

Externe elektronische Auslegestelle-Beuth-Friedrich-Althoff-Konsortium Geschäftsstelle am Zuse-Institut Berlin-KdNr. 6956955-ID: MJVTYVICYJB7JH8NH32XQUC9.2-2015-07-21 16:18:37
Frühere Ausgabe: 11/97 Entwurf, deutsch
Former edition: 11/97 draft, in German only

<div>VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE</div>	<div>Zustandsorientierte Instandhaltung</div> <div>Maintenance condition monitoring</div>	<div>VDI 2888</div> <div>Ausg. deutsch/englisch Issue German/English</div>
<div>Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.</div> <div>No guarantee can be given with respect to the English translation. The German version of this Guideline shall be taken as authoritative.</div>		
<div><div><div>Inhalt</div><div>Seite</div><div>1 Zielsetzung. 2</div><div>1.1 Einleitung 2</div><div>1.2 Geltungsbereich 2</div><div>1.3 Grundlagen der zustandsorientierten Instandhaltung 2</div><div>2 Definition der Zustände und Funktionen der Anlage 5</div><div>2.1 Definition der Anlage 5</div><div>2.2 Funktionales Modell. 5</div><div>2.3 Definition der Betriebsarten 7</div><div>3 Zustandserfassung und -bewertung 11</div><div>3.1 Definition der Sollzustände 11</div><div>3.2 Erfassung der Istzustände 14</div><div>3.3 Zustandsbewertung und Prognose. 15</div><div>3.4 Diagnose 17</div><div>4 Instandhaltungsmaßnahmen und Betriebsanweisungen. 20</div><div>5 Schwachstellenanalyse und Optimierung . . 21</div><div>5.1 Schwachstellenanalyse 21</div><div>5.2 Optimierung 22</div><div>Schrifttum 23</div></div><div><div>Contents</div><div>Page</div><div>1 Purpose of the guideline 2</div><div>1.1 Introduction. 2</div><div>1.2 Scope 2</div><div>1.3 Fundamentals of condition-oriented maintenance. 2</div><div>2 Definition of the conditions and functions of the plant 5</div><div>2.1 Definition of the plant 5</div><div>2.2 Functional model 5</div><div>2.3 Definition of the operating modes 7</div><div>3 Detection and evaluation of condition 11</div><div>3.1 Definition of specified conditions 11</div><div>3.2 Detection of actual conditions 14</div><div>3.3 Condition evaluation and prediction 15</div><div>3.4 Diagnosis 17</div><div>4 Maintenance measures and operating instructions 20</div><div>5 Weak-point analysis and optimisation 21</div><div>5.1 Weak-point analysis 21</div><div>5.2 Optimisation 22</div><div>References 23</div></div></div>		
<div>VDI-Gesellschaft Produktionstechnik</div> <div>Ausschuß Instandhaltung</div> <div>Unterausschuß Zustandsorientierte Instandhaltung</div>		
<div>VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 4</div>		

Vervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet / Reproduction – even for internal use – not permitted

Zu beziehen durch / Available from Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin – Alle Rechte vorbehalten / All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1999

1 Zielsetzung

1.1 Einleitung

Durch die verstärkten Rationalisierungsbemühungen der letzten Jahre sind insbesondere die operativen Unternehmensbereiche von ständigen Personal- und Budgetkürzungen betroffen. In der modernen Produktionstechnik werden zunehmend komplexe, hochautomatisierte Maschinen und Anlagen eingesetzt, an die höchste Anforderungen in Bezug auf Verfügbarkeit und Betriebssicherheit gestellt werden. Daher befindet sich die Instandhaltung seit Jahren in dem Spannungsfeld, die Maschinen- und Anlagenverfügbarkeit sowie die Produktqualität erhöhen und dabei gleichzeitig die Instandhaltungskosten senken zu müssen.

Mit den bisher von den meisten Unternehmen fast ausschließlich praktizierten Strategien der vorbeugenden und der ausfallbedingten Instandhaltung läßt sich das beschriebene Dilemma nicht lösen. Auf längere Sicht können die gestellten Anforderungen wirtschaftlich nur durch eine weitestgehend zustandsorientierte Instandhaltung erfüllt werden. Eine unternehmensweite Entscheidung für eine bestimmte Instandhaltungsstrategie ist aber nicht sinnvoll. Sie muß fallweise für jede Anlage oder für Anlagenteile nach technischen, wirtschaftlichen oder gesetzlichen Erwägungen bestimmt werden.

1.2 Geltungsbereich

Diese Richtlinie gilt für alle Produktionsanlagen, die Instandhaltung zur Gewährleistung eines effizienten und/oder sicheren Betriebs erfordern. Nach der Definition relevanter Begriffe werden das Konzept der zustandsorientierten Instandhaltung erläutert, seine Bedeutung für die Praxis herausgestellt und dem potentiellen Anwender Handlungsanleitungen zur Einführung im Unternehmen gegeben. Dadurch soll die Akzeptanz dieser Strategie durch die industrielle Praxis erhöht und die Anwendung erleichtert werden.

1.3 Grundlagen der zustandsorientierten Instandhaltung

Die Zielsetzung einer zustandsorientierten Instandhaltung besteht darin, anhand der Zustände der Produktionsanlagen als notwendig erkannte Instandhaltungsmaßnahmen zeit-, qualitäts- und kostenoptimal zu planen und durchzuführen. Durch moderne Anlagen- und Meßtechnik und technische Diagnostik ist es möglich, den Zustand maschineller Anlagen präzise zu erfassen, zu beschreiben und zu bewerten. Anhand der Zustände können auch Ursachen für Störungen und Schäden erkannt werden, und es kann eine Optimierung der Anlage erfolgen.

1 Purpose of the guideline

1.1 Introduction

Due to intensified rationalisation efforts over the past years, the operative sectors of companies have been particularly subject to constant cuts in budget and personnel. Modern production engineering increasingly relies on complex, highly automated plants and machinery which have to meet extreme requirements with respect to availability and operational reliability. Therefore, it has been a balancing act for maintenance for many years to have to increase the availability of plants and machinery and improve the product quality while being forced to cut down on maintenance costs.

So far, most companies have relied almost exclusively on the strategies of preventive and corrective maintenance which, however, cannot resolve the dilemma described above. In the long term, only maintenance that is largely condition-oriented will allow to meet the requirements economically. It is not useful, however, to choose one specific maintenance strategy for the entire company. It must be determined from case to case for each plant or plant component on the basis of technical, economic or legal considerations.

1.2 Scope

This guideline applies to any production plant requiring maintenance to ensure efficient and/or reliable operation. Following the definitions of the relevant terms, the concept of condition-oriented maintenance is explained, its significance for practical application is illustrated, and potential users are given guidance on the implementation in their companies. The objective is to make this strategy more acceptable for the industrial practice and to facilitate its use.

1.3 Fundamentals of condition-oriented maintenance

Condition-oriented maintenance aims at optimising the planning and performing of such maintenance measures as have been found necessary on the basis of the condition of the production plant with respect to time, quality and expense. Thanks to modern plant engineering, measurement techniques and technical diagnostics, it is possible to detect, describe, and evaluate the condition of mechanical equipment precisely. Condition information can also help to identify the cause of malfunctions and damage, allowing optimisation of the plant.

Die zustandsorientierte Instandhaltung bietet die Grundlage dafür, daß zum einen der vorhandene Abnutzungsvorrat fast vollständig ausgenutzt und zum anderen Primärschäden weitgehend ausgeschlossen beziehungsweise rechtzeitig erkannt werden können. Dementsprechend lassen sich eventuell resultierende Folgeschäden verhindern.

Zusammengefaßt bietet die zustandsorientierte Instandhaltung folgende Vorteile:

- Der Abnutzungsvorrat wird besser ausgenutzt
- Die mittlere, wartungsfreie Maschinenlaufzeit wird erhöht
- Unnötige Reparaturen und Demontagen von Anlagen werden weitgehend vermieden, und die Ersatzteilverhaltung kann verringert werden
- Der Austausch abgenutzter Bauteile erfolgt in planbaren Stillstandszeiten durch Gewährung einer hinreichend großen Reparaturvorlaufzeit
- Die Kenntnis des Verschleißzustands trägt zur Betriebssicherheit bei
- „Installierte Sicherheit“ entlastet Maschinenbediener von Kontrolltätigkeiten und dient der Sicherheit von Menschen und Umwelt
- Vom aktuellen Anlagenzustand können die erzeugbaren Produktqualitäten und -mengen abgeleitet werden

Bild 1 zeigt das Referenzmodell für die Einführung der zustandsorientierten Instandhaltung. Ausgehend von der Beschreibung der Anlagenstruktur und -daten wird ein funktionales Modell aufgestellt. Anhand dessen erfolgt die Beschreibung der Betriebsarten und -zustände für ausgewählte Teile der Anlage, die um zusätzliche Angaben über das Verhalten im Störfall ergänzt werden. Anschließend müssen die zustandsbeschreibenden Sollmerkmale festgelegt werden, die eine möglichst detaillierte Unterscheidung verschiedener Zustände erlauben. Daneben können auch Veränderungen von Eigenschaften der auf der Anlage gefertigten Produkte Hinweise auf den Anlagenzustand geben.

Für die Erfassung der Istzustände müssen die geeignete Meßtechnik und Instrumentierung ausgewählt werden. Anhand der erfaßten Meßwerte werden Istmerkmale gebildet, die mit den Sollmerkmalen verglichen und zur Beurteilung des aktuellen Anlagenzustands herangezogen werden. Wird ein unzulässiger Zustand erkannt, setzt die Diagnose ein und es wird ein Zusammenhang zur Fehlerart, zum Fehlerort und zur Fehlerursache hergestellt. Es können eine Restnutzungsdauerprognose, Anweisungen zum Betrieb der Anlage und Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden. Mit diesen Informationen können, ergänzt durch archivierte Meßwerte, die beispiels-

Condition-oriented maintenance makes it possible, on the one hand, to utilise the wear reserve almost completely and, on the other hand, to prevent primary damage to a large degree or to recognise it in good time. Accordingly, consequential damage can be avoided.

In summary, condition-oriented maintenance offers the following advantages:

- The wear reserve is utilised to a higher degree
- The mean maintenance-free machine running time is increased
- Unnecessary repairs and disassemblies of plants are prevented to a large degree, and the stock-keeping of spare parts can be reduced
- Worn components are replaced during planned standstills since a sufficient lead time for repairs is granted
- Knowledge of the wear condition contributes to operational reliability
- "Installed safety" relieves the machine operator from monitoring tasks and serves for the safety of personnel and environment
- Information on the current plant condition can be used to derive the product qualities and quantities that can be produced

Figure 1 shows the reference model for the implementation of condition-oriented maintenance. Based on the description of the plant structure and plant data, a functional model is developed, which serves to describe the operating modes and conditions for selected parts of the plant, including additional information on the characteristics in case of malfunction. The desired features required for describing the (specified) condition have to be specified then. They shall allow to distinguish different conditions in as much detail as possible. Changes in the characteristic features of the products produced in a plant may also provide information on the plant condition.

