

---

## 2.1 Ziele der Instandhaltung

DIN-Norm 31.051 strukturiert die Instandhaltung in vier Grundmaßnahmen:

1. Wartung,
2. Inspektion,
3. Instandsetzung und
4. Verbesserung.

Mit diesen Maßnahmen sollen die nachfolgend aufgelisteten Primärziele entweder untereinander gleichwertig oder aber in einer spezifischen Priorisierung untereinander erreicht werden:

- Die Anlage soll *sicher* sein, d. h. von ihr darf keine Gefahr ausgehen.
- Die Anlage soll *verfügbar* sein, d. h. sie muss den Betrieb aufnehmen können.
- Die Anlage soll *zuverlässig* sein, d. h. sie soll den Betrieb störungsfrei durchführen können.
- Der *Wert* der Anlage soll *erhalten* werden, d. h. sie soll eine hohe Restlebenserwartung haben.

Zunächst sind die Anforderungen an die Sicherheit zu erfüllen. Diese subsumieren sich unter den HSSE-Themen (Health, Safety, Security, Environment) und sind überwiegend durch gesetzliche Regelungen, in denen Art, Umfang und Häufigkeit wiederkehrender Überprüfungen des Zustands der jeweiligen Anlage und/oder ihrer Sicherheitseinrichtungen festgelegt werden, vorgegeben. Da der Gesetzgeber nicht in der Lage sein kann, für alle erdenklichen Anlagen Prüfvorschriften zu erlassen, mit denen jedwede Gefahr im Vorfeld eines sich manifestierenden Ereignisses erkannt und gebannt werden kann, obliegt

es dem Betreiber der Anlage, selber dafür Sorge zu tragen, dass von seiner Anlage keine Gefahr ausgeht.

Auch er wird dies nicht zu 100 % ausschließen können. Es gibt keine natürliche oder technische Tätigkeit, die zu 100 % gefahrlos ist.

Aufgrund der stets verbleibenden Restrisiken muss der Betreiber einer Anlage dafür Sorge tragen, dass er im Fall eines eingetretenen sicherheitsrelevanten Ereignisses nachweisen kann, nicht fahrlässig gehandelt zu haben. Dazu gehört, dass er beweisen kann, dass sein Instandhaltungsprogramm über die gesetzlichen Forderungen hinaus auch den Stand der Technik, der durch die Literatur, durch Veröffentlichungen auf Tagungen, Verbandsempfehlungen, Empfehlungen von Versicherern etc. definiert wird, berücksichtigt.

Die Ziele der Verfügbarkeit, der Zuverlässigkeit und der Werterhaltung sind innere Ziele des Betreibers. Er ist frei, diese mehr oder weniger vollständig zu erfüllen und kann diese freie Entscheidung nach Kriterien der Gesamtwirtschaftlichkeit treffen. Erfüllt er die Ziele nicht, so haftet er zwar gegenüber seinem Gesellschafter; ein öffentlich rechtliches Interesse gibt es – mit Ausnahme einer möglichen Systemrelevanz einer Anlage für die Funktion der Infrastruktur der öffentlichen Daseinsvorsorge – aber nicht.

Beispiele für systemrelevante Anlagen sind Gasturbinen an besonderen Einspeisestellen der Stromtransportnetze oder Einrichtungen zur Sicherheit des Flugverkehrs etc.

Trifft keine besondere Anforderung bezüglich der Systemrelevanz zu, so ist der Betreiber im Rahmen der die gesetzlichen Vorgaben überschreitenden Maßnahmen nur sich selber und seinem Gesellschafter gegenüber verantwortlich und wird anstreben (müssen), die gesamtwirtschaftlich beste Lösung zu erreichen. Die Gesamtwirtschaftlichkeit kann jedoch nur über eine ganzheitliche Betrachtung beurteilt werden, die deutlich mehr umfasst als ausschließlich die Lebenszykluskosten: Es gehören die Konsequenzen eines Lieferausfalls der Produkte an die Kunden sowie die Wechselwirkungen aus Pönalezahlungen, Kundenverlusten und Imageschaden mit dazu.

---

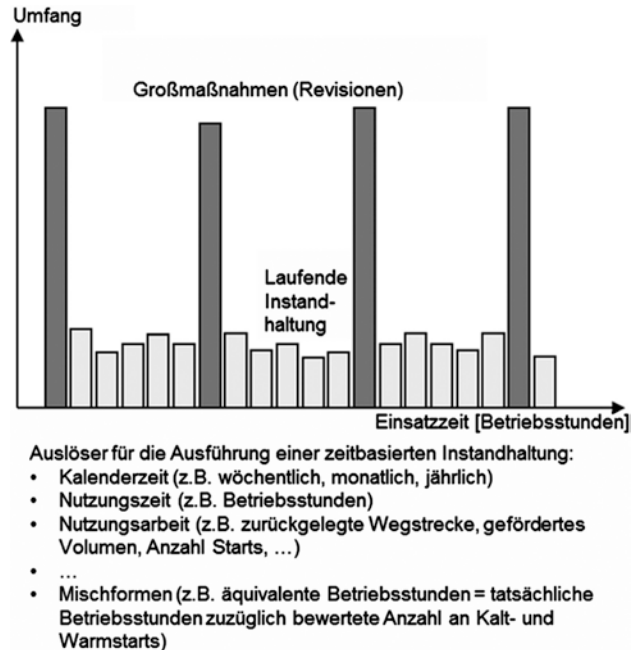
## **2.2 Instandhaltungsarten**

### **2.2.1 Zeitbasierte Instandhaltung**

Bei der zeitbasierten Instandhaltung werden alle Instandhaltungsmaßnahmen nach Ablauf einer bestimmten Anzahl von Betriebsstunden oder nach kalendarischer Terminvorgabe durchgeführt. Gesetzliche Prüfungen in Form von Funktionstests sind ein typisches Beispiel dafür. Allerdings gehören auch rein freiwillige Maßnahmen, wie z. B. Turbinenrevisionen zu den Maßnahmen einer zeitbasierten Instandhaltung. Das Wort „zeitbasiert“ bezieht sich meist auf die Einsatzzeit, die im Fall eines alleinigen Volllastbetriebs identisch mit der Betriebszeit ist. Besondere Betriebszustände wie z. B. Anlagenstarts werden dabei in äquivalente Betriebsstunden umgerechnet und der reinen Betriebszeit hinzuaddiert, vgl. [Abb. 2.1](#).

In vielen Fällen wird statt der Betriebszeit eine geleistete Arbeit oder eine erzeugte Produktionsmenge herangezogen. Bei Fahrzeugen ist es üblich, die geleistete Fahrstrecke, bei Fördereinrichtungen das geförderte Volumen oder die geförderte Fracht und bei

**Abb. 2.1** Zeitbasierte Instandhaltung



Luftverkehrsfahrzeugen die Strecke zuzüglich der bewerteten Starts und Landungen zu verwenden.

Bei der zeitbasierten Instandhaltung geht man davon aus, dass der Abnutzungsvorrat eines dem Verschleiß unterliegenden Bauteils der Anlage nach einer bestimmten Beanspruchung durch den andauernden Betrieb verbraucht ist, und dass ein Austausch vor Erreichen dieses Zustands angestrebt wird. Das geplante Zeitintervall der zeitbasierten Instandhaltung wird auf Basis von Herstellerempfehlungen und eigenen Erfahrungswerten so gewählt, dass der Abnutzungsvorrat zum Zeitpunkt des Austauschs mit größter Wahrscheinlichkeit nicht vollständig aufgezehrt ist. Ziel ist es, vor vollständigem Erreichen der Abnutzung einen Austausch vorzunehmen und somit einem Schaden vorzubeugen. Die zeitbasierte Instandhaltung ist dann erfolgreich, wenn dies stets gelingt. Ihr Nachteil: Um zu vermeiden, dass der Abnutzungsvorrat überschritten wird und eine Störung oder ein Schaden eintritt, muss der Austausch vor dem vollständigen Verbrauch des Abnutzungsvorrats erfolgen. Damit verwirft die zeitbasierte Instandhaltung Bauteile, die noch über Restnutzungspotenzial verfügen. Sie ist damit eine sehr aufwändige Instandhaltungsart.

#### **Zeitbasierte Instandhaltung – Beispiel: Motorölwechsel beim PkW**

Der Austausch des Motoröls für PkWs erfolgt auf Basis von Herstellerempfehlungen, die unter anderem die zeitlichen Alterung (z. B. spätestens alle 12 bis 18 Monate) und die Fahrleistung (z. B. maximal 20.000 bis 30.000 km) berücksichtigen. Die zeitbasierten Vorgaben liegen auf der sicheren Seite und berücksichtigen Umwelteinflüsse

zwischen der Arktis und der Sahara und Fahrstile zwischen dem von Michael Schumacher und dem von Mutter Theresa. Sie werden in 85 % aller Fälle viel zu früh liegen.

## 2.2.2 Zustandsbasierte Instandhaltung

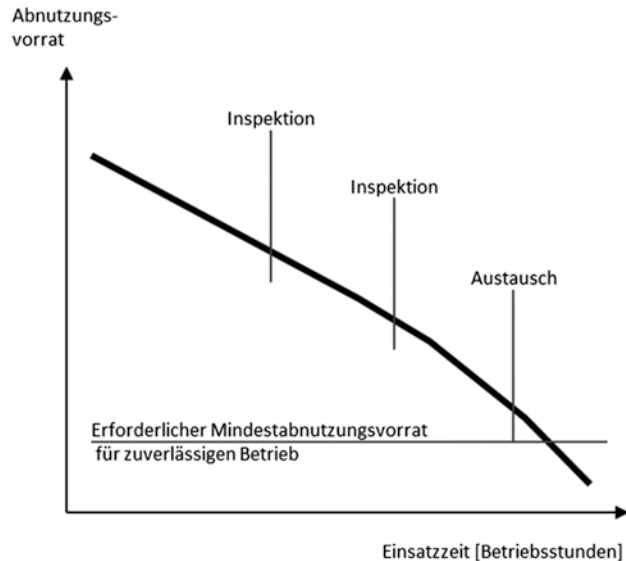
Bei der zustandsbasierten Instandhaltung werden nach bestimmten Intervallen – vgl. zeitbasiert – Diagnosen durchgeführt, die zur Ermittlung des Handlungsbedarfs führen. Anschließend wird je nach festgestelltem Zustand gehandelt.

