiert ist wie nicht gemacht! Grundsätzlich muss auch auf Bauteilebene die automatische Erzeugung von Kennzahlen, beispielsweise MTBF, Ausfallrate und MTTR, auf der Basis gesammelter Daten angestrebt werden.

Die große Population älterer Anlagen, die nicht mehr auf dem aktuellen Stand der Technik sind, ist davon nicht ausgeschlossen [7]. Auch diese Anlagen können modernisiert und mit Online-Kennzahlensystemen fit für den weiteren Einsatz gemacht werden.

Es sind aber weniger die Kennzahlen als die gemeinsam getroffenen Maßnahmen, die den Unterschied machen. Ob bzw. wie sich dieser Paradigmenwechsel in der Denkungsweise bemerkbar macht, wird sich aber

dann nach einiger Zeit wieder an den Kennzahlen zeigen. Dazu sind sie ja da!

LITERATUR

- [1] Augsten, H.; Haidlauf, M.: Der Einfluss der Instandhaltung auf die Anlageneffizienz. Präsentationsfolien zum Aichelin Instandhaltungsforum, Ludwigsburg 2010 und 2011
- [2] VDI 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen: Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung, Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [3] May, C., Koch, A.: Overall Equipment Effectiveness, Zeitschrift der Unternehmensberatung (ZUb), Heft 6/2008, Seite 245-250, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin 2008
- [3] VDI 4004 Blatt 1: Zuverlässigkeitskenngrößen; Übersicht; VDI 4004 Blatt 3: Kenngrößen der Instandhaltbarkeit; VDI 4004 Blatt 3: Zuverlässigkeitskenngrößen; Verfügbarkeitskenngrößen. Beuth Verlag, Berlin, 1986
- [4] Steck-Winter, H.: Integratives Instandhaltungsmanagement von Thermoprossessanlagen. Gaswärme International, Jahrgang 7-8-2008, Seite 519-526, Vulkan-Verlag Essen, 2008
- [5] Steck-Winter, H.; Unger, G.: Thermoprossessanlagen für Automobilzulieferer. Gaswärme International, Jahrgang 4-2009, Seite 232-239, Vulkan-Verlag Essen, 2009
- [6] Steck-Winter, H.: Vorausschauende Instandhaltung von Thermoprossessanlagen. Gaswärme International, 3/2011, Seite 141-152, Vulkan-Verlag Essen, 2011
- [7] Steck-Winter, H.: Modernisierung der Steuerung von Thermoprossessanlagen. Gaswärme International, Jahrgang 4-2008, Seite 232-236, Vulkan-Verlag Essen, 2008

AUTOR



Dr. Hartmut Steck-Winter, MBA
 Aichelin Service GmbH
 Ludwigsburg
 Tel.: 07141/ 6437-104
hartmut.steck-winter@aichelin.com

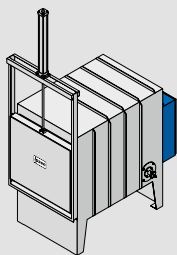
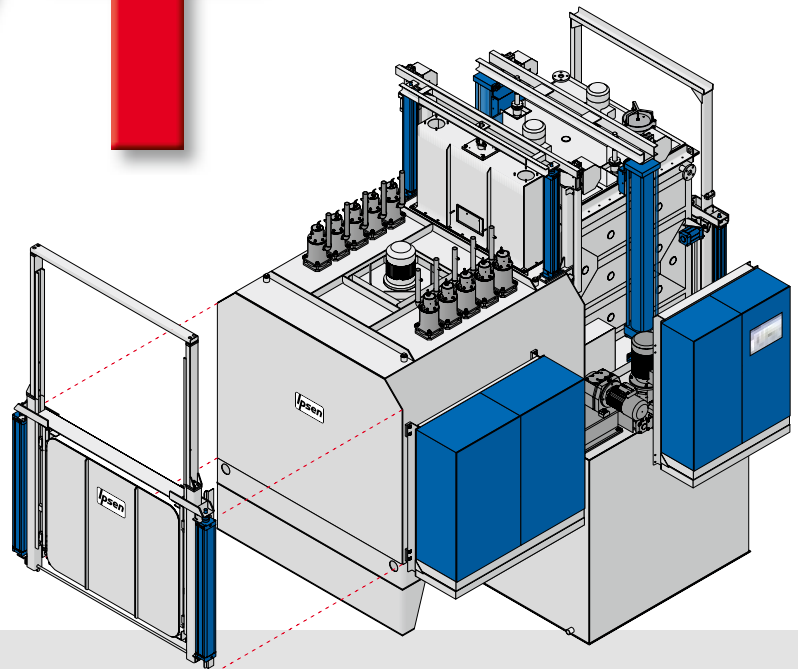
Ipsen **RT/T** – die neue Intelligenz
in der Atmosphärentechnik.



RT/T

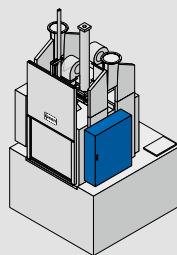
**Die intelligente Lösung
vom Weltmarktführer.**

Ipsen setzt mit seinen optimierten Atmosphärenanlagen einen neuen Qualitätsstandard: mit smart aufeinander abgestimmten Komponenten, intelligenten Schnittstellen und Steuerungen, einer einfachen Anlagenplanung und einem neuen Verfahren zur Steigerung der Energieeffizienz.



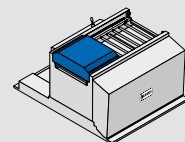
Leicht gebaut: der Anlassofen.

Die Schweißkonstruktion des Ipsen Anlassofens ist leicht und gasdicht. Die Vorteile: geringe Speicherwärme, rasches Anpassen an wechselnde Behandlungstemperaturen, exzellente Temperaturgleichmäßigkeit. Dank der wartungsarmen Konstruktion sowie gut zugänglicher und austauschbarer Verschleißteile.



Der raumsparende Wascher.

Das Ipsen Zweistufen-Entölungssystem ist äußerst kompakt, sorgt für eine optimale Waschmittelausnutzung und bietet einen hohen Durchsatz. Die Reinigung wird durch Auf- und Abbewegung des Korbes verstärkt – besonders vorteilhaft bei dicht gepackten Chargen.



Der zuverlässige Lader.

Der zuverlässige Ipsen Lader sorgt dafür, dass Chargen beim Transport nicht verkanteten. Dadurch schont er die Anlagen wie die Körbe – aber natürlich auch die Körperkräfte der Bediener.