For actual-condition detection, appropriate measurement techniques and instruments must be selected. Actual features are derived from the measured values, then compared to the desired features, and used for evaluation of the current plant condition. If an inadmissible condition is detected, a diagnosis is triggered, and a connection is made to the type of fault, its location and cause. The residual service life can be predicted, and instructions for operation of the plant and for maintenance measures can be derived. These data, supplemented by archived measured values which, e.g. emphasise trends, can help to identify and analyse weak points. It is the objective of optimisa-

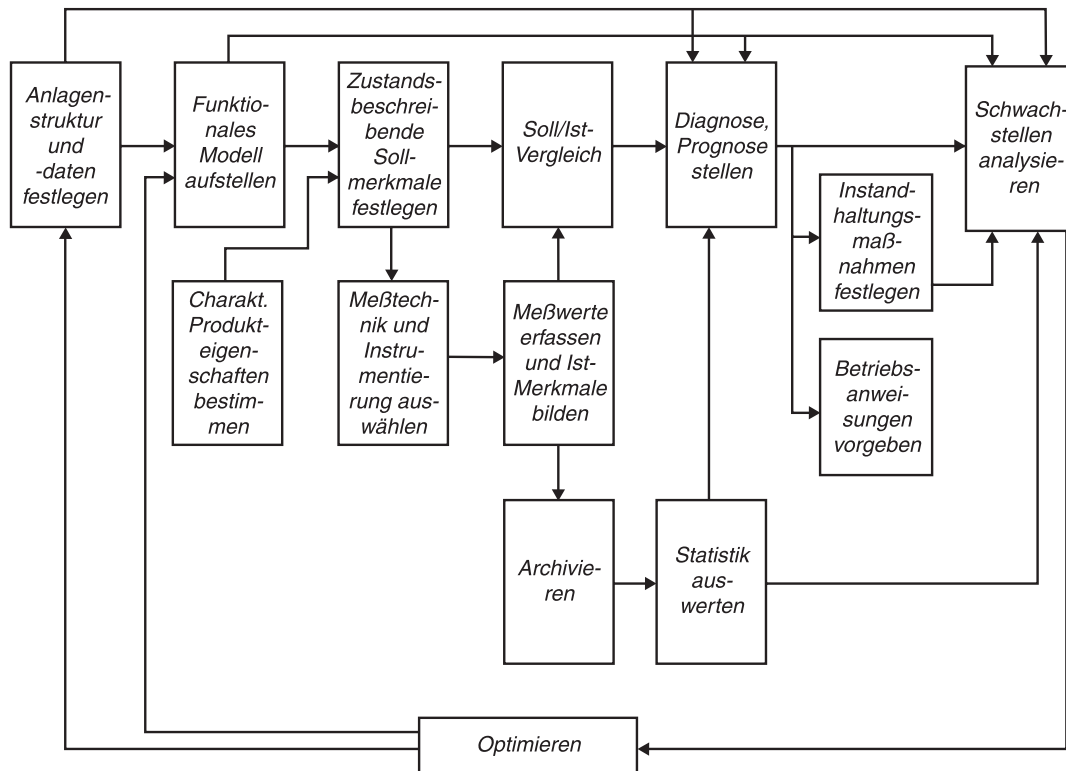


Bild 1. Referenzmodell für die Einführung der zustandsorientierten Instandhaltung

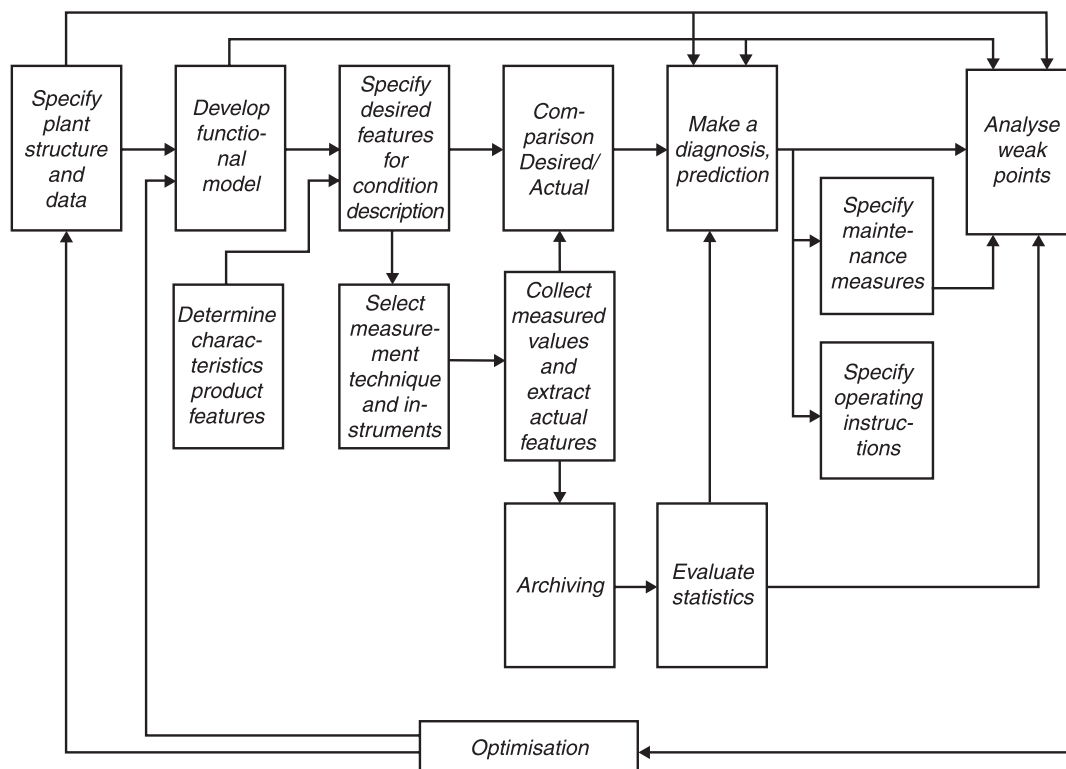


Fig. 1. Reference model for the implementation of the condition-oriented maintenance

weise Trends deutlich machen, Schwachstellen identifiziert und analysiert werden. Ziel der Optimierung ist, erkannte Schwachstellen zu beseitigen und damit die Anlagenverfügbarkeit, die Produktqualität und ihre Reproduzierbarkeit zu verbessern sowie den Instandhaltungsaufwand zu reduzieren.

Das Referenzmodell für die zustandsorientierte Instandhaltung kann auf ausgewählte Anlagenteile angewendet und mehrfach durchlaufen werden, beispielsweise mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden und Schwerpunkten. In den folgenden Abschnitten werden die in Bild 1 dargestellten Kernelemente dieser Instandhaltungsstrategie näher erläutert.

2 Definition der Zustände und Funktionen der Anlage

2.1 Definition der Anlage

Grundlage für die Planung und Umsetzung der zustandsorientierten Instandhaltung ist die Beschreibung der hierarchischen Anlagenstruktur (Bild 2, siehe VDI 2898). Sie bildet den Ausgangspunkt für die Erstellung eines funktionalen Modells der Anlage, für die Erstellung von Wartungs- sowie Inspektionslisten und -plänen (siehe VDI 2890), zur Erarbeitung von Strategien für die Ersatz- und Reserveteilbevorzugung, Kostenerfassung und -verfolgung sowie zum gezielten Sammeln von technischen Informationen.

2.2 Funktionales Modell

Ein wesentliches Instrument der zustandsorientierten Instandhaltung ist ein funktionales Modell der kompletten Anlage oder ausgewählter Anlagenteile, das für jede Hierarchieebene der Anlagenstruktur erstellt werden kann. Anhand des funktionalen Modells können Betrachtungen über die Auswirkungen einzelner Funktionen auf die Verfügbarkeit und Sicherheit des Systems untersucht werden. Weiterhin zeigt es Ansätze für die Installation einer effizienten Fehlerdiagnose, ist die Grundlage für die Definition der Anlagenzustände sowie für die Schwachstellenanalyse und ist damit Voraussetzung zur kontinuierlichen Verbesserung der Anlage. Es kann außerdem für die Neuplanung von Anlagen genutzt werden.

Ein funktionales Modell der Anlage stellt die Verketten beziehungsweise Schaltung aller für die Erbringung einer Funktion benötigten Funktionseinheiten dar (Bild 3).

Funktionseinheiten sind Positionen einer hierarchischen, montagestücklistenunabhängigen Struktur der Anlage. Mehrfach installierte Funktionseinheiten sollen somit auch mehrfach in der Anlagenstruktur erscheinen. Zur Untersuchung der Sicherheit und Verfügbarkeit müssen die zur Erbringung einer Funk-

tion to eliminate any weak points that have been identified, and thus to improve plant availability, product quality and its reproducibility while reducing maintenance costs.

The reference model for condition-oriented maintenance is applicable to selected plant components and may be run through several times, for instance with different degrees of detailing and different points of emphasis. The following sections further explain the essential elements of this maintenance strategy as shown in Figure 1.

2 Definition of the conditions and functions of the plant

2.1 Definition of the plant

The planning and realisation of condition-oriented maintenance is based on the description of the hierarchic plant structure (Figure 2, see VDI 2898). It is the starting point for the development of a functional model of the plant, for the generation of maintenance and inspection lists and schedules (see VDI 2890), for the elaboration of strategies for the stockkeeping of spare and replacement parts, for cost finding and tracing, and for the compilation of specific technical information.

2.2 Functional model

A functional model of the complete plant or selected plant components, which can be developed for each hierarchic level of the plant structure is an essential instrument of condition-oriented maintenance. The functional model can be used to examine considerations regarding the effects of individual functions on the availability and reliability of the system. Furthermore, it provides starting points for the installation of an efficient fault diagnosis, it is the basis for the definition of plant conditions and for weak-point analysis and is, thus, prerequisite to a continuous improvement of the plant. It can also be used for the planning/designing of new plants.

A functional model of a plant illustrates the interlinking or connection between all functional units required for the performance of a function (Figure 3).

Functional units are positions within a hierarchic plant structure that is independent of assembly parts lists. Accordingly, functional units installed several times shall, if possible, appear several times in the plant structure. When examining reliability and availability, the possible connections of the functional

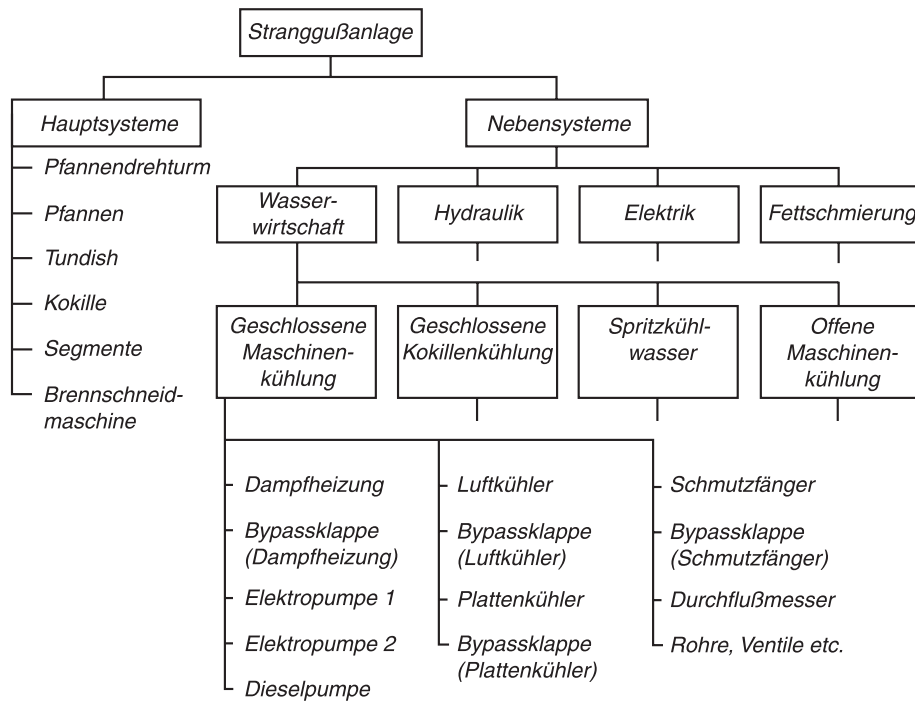


Bild 2. Objektstruktur einer Stranggußanlage

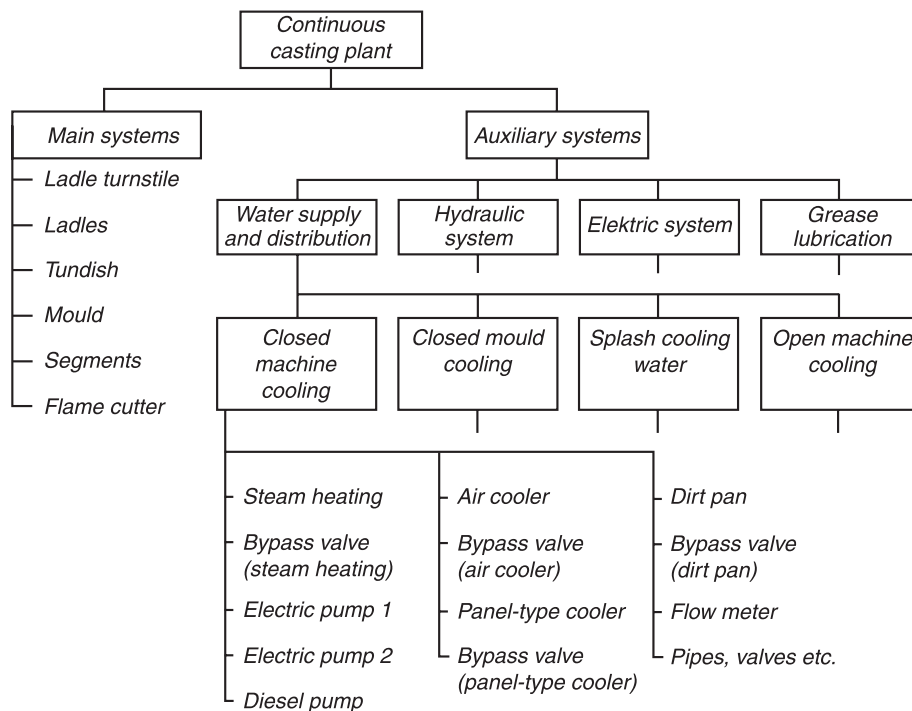


Fig. 2. Object structure of a continuous-casting plant

tion vorgesehenen Schaltungsmöglichkeiten der beteiligten Funktionseinheiten berücksichtigt werden. Jede Schaltungsmöglichkeit wird mehreren Betriebsarten oder -zuständen der Anlage (Abschnitt 2.3) zugeordnet, so daß jeweils die entsprechenden Schaltungspfade abbildbar und erkennbar werden.

units involved, which are designed to enable performance of the function, shall be taken into account. Each possible connection is allocated to several operating modes or conditions of the plant (Section 2.3) so that the corresponding connecting paths can be represented and identified in each case.