Wesentliches Element der zustandsbasierten Instandhaltung ist die Inspektion. Der Aufwand hierfür kann zwischen dem einfachen Hinschauen und der vollständigen Demontage liegen. Für die tägliche Inspektion des Spannseils einer Fördereinrichtung genügt beispielsweise der visuelle Vergleich des Seildurchmessers bei laufendem Betrieb mit einer Schablone, während für die alle 15 Jahre erfolgende Revision einer Dampfturbine ein Öffnen von Außen- und Innengehäuse erforderlich wird, wodurch die Dichtflächen beschädigt werden und daher stets Nachbearbeitungen erforderlich werden. Weiterhin erfordert diese Maßnahme einen Produktionsstillstand von 6 bis 12 Wochen.

Ziel der zustandsbasierten Instandhaltung ist es, Bauteile erst dann auszutauschen, wenn deren Verschleißvorrat nachgewiesenermaßen so weit aufgebraucht ist, dass sie eine weitere Reisezeit bis zum nächsten Inspektionszeitpunkt nicht unbeschadet überdauern, vgl. [Abb. 2.2](#). Dies erfordert Prognosesicherheit

- bezüglich des Zeitpunkts für den nächsten Inspektionszugang zum Bauteil,
- bezüglich der beabsichtigten Fahrweise der Anlage bis zu diesem Zeitpunkt und
- bezüglich des Bauteilverhaltens während der erwarteten Beanspruchung durch die prognostizierte Fahrweise während der ebenfalls prognostizierten weiteren Nutzungsperiode.

Es heißt, dass Prognosen insbesondere dann schwierig sein sollen, wenn sie die Zukunft betreffen. Ungeachtet der Tatsache, dass diese Aussage je nach Zitatstelle Mark Twain, Karl Valentin, Niels Bohr oder auch Winston Churchill zugeschrieben wird, ist sie richtig. Das bedeutet, dass man nur bei sehr kurzen Inspektionsintervallen und nur bei erst kürzlich eingewechselten Ersatzteilen sicher sein kann, dass die nächstfolgende Reisezeit ohne Störung überstanden wird. Mit zunehmendem Alter der Verschleißflächen und/oder zunehmender Betriebsdauer zwischen zwei Inspektionsintervallen sinkt die Genauigkeit der Prognose. Das bedeutet, dass gegen Ende der Nutzung oder bei langen Zeiträumen zwischen den einzelnen Revisionen Sicherheitszuschläge erforderlich werden, die zum Ergebnis haben, dass der Abnutzungsvorrat der Bauteile nicht vollständig verbraucht wird. Auch hier „schlummern“ Kostenpotenziale.

**Abb. 2.2** Zustandsbasierte Instandhaltung

### Zustandsbasierte Instandhaltung – Beispiel: Bremsbelagwechsel beim PkW

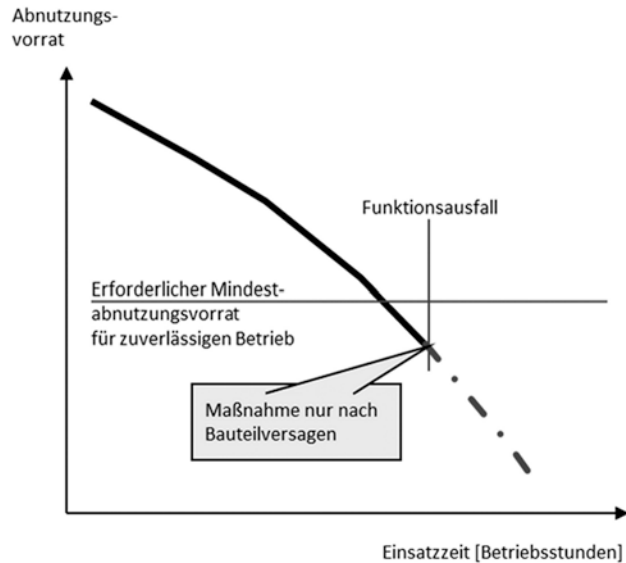
Je nach Fahrstrecke (Stadt oder Autobahn) und Fahrweise (aggressiv oder vorausschauend) beträgt die Standzeit von PkW-Bremsbelägen heute zwischen 25.000 und 75.000 km Fahrstrecke. Ohne Monitoringeinrichtung, die die Bremsbeläge bei der Fahrt kontinuierlich überwacht, würde man davon ausgehen, alle ca. 20.000 km eine Inspektion der Bremsbeläge durchführen zu lassen. Das Intervall der gesetzlichen Prüfung, der Hauptuntersuchung, liegt für Fahrzeuge mit einem Alter von mehr als 3 Jahren bei 24 Monaten. Hierbei wird jedoch nicht die Belagstärke selber kontrolliert, sondern eine Funktionsprüfung der Bremsen durchgeführt. Bei einer jährlichen Fahrleistung von 30.000 km oder mehr würde die Hauptuntersuchung in nahezu allen Fällen zu spät greifen. Somit unter setzt die Belagskontrolle einerseits die Einhaltung der Sicherheitsziele (Bremskraft) und andererseits die Schutzziele des Fahrzeuges selbst (Verschleiß der Bremsscheibe).

Belagkontrolle und Hauptuntersuchung sind Prüfelemente zur Feststellung des Zustands von Teilen der Bremsanlage. Die auf einen entsprechenden Befund hin eingeleiteten Instandsetzungsmaßnahmen runden im Bedarfsfall den definitionsgemäßen Umfang der zustandsbasierten Instandhaltung ab.

### 2.2.3 Ausfallbasierte Instandhaltung

Bei der ausfallbasierten Instandhaltung wird nur gehandelt, wenn sich die Anlage, das System, die Komponente bzw. das Bauteil selber durch ein Störereignis meldet, vgl. [Abb. 2.3](#). Bei der ausfallbasierten Instandhaltung nimmt man Störungen und Schäden bewusst in Kauf. Sie

**Abb. 2.3** Ausfallbasierte Instandhaltung



steht damit im Gegensatz zu den vorbeugenden zeitbasierten und zustandsbasierten Instandhaltungsarten, die sich zum Ziel gesetzt haben, keine Störung zuzulassen. Da dies jedoch bei technischen Systemen unabhängig vom eingesetzten wirtschaftlichen Aufwand nicht vollständig gelingen kann, ergänzt die ereignisbasierte Instandhaltung zusätzlich zu ihrer möglicherweise beabsichtigten alleinigen Vorgehensweise bei bestimmten Anlagen, Systemen, Komponenten bzw. Bauteilen beide zuvor behandelten Instandhaltungsarten in Form einer Entstörung. Ohne sie geht es nicht – ob gewollt oder ungewollt.

Die ausfallbasierte Instandhaltung hat zunächst einmal den Vorteil, dass der Abnutzungs-vorrat des nach Funktionsausfall und/oder Verlust von Substanz ausgewechselten Bauteils tatsächlich vollständig verbraucht ist. Das schont Inspektionsaufwand sowie Ersatzteilressourcen inklusive deren Montageaufwand. Andererseits bestimmt bei der ausfallbasierten Instandhaltung die Anlage und nicht der Mensch, wann der Zeitpunkt für die Initiierung einer erforderlichen Instandhaltungsmaßnahme eintritt.

In vielen Fällen kann die Instandsetzungsmaßnahme zeitverzögert zum Ereignis der Störung, bei dem bekannt wird, dass der Abnutzungs-vorrat verbraucht ist, durchgeführt werden. Das bedeutet, dass ein geeigneter Betriebszustand abgewartet werden kann. Zum Beispiel lassen sich Anlagen trotz Funktionsausfall von Baugruppen häufig noch bis zum ohnehin bereits geplanten nächsten Stillstand weiter betreiben. Andererseits besteht auch die Wahrscheinlichkeit, dass Baugruppen versagen, die für den sicheren Betrieb unabdingbar sind. Wenn dies zu einem ungünstigen Zeitpunkt eintritt, kann der durch die störbedingte zusätzliche ungeplante Betriebsunterbrechung eintretende Deckungsbeitragsverlust deutlich höher ausfallen, als die Ersparnis aus der vollständigen Ausbeute des Abnutzungs-vorrats. Die ausfallbasierte Instandhaltung kann aus diesem Grund nicht ohne korrektive Maßnahmen eingesetzt werden.

**Ereignisbasierte Instandhaltung – Beispiel: Leuchtmittelwechsel beim PkW**

Es gibt bei herkömmlichen Fahrzeugscheinwerfern – ob Halogen oder Xenon – so gut wie keine Möglichkeit, mit für den Fahrer akzeptablen Mitteln den Abnutzungsstatus der Leuchtmittel messtechnisch festzustellen und eine Restlebenszeit zu prognostizieren. Ein derartiger Aufwand wäre auch nicht gerechtfertigt. Heutige Fahrzeuge verfügen über ein Monitoringsystem, das dem Fahrer einen Ausfall unmittelbar meldet. Die Leuchtmittel halten deutlich länger als 3.000 Betriebsstunden, was bei Tagfahrlicht mindestens 180.000 km Wegstrecke entspricht. Es ist also äußerst unwahrscheinlich, dass ein „Xenonbirnchen“ während der üblichen Nutzungszeit ausfällt. Andererseits ist der Wechsel mit großem Aufwand verbunden, oft muss der ganze Scheinwerfer getauscht werden.

Ein prophylaktischer Austausch (zeitbasierte Instandhaltung) ist – verglichen mit dem Ausfallrisiko – deutlich zu teuer und eine Zustandsprüfung in Form einer Funktionsprüfung liefert keine Prognose, sondern nur einen Augenblickswert, der durch das bestehende Monitoring ohnehin verfügbar ist.

Hieraus folgt, dass die ausfallbasierte Instandhaltung die geeignete Instandhaltungsart ist: In Konsequenz muss bei Funktionsausfall die Werkstatt angefahren werden – laut Gesetzgeber sogar unmittelbar.

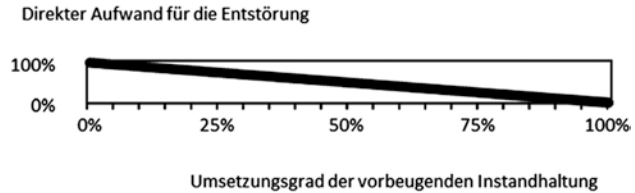
Bis Mitte der 1980er Jahre war das anders. Die Lebensdauer der damals verwendeten Glühbirnen entsprach 15 % der Lebensdauer der heutigen Leuchtmittel; allerdings konnte die Glühbirne durch den Fahrer – zumindest aber durch jeden Tankwart – innerhalb kürzester Zeit ausgewechselt werden. Eine entsprechende Ersatzteilkhaltung im Handschuhfach des Fahrzeugs hat damals im Rahmen einer ausfallbasierten Vorgehensweise ausgereicht. Da es – bis auf die Frequenzanhebung bei der Blinkerbetätigung – keine Hinweise zum Funktionsausfall von Leuchtmitteln gab, war ein Funktionstest vor Antritt einer jeden Fahrt vorgeschrieben. Damals wie heute war dessen Durchführung mehr als unüblich.

Nur zur Ergänzung des Beispiels erfolgt hier noch der Hinweis auf die seit 2000 vermehrt verwendeten LED-Leuchtmittel. Auch hier geht man ausfallbasiert vor. Allerdings nutzt man den konstruktiven Ansatz, dass das Leuchtmittel aus einer Vielzahl einzelner LEDs besteht und somit eine Redundanz vorliegt. Anders als bei Glühbirnen oder Halogen/ Xenon Lampen entsteht der Ausfall in kleineren Schritten, so dass die langsame Degradation ohne Inspektionsaufwand von außen sichtbar wird. Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass die Lebensdauer von LED Leuchtmitteln im Fahrzeug die tatsächliche Nutzungsdauer des Fahrzeugs meist weit übertrifft.

**2.2.4 Kombination**

Jede der drei zuvor geschilderten Instandhaltungsarten findet seine Berechtigung. Keine ist allerdings universell geeignet. Zu groß sind die jeweiligen Nachteile. Erst durch die Kombination der verschiedenen Instandhaltungsarten ist es möglich, eine optimierte Vorgehensweise zu gestalten.

**Abb. 2.4** Definition des Umsetzungsgrads der vorbeugenden Instandhaltung



Die drei vorgestellten Instandhaltungsarten unterscheiden sich untereinander durch den Umsetzungsgrad der vorbeugenden Instandhaltung. Bei der ausfallbasierten Instandhaltung ist er exakt „Null“, bei der zeitbasierten Instandhaltung liegt er nahe 100 % und bei der zustandsbasierten liegt er bei hohen Werten in der Nachbarschaft der zeitbasierten Instandhaltung.

Als mathematische Definition wollen wir die direkten Kosten der Entstörung – ohne Berücksichtigung der Beseitigung von Schadenvergrößerungen und ohne Berücksichtigung der Kosten durch die Betriebsunterbrechung – als in einem linearen Zusammenhang mit dem Umsetzungsgrad der vorbeugenden Instandhaltung definieren und skalieren sie im Fall ausschließlich ereignisorientierter Instandhaltung auf 100 %. Hieraus ergibt sich die in [Abb. 2.4](#) dargestellte Geradengleichung für den direkten Aufwand für die Entstörung, die durch die beiden Punkte

- 0 % Umsetzungsgrad mit 100 % direkten Entstörungskosten und
- 100 % Umsetzungsgrad mit 0 % direkten Entstörungskosten

eindeutig definiert ist.

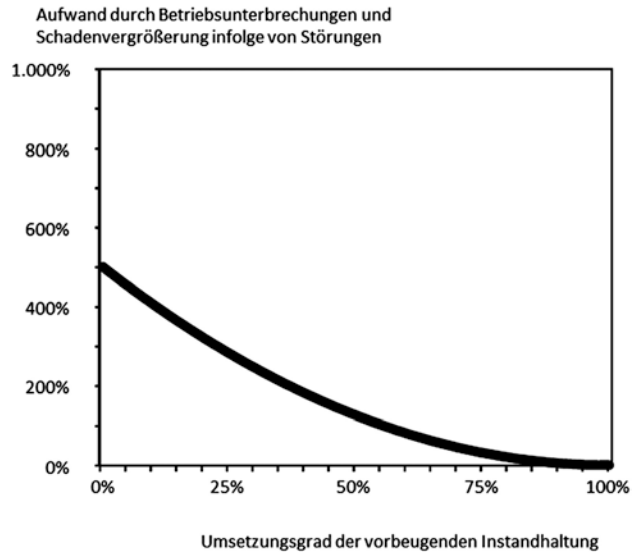
Den direkten Entstörungskosten muss der Zusatzaufwand der Entstörung hinzugefügt werden. Dieser besteht aus

- höheren Rüstkosten, da die Entstörmaßnahme unvorbereitet erfolgt und darüber hinaus meist nicht mit anderen Maßnahmen zusammengelegt werden kann,
- Schadenvergrößerungskosten, wenn das Bauteil, dessen Abnutzungsvorrat verbraucht ist, ein benachbartes Bauteil oder ein Bauteil im weiteren Auswirkungsbereich schädigt,
- Kosten für einen provisorischen Weiterbetrieb mit dem eine Betriebsunterbrechung vermieden werden soll und
- Opportunitätskosten durch den instandhaltungsbedingten Verlust an fest geplanter Betriebszeit.

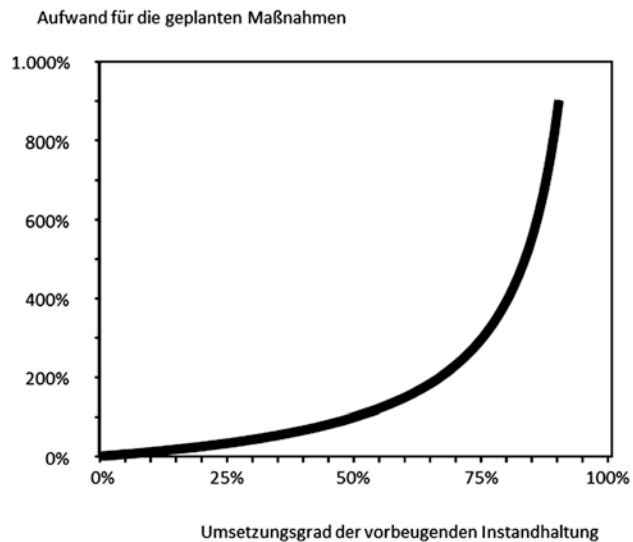
Dieser Zusatzaufwand kann erheblich höher ausfallen als die eigentlichen Entstörungskosten. [Abbildung 2.5](#) zeigt schematisch einen typischen Verlauf aus über einen langen Zeitraum gemittelten Kostendaten in Abhängigkeit des Umsetzungsgrads der vorbeugenden Instandhaltung. Die Kurve startet bei höheren Werten als die direkten Entstörungskosten und verläuft nicht linear, sondern schmiegt sich mit zunehmendem Anteil vorbeugender Instandhaltung an die Abszisse an.



**Abb. 2.5** Aufwand durch Betriebsunterbrechungen und Schadenvergrößerungen aufgrund von Störungen



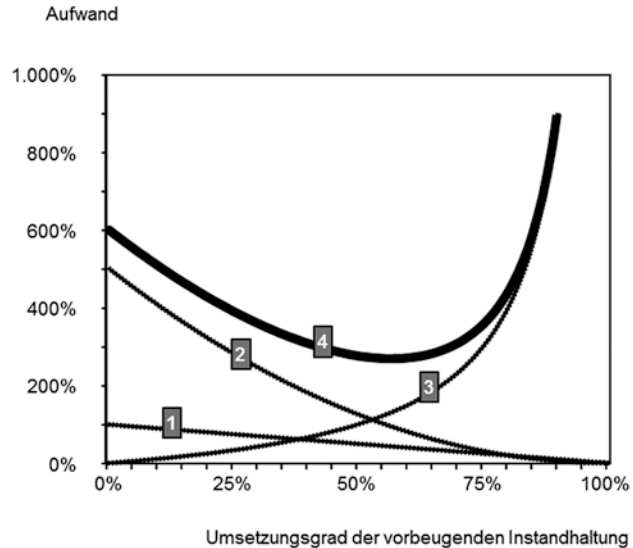
**Abb. 2.6** Aufwand für die geplanten Maßnahmen der vorbeugenden Instandhaltung



Zur Vermeidung von Störungen wird vorbeugende Instandhaltung durchgeführt. Das kann die zeitbasierte oder auch die zustandsbasierte Instandhaltung sein. Je mehr fachlich richtig eingesetzter Aufwand getrieben wird, desto weniger Störungen können eintreten.

In der Darstellung in [Abb. 2.6](#) beginnt die Kurve im Ursprung des Koordinatensystems und wächst mit zunehmendem Umsetzungsgrad der vorbeugenden Instandhaltung deutlich überproportional. 100 % Umsetzungsgrad werden nicht erreicht. Einerseits ist dieser Zustand rein technisch nicht zu realisieren. Andererseits entstehen bereits vor der

**Abb. 2.7** Gesamtaufwand der Instandhaltung (ohne Projekte) und seine Bestandteile



1	Direkter Aufwand für die Entstörung
2	Aufwand durch Betriebsunterbrechungen und Schadenvergrößerung infolge von Störungen
3	Aufwand für die geplanten Maßnahmen
4	Gesamtaufwand: geplante Maßnahmen, Entstörung und Betriebsunterbrechung inkl. Schadenvergrößerung

technischen Grenze Finanzierungsprobleme, denn die Kosten laufen gegen unendlich: Die Kurve hat bei 100 % eine Polstelle.

Der Gesamtaufwand der Instandhaltung setzt sich additiv aus den soeben beschriebenen Bestandteilen zusammen, wobei Verbesserungsmaßnahmen in Form von Projekten zur Modifikation der Anlagen außen vor gelassen werden. [Abbildung 2.7](#) zeigt diese Addition. Klar zu erkennen ist, dass der Summenwert bei geringem wie bei hohem Grad der Umsetzung der vorbeugenden Instandhaltung höher liegt als bei mittleren Werten. Die Kurve zeigt einen Verlauf wie ein Fischhaken. Auf dem hohen Startwert links ist die ereignisbasierte Instandhaltung positioniert, am rechten hohen Auslauf sitzen die zustands- und zeitbasierten Instandhaltungsarten.

Ziel ist es, das Kostental zwischen diesen Extremwerten zu erreichen. Eine Mischform als Instandhaltungsart aber gibt es nicht: für jede Komponente muss man sich für eine eigene Art entscheiden. Der Mischwert ergibt sich nur aus der Kombination von unterschiedlichen Instandhaltungsarten für die unterschiedlichen Anlagen, Systeme,

Teilsysteme, Komponenten und Elemente. Das bedeutet, man muss „jede Schraube“ einzeln anfassen.