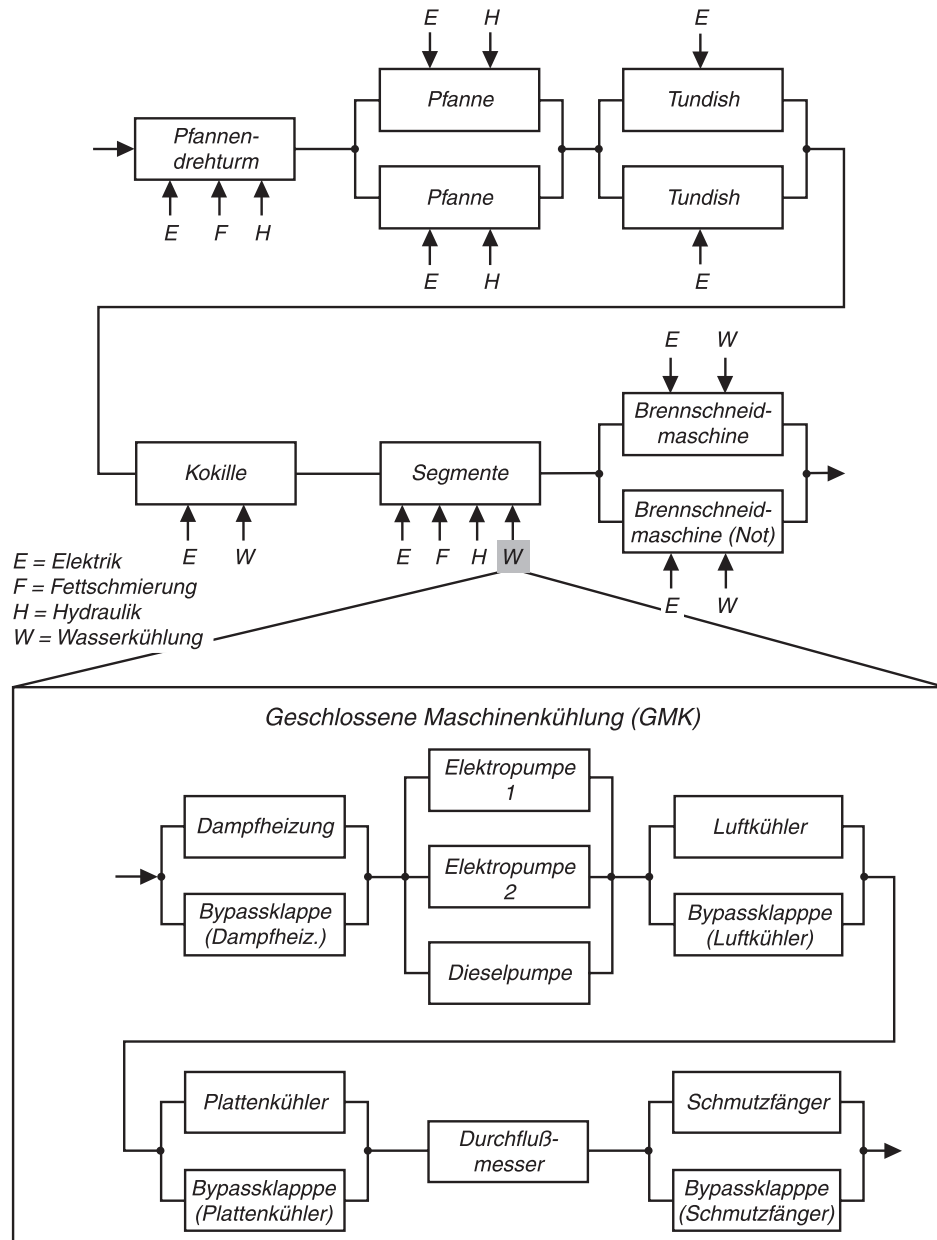


Bild 3. Funktionales Modell einer Stranggußanlage und Detaillierung des Teilsystems GMK

Bei der Modellierung muß zwischen Redundanzen (DIN 40 041) – d.h. Parallelanordnung gleichartiger Einheiten, von denen bereits eine zur Funktionserfüllung genügen würde – und Ersatzschaltungen – d.h. Inanspruchnahme von Einheiten, die entweder eine teilweise Funktionserfüllung gewährleisten oder die auch noch andere Aufgaben wahrnehmen – unterschieden werden.

2.3 Definition der Betriebsarten

Durch die Betriebsart wird die Fahrweise einer Produktionsanlage bestimmt. Beispiele dafür sind Automatik-, Hand- oder Testbetrieb, aber auch Anfahren, Normalbetrieb oder Vollast. Betriebszustände sind dagegen beispielsweise Belastung, Produzieren oder

In modelling, a distinction must be made between redundancies (DIN 40 041), i.e. the parallel arrangement of similar units, one of which would already suffice to perform the function, and spare connections, i.e. the use of units which either ensure partial performance of the function or perform other tasks in addition.

2.3 Definition of the operating modes

The operating mode determines the operating characteristics of the production plant. Examples are automatic, manual, and testing mode, but also start-up, normal operation and full load. Operating conditions, by contrast, are, e.g., loading, producing, and setting.

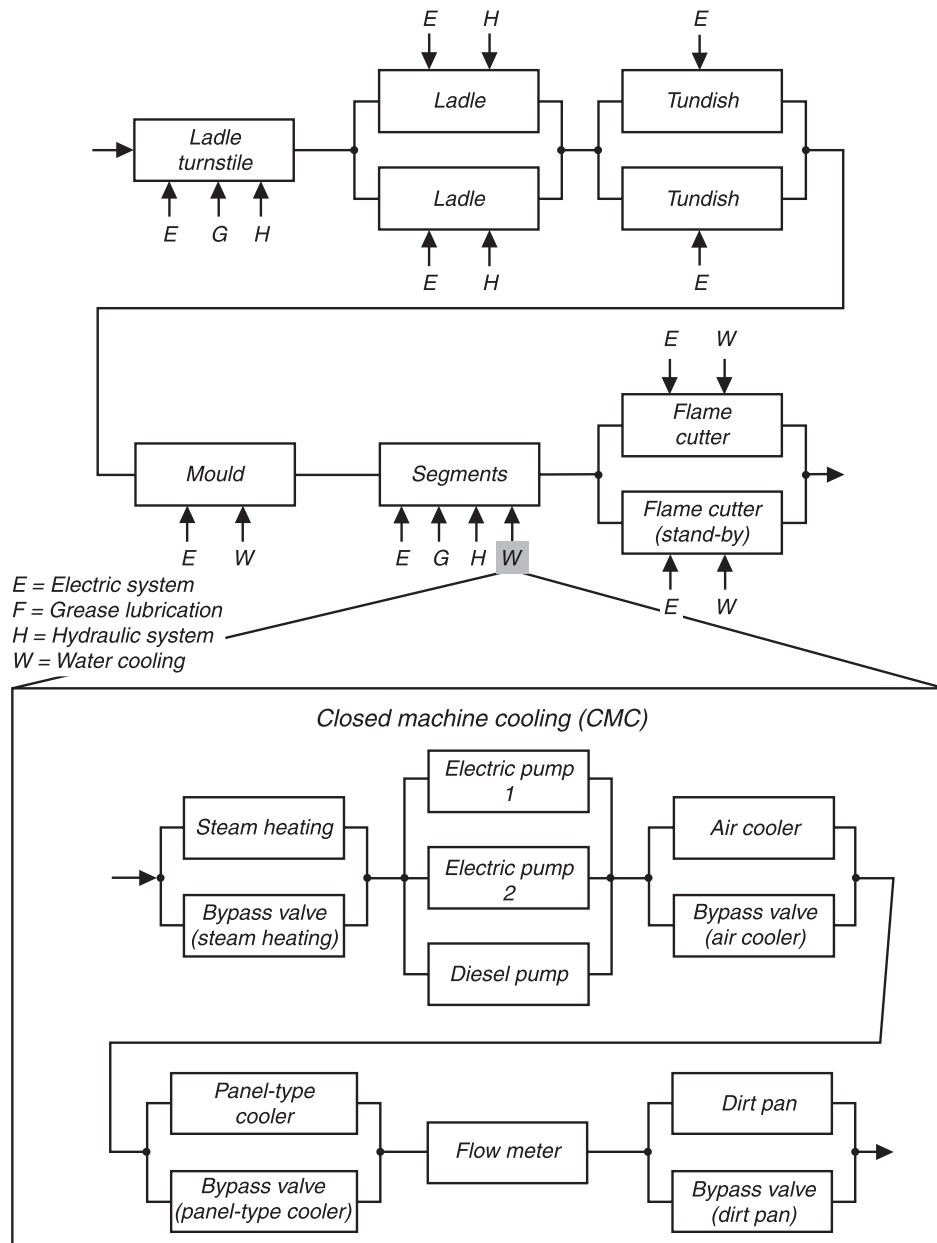


Fig. 3. Functional model of a continuous casting plant and detailing of the CMC subsystem

Rüsten. Tabelle 1 zeigt ein Beispiel für die Festlegung von Betriebsarten und -zuständen einer Produktionsanlage.

Ausgehend vom funktionalen Modell in den jeweiligen Strukturebenen sollte die Beschreibung der Betriebsarten und -zustände um zusätzliche Angaben über das Verhalten der Anlage im Störfall ergänzt werden. Für das ausgewählte System sind geeignete Sofortmaßnahmen, Prüfmaßnahmen, Störungsauslöser, Fehler und Maßnahmen zu ihrer Beseitigung festzulegen. Dazu erscheint folgende Vorgehensweise sinnvoll:

- Für die ausgewählte Funktionseinheit die möglichen Betriebsarten, Betriebszustände und Fehler-symptome festlegen

Table 1 shows an example for the determination of operating modes and conditions of a production plant.

Starting from the functional model at the structural level concerned, the description of the operating modes and conditions should be supplemented by additional information on the characteristics of the plant in case of malfunction. Appropriate immediate measures, checking measures, sources of malfunction, faults and remedial measures shall be specified for the selected system. The following procedure seems convenient for this purpose:

- Specify the possible operating modes, operating conditions, and fault symptoms for the selected functional unit

Tabelle 1. Beispiel für die Festlegung von Betriebsarten und -zuständen

Funktion	Funktionsbeschreibung	Betriebsart	Betriebszustand	Erläuterungen
Kaltstrangmeßfahrt	Kaltstrang-Meßkopf in Gießrichtung durch den Strang fördern	T	W	Anlagenzustand überprüfen
Kaltstrangfahrt	Simulation des Einfahrens, Gießens, Ausförderns	T	W	Anlagenfunktionen simulieren
Kaltstrang einfahren	Kaltstrang über die Wippe in den Strang fahren bis Vorposition Tippen bis Angießposition	A	U, R	
		H	U, R	
Pfanne für Anguß vorbereiten	Pfanne in Drehturm setzen und in Gießposition drehen, Arm absenken, Schieber öffnen, Tundish auffüllen	H	U, R	
Angießen	Stopfen im Tundish öffnen, Kalt- mit Warmstrang durch die Transportmaschine in Gießrichtung ziehen; Trennen des Kaltstrangs vom Warmstrang Gießspiegelregelung „Ein“	H	P	Gießbeginn, $v_{\text{gieß}} = 0,15 \text{ m/min}$, inkrementieren auf Sollwert, gezieltes Entlasten der Segmente über das Wegfolgesystem, danach Normalbetrieb
		A	P	
Einzelguß	Gießen bis Pfanne leer, Tundish leer	A	P	$v_{\text{gieß}} = 0,6 - 1 \text{ m/min}$ je nach Qualität
Sequenzguß ... mit Formatwechsel	Pfannendrehturm nimmt neue Pfanne auf und schwenkt drehend ein in Gießposition, Schieber öffnen und weitergießen Die Verstellkokille fährt auf den neuen Breiten-sollwert	H	P	$v_{\text{gieß}}$ dekrementieren auf $0,15 \text{ m/min}$
		A	P	$v_{\text{gieß}} = 0,6 - 1 \text{ m/min}$ bis Pfanne leer
Verbund mit Qualitätswechsel	Die Trennstelle des Stranges wird in der Kokille gebildet	H	R	$v_{\text{gieß}}$ dekrementieren auf $0,15 \text{ m/min}$, gezieltes Entlasten der Segmente über das Wegfolgesystem, danach Normalbetrieb
Tundish-Wechsel	Tundish leergießen, anhalten der Gießmaschinen, aus Gießposition heben und neuen Tundish einfahren	H	R	$v_{\text{gieß}}$ auf $0,15 \text{ m/min}$ reduzieren
Gießende/ Ausfördern	Schließen des Strangkopfes in der Kokille; Warmstrang durch die Transportmaschine in Ausförderrichtung ziehen	H	R	Gießende, $v_{\text{gieß}} = 0 \text{ m/min}$
		A	P	
Gießunterbrechungen:				
Pfanne brennen	Mit neuer Pfanne vor dem Angießen, bei Verbund etc.	H	St	3 – 5 min $v_{\text{gieß}} = \text{konst.}$, danach Gießabbruch
Notfunktionen Gießabbruch	Ausfall der Kühlkreisläufe, Hydraulik Tauchrohr schmiert zu Tauchrohr fällt ab Durchbruch Mitlauf von Schlacke in die Kokille Pfannenschieber läuft durch Stopfenläufer	A / H	St	
Störungen, Strangstecker	Antriebe können Strang nicht weiterfördern	H	St	Kühlwasser reduzieren, Segmente hydraulisch entlasten, ggf. Strang brennen und Strang ausfördern
Betriebsarten: H Hand T Test A Automatik		Betriebszustände: U Unbelegt St Störung P Produzieren W Wartung R Rüsten F Freischicht		

Table 1. Example of the specification of operating modes and conditions

Function	Description of function	Operating mode	Operating condition	Explanations
Dummy-bar test run	Convey measuring head of dummy-bar through the strand in casting direction	T	W	Check plant condition
Dummy-bar run	Simulation of charging, casting, delivery	T	W	Simulate plant functions
Charge dummy-bar	Move dummy-bar into the strand via the tilting chute up to the advance position Inching up to casting position	A H	U, R U, R	
Prepare ladle for integral casting	Place ladle in turnstile, turn to casting position, lower arm, open valve, fill tundish	H	U, R	
Integral casting	Open tundish stopper, pull dummy-bar and hot strand through the transport and conveying facility in casting direction; separate dummy-bar from hot strand Meniscus control "On"	H A	P P	Casting start, $v_{\text{cast}} = 0.15$ m/min, incrementing to specified value, selective relieving of segments via position-sensing system, followed by normal operation
Individual casting	Casting until ladle empty, tundish empty	A	P	$v_{\text{cast}} = 0.6$ to 1 m/min depending on quality
Sequential casting	Ladle turnstile receives new ladle and swivels it to casting position, open valve and continue casting	H	P	Decrement v_{cast} to 0.15 m/min
... with change of size	The adjustable mould changes to the new specified width	A	P	$v_{\text{cast}} = 0.6$ to 1 m/min until ladle is empty
Composite casting with change in quality	The separating mark is formed in the mould	H	R	Decrement v_{cast} to 0.15 m/min, selective relieving of segments via position-sensing system, followed by normal operation
Change of tundish	Clear tundish, stop casting machines, lift from casting position, enter new tundish	H	R	Reduce v_{cast} to 0.15 m/min
Casting end/Delivery	Close strand head in the mould; pull hot strand through the transport and conveying facility in delivery direction	H A	R P	Casting end, $v_{\text{cast}} = 0$ m/min
Interruptions of casting:				
Burn ladle	With new ladle prior to integral casting, for composite casting, etc.	H	St	v_{cast} constant for 3 to 5 min, then casting abort
Emergency functions Casting abort	Failure of cooling circuits, hydraulics Submerged tube clogged Submerged tube falls off Break-out Slag carried over into mould Running ladle valve Running stopper	A / H	St	
Malfunctions, sticking strand	Drives cannot convey strand further on	H	St	Reduce cooling water, relieve segments hydraulically, burn strand, if required, and deliver strand
Operating modes: H Manual T Test A Automatic		Operating conditions: U Unassigned St Malfunction P Production W Maintenance R Setting F Idle shift		

- Pro Symptom die Sofortmaßnahmen (übergeordnete Prioritäten) betriebsartabhängig festlegen und bewerten
- Symptombezogen die übergreifenden Prüfmaßnahmen festlegen und bewerten
- Für die einzelnen Symptome die möglichen Störungsauslöser mit den dazugehörigen Fehlerursachen festlegen und bewerten
- Pro Auslöser und Fehler Prüfmaßnahmen festlegen, die eine Aussage über das fehlerhafte Arbeiten des Auslösers erlauben
- Für die Auslöser und Fehler die Behebungsmaßnahmen festlegen
- Pro Auslöser und Fehler betriebliche Informationen und Empfehlungen, bezogen auf die jeweiligen Zusammenschaltungen der Geräte, festlegen und bewerten

Die einzelnen Schritte können iterativ erfolgen, und während des Lebenszyklus der Anlage sollten die getroffenen Festlegungen bei Bedarf überprüft und den jeweiligen Gegebenheiten angepaßt werden. Diese Überlegungen liefern die Basis für die Diagnose und die Schwachstellenanalyse.

3 Zustandserfassung und -bewertung

3.1 Definition der Sollzustände

Ausgehend vom entwickelten Funktionsmodell und den zugeordneten Betriebszuständen, müssen die angestrebten Sollzustände festgelegt werden. Dazu gilt es, aussagefähige Zustandsmerkmale zu bilden, deren Eigenschaften zusammengefaßt eine möglichst detaillierte Unterscheidung verschiedener Zustände erlauben. Im günstigsten Fall ist ein Zustandsmerkmal identisch mit einer Meßgröße, z.B. die Temperatur an einem Meßpunkt bei thermischer Überwachung. Bei komplexeren Zuständen ist analog zur Kennzahlenbildung eine Verdichtung mehrerer Meßgrößen zu zustandsbeschreibenden Merkmalen erforderlich.

Entscheidend bei der Merkmalbildung ist, daß sich die ausgewählten Zustandsmerkmale bei Veränderungen des Anlagenzustands rechtzeitig und eindeutig meßbar ändern, so daß eine präventive, gezielte Instandhaltungsmaßnahme möglich ist.

Neben der direkten Erfassung von Anlagenzustandsänderungen können auch Veränderungen des Zustandes der auf der Anlage gefertigten Produkte Hinweise auf den Anlagenzustand liefern. Dazu werden die entsprechenden Produkt-Sollzustände benötigt. Diese Sollzustände werden über entsprechende Qualitätsmerkmale (Abmessungen und Werkstoffeigen-

- For each symptom, specify and evaluate immediate measures (superior priorities) depending on the operating mode
- For each symptom, specify and evaluate the general checking measures
- For each symptom, specify and evaluate the possible sources of malfunction with their associated causes of fault
- For each source of malfunction and fault, specify checking measures which allow to make a statement on the malfunctioning of the source
- Specify remedial measures for each source of malfunction and fault
- For each source of malfunction and fault, specify and evaluate operational information and recommendations with respect to the different interconnections of the units

The individual steps can be iterated, and during the service life of the plant, the specifications should be revised as required and adapted to the current conditions. These considerations form the basis for diagnosis and weak-point analysis.

3 Detection and evaluation of condition

3.1 Definition of specified conditions

The desired conditions shall be specified on the basis of the functional model developed and the associated operating conditions. To this end, it is necessary to develop meaningful condition features which, altogether, allow to distinguish different conditions in as much detail as possible. Ideally, a condition feature is identical with a measured quantity, e.g. the temperature at a measuring point in the case of temperature detection. Analogously to the specification of parameters, more complex conditions require the combination of several measured quantities to yield features that describe the condition.

In the extraction of features, it is essential that the selected condition features adapt in good time and in a clearly measurable way if the condition of the plant changes. This will allow specific preventive maintenance measures.

In addition to the direct detection of changes in the plant condition, changes in the condition of the product produced by the plant in question can also provide information on the plant condition if the corresponding specified product conditions are available. These specified conditions are defined by means of appropriate quality features (dimensions and material char-

Tabelle 2. Sollzustände der geschlossenen Maschinenkühlung einer Stranggußanlage im Automatikbetrieb
Table 2. Specified conditions of the closed machine cooling system of a continuous casting plant under automatic operation

Wert Value	Sollzustand Specified condition	Obere Warnung Upper warning limit	Untere Warnung Lower warning limit	Alarm
Wasserdruck vor der Verteilung Water pressure before distribution	6 bar 6 bars	–	5 bar 5 bars	4 bar 4 bars
Wassermenge Vorlauf Water flow rate	14 000 l/min	–	10 000 l/min	8 300 l/min
Wassertemperatur Rücklauf Return water temperature	45 °C	80 °C	–	90 °C

schaften) definiert, die aus den charakteristischen Produkteigenschaften abzuleiten sind.

Nach erfolgter Festlegung der zustandsbeschreibenden Merkmale werden im nächsten Schritt in Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebszustand der Anlage Sollwerte für die Meßgrößen sowie entsprechende Toleranzen festgelegt, in denen sich der Anlagenzustand bewegen darf, ohne eine Fehlermeldung auszulösen (Tabelle 2).

Das Festlegen der Sollwerte und Toleranzgrenzen sollte auf Basis von Kriterien geschehen, die je nach Unternehmensvorgabe ausgewählt und gewichtet werden. Im folgenden sind einige Beispiele für solche Kriterien aufgelistet:

- Anlagenverfügbarkeit
- Anlagenbetriebszustand
- Anlagensicherheit (gesetzliche Auflagen)
- Arbeitssicherheit
- Produktionsausstoß
- Produktqualität
- Personaleinsatz für Instandhaltung
- Wirtschaftlichkeit

Bild 4 gibt einen Überblick über mögliche Meßgrößen und Kennzahlen zur Zustandserfassung.

Die unterschiedliche Eignung der aufgeführten Meßgrößen leitet sich aus den wichtigsten Anforderungen an die Meßverfahren (siehe Abschnitt 3.2) ab. Als solche sind zu nennen:

- sichere Aussage bezüglich des Trends der Veränderung
- hohe Zuverlässigkeit des gesamten Meßsystems unter betrieblichen Bedingungen
- einfache Handhabbarkeit des Meßsystems (wartungsarmer Betrieb, Selbstkalibrierung, Robustheit)
- Meßmöglichkeiten für frühe Schädigungen während des laufenden Betriebes
- Kosten des eingesetzten Verfahrens

acteristics) which can be derived from the characteristic product properties.

Following the specification of the features serving to describe the conditions, the next step consists in determining, for each operating condition of the plant, specified values for the measured quantities as well as the corresponding tolerances within which the plant condition may vary without a fault message being triggered (Table 2).

The specified values and tolerance limits should be determined on the basis of criteria which are selected and weighted depending on the company's requirements. Some examples of such criteria are listed below:

- Plant availability
- Plant operating condition
- Plant safety (legal provisions)
- Health and safety at work
- Production output
- Product quality
- Maintenance personnel required
- Economic efficiency

Figure 4 gives a survey of possible measured quantities and parameters for condition detection.