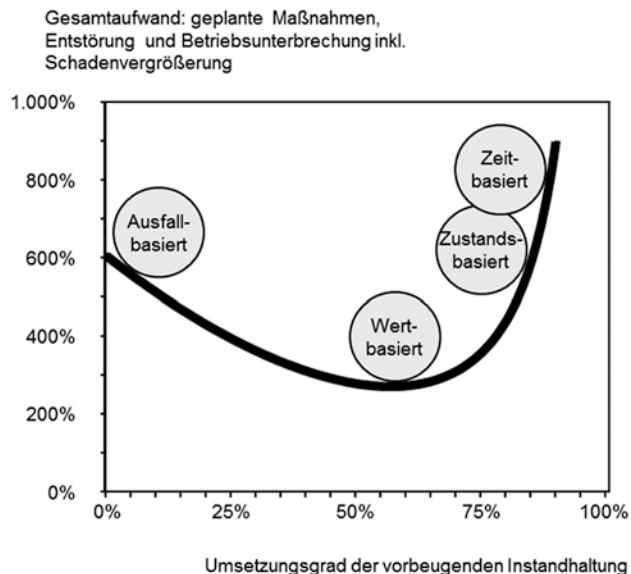
Das Kostental entspricht der Wertorientierten Instandhaltung, bei der für jedes Bauteil individuell entschieden wird, welche Instandhaltungsart gesamtwirtschaftlich betrachtet unter Einhaltung gesetzlicher Auflagen und zusätzlicher eigener HSSE-Regeln die günstigste ist. Hierzu werden beispielsweise die Zeitintervalle der Zustandsüberprüfungen oder die von Wartungsarbeiten sowie deren jeweiliger Umfang neu justiert. Für andere Bauteile wird entschieden, statt der vorbeugenden Instandhaltung zukünftig ausfallbasierte Instandhaltung durchzuführen. Das wirtschaftliche Optimum ergibt sich aus der idealen Kombination der drei Instandhaltungsarten:

- zeitbasierte Instandhaltung,
- zustandsbasierte Instandhaltung und
- ausfallbasierte Instandhaltung

Zur besseren Illustration wurden in [Abb. 2.8](#) die verschiedenen Instandhaltungsarten über dem Umsetzungsgrad der vorbeugenden Instandhaltung aufgetragen und hierbei die wirtschaftliche Auswirkung unter Verwendung der Beziehungen aus [Abb. 2.7](#) aufgetragen.

Bei der Betrachtung dieser Abbildung ist zu beachten, dass die Y-Achse bewusst so skaliert wurde, dass 0 % Umsetzungsgrad der vorbeugenden Instandhaltung 100 % Aufwand durch direkte Entstörmungsmaßnahmen entspricht – ohne Betriebsunterbrechungs- und Schadenvergrößerungskosten.

**Abb. 2.8** Positionierung der einzelnen Instandhaltungsarten über dem Umsetzungsgrad der vorbeugenden Instandhaltung



## 2.3 Risikobewertung

### 2.3.1 Risikodefinition

Das Risiko  $R$  ist definiert als Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit  $W$  eines Ereignisses und seiner Auswirkung  $A$ .

$$R = W \cdot A$$

Trägt man die Auswirkung  $A$  für gleiche Risiken  $R$  über der Wahrscheinlichkeit  $W$  ihres Eintritts auf, so erhält man eine Hyperbelgleichung:

$$A = R / W$$

Diese Korrelation ist in [Abb. 2.9](#) dargestellt.

Linien gleichen Risikos sind Hyperbeln, die sich für hohe Eintrittswahrscheinlichkeiten an die X-Achse (Wahrscheinlichkeitsachse) und für geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten an die Y-Achse (Auswirkungsachse) anschmiegen.

Während es im Rahmen von Szenarioanalysen meist gelingt, einem Risiko eine realistische Auswirkung zuzuordnen, ist die Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit besonders schwierig.

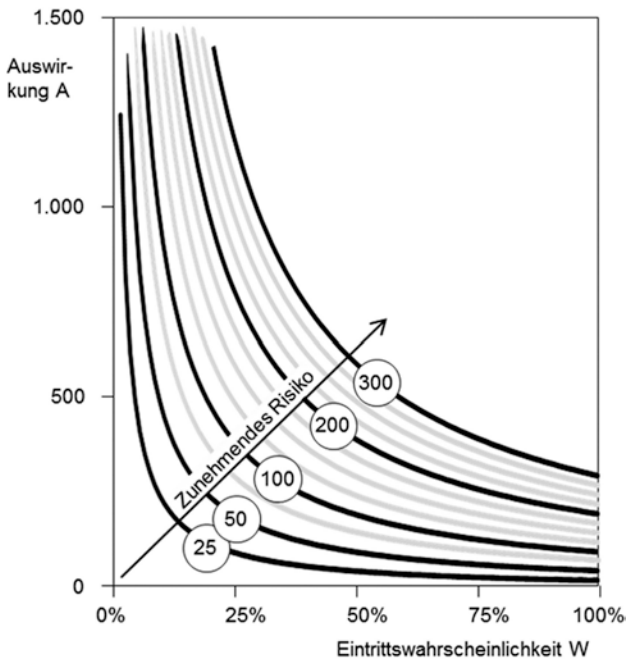
---

#### Beispiel: Risiko eines Totalschadens durch einen Kfz-Unfall

Der Eigenschaden am Fahrzeug entspricht bei wirtschaftlichem oder technischem Totalschaden dem Wiederbeschaffungswert zum Zeitpunkt des Schadeneintritts abzüglich des Erlöses der Verschrottung des Altfahrzeugs. Hinzu kommen die Kosten für ein Mietfahrzeug für den Zeitraum bis zur Beschaffung des endgültigen Ersatzfahrzeugs abzüglich der Kosten, die bei der Nutzung in diesem Zeitraum der provisorischen Mobilität mit dem eigenen Fahrzeug entstanden wären. Sind das Fahrzeugalter und der Zeitwert sowie die typische Fahrleistung und der für die Wiederbeschaffung erforderliche Zeitraum bekannt, so lässt sich sehr schnell ein sehr genauer Wert für das Ausmaß des Schadens ermitteln. Hierzu wird oft nicht einmal die Unterstützung durch einen Sachverständigen erforderlich sein.

Die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Totalschadens am Fahrzeug lässt sich allerdings nur sehr grob schätzen. Man kann beispielsweise Statistiken von Versicherern zu Rate ziehen. Die hieraus abgeleiteten Daten treffen für die Vergangenheit sowie für ein Kollektiv von Versicherungsnehmern zu. Die Übertragbarkeit auf die Zukunft (neue Assistance-Systeme in den Fahrzeugen sowie jährlich zunehmende allgemeine Verkehrssicherheit etc.) sowie auf die individuelle Situation (Risikobewusstsein, Lebensalter und persönliche Erfahrung der Fahrer etc.) lassen auf Werte irgendwo zwischen 0,1 und 1 % Eintrittswahrscheinlichkeit pro Kalenderjahr schließen. Über die typische Nutzungsspanne von etwa 5 Jahren liegt die kumulierte Wahrscheinlichkeit weit unter 5 % – wie weit genau, ist schwer zu ermitteln.

**Abb. 2.9** Auswirkung von Risiken in Abhängigkeit von der Eintrittswahrscheinlichkeit der entsprechenden Ereignisse in linearer Darstellung



Für Einzelbetrachtungen sind die genauen Werte für die Wahrscheinlichkeit jedoch unerheblich: Das Ereignis tritt entweder ein, oder auch nicht – dies sowohl bei Eintrittswahrscheinlichkeiten von 10 % als auch bei Eintrittswahrscheinlichkeiten von 90 %. Das bedeutet, dass die Wahrnehmung von möglichen Einzelereignissen „digital“ erfolgt und die Wahrscheinlichkeiten erst durch die Kollektivbildung eine technische Bedeutung erhalten. Bei niedriger Anzahl der Elemente im Kollektiv – also geringer statistischer Basis – ist die Genauigkeit der Ermittlung einer repräsentativen Wahrscheinlichkeit eher gering. Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten von Bauteilausfällen in industriellen Anlagen wird man sich in Ermangelung von geeigneten Aufzeichnungen häufig mit Hypothesen und Ersatzmodellen zufrieden geben müssen.

Da meist ohnehin nur Schätzwerte bestimmt werden können, können diese in Wahrscheinlichkeitsklassen eingeteilt werden. Diese könnten wie folgt definiert sein:

Ausgeschlossen	$W = 0$
Sehr unwahrscheinlich	$0 < W \leq 5 \%$
Unwahrscheinlich	$5 \% < W \leq 30 \%$
Eher wahrscheinlich	$30 \% < W \leq 50 \%$
Wahrscheinlich	$50 \% < W \leq 70 \%$
Sehr wahrscheinlich	$70 \% < W \leq 95 \%$
Fast sicher	$95 \% < W < 100 \%$
Sicher	$W = 100 \%$

Selbst eine derartige vereinfachende Staffelung stellt noch eine deutliche Überforderung für die praktische Anwendung dar. Sobald man es mit individuellen Anlagen zu tun hat, für die es keine Vergleichswerte gibt, wird es nur in den seltensten Fällen gelingen, Szenarien zutreffend diesen Wahrscheinlichkeitsklassen zuzuordnen. Für die praktische Anwendung muss ein weiterer Schritt unternommen werden.

Die Risikoanalyse wird einfacher, wenn man beide Seiten der Definitionsgleichung für das Risiko logarithmiert:

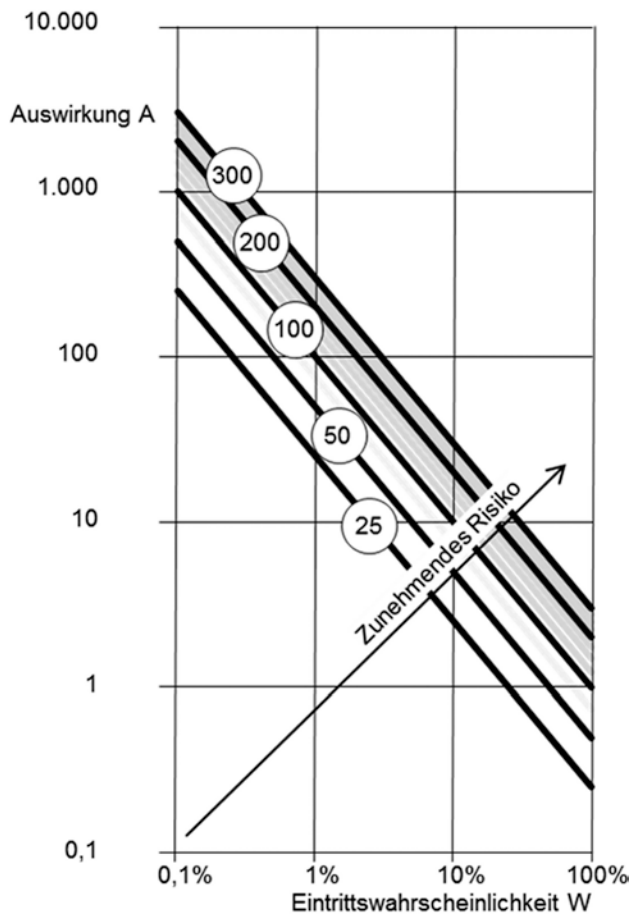
$$\log(R) = \log(W \cdot A) = \log(W) + \log(A)$$

Durch einfache Umstellung wird hieraus:

$$\log(A) = \log(R) - \log(W)$$

Diese Transformation führt zu einer Geradengleichung. Mit ihr verändert sich [Abb. 2.9](#) und man erhält die Darstellung von [Abb. 2.10](#).