As a result of the main requirements to be met by measurement methods (see Section 3.2), the measured quantities listed are suitable to different degrees. Such requirements are:

- reliable statement regarding the trend of a change
- high reliability of the entire measuring system under operational conditions
- easy handling of the measuring system (low maintenance, self-calibrating, robustness)
- means for early detection of damage while the plant is in operation
- cost of the procedure applied

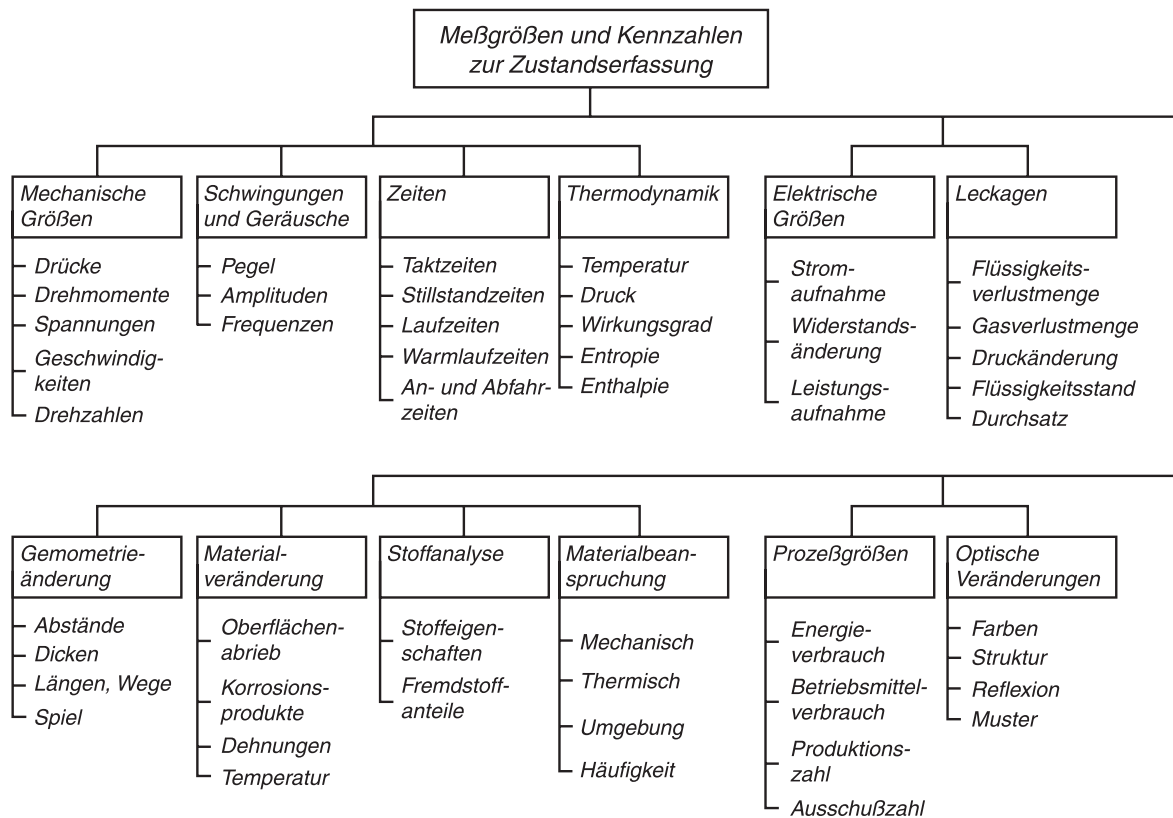


Bild 4. Meßgrößen und Kennzahlen zur Zustandserfassung (in Anlehnung an [1])

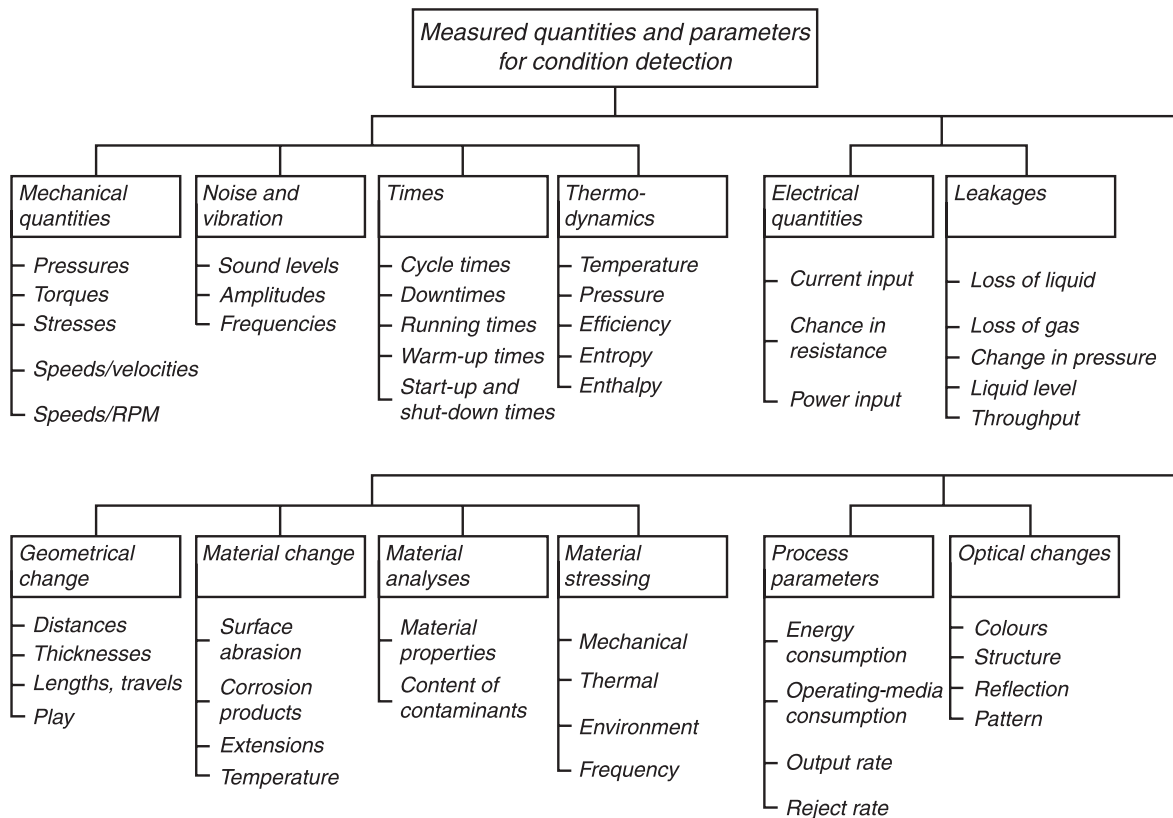


Fig. 4. Measured quantities and parameters for condition detection (following [1])

Um eine aussagekräftige und zugleich wirtschaftliche Lösung zu finden, ist daher bei der Sollzustandsbeschreibenden Merkmalauswahl und der daraus resultierenden Festlegung der geeigneten Meßverfahren zur Ermittlung der Merkmale eine iterative Vorgehensweise zu empfehlen.

3.2 Erfassung der Istzustände

Die Auswahl der Meßgrößen zur Beschreibung des Sollzustands und der Zustandsgrenzen hat entscheidenden Einfluß auf den Aufwand bei der Erfassung des Istzustands und die Genauigkeit der Zustandsbeurteilung.

Die subjektive Erfassung des Istzustands wird durch den Gebrauch der menschlichen Sinnesorgane, also durch Hören, Sehen, Fühlen und Riechen, ohne Einsatz meßtechnischer Geräte durchgeführt. Falls erforderlich, können zur Verbesserung der Aussagegenauigkeit beispielsweise Hilfsmittel wie Stethoskope zur Lokalisierung intensitätsarmer Geräusche, Endoskope zur Besichtigung von Hohlkörpern mit kleiner Öffnung oder die Infrarottechnik zum Feststellen heißer Stellen an elektrischen Kontakten benutzt werden. Vorteile sind in dem geringen Zeitaufwand und den geringen Kosten zu sehen. Nachteilig ist jedoch die Abhängigkeit des Inspektionsergebnisses von den Erfahrungen des Überprüfenden.

Die objektive Zustandserfassung erfolgt mit Hilfe von Meßgeräten. Der festgestellte Zustand liegt in Form von Meßwerten oder Kenngrößen vor und führt, mit einem Zustandsgrenzwert verglichen, zu einer objektiven Zustandsbewertung. Die objektive Zustandserfassung ist unabhängig von den Erfahrungen des Überprüfenden und weist einen deutlich höheren Informationsgehalt auf als die subjektive Zustandserfassung.

Eine direkte Meßgröße zur Erfassung der Schädigung ist beispielsweise das Lagerspiel an einem Gleitlager, welches mittels Meßuhr als radiale Bewegung der Welle gemessen werden kann. In solchen Fällen sind meist sehr präzise Aussagen formulierbar, wobei oftmals aufwendige Demontagen der Betrachtungseinheit erforderlich sind. Dies kann zu zusätzlichen Stillstandszeiten und demontagebedingten Schädigungen führen. Der Forderung nach einer demontagelosen bzw. -armen Erfassung des Istzustands kann durch die Wahl einer indirekten Meßgröße, beispielsweise der Messung der Schwingbeschleunigung zur Überwachung von Getrieben oder die Aufnahme von Temperaturen, deutlich besser nachgekommen werden. Die Messung der Schwingbeschleunigung ist eine objektive Erfassung des Istzustands, wobei die Aufnahme von Temperaturen auf subjektivem oder objektivem Wege erfolgen kann.

To find a meaningful and cost-effective solution, it is therefore recommended to apply an iterative procedure for the selection of the features describing the specified conditions and for the resulting specification of measurement methods suitable to determine the features.

3.2 Detection of actual conditions

Which measured quantities to describe the specified condition and which condition limits are selected has a decisive influence on the expense incurred in detecting the actual condition and on the accuracy of condition evaluation.

The subjective detection of the actual condition relies on the human senses, i.e. hearing, sight, touch and smell, without using any measuring instruments. To improve the accuracy of the statement, if required, auxiliary means may be used, such as stethoscopes to locate faint noises, endoscopes to examine hollow parts with a small opening, or infrared technology to identify hot spots at electrical contacts. Low expenditure of time and low costs are advantageous here. It is a drawback, however, that the inspection result depends on the inspector's experience.

Objective condition detection uses measuring instruments. The identified condition is available in the form of measured values or parameters and, after comparison with a condition limit, leads to an objective condition evaluation. The objective condition detection is independent of the inspector's experience, and its information content is considerably higher than that of subjective condition detection.

An example of a direct measured quantity for the detection of damage is the bearing play of a slide bearing, which can be measured in terms of the radial movement of the shaft by means of a dial gauge. In most of such cases, very precise statements can be made. However, this often requires a costly disassembly of the item inspected. This may result in additional standstill times and damage caused by the disassembly. The requirement of detecting the actual condition without disassembly or with only little disassembly work required, can rather be met by selecting an indirect measured quantity, e.g. by measurement of the vibration acceleration to monitor gears, or by temperature sensing. The measurement of the vibration acceleration is an objective detection of the actual condition, whereas the temperature sensing may be either objective or subjective.

Die subjektive Zustandserfassung geschieht zu festgelegten Inspektionsterminen, wobei das Inspektionsintervall gleichbleibend ist oder von der zuletzt durchgeführten Zustandsbewertung abhängen kann. Fordert der konkrete Anwendungsfall eine objektive Erfassung des Istzustands, ist zwischen einer kontinuierlichen und einer diskontinuierlichen Inspektionsdurchführung zu unterscheiden.

Inspektionsgeräte zum Zweck der kontinuierlichen Zustandserfassung sind an der Betrachtungseinheit fest installiert und signalisieren den Zustand des ausgewählten Zustandsmerkmals während des Betriebs. Durch die Verbindung des Inspektionsgerätes mit einem Diagnosesystem können bei eintretenden unzulässigen Zustandsveränderungen entsprechende Aktionen ausgeführt werden (z.B. Not-Aus, Regelfunktion ausüben), so daß eine hohe Überwachungssicherheit gewährleistet ist. Dem hohen Bedarf an Inspektionsgeräten und eventuell Diagnosesystemen sowie dem anfallenden Aufwand für die Instandhaltung der Inspektionsgeräte muß hierbei Rechnung getragen werden.

Bei der diskontinuierlichen Zustandserfassung werden die Inspektionsmaßnahmen nach festgelegten Intervallen oder Arbeitsleistungen mittels fest installierter oder ambulanter Technik durchgeführt. Die Betrachtungseinheit ist dabei in der Regel aus dem Produktionsprozeß ausgegliedert. Diskontinuierliche Zustandserfassung zeichnet sich durch einen geringeren Bedarf an Inspektionsgeräten bei gleichzeitig höherem Personaleinsatz gegenüber der kontinuierlichen Zustandserfassung aus.

3.3 Zustandsbewertung und Prognose

Voraussetzung für die Bewertung des Verhaltens des Zustandsmerkmals ist, daß Zustandsgrenzen (z.B. Schadens-, Aussonderungs-, Betriebssicherheits- oder Verschrottungsgrenze) benannt werden können.