**Abb. 2.10** Auswirkung von Risiken in Abhängigkeit von der Eintrittswahrscheinlichkeit der entsprechenden Ereignisse in doppeltlogarithmischer Darstellung



Linien gleichen Risikos sind in dieser Darstellung Geraden, die im Fall einer identischen Skalierung der beiden Achsen diagonal verlaufen. Unter Nutzung dieses Ansatzes lassen sich Wahrscheinlichkeitsklassen angemessener als zuvor voneinander abgrenzen. Eine Definition könnte sein:

Ausgeschlossen	$W = 0$
Unvorstellbar	$0 < W \leq 0,1 \%$
Vorstellbar	$0,1 \% < W \leq 10 \%$
Möglich	$10 \% < W < 100 \%$
Sicher	$100 \%$

Unabhängig von der semantischen Frage der Benennung der Klassen lassen sich hier Zuordnungen deutlich besser durchführen, denn die Klassenweiten nehmen – wenn logarithmiert – mit abnehmender Wahrscheinlichkeit zu.

Für die Handhabung im Rahmen von Risikoanalysen hat sich die doppeltlogarithmische Darstellung besonders bewährt.

In [Abb. 2.9](#) und [2.10](#) wurden die Auswirkungen dimensionslos dargestellt. Auf eine Einheit wurde zu diesem Zeitpunkt bewusst verzichtet.

2.3.2 Risikomatrix

Die numerische Skalierung eines Risikos durch die Multiplikation der Eintrittswahrscheinlichkeit mit dem möglichen Ausmaß im Falle, dass sich das Risiko manifestiert, ist ein notwendiger Schritt zur Risikobewertung. Denn wir sind ohne Kenntnis des quantitativen Wertes dieser Kennzahl nicht in der Lage, objektiv mit Risiken umzugehen: Wir lehnen kleine Risiken mit vermeintlich geringer eigener Einflussmöglichkeit stärker ab als große Risiken, die wir über das eigene Handeln zu beherrschen glauben.

Subjektivität bei der Risikobewertung – Vergleich 1

Man kann beim Spaziergang auf ebenem Weg stolpern und so unglücklich fallen, dass man sich das Genick bricht, und man kann bei einer bemannten Weltraumfahrt aufgrund eines Funktionsausfalls einer technischen Komponente tödlich verunglücken – ersteres Szenario ist für einen Normalbürger, der keiner beruflichen Beschäftigung als Astronaut nachgeht, wahrscheinlicher als das zweite und birgt daher aufgrund der bei Schadeneintritt identischen Auswirkung auf den Betroffenen für ihn ein deutlich höheres Risiko.

Subjektivität bei der Risikobewertung – Vergleich 2

Es sterben heute in Deutschland jährlich mehr Menschen durch Unfälle im Straßenverkehr, als weltweit in den letzten 10 Jahren an der Folge von Unfällen in

Kernkraftwerken. Dennoch haben wir den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen, ohne jemals über den Ausstieg aus dem Straßenverkehr diskutiert zu haben. Jeder glaubt, sein eigenes Risiko im Straßenverkehr durch eigenes Verhalten günstig beeinflussen zu können, während er sich dem Kernenergie­risiko schutzlos ausgeliefert sieht. Dabei hat gerade die zum Ausstieg führende Katastrophe in Fukushima gezeigt, dass sogar der gleichzeitig mehrfach eintretende GAU (größter anzunehmender Unfall) einer Kernschmelze nicht zu mehr Toten führen muss als ein einziger typischer Unfall mit einem Reisebus.

Die qualitative Risikowahrnehmung ist eher eine emotional begründete Angelegenheit. Daher muss man sich mit den Risiken quantitativ und damit numerisch befassen, um sie bewerten zu können. Während die Ermittlung der möglichen Auswirkung eines Schadenereignisses nach genauer Spezifikation des zu Grunde gelegten Szenarios nur wenig Aufwand macht, ist die Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit umso schwerer.

Zunächst wollen wir uns mit einer handhabbaren Skalierung der Auswirkung befassen. Ziel der Instandhaltung ist es, Schädigungen der Anlage, die aufgrund des Verbrauchs des Abnutzungsvorrats von Bauteilen entstehen können, zu vermeiden. Der größte im Rahmen dieser Vermeidungsstrategie betrachtete Kostenblock ist die Ausfallzeit der Anlage. In fast allen Fällen der eigenverantwortlich durchführbaren Instandhaltung liegen die möglichen Betriebsunterbrechungskosten um ein Vielfaches über dem Aufwand für die Schadenbehebung. Diese Aussage trifft insbesondere deswegen zu, da die Vermeidung von größerer Schadenausweitung in der Regel bereits durch die Sorgfaltspflichten zur Arbeitssicherheit, die in keiner Weise eingeschränkt werden sollen, abgedeckt ist.

Zur Definition der Schadenauswirkung kann aufgrund der Dominanz der Betriebsunterbrechungskosten die Dauer des möglichen unplanmäßigen Anlagenstillstands herangezogen werden. Unter Verwendung der zuvor eingeführten logarithmischen Skalierung kann das in Form eines Vielfachen von Stunden geschehen.

Schrittweite der Ausfallzeit unter Verwendung eines Logarithmus zur Basis 10 und Startwert 1	
1 h	0,04 Tage
10 h	0,4 Tage
100 h	0,6 Wochen
1.000 h	6 Wochen (1,4 Monate)
10.000 h	13,7 Monate
100.000 h	11,4 Jahre

Die Stufen aus dem obigen Beispiel erweisen sich als zu schnell wachsend. Sie lösen den wichtigen Bereich zwischen mehreren Tagen und wenigen Wochen zu gering auf. Verwendet man statt des Logarithmus mit der Basis 10 den zur Basis 3, so ergeben sich für



die Praxis nutzbare Einteilungen für die ausfallbedingten Betriebsunterbrechungen der Anlage. Bei der Verwendung des Faktors „3“ sind aufgrund der 12-er Systematik unserer Zeiteinteilung 4 h ein zweckmäßiger Startwert.

#### Schrittweite der Ausfallzeit unter Verwendung eines Logarithmus zur Basis 3 und Startwert 4

4 h	0,2 Tage
12 h	0,5 Tage
36 h	1,5 Tage
108 h	4,5 Tage
324 h	1,9 Wochen
972 h	5,8 Wochen
2.916 h	ca. 4 Monate
8.748 h	ca. 12 Monate
26.244 h	ca. 3 Jahre

Unser Kalender bestimmt unsere Vorstellung über die Zeiteinteilung. Werte wie „5,8 Wochen“ oder „ca. 12 Monate“ sind ungünstige Einteilungen. Für die technische Nutzung ist es daher sinnvoll, genaue ganzzahlige Vielfache von Wochen und Monaten zu verwenden und hierdurch die präzisen äquidistanten Stützstellen der logarithmischen Skala aufzugeben, also eine geringfügige Verletzung der Regel einer Multiplikation mit „3“ zwischen den einzelnen Zeilen der Tabelle zu akzeptieren.

#### Praktikable Schrittweite für die Ausfallzeit

4 h	0,2 Tage
12 h	0,5 Tage
36 h	1,5 Tage
108 h	4 bis 5 Tage
336 h	2 Wochen
1.008 h	6 Wochen
2.920 h	2 Monate
8.760 h	12 Monate
26.280 h	3 Jahre

In dieser Stufung sind kurze Unterbrechungen mit einer Zeitdauer von bis zu einer halben Schichtdauer gleichermaßen wie längere Unterbrechungen, deren Dauer mehrere Monate umfasst, darstellbar.

In gleicher Art und Weise wollen wir uns mit der Skalierung der Wahrscheinlichkeit eines Schadeneintritts befassen. Aus pragmatischen Gründen soll die Wahrscheinlichkeit gleich der Häufigkeit eines Ereignisses in einem bestimmten Zeitintervall gleich gesetzt werden:

Statt von einer Wahrscheinlichkeit von 10 % für den Eintritt eines Ereignisses im Betrachtungsjahr wird damit von dem wahrscheinlich einmaligen Eintritt des Ereignisses innerhalb eines Zeitraums von 10 Jahren gesprochen. Das ist statistisch unsauber, aber praktikabel und zweckdienlich. Durch diese Vereinfachung lassen sich auf einen festen Zeitraum bezogene Erinnerungswerte tatsächlich eingetretener Ereignisse (absolute Häufigkeit) in eine adäquate relative Häufigkeit und darüber hinaus in Wahrscheinlichkeiten des möglichen Eintritts aus der Vergangenheit in die Zukunft spiegeln.

**Schrittweite für die Wahrscheinlichkeit/Häufigkeit von Ereignissen unter Verwendung eines Logarithmus zur Basis 8**

Jährliche Wahrscheinlichkeit 1,56 %	Einmal in 64 Jahren eingetreten
Jährliche Wahrscheinlichkeit 12,5 %	Einmal in 8 Jahren eingetreten
Jährliche Wahrscheinlichkeit 100 %	Einmal jährlich eingetreten
Jährliche Wahrscheinlichkeit 800 %	Einmal in 6,5 Wochen eingetreten
Jährliche Wahrscheinlichkeit 6400 %	Einmal in 5,7 Tagen eingetreten

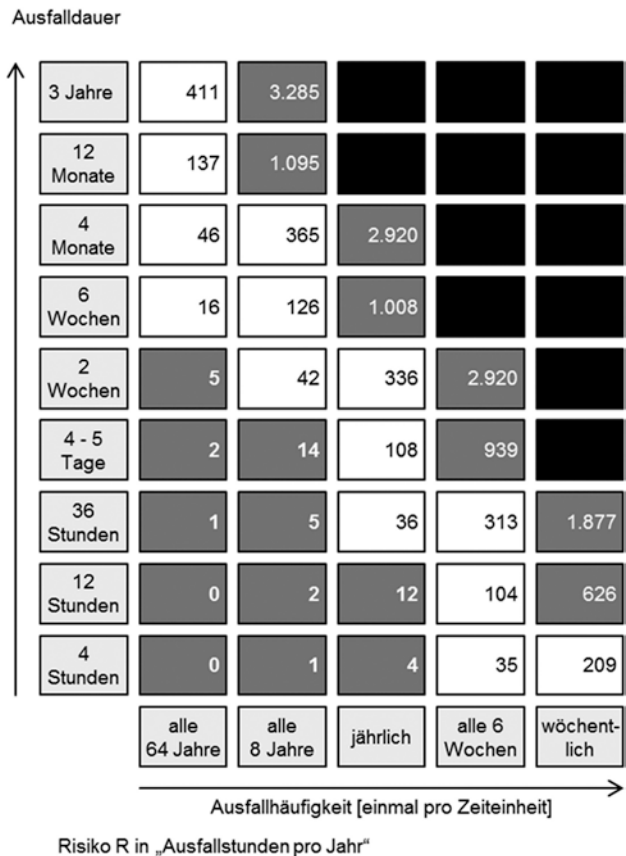
Bei diesem Beispiel wurde zunächst der feste Faktor „8“ als Basis für die logarithmische Schrittweite genutzt. Diese Schrittweite erweist sich von der Größenordnung her als grundsätzlich geeignet. Allerdings sind die zugehörigen Kalenderintervalle unrund und damit unpraktisch. Um für die Anwendung geeignete Größen zu erhalten, werden die Zeiteinheiten wiederum geglättet und damit eine Unregelmäßigkeit in den Schrittweiten zwischen den Zeilen der Tabelle in Kauf genommen.

**Praktikable Schrittweite für die Wahrscheinlichkeit/Häufigkeit von Ereignissen**

Alle 64 Jahre einmal	Jährliche Wahrscheinlichkeit 1,56 %
Alle 8 Jahre einmal	Jährliche Wahrscheinlichkeit 12,50 %
Jährlich einmal	Jährliche Wahrscheinlichkeit 100 %
Alle 6 Wochen einmal	Jährliche Wahrscheinlichkeit 869 %
Wöchentlich einmal	Jährliche Wahrscheinlichkeit 5214 %

Die zuvor erarbeiteten Skalen für die Beschreibung des Risikos spannen eine Risikomatrix auf, vgl. [Abb. 2.11](#). Hierbei handelt es sich um nichts anderes als die neu skalierte Darstellung von [Abb. 2.10](#) als Tabelle. Der 10-er Logarithmus aus [Abb. 2.10](#) wurde für

Abb. 2.11 Risikomatrix



die X-Achse (Häufigkeitsachse) in einen Logarithmus zur Basis 8 und für die Y-Achse (Auswirkungsachse) in einen Logarithmus zur Basis 3 transformiert. Auf beiden Achsen wurden die Stützpunkte jedoch nicht exakt äquidistant gesetzt, sondern auf die benachbarten ganzzahligen Vielfache von Jahren, Monaten, Wochen, Tagen und Stunden gerundet.

Die Risikomatrix nach Abb. 2.11 enthält in ihren aufgespannten Tabellenelementen die einzelnen Risikowerte. Hierbei handelt es sich um das Produkt aus relativer Ausfallhäufigkeit mit der Ausfalldauer: Ein alle 6 Wochen eintretendes Ereignis (jährlich etwa 8,69-mal, also „8,69“), das zu einem Stillstand von 12 h führt, hat einen Risikowert von 104 h ( $8,69 \cdot 12 \text{ h}$ ) pro Jahr und ein alle 64 Jahre eintretendes Ereignis (jährlich etwa 1/64-mal, also „0,0156“), das zu einem Stillstand von 6 Wochen (1.008 h) führt, hat einen Risikowert von 16 h ( $0,0156 \cdot 1.008 \text{ h}$ ) pro Jahr etc.

Wie erwartet verlaufen Linien gleichen Risikos wie Diagonalen von oben links nach unten rechts. Aufgrund der groben „Pixelung“ in Matrixzellen wird dies jedoch nicht unmittelbar sichtbar. Um eine Diskussion zu ermöglichen wurde die Matrix durch willkürliche Festlegung von Schwellenbereichen in drei relevante Teile aufgegliedert. Als Grenzen zwischen sehr kleinen und kleinen Risiken wurde willkürlich der Wert 15 Ausfallstunden pro Jahr gewählt und als Grenze zwischen kleinen und mittleren Risiken wurde

der Wert 500 Ausfallstunden pro Jahr gewählt. Bei den Ausfallstunden handelt es sich um unplanmäßige Nichtverfügbarkeit aufgrund von Instandsetzungsmaßnahmen nach eingetretenen Störungen durch Schäden.

Die unterschiedlichen Bereiche der Risikomatrix sind unter Verwendung dieser Grenzen:

- Ecke unten links (Risikowerte unter 15 Ausfallstunden pro Jahr): Hier treffen geringe Wahrscheinlichkeiten bzw. Häufigkeiten auf geringe Auswirkungen von Ereignissen. Man könnte diesen Bereich mit dem Wort „peanuts“ beschreiben und ihn daher eigentlich bei der weiteren Betrachtung vergessen. Allerdings handelt es sich um die sogenannte „Komfortzone“. Es muss daher genau geprüft werden, wie groß der Aufwand ist, mit dem dieser Komfort erkaufte wird.
- Erstes diagonales Feld (Risikowerte zwischen 15 und 500 Ausfallstunden pro Jahr): Dieses Feld enthält Matricelemente, die eine *akzeptable Risikosituation* beschreiben.
- Zweites diagonales Feld (Risikowerte zwischen 500 und 5.000 Ausfallstunden pro Jahr): Dieses Feld enthält Matricelemente die eine *inakzeptable Risikosituation* beschreiben.
- Ecke oben rechts (Risikowerte über 5.000 Ausfallstunden pro Jahr): Hier treffen sehr häufiges Manifestieren von Schäden mit sehr hohen Schadenauswirkungen zusammen. Unternehmen, deren Anlagen sich in diesem Bereich befinden, haben große Probleme. Sie sollten sich nicht mit der Weiterentwicklung der Instandhaltung befassen, sondern überlegen, den Betrieb der betroffenen Anlage einzustellen und die Anlage abzureißen. Diesen Bereich (bereits geschwärzt) können wir problemlos von den weiteren Betrachtungen ausschließen.

Den nach Abzug der Ecke oben rechts verbleibenden drei Feldern kann unterschiedlicher Handlungsbedarf zugeordnet werden:

- Komfortzone (Risikowerte unter 15 Ausfallstunden pro Jahr): Es muss identifiziert werden, welche Maßnahmen der Instandhaltung dazu führen, dass die Komfortzone erreicht wird. Und es ist zu prüfen, ob ein Entfall dieser Maßnahmen zulässig ist. Eine Verschiebung in die akzeptable Zone ist dabei grundsätzlich gewünscht.
- Akzeptable Zone (Risikowerte zwischen 15 und 500 Ausfallstunden pro Jahr): Es ist zu prüfen, in wieweit die geplanten Maßnahmen zum Erhalt der Positionierung in der akzeptablen Zone beitragen und ob bei Entfall von Instandhaltung die Position noch gehalten werden kann.
- Inakzeptable Zone (Risikowerte über 500 Ausfallstunden pro Jahr): Es ist zu prüfen, mit welchen Maßnahmen eine Verlagerung in die akzeptable Zone erreicht werden kann.

Für die praktische technische Anwendung ist die in [Abb. 2.11](#) dargestellte Risikomatrix noch nicht ganz ideal. Die an kalendarische Meilensteine angelehnten Schrittweiten beider Achsen müssen an Kenngrößen angepasst werden, die mit den verschiedenen

Meilensteinen im Anlagenleben sowie mit den verschiedenen Durchlaufzeiten von planmäßigen Stillständen für Instandhaltungszeiten korrelieren.

Für die Häufigkeit eignen sich Intervalle zwischen

- Reinigungsstillständen (z. B. jährlich)
- Kurzrevisionen (z. B. alle 2 Jahre)
- Revisionen an großen Komponenten (z. B. alle 4 Jahre)
- Hauptrevisionen an mehreren Systemen (z. B. alle 8 Jahre)
- Großrevisionen mit umfangreicher Ertüchtigung (z. B. alle 16 Jahre)

Für die Durchlaufzeiten von Instandsetzungsmaßnahmen und damit für die Betriebsunterbrechungszeiten eignen sich Stufenungen wie

% Schicht	4 h
2 Tage	Wochenendstillstand
2 Wochen	Reinigungsstillstand/Kurzrevision
6 Wochen	Hauptrevision
4 Monate	Großrevision

Dies ist in [Abb. 2.12](#) dargestellt. Aufgrund der nachträglichen Eintragung von Zwischenintervallen ist die Darstellung nicht mehr genau doppeltlogarithmisch. Linien gleichen Risikos verlaufen nicht mehr exakt als Geraden. Der geschwärzte Bereich oben rechts entspricht wiederum dem Anlagenverlust, der nicht betrachtet wird. Die beiden grauen Bereiche (Risiko unter 15 und über 500 Ausfallstunden jährlich) dienen der Betrachtung,

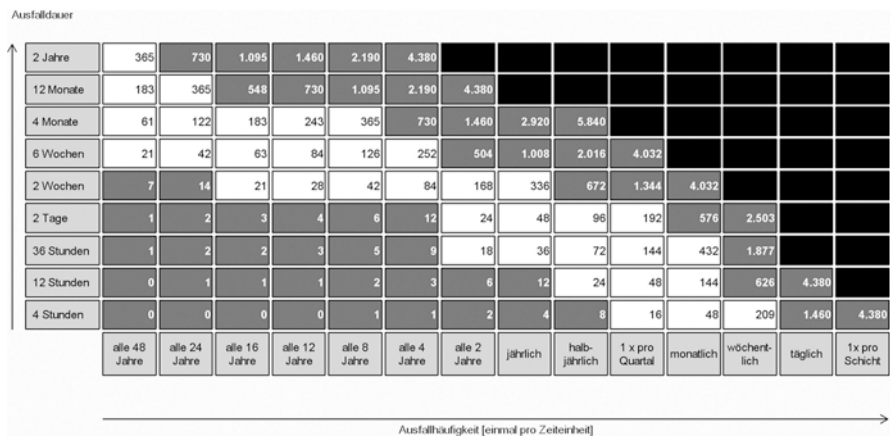


Abb. 2.12 Risikomatrix für die praktische Nutzung

ob grundsätzlich weniger (unter 15) oder mehr (über 500) vorbeugende Instandhaltung möglich bzw. erforderlich ist. Unabhängig von dieser Einteilung ist jedoch eine Einzelfallbetrachtung einer jeden geplanten Maßnahme erforderlich.