Hat das ermittelte Zustandsmerkmal den festgelegten Grenzwert erreicht, sind Instandsetzungsmaßnahmen einzuleiten, bevor Schäden entstehen können. Befindet sich das Zustandsmerkmal noch innerhalb der zulässigen Grenzen, ist ein weiterer Betrieb der Anlage möglich. Durch die Differenz des Zustandsmerkmals und des Merkmals, das den Sollzustand beschreibt sowie die Geschwindigkeit, mit der das Zustandsmerkmal sich von dem Sollwert entfernt oder auf einen Grenzwert (z.B. Schadensgrenze) zustrebt, können nachfolgende Inspektionstermine festgelegt und eine Prognose, d.h. eine Ermittlung der Abnutzungsreserve, durchgeführt werden. Die Aussagefähigkeit des Zustandsmerkmals und damit der Prognose wird deutlich gemindert, wenn bei der Merkmalauswahl der Einfluß eintretender Störungen an

The subjective condition detection is performed at specified inspection dates. The inspection interval is either regular or may vary depending on the latest condition evaluation. If a specific application calls for an objective detection of the actual condition, a distinction shall be made between continuous and discontinuous inspections.

Inspection devices for the purpose of continuous condition detection are fixed to the item inspected and signal the condition of the selected condition feature during operation. By connecting the inspection device to a diagnosis system, any inadmissible change in condition that occurs can trigger appropriate action (e.g. emergency stop, execute control function) so that a high reliability of monitoring is ensured. Consider a large number of inspection devices and, possibly, diagnosis systems, and the time and cost needed for maintenance of the inspection devices.

For discontinuous condition detection, the inspection measures are taken at specified intervals or after completion of specified tasks, using fixed or removable devices. As a rule, the item inspected is separated from the production process for the inspection. The discontinuous condition detection is characterised by only few inspection devices being required whereas more personnel is needed as compared to the continuous condition detection.

3.3 Condition evaluation and prediction

The evaluation of the characteristics of a condition feature requires that condition limits (e.g. damage limits, reject limits, operational reliability or scrap-ping) can be identified.

If the condition feature determined reaches the specified limit value, corrective maintenance measures shall be taken in order to avoid any damage. If the condition feature still lies within the admissible limits, it is possible to continue operation of the plant. The difference between the condition feature and the feature describing the specified condition, and the rate at which the deviation of the condition feature from the specified value increases or at which a limit value (e.g. damage limit) is approached can be used to determine subsequent inspection dates and to make a prediction, i.e. determination of the wear reserve. The condition feature and thus the prediction are much less informative if the influence of malfunctions that may occur at the item inspected and/or at adjacent sub-assemblies have not been accounted for

der Betrachtungseinheit und/oder an benachbarten Baugruppen keine Beachtung fand.

Die Bewertung des Zustandsverhaltens kann u.a. als Alternativbewertung oder als Restnutzungsdauerprognose erfolgen. Die Alternativbewertung sieht eine Aussage hinsichtlich „funktionsfähig“ oder „nicht funktionsfähig“ vor, wobei der Vergleichswert zahlenmäßig, in verbaler Form oder in Vergleichsbildern vorliegen kann.

Bei Anwendung der Restnutzungsdauerprognose wird auf der Grundlage des Zustandsmerkmals, des Inspektionszeitpunkts, des Zusammenhangs zwischen Zustandsmerkmal und Nutzungsdauer und des festgelegten Grenzwertes die verbleibende Abnutzungsreserve prognostiziert. Durch Extrapolation ist der zukünftige Verlauf der Schädigung prognostizierbar, und der nächste Inspektionstermin kann bestimmt werden. Die Restnutzungsdauerprognose kann anhand des Zustandsmerkmals mit direkten Meßgrößen (z.B. Verschleiß) oder indirekten Meßgrößen (z.B. Temperatur) erfolgen. Da der Abnutzungsvorrat gleicher Betrachtungseinheiten durch innere und äußere Abnutzungserscheinungen zum gleichen Nutzungsdauerzeitpunkt unterschiedlich ist, ist die Anwendung verschiedener Prognosemethoden erforderlich. Beispiele sind die Prognose nach dem mittleren statistischen oder nach dem individuellen Abnutzungsverlauf [2].

In Bild 5 ist zum einen der Abbau des Abnutzungsvorrats in Abhängigkeit von der Betriebsdauer ($Z = f(t)$, mit Streuung) und zum anderen der Zusammenhang zwischen Diagnosemerkmal (D_X) und Zustandsmerkmal (Z_X) als Kennlinie ($D = f(Z)$, mit Streuung) modellhaft dargestellt.

Eine Prognose bezüglich des Eintretens einer Schädigung ist durch die alleinige Kenntnis der Nutzungsdauer unter Berücksichtigung der dazugehörigen statistischen Streuung möglich. Aufwendiger ist die Prognose der Abnutzungsreserve nach jedem Inspektionstermin. Hierbei muß entweder der Verlauf des Abnutzungsvorrats zu verschiedenen Betriebsdauerzeitpunkten oder bei indirekter Meßgröße der Änderungsverlauf des Diagnosemerkmals über der Betriebsdauer bekannt sein. Da präzise Untersuchungen zu diesem Sachverhalt in den seltensten Fällen vorliegen, ist die Merkmalauswahl und -bestimmung zur Zustandscharakterisierung auch in einer Art Lernphase (teach in) denkbar. Die Präzisierung der Zustandsmerkmale erfolgt sukzessiv nach jedem ausgeschöpften Abnutzungsvorrat der betroffenen Betrachtungseinheit.

Auch bei Einsatz modernster Inspektionsgeräte und Diagnosesysteme sollte auf die subjektive Wahrneh-

in the selection of features.

The evaluation of the condition characteristics can, among other possibilities, be performed as alternative evaluation or as prediction of the residual service life. The alternative evaluation allows a statement as to whether the item inspected is "operative" or "inoperative", with the reference value being available as a number, verbally, or in the form of comparative illustrations.

In case of the prediction of the residual service life, the remaining wear reserve is predicted on the basis of the condition feature, the time of inspection, the relation between condition feature and service life, and the specified limit value. By extrapolation, the future development of the damage can be predicted, and the next inspection date be determined. The prediction of the residual service life can be made on the basis of the condition feature by means of either direct measured quantities (e.g. wear) or indirect measured quantities (e.g. temperature). Since the wear reserve differs for identical items after the same period of service life due to internal and external wear, it is required to apply different prediction methods. Examples are the prediction according to the mean statistical, or the individual, wearing characteristic [2].

Figure 5 models, on the one hand, the decrease in the wear reserve as a function of operating time ($Z = f(t)$, including spread) and, on the other hand, the relation between diagnosis feature (D_X) and condition feature (Z_X) as a characteristic ($D = f(Z)$, including spread).

The occurrence of damage can be predicted if the service life alone is known, taking the associated statistical spread into account. Predicting the wear reserve after each inspection date requires more expense. Here, either the wear reserve at different points in operating time or, if an indirect measured quantity is used, the change of the diagnosis feature over the operating time must be known. Since precise examinations on this matter are very seldom available, it is also possible to select and determine the features for description of the condition during a kind of teach-in phase. The condition features become more and more precise with each time the wear reserve of the item inspected has been used up.

Even if highly sophisticated inspection devices and diagnosis systems are used, plant users should not do

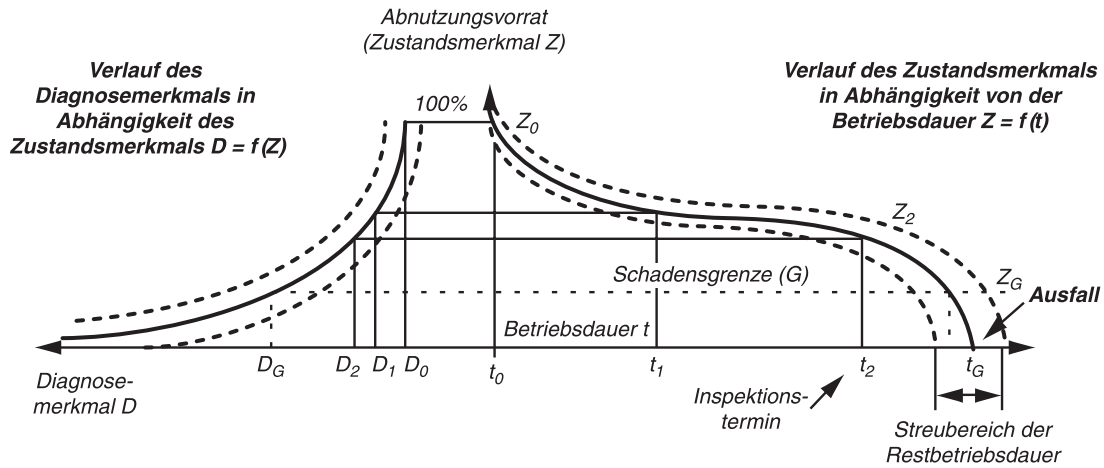


Bild 5. Zusammenhang zwischen Zustands- und Diagnosemerkmal in Abhängigkeit von der Betriebsdauer (in Anlehnung an [3])

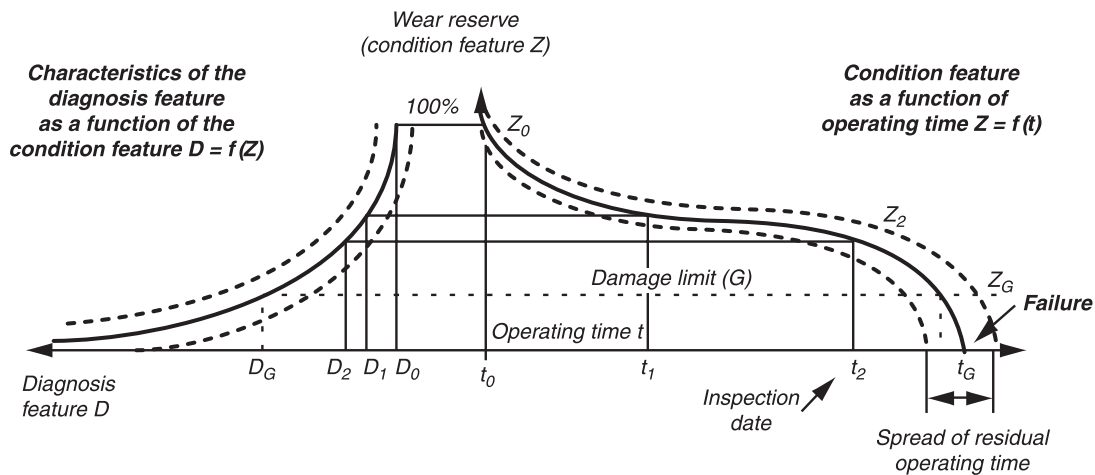


Fig. 5. Relation between condition and diagnosis features as a function of operating time (following [3])

mung der Anlagenbetreiber – wie z.B. Feststellung ungewöhnlicher Geräusche – nicht verzichtet werden. Unsicherheiten bei der Durchführung der Erfassung der Istzustände, der Aufnahme des Verlaufs des Abnutzungsvorrats in Abhängigkeit von der Betriebsdauer, der Festlegung der Schadensgrenze oder bei dem ggf. ermittelten Zusammenhang des Diagnosemerkmals zum Zustandsmerkmal bei der Zustandserfassung mittels indirekter Meßgrößen führen zu einem Fehleranteil, der bei der Prognose der Abnutzungsreserve unbedingt berücksichtigt werden muß.

3.4 Diagnose

Voraussetzung für die Zustandsbewertung sind die Erfassung des Istzustands und der Vergleich mit dem Sollzustand. Es kann auch zweckmäßig sein, die in einem Betrachtungszeitraum beobachtete Änderungsgeschwindigkeit der Zustandsgrößen in die Bewertung mit einzubeziehen. Wird ein unzulässiger Zustand, d.h. Abweichung eines Merkmals vom Soll-

without subjective observations, such as the detection of unusual noises. Uncertainties in the detection of the actual conditions, in the recording of the wear reserve as a function of operating time, in the determination of the damage limit, or uncertainties in the relation between the diagnosis and condition features as may be determined in the case of condition detection by means of indirect measured quantities, result in an uncertainty of the prediction which must by all means be taken into account when predicting the wear reserve.

3.4 Diagnosis

The detection of the actual condition and its comparison to the specified condition are prerequisite to a condition evaluation. It may also be convenient to include the rate of change of condition parameters observed over one inspection interval in the evaluation. If an inadmissible condition, i.e. the deviation of a feature from the specified condition, is recognised,

zustand, erkannt, setzt die Diagnose ein. Für die Zustandsbewertung und die Diagnose werden in der Regel die gleichen Verfahren und Systeme angewendet. So kann ein Modul zur Klassifizierung von Meßdaten sowohl zur Beurteilung von Zuständen als auch zur weitergehenden Diagnose eingesetzt werden.