### 2.3.3 Definition des Schadenbegriffs

Zur Bewertung der Risikoposition müssen potenzielle Schadenereignisse beschrieben werden. Hierzu muss in drei verschiedenen Dimensionen gedacht werden, die den Schadenbegriff definieren, vgl. [Abb. 2.13](#):

1. Verlust an Funktionalität: Das betroffene Bauteil versagt. Es kommt zu Fehlfunktionen oder zum kompletten Funktionsausfall.
2. Beeinträchtigung der Substanz: Das betroffene Bauteil hat eine Veränderung erfahren. Dies kann sich durch einen Bruch, eine Leckage, eine bleibende Verformung oder andere Beeinträchtigung manifestieren.
3. Auftreten von Gefährdung: Vom betroffenen Bauteil geht mittelbar oder unmittelbar eine Gefahr aus, die die Arbeitssicherheit betrifft, Umweltauswirkungen verursachen kann und/oder weitere Anlagenteile schädigen könnte.

Ein Verlust an Funktionalität und eine Beeinträchtigung der Substanz können sich einzeln oder gemeinsam ereignen. Beide können in Abhängigkeit zueinander stehen oder auch nur zufällig zeitgleich eintreten.

---

#### Substanzbeeinträchtigung ohne Funktionsausfall

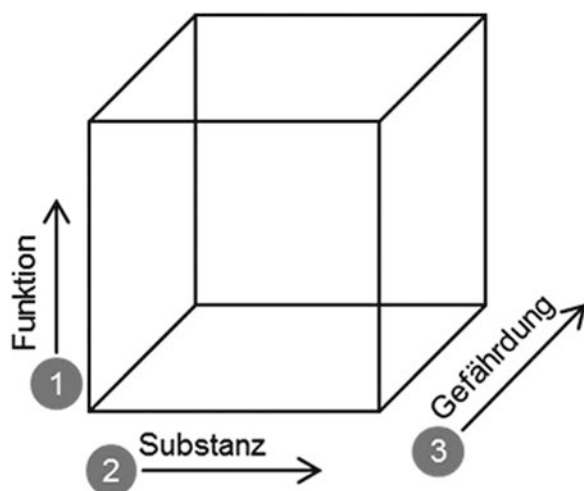
Ein Leck an der Dichtung einer Ölpumpe kann auftreten, ohne dass die Funktion der Pumpe signifikant beeinträchtigt wird: Trotz Leckage wird die Förderung aufrechterhalten. Das durch die Undichtigkeit austretende Öl kann seinerseits aber zu einer Gefährdung (Arbeitssicherheit bzw. Umweltschaden) führen, sodass der Betrieb des Anlagenteils eingestellt werden muss. Kann der betroffene Teil der Anlage abgeschiebert werden, so kann die Anlage unter Voraussetzung, dass entweder redundante Förderstränge bestehen oder dass für ein gewisses Zeitintervall auf die Förderung verzichtet werden kann, weiter betrieben werden.

---

#### Funktionsausfall ohne Substanzbeeinträchtigung

Durch schlechte Kontakte an der Steckverbindung der Steuerleitung einer Komponente kann deren Funktion ausfallen, ohne dass eine Beeinträchtigung der Substanz vorliegt. Die lose Steckverbindung braucht nur wieder fixiert zu werden, eine Instandsetzung der Komponente wird nicht erforderlich.

**Abb. 2.13** Drei Dimensionen der Schadenbeschreibung



Funktion des Objekts/ Teilsystems beeinträchtigt	
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vollständiger Ausfall</li> <li>▪ Teilausfall/ gestörter Betrieb</li> <li>▪ Kein Ausfall/ betriebsfähig</li> </ul>

Substanz des Objekts/ Teilsystems beeinträchtigt	
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zerstört (Totalschaden)</li> <li>▪ Geschädigt (reparabel)</li> <li>▪ Keine Beeinträchtigung</li> </ul>

Gefährdung durch Objekt/ Teilsystem	
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Für Menschen</li> <li>▪ Für Objekte</li> <li>▪ Kein Gefahrenpotenzial</li> </ul>

**Gleichzeitige Substanz- und Funktionsbeeinträchtigung – ohne gegenseitige Abhängigkeit**

In einem Leistungstransformator kann wegen eines Isolationsfehlers eine Gasbildung im Ölraum entstehen, der über den Buchholz-Schutz zur Warnung führt. Gleichzeitig kann die Kühlung des Transformatorenöls aufgrund eines mechanischen Problems am Ventilator des Ölkühlers ausfallen. Beide Störungen haben Koinzidenz, aber stehen in keinem Kausalzusammenhang zueinander.

**Gleichzeitige Substanz- und Funktionsbeeinträchtigung – mit Kausalzusammenhang**

Ein Rohrbruch stellt zunächst einmal eine Beeinträchtigung der Substanz dar. Reißt das Rohr ab, so wird das zu fördernde Medium nicht mehr transportiert. Die Funktion ist beeinträchtigt. Handelt es sich darüber hinaus beim durch das Rohr zu transportierenden Medium um Öl, so gehen sowohl eine Gefahr durch Bodenglätte, eine Brandgefahr sowie möglicherweise weitere Unfallgefahren von dem Ereignis aus.

Schäden müssen – insbesondere auch innerhalb der Instandhaltungsstatistiken – von Mängeln abgegrenzt werden. Ein Schaden liegt erst dann vor, wenn sich das betrachtete Bauteil durch ein Ereignis verändert hat, vorher also sowohl die Substanz intakt als auch die Funktion gegeben war. Ist die Abweichung des Zustands der Substanz oder die der Funktion vom Erwartungswert nicht auf ein Ereignis zurück zu führen, sondern bestand diese von Anfang an, so handelt es sich nicht um einen Schaden, sondern um einen Mangel.

**Abgrenzung Schaden und Mangel**

Aufgrund einer Undichtigkeit tropft aus einem Sammelbehälter Altöl in den Boden. Wenn die Undichtigkeit nicht durch Zeitstandsschädigung oder andere Ereignisse entstanden ist, sondern aufgrund eines Herstellfehlers – z. B. Schweißnahtqualität – von Anfang an bestand, so handelt es sich bei der Leckstelle am Behälter um einen Mangel. Die Bodenverunreinigung durch das Altöl aber ist ein Schaden, da sich der Zustand des Erdreichs durch das Hineintropfen von Altöl verändert hat.

### 2.3.4 Anwendung der Risikomatrix

Für ein jedes Geschäftsfeld eines Unternehmens muss individuell festgelegt werden, welche Ausfallrisiken getragen werden können und sollen. Hierbei geht es darum, Grenzen vorzugeben, bis wohin die Instandhaltung die Aufgabe hat, die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit einer Anlage durch Steigerung der Aufwendungen für Wartungen und Inspektionen zu verbessern und ab wann in umgekehrter Richtung nach Einsparpotenzialen in den



bislang geplanten Maßnahmen gesucht werden muss. Im Beispiel nach [Abb. 2.12](#) lagen die Grenzen bei 15 bzw. 500 jährlichen Ausfallstunden.

**Szenarien mit Ereignissen, die unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit über 500 jährliche Ausfallstunden verursachen**

Die Instandhaltung ist zu intensivieren. Es ist nach Möglichkeiten zu suchen, in kurzen Zeitintervallen mit geringem Aufwand den jeweiligen Zustand der betroffenen Anlagenteile/Baugruppen festzustellen oder aber diese früher, als bislang vorgesehen, prophylaktisch auszuwechseln. Der Aufwand der zusätzlichen Maßnahmen ist mit dem erwarteten Vorteil des geringeren Ausfallrisikos zu vergleichen. Für jeden zusätzlich für die Instandhaltung aufgewendeten Euro muss der wirtschaftliche Vorteil aus zusätzlich gewonnener Zuverlässigkeit mindestens 1,01 € betragen!

**Szenarien mit Ereignissen, die unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit weniger als 15 jährliche Ausfallstunden verursachen**

Es ist zu prüfen, ob die geplanten Instandhaltungsmaßnahmen reduziert werden können. Hierbei ist die mögliche Einsparung mit dem erwarteten Verlust an Zuverlässigkeit und der daraus resultierenden finanziellen Auswirkung zu vergleichen. Es darf in Summe durchaus bis zu 0,99 € Nachteil aus geminderter Zuverlässigkeit auftreten, wenn hierdurch das Instandhaltungsbudget um einen Euro verringert werden kann.