Diagnosesysteme stellen aus unzulässigen Merkmalabweichungen einen Zusammenhang zu Fehlerart, Fehlerort und Fehlerursache her. Aus diesen Informationen kann eine Fehlerbewertung vorgenommen werden, und es können sinnvolle Betriebszustände (z.B. Teillast oder Stillstand), Instandsetzungsmaßnahmen und Strategien für den Wiederanlauf der Anlage abgeleitet werden. In dezentralen Anlagenstrukturen müssen Diagnosesysteme der jeweiligen Funktion sowohl logisch als auch physikalisch zugeordnet und zugleich in das Gesamtsystem integriert sein.

Bild 6 zeigt eine grundlegende Einteilung der Diagnoseverfahren. Realisiert werden meist hybride Systeme, die die Vorteile der einzelnen Verfahren sinnvoll kombinieren. Bei der Signalanalyse werden aufbereitete Merkmale (z.B. durch Korrelationsanalyse oder Spektraltransformation) mit Grenzwerten verglichen, und daraus wird dann auf einen Fehler geschlossen.

Statistische Diagnose schließt anhand von statistischen Merkmalen auf einen wahrscheinlichen Zusammenhang von Fehlerursache und Fehlerwirkung.

the diagnosis is started. As a rule, the same procedures and systems are used for the condition evaluation and the diagnosis. It is thus possible to use one module for the classification of measured data both for the evaluation of conditions and for further diagnosis.

Diagnosis systems analyse inadmissible deviations in features so as to link them to a type, location, and cause of fault. Based on this information, a fault evaluation can be made, and useful operating conditions (e.g. partial load or standstill), corrective maintenance measures, and strategies for re-starting of the plant can be derived. Where plant structures are decentralised, diagnosis systems shall be allocated to the relevant function both logically and physically while being integrated in the overall system.

Figure 6 shows a general classification of diagnosis procedures. In most practical applications, hybrid systems are realised, which conveniently combine the advantages of the individual procedures. A signal analysis serves to compare preprocessed features (e.g. by means of correlation analysis or spectral transformation) with limit values, and a fault is then inferred from this comparison.

The statistical diagnosis infers a probable relation between fault cause and fault effect from statistical features. As a rule, it is appropriate for small problem ar-

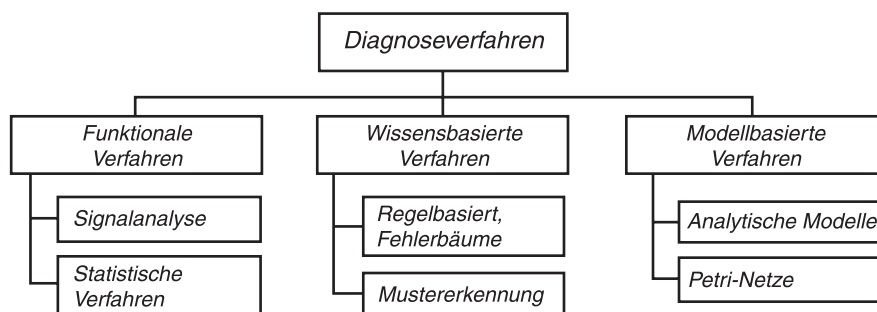


Bild 6. Einteilung der Diagnoseverfahren

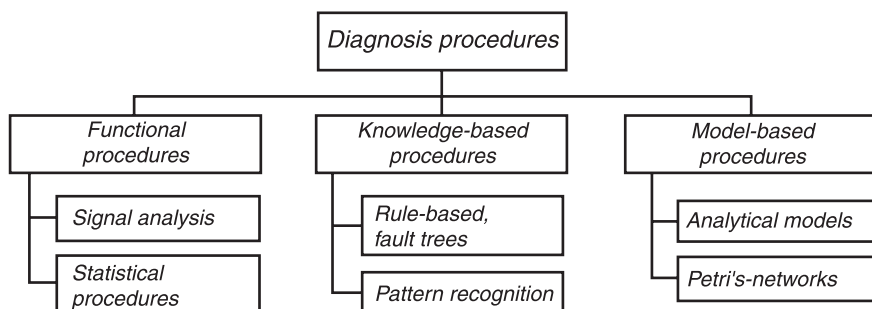


Fig. 6. Classification of diagnosis procedures

Sie ist in der Regel für kleine Problembereiche mit beschränkter Komplexität beziehungsweise für Teilprobleme aus umfangreichen Systemen geeignet.

Assoziative (heuristische) regelbasierte Diagnoseverfahren nutzen Erfahrungswissen in Form einer direkten Kopplung zwischen Symptom und Fehler. Sie sind breit einsetzbar und liefern schnelle Ergebnisse. Nachteilig sind oft die mangelnde Objektivierbarkeit und schlechte Strukturierbarkeit umfangreicher Wissensbasen.

Bei der Diagnose mittels Mustererkennung und Klassifizierung werden Ergebnisse durch einen Musterabgleich zwischen Zustands-, Ereignis- und Fehlermustern und dem realen System gewonnen. Mustererkennung bietet sich immer dann an, wenn die Zusammenhänge zwischen erfaßten Merkmalen und Fehlerursachen komplex sind und in analytischer Form nicht oder nur sehr aufwendig formuliert werden können. Hauptbestandteile von Mustererkennungssystemen sind Komponenten zur Datenerfassung und -vorverarbeitung, zur Merkmalbestimmung und zur Klassifikation. In der Entwurfsphase werden für die festgelegten Merkmale aus bekannten Fehler-situationen die Parameter des Klassifikators bestimmt. Mit neuronalen Netzen und (Neuro-) Fuzzy-Methoden können neue Muster und Gewichtungen der Klassifikatoren trainiert werden. Man spricht dann von lernenden Systemen.

Bei der modellbasierten Diagnose wird der Zusammenhang zwischen Fehlersymptom und Fehler durch explizite kausale Zusammenhänge in der Struktur und dem Verhalten des zu diagnostizierenden Systems dargestellt. Hierzu ist ein fundiertes Wissen über die Strukturen, Funktionen und Abläufe im zu diagnostizierenden System erforderlich. Petri-Netze können ebenfalls als analytische Modelle aufgefaßt werden, bilden aber ereignisorientiertes Systemverhalten ab.

Außer den bisher genannten Verfahren werden noch konventionelle Diagnosetechniken eingesetzt, die offline erstellte Fehlerbäume (DIN 25 424) auswerten, z. B. durch die Fehlermöglichkeits- und -einflußanalyse (FMEA), oder Symptom-Fehlermatrizen bearbeiten. Weiterhin kann man Datenbanken zur Fehlersuche und Zuordnung zu Fehlerklassen nutzen, indem statistische, empirische oder fallvergleichende Suchverfahren angewendet werden.

Übergeordnete Ziele der Diagnose sind:

- Minimierung der Fehlersuchzeiten
- Sicherheit für die Anlagenbetreiber
- Sicherheit für die Anlage
- Sicherstellung der Produktqualität und Vermeidung von Ausschuß

eas with limited complexity, or for partial areas within large systems.

Associative (heuristic) rule-based diagnosis procedures rely on empirical knowledge in the form of a direct connection between symptom and fault. Their scope is wide and they yield fast results. The difficulty to objectify and to structure extensive knowledge bases is often unfavourable.

The diagnosis by pattern recognition and classification obtains results through a comparison of condition, event, and fault patterns with the real system. Pattern recognition is convenient wherever the relations between detected features and fault causes are complex and cannot be stated in analytical form, or only at very high expenditure. The principal components of pattern recognition systems are components for data acquisition and preprocessing, for feature extraction and classification. At the design stage, the parameters of the classifier are determined for the specified features on the basis of known fault situations. Neural networks and (neural) fuzzy-logic methods may be used to teach in new patterns and weightings of the classifiers. Such systems are called adaptive systems.

The model-based diagnosis represents the relation between fault symptom and fault in the form of explicit causal relations within the structure and the characteristics of the system to be diagnosed. This requires a sound knowledge of the structures, functions, and processes in the system to be diagnosed. Petri's-networks may also be regarded as analytical models. However, they model event-oriented system characteristics.

Apart from the above-mentioned procedures, conventional diagnostic techniques are used to analyse fault trees that were generated off-line (DIN 25 424), e.g. by the fault probability and influence analysis, or to handle symptom/fault matrices. Furthermore, data bases may serve for fault localisation and the allocation to fault classes by using statistical, empirical, or case-comparing fault-locating procedures.

Primary objectives of the diagnosis are:

- Minimising fault-locating times
- Safety for the plant user
- Operational reliability
- Ensuring product quality and avoiding rejects

- Steigerung der Anlagenverfügbarkeit
- Senkung des Instandhaltungsaufwands

Die Richtlinie VDI 2889 behandelt ausführlich das Thema „Einsatz wissensbasierter Diagnosemethoden und -systeme in der Instandhaltung“.

- Increasing the plant availability
- Reducing the maintenance costs

The guideline VDI 2889 deals in detail with the subject of "Methods and systems for condition and process monitoring in maintenance".

4 Instandhaltungsmaßnahmen und Betriebsanweisungen

Anhand der Bewertung und Diagnose des Zustands müssen die Auswirkungen auf die Produktionsanlage beschrieben werden. Unter Einbeziehung technischer, organisatorischer und ökonomischer Aspekte sowie gesetzlicher Auflagen ist dann zu entscheiden, ob der Prozeß (eingeschränkt) weitergeführt und wie die Produktionsanlage in einen sicheren Betriebszustand gebracht werden kann. Für den Betrieb der Anlage müssen Vorgaben getroffen werden, um Folgeschäden, Produktionsausfälle, Mängel in der Produktqualität und gefährliche Betriebszustände bis zur geplanten Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen zu vermeiden.

Abhängig von der Zustandsbewertung müssen Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet und terminiert werden. Neben der Störungs- und Schadensbeschreibung sollten Arbeits- und Zeitpläne bereitgestellt und Hinweise auf benötigte Ersatzteile und Werkzeuge sowie die zu erwartenden Ausfallzeiten gegeben werden. Zur Unterstützung der Instandhaltung ist es sinnvoll, aktuelle Anlagendokumentationen, Hilfen der Anlagenhersteller und unter Berücksichtigung von Betriebserfahrungen projektierte Strategien und Vorgehensmodelle (automatisch) bereitzustellen.

Zur Unterstützung der Planung, Steuerung und Kontrolle der Instandhaltung kann es zweckmäßig sein, ein Instandhaltungsplanungssystem (IPS) einzusetzen. Es integriert über geeignete Schnittstellen die Instandhaltung in den inner- und überbetrieblichen Informationsfluß und stellt damit die notwendigen Verbindungen zu anderen Bereichen her, beispielsweise zur Produktion und Qualitätssicherung oder zu externen Dienstleistern (Bild 7). Neben der Instandhaltung ist es aber ebenso wichtig, Maßnahmen zur Verbesserung und Optimierung von Anlage und Prozeß einzubeziehen.

Weitere Hinweise sind in den Richtlinien VDI 2890, VDI 2895 und VDI 2898 zu finden.

4 Maintenance measures and operating instructions

By means of the evaluation and diagnosis of the condition, the effects on the production plant shall be described. Taking into account technical, organisational, and economic aspects as well as legal provisions, a decision must then be made as to whether the process can be continued (to a limited extent) and how the production plant can be restored to a reliable operating condition. Instructions shall be given regarding the operation of the plant in order to avoid consequential damage, losses of production, impairment of product quality, and hazardous operating conditions until the scheduled performance of maintenance measures.

Depending on the condition evaluation, maintenance measures shall be derived and scheduled. In addition to a description of malfunction and damage, working programmes and schedules should be supplied and information be given on the spare parts and tools required and on the downtimes to be expected. For maintenance support, it is convenient to (automatically) provide up-to-date plant documentations, aids by the plant manufacturers, and strategies and models of proceeding planned on the basis of operating experience.

To support the planning, controlling and checking of maintenance, it may be convenient to use a maintenance planning system. It integrates the maintenance, via appropriate interfaces, in the internal and external information flow, thus providing the necessary connections to other sectors, e. g. to production and quality assurance, or to external service enterprises (Figure 7). Apart from maintenance, it is equally important to include measures for improvement and optimisation of plant and process.

For further information, refer to guidelines VDI 2890, VDI 2895 and VDI 2898.

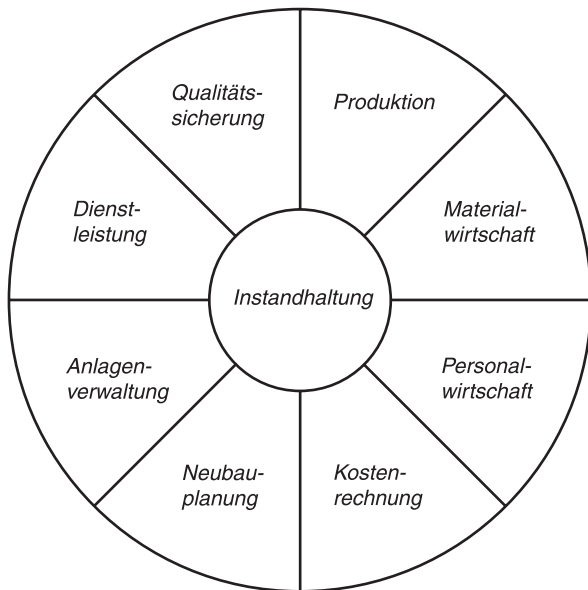


Bild 7. Schnittstellen der Instandhaltung

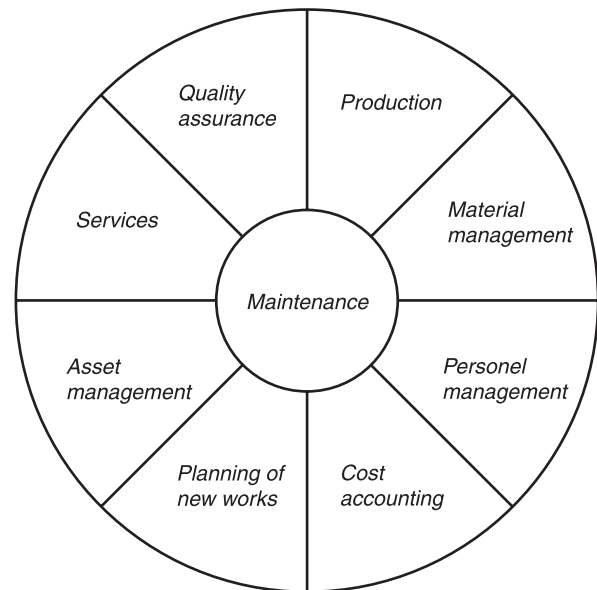


Fig. 7. Maintenance interfaces

5 Schwachstellenanalyse und Optimierung

5.1 Schwachstellenanalyse

Bei der Suche nach Schwachstellen kann man auf verschiedene Weise vorgehen. Es lassen sich drei Arten von Schwachstellenanalysen unterscheiden: die kenngrößenbezogene, die schadenstatistikbezogene sowie die vorbeugende Schwachstellenanalyse [4].

Ausgangspunkt der kenngrößenbezogenen Schwachstellenanalyse ist eine fertiggestellte und installierte Anlage. Durch genaue Beobachtung und aus den Aufschreibungen der Störungen und Schäden erhält der Anwender Hinweise auf mögliche Schwachstellen. Zur Erkennung einer Schwachstelle können als Kenngrößen z.B. Ausfallhäufigkeiten von Bauelementen und Baugruppen oder Kosten (Ersatzteilkosten, Instandhaltungskosten, Produktionsausfallkosten etc.) verwendet werden. Als Analysewerkzeug bietet sich die ABC- oder Pareto-Analyse an.

Die schadenstatistikbezogene Schwachstellenanalyse wird vor allem von Versicherungen, Technischen Überwachungsvereinen und größeren Firmen verwendet. Sie basiert darauf, daß man eine größere Anzahl von Schäden analysiert (siehe VDI 3822). Die Ergebnisse spiegeln prozentual die verschiedenen Schadensarten und Schadensursachen wider.

Durch Anwendung der vorbeugenden Schwachstellenanalyse wird versucht, potentielle Schwachstellen rechtzeitig aufzudecken. Dieser Art der Schwachstellenanalyse liegt der Gedanke zugrunde, daß jede als Störfall oder Schaden zum Ausbruch kommende

5 Weak-point analysis and optimisation

5.1 Weak-point analysis

Different methods of weak-point localisation are available. A distinction can be made between three types of weak-point analysis: parameter-based, damage-statistics-based, and preventive weak-point analyses [4].

A parameter-based weak-point analysis starts from a finished and installed plant. Exact observation and the fault and damage records give the user clues about potential weak points. Parameters that can be used to locate a weak point are, e.g., failure frequencies of elements or sub-assemblies, or costs (spare parts costs, maintenance costs, costs of loss of production, etc.). Appropriate analysing tools are the ABC or Pareto analyses.

The damage-statistics-based weak-point analysis is mainly used by insurers, technical inspectorates, and large-scale companies. It relies on the analysis of a large number of damage events (see VDI 3822). The results represent the different types and causes of damage in percentages.

Preventive weak-point analysis aims at discovering potential weak points in good time. This type of weak-point analysis is based on the idea that before any weak point manifests itself as a failure or damage, it goes through a phase where the element con-

Schwachstelle eine Phase durchläuft, bei der das betroffene Bauelement trotz seiner Fehler noch seine Funktion erfüllt. Erst eine auslösende Ursache oder das Erreichen der Schadensgrenze einzelner Bauelemente erzeugt aus der Schwachstelle eine Schadensstelle.

Eine vorbeugende Schwachstellenanalyse besteht aus drei Schritten: der Funktionsanalyse, der Ausfall-effektanalyse (DIN 25 448) sowie der eigentlichen Schwachstellenanalyse. Die Funktionsanalyse liefert Stellen, an denen die Funktion versagen kann. Diese potentiellen Schwachstellen bilden die Schwerpunkte der anschließenden Ausfalleffektanalyse. Dort werden bei angenommenem Fehler die möglichen Versagenssituationen untersucht, die Verzweigung und Fortpflanzung eines Fehlers wird simuliert, und die dem einzelnen Fehler zugeordneten Schadensursachen werden gewichtet. Ergebnisse der Ausfall-effektanalyse sind: Schwachstellen und ihre Schadensursachen sowie eine qualitative Aussage über die Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Fehlerketten. Im Rahmen der eigentlichen Schwachstellenanalyse wird schließlich untersucht, ob angenommene Fehler bei der Ausfalleffektanalyse tatsächlich auch am Bauteil oder an der Maschine vorhanden sind. Jede Schwachstelle wird einzeln oder im Zusammenhang mit anderen auf ihre Art, Intensität und das zeitliche Ausbruchverhalten untersucht [4].

5.2 Optimierung

Ziel der Optimierung ist es, erkannte Schwachstellen zu eliminieren, die Produktqualität zu verbessern und die Reproduzierbarkeit zu erhöhen. Bei der Optimierung sollte aus Kostengründen zuerst die Prozeßoptimierung erfolgen. Konstruktive Änderungen zur Anlagenoptimierung sind demgegenüber wesentlich kostenintensiver und in den meisten Fällen nur längerfristig zu lösen.

Wichtiges Hilfsmittel für die Prozeß- und Anlagenoptimierung ist die rechnergestützte Simulationstechnik, bei der die Anlage als Modell auf einem Rechner abgebildet wird. Dieses Modell beschreibt die Anlage bezüglich ihres dynamischen Verhaltens. Anlagen- bzw. Prozeßparameter lassen sich mit diesem Werkzeug sehr einfach variieren und deren Auswirkungen auf die dynamischen Eigenschaften entsprechend schnell untersuchen.

Bei der Prozeßoptimierung steht die Frage im Vordergrund, inwieweit sich einzelne Parameter des Prozesses ändern lassen, damit unter sonst gleichen Randbedingungen (z.B. Taktzeiten, Qualität) die Produkte in der mit der Anlage vorgesehenen Art und Weise optimal hergestellt werden können. Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung der Prozeß-

cerned still performs its function despite its faults. It is only by a triggering cause or individual elements reaching the damage limit that a weak point turns into a damage point.

A preventive weak-point analysis consists of three steps: the functional analysis, the failure-mode-and-effects analysis (DIN 25 448), and the actual weak-point analysis. The functional analysis reveals points where the function is likely to fail. The subsequent failure-mode-and-effects analysis focuses on these potential weak points. Possible failure situations are examined for assumed faults, the branching and propagation of faults is simulated, and the causes of damage allocated to each fault are weighted. Results of the failure-mode-and-effects analysis are: weak points and their causes of damage, and a qualitative statement as to the failure probability of each fault chain. Finally, the actual weak-point analysis consists in examining whether faults assumed in the failure-mode-and-effects analysis are actually found in the element or the machine. Each weak point is examined individually or in connection with others, regarding its type, intensity, and the outbreak characteristics over time [4].

5.2 Optimisation

Optimisation serves to eliminate identified weak points, to improve product quality, and to improve reproducibility. For cost reasons, process optimisation should be the first step. Compared to this, design changes for plant optimisation are much more cost-intensive and, in most cases, can only be realised over an extended period of time.

The most important aid for process and plant optimisation is the computer-based simulation technology which allows to generate a model of the plant on a computer. This model simulates the dynamic characteristics of the plant. This tool allows to vary plant and process parameters very easily and, accordingly, their effects on the dynamic characteristics can be quickly examined.

Process optimisation focuses on the question to what extent individual process parameters can be changed without changing the boundary conditions (e.g. cycle times, quality), so that the products are produced optimally in the way envisaged for the plant. A process optimisation can only be successful if the parameters can be changed appropriately.

optimierung ist, daß sich die Parameter in geeigneter Weise ändern lassen.

Führt die Prozeßoptimierung nicht zum gewünschten Erfolg oder ist sie nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren, so müssen die Anlage bzw. deren Bauteile optimiert werden. Die Anlagenoptimierung erstreckt sich auf konstruktive Änderungen einzelner Anlagenelemente. Die Vorgehensweise ist in Abhängigkeit von der Ursache der Schäden zu differenzieren.

If the process optimisation does not yield the desired success, or can only be realised at considerable expense, the plant or its components have to be optimised. The plant optimisation includes design changes to individual plant components. Distinctions in the procedure shall be made depending on the cause of each damage.

Schrifttum/References

Technische Regeln/Technical rules

- VDI 2889 : 1998-04 Einsatz wissensbasierter Diagnosemethoden und -systeme in der Instandhaltung. Berlin: Beuth Verlag
- VDI 2890 : 1986-11 Planmäßige Instandhaltung – Anleitung zur Erstellung von Wartungs- und Inspektionsplänen. Berlin: Beuth Verlag
- VDI 2895 : 1996-12 Organisation der Instandhaltung – Instandhalten als Unternehmensaufgabe. Berlin: Beuth Verlag
- VDI 2898 : 1996-10 DV-Einsatz in der Instandhaltung – Anforderungen und Kriterien. Berlin: Beuth Verlag
- VDI 3822 Blatt 1 : 1984-02 Schadensanalyse – Grundlagen, Begriffe und Definitionen – Ablauf einer Schadensanalyse. Berlin: Beuth Verlag
- VDI 3822 Blatt 2 : 1984-02 Schadensanalyse – Schäden durch mechanische Beanspruchungen. Berlin: Beuth Verlag
- VDI 3822 Blatt 3 : 1990-10 Schadensanalyse – Schäden durch Korrosion in wäßrigen Lösungen. Berlin: Beuth Verlag
- VDI 3822 Blatt 4 : 1999-06 Schadensanalyse – Schäden durch thermische Beanspruchungen. Berlin: Beuth Verlag
- VDI 3822 Blatt 5 : 1999-01 Schadensanalyse – Schäden durch tribologische Beanspruchungen. Berlin: Beuth Verlag

- VDI 3822 Blatt 6 : 1984-02 Schadensanalyse – Erfassung und Auswertung von Schadensanalysen. Berlin: Beuth Verlag
- DIN 25 424-1 : 1981-09 Fehlerbaumanalyse – Methoden und Bildzeichen. Berlin: Beuth Verlag
- DIN 25 424-2 : 1990-04 Fehlerbaumanalyse – Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes. Berlin: Beuth Verlag
- DIN 25 448 : 1990-05 Ausfalleffektanalyse. Berlin: Beuth Verlag
- DIN 40 041 : 1990-12 Zuverlässigkeit – Begriffe. Berlin: Beuth Verlag

Literatur/Bibliography

- [1] *Schneider-Fresenius, W.*: Technische Fehlerfrühdiagnoseeinrichtungen – Stand der Technik und neuartige Einsatzmöglichkeiten in der Maschinenbauindustrie. München, Wien: R. Oldenbourg-Verlag 1985
- [2] *Wohllebe, H.*: Technische Diagnostik im Maschinenbau. Hanser-Verlag 1977
- [3] *Wolf, A., Amthor, W., Fischer, K.*: Zustandsabhängige Instandhaltung – Mittel zur Erhöhung der Verfügbarkeit technischer Systeme. TU Chemnitz, Fertigungstechnik und Betrieb, Berlin 42 (1992)
- [4] *Mexis, N.*: Handbuch Schwachstellenanalyse. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1990