Sind dem betrachteten Schadenereignis Häufigkeit und Auswirkung zugeordnet, so kann es in der Risikomatrix „verortet“ werden:

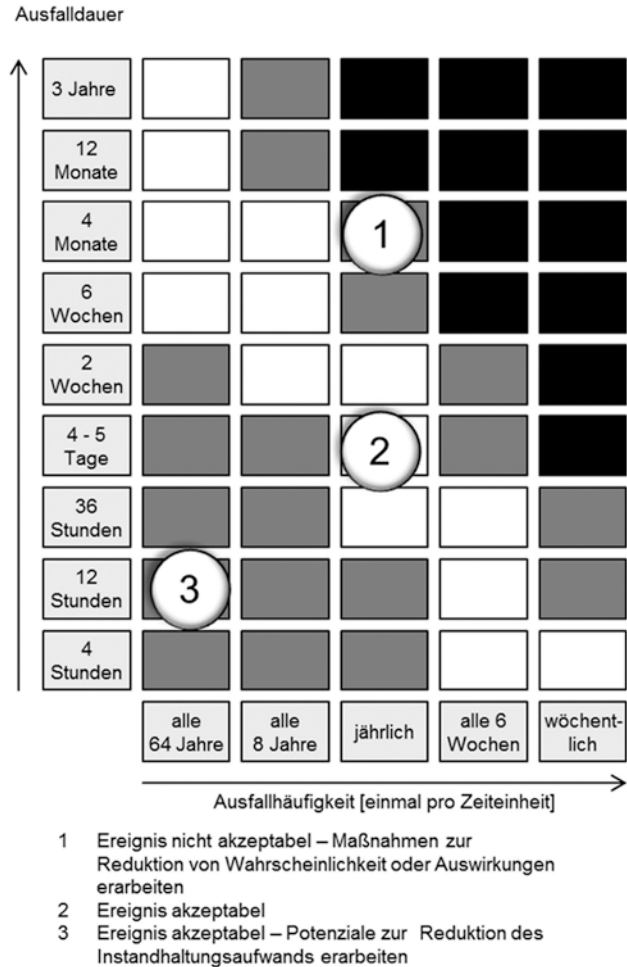
- Häufigkeit: Wie oft hat sich ein derartiger Schaden in der Vergangenheit in der untersuchten Anlage ereignet bzw. wie groß ist der mittlere zeitliche Abstand zwischen den Schadenereignissen?
- Auswirkung: Was waren die Folgen insbesondere für die ungeplante zusätzliche Betriebsunterbrechung?

[Abbildung 2.14](#) zeigt dies beispielhaft für drei unterschiedliche mögliche Ereignisse.

**Schaden 1 – Ereignis mit jährlicher Wiederholung, das zu einer Ausfallzeit von etwa 4 Monaten führt, [Abb. 2.14](#)**

Ein derartiges Ereignis ist nicht akzeptabel, da es mit fast 3.000 wahrscheinlichen Ausfallstunden pro Jahr deutlich über der (zuvor festgelegten) Grenze von 500 jährlichen Ausfallstunden liegt. Daher müssen Maßnahmen zur Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeit und/oder der Auswirkungen erarbeitet werden.

**Abb. 2.14** Verortung eines Schadenereignisses



**Schaden 2 – Ereignis mit jährlicher Wiederholung, das zu einer Ausfallzeit von 4 bis 5 Tagen führt, [Abb. 2.14](#)**

Ein derartiges Ereignis ist im Prinzip akzeptabel, da es mit wenig über 100 wahrscheinlichen Ausfallstunden pro Jahr unter der (zuvor festgelegten) Grenze von maximal zulässigen 500 jährlichen Ausfallstunden liegt. Dennoch muss abgewägt werden, ob Maßnahmen zur Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeit und/oder der Auswirkungen möglich sind, die weniger Aufwand als Nutzen zur Folge haben, oder aber, ob alle bislang geplanten Instandhaltungsmaßnahmen tatsächlich erforderlich sind, um die Positionierung im akzeptablen Bereich zu halten.

**Schaden 3 – sehr seltenes Ereignis mit einer Wahrscheinlichkeit des Eintritts einmal in 64 Jahren, [Abb. 2.14](#)**

Die Ausfallwahrscheinlichkeit ist so gering, dass nur mit einem einzigen Ausfall im Leben der Anlage zu rechnen ist. Da auch die Auswirkung mit einer Ausfallzeit von 12 h mehr als überschaubar ist, stellt dies kein Problem dar. Um sicher zu stellen, dass die Positionierung in der Komfortzone nicht zu teuer erkaufte wird, ist zu untersuchen, ob es nicht möglich ist, den geplanten Instandhaltungsaufwand zu reduzieren, ohne dass das Ausfallrisiko einen Wert einnimmt, der über den Einsparungen durch die Reduktionen liegt.

## 2.4 Strategische Leitplanken

Die im Rahmen der zuvor diskutierten detaillierter Erwägungen durchzuführenden Entscheidungen haben Einfluss auf

- die prüfpflichtige laufende Instandhaltung,
- die eigenverantwortliche laufende Instandhaltung,
- die Vorhabenplanung, die z. B. Revisionen umfasst, und
- die Instandhaltungsprojekte, die die Mittelfristplanung prägen.

Im Rahmen einer Strategiedefinition muss zu diesen wesentlichen Elementen der Instandhaltung die unternehmensspezifische Position festgelegt werden. Es ist wichtig, strategische Leitplanken mit der Geschäftsführung abzustimmen und den operativen Einheiten zur Umsetzung vorzugeben:

- Welche Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit haben wir?
  - Was dürfen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit kosten?
  - Welche ungeplanten Ausfälle sind grundsätzlich akzeptabel, welche grundsätzlich nicht?
  - Nach welchen wirtschaftlichen Kriterien werden Entscheidungen zur Durchführung der vorbeugenden Instandhaltung an Bauteilen, deren Versagen grundsätzlich akzeptabel ist, getroffen?

Die Antwort auf diese Fragen muss dem Instandhalter sowie der Betriebsführung als verbindliche strategische Leitplanke vorliegen. Das nachfolgende Beispiel dient der Illustration. Es wird eindringlich davor gewarnt, es 1:1 zu übernehmen – die Wahrscheinlichkeit, dass es ohne Modifikation zum strategischen Ziel des Unternehmens passt, ist gering:

---

### **Prüfpflichtige laufende Instandhaltung**

Als prüfpflichtige Instandhaltung gelten alle gesetzlichen definierten Prüf- und Nachweisaufgaben sowie alle aus Gründen der Vermeidung von Gefahren für Mensch und Umwelt erforderlichen Inspektionen und Wartungen. Sie sind von den Überlegungen zur wirtschaftlichen Optimierung grundsätzlich ausgenommen. Es gilt als selbstverständlich, dass sie ungeachtet der durch sie verursachten Kosten pflichtgemäß und verantwortungsbewusst durchgeführt werden. Dennoch ist es nicht nur gestattet, sondern auch erforderlich, zu analysieren, ob das bestehende Prüfprogramm tatsächlich im Einklang mit den entsprechenden aktuellen Vorgaben ist: Mögliche Defizite sind auszumerken, mögliches Overdoing ist zu hinterfragen.

---

### **Eigenverantwortliche laufende Instandhaltung**

Die eigenverantwortliche laufende Instandhaltung ist – unter Beachtung der Vorgaben für die Sicherheit der Anlagen – auf das Maß zu reduzieren, das erforderlich ist, um die nachfragebedingte Zuverlässigkeit der Anlage zu erreichen. Es werden nur Maßnahmen durchgeführt, ohne deren Umsetzung die Zuverlässigkeit signifikant eingeschränkt würde. Alle darüber hinaus gehenden Maßnahmen entfallen – sicherheitsrelevante Maßnahmen sind jedoch von diesen Einsparungen ausgenommen.

---

### **Vorhabenplanung**

Instandhaltungsmaßnahmen, für deren Durchführung ein längerer Anlagenstillstand erforderlich ist, werden in Kurzstillständen, Reinigungsstillständen, Systemrevisionen und Hauptrevisionen gebündelt, die in festgelegten Abständen durchgeführt werden. Hierbei werden grundsätzlich nur Maßnahmen durchgeführt, ohne deren Umsetzung die Zuverlässigkeit signifikant eingeschränkt werden würde. Darüber hinaus gehende Maßnahmen werden unter Nutzung der ohnehin verfügbaren Stillstandszeit nur durchgeführt, wenn durch die Zusammenlegung mit zwingend erforderlichen Maßnahmen Vorteile bei den Rüstaufwendungen entstehen und der Mehraufwand für die zusätzlichen nicht zwingend durchzuführenden Arbeiten nachweislich geringer ist als ihr Nutzen in Bezug auf erwartete vermiedene Stillstandskosten – sicherheitsrelevante Maßnahmen sind jedoch von diesen Einsparungen ausgenommen.

---

### **Instandhaltungsprojekte**

Instandhaltungsprojekte werden grundsätzlich nur durchgeführt, wenn dies zur Erzielung der erforderlichen Verfügbarkeit unvermeidbar ist. Darüber hinausgehende Projekte werden nur dann durchgeführt, wenn sichergestellt ist,

- dass einerseits ein Wirtschaftsplan besteht, in dem der Nachweis geführt wird, dass der Instandhaltungsaufwand der 3 Folgejahre durch die Instandhaltungsprojekte

so weit gesenkt wird, dass sich die Projekte aus diesen Einsparungen finanzieren, sowie

- dass darüber hinaus sichergestellt wird, dass die erwarteten Einsparungen tatsächlich in die Mittelfristplanung der Instandhaltung der Folgejahre eingepflegt worden sind.

Sicherheitsrelevante Maßnahmen sind jedoch von diesen Einsparungen ausgenommen.

---

## 2.5 Zusammenfassung Strategie

Die Instandhaltungsstrategie legt die Ziele an die Instandhaltung fest. Diese umfassen die Sicherheit, die Verfügbarkeit, die Zuverlässigkeit und die Werterhaltung der Anlagen und deren Betrieb.

Zur Zielerreichung werden Wartungen, Inspektionen Instandsetzungen und Verbesserungen durchgeführt. Die Dosierung dieser Maßnahmen in Bezug auf Umfang und Häufigkeit ist Kern der strategischen Instandhaltungsplanung.

Auf Bauteilebene unterscheidet man zwischen den vorbeugenden zeit- oder zustandsbasierten Instandhaltungsarten sowie der ausfallbasierten Instandhaltungsart. Durch die richtige Mischung dieser Instandhaltungsarten entsteht die Wertorientierte Instandhaltung.

Bei der Wertorientierten Instandhaltung werden Einzelentscheidungen auf Bauteilebene getroffen, mit denen auf Basis der Risikobeurteilung festgelegt wird, wie viel Prophylaxe erforderlich und wie viel Schadenakzeptanz möglich ist.

Die Bewertung der Risiken erfolgt in einer pragmatischen Form der Risikomatrix, in der – basierend auf Szenarioanalysen – die Auswirkungen von Schadenereignissen über der Wahrscheinlichkeit des Eintritts aufgetragen werden. Für die technische Anwendung werden vereinfachende Auswirkungs- und Wahrscheinlichkeitsklassen genutzt.

Auf Basis einer klaren mit der Geschäftsleitung abgestimmten Vorgabe zur gesamtwirtschaftlich begründeten Schadenakzeptanz entsteht die Operationalisierung der Strategie in die Planung.



<http://www.springer.com/978-3-658-17854-3>

Wertorientierte Instandhaltung  
Kosten senken, Verfügbarkeit erhalten  
Leidinger, B.  
2017, XV, 146 S. 68 Abb., Softcover  
ISBN: 978-3-658-17854-3