

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURESchwingungsanalysen  
Verfahren und Darstellung  
Multivariate Verfahren  
Vibration analysis  
Procedures and presentation  
Multivariate methodsVDI 4550  
Blatt 3 / Part 3Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.**The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite
Vorbemerkung .....	2
Einleitung .....	2
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	3
<b>2 Normative Verweise</b> .....	4
<b>3 Begriffe</b> .....	4
<b>4 Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	10
<b>5 Multivariate Analyse</b> .....	11
5.1 Grundidee .....	11
5.2 Strategien .....	13
5.3 Multivariate Bewertung .....	28
5.4 Datenausgabe .....	31
<b>6 Zusammenfassung</b> .....	32
<b>Anhang A</b> Hauptkomponentenanalyse .....	34
<b>Anhang B</b> Konzeption umfassender Überwachungssysteme .....	37
B1 Struktur von Überwachungssystemen .....	37
B2 Messgrößen und Kennwerte .....	37
<b>Anhang C</b> Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) .....	40
Schrifttum .....	47
Benennungsindex englisch – deutsch .....	47

Contents	Page
Preliminary note .....	2
Introduction .....	2
<b>1 Scope</b> .....	3
<b>2 Normative references</b> .....	4
<b>3 Terms and definitions</b> .....	4
<b>4 Symbols and abbreviations</b> .....	10
<b>5 Multivariate analysis</b> .....	11
5.1 Basic concept .....	11
5.2 Strategies .....	13
5.3 Multivariate evaluation .....	28
5.4 Data output .....	31
<b>6 Summary</b> .....	32
<b>Annex A</b> Principal component analysis .....	34
<b>Annex B</b> Design of comprehensive monitoring systems .....	37
B1 Structure of monitoring systems .....	37
B2 Measured variables and characteristic values .....	37
<b>Annex C</b> Failure mode and effects analyses (FMEA) .....	40
Bibliography .....	47
Term index English – German .....	47

VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)  
Fachbereich Schwingungstechnik

VDI-Handbuch Schwingungstechnik

## Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/4550](http://www.vdi.de/4550).

## Einleitung

Die Beurteilung mechanischer Schwingungen einer Maschine basiert vorwiegend auf einer Reihe von Kennwerten, wie sie in der Richtlinie VDI 4550 Blatt 1 beschrieben sind. Diese Kennwerte werden über Kennfunktionen aus Schwingungsmessungen gebildet oder berechnet. Das Überschreiten festgelegter Grenzwerte signalisiert einen Warn- oder Alarmzustand.

Zur simultanen Überwachung mehrerer Kennwerte für eine Maschine oder Anlage werden in der Regel mehrere solcher Kennwerte unabhängig voneinander parallel überwacht. Pegelerhöhungen oder Grenzwertüberschreitungen weisen dabei auf einen Fehler im zugeordneten Maschinenelement oder – bei Breitbandüberwachung – auf eine Verschlechterung des dynamischen Gesamtzustands hin. Ein möglicherweise vorhandener statistischer Zusammenhang zwischen den Kennfunktionen wird bei dieser Methode nicht berücksichtigt.

Sieht man zunächst einmal von der globalen Breitbandüberwachung ab, erhält man über die Kennwerte Fehlermeldungen fokussiert auf das zugehörige Maschinenelement, z.B. über den Zustand eines bestimmten Wälzlagers. Wird das Lager als fehlerhaft beurteilt, ist die Maschine eigentlich bereits mehr oder weniger zum Problemfall geworden. Andererseits ist bei fehlerfreiem Lagerzustand ein präziser und umfassender Hinweis auf den Gesamtzustand der Maschine bei dieser Überwachungstechnik nicht gegeben. Hier ist eine Zusammenfassung sämtlicher Kenngrößen zu einem einzelnen Kennwert über den Gesamtzustand anzustreben.

## Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards and those in preparation as well as further information, if applicable, can be accessed on the Internet at [www.vdi.de/4550](http://www.vdi.de/4550).

## Introduction

The assessment of mechanical vibrations of a machine is mainly based on a number of characteristic values, as described in VDI 4550 Part 1. These characteristic values are derived from or calculated by using characteristic functions from vibration measurements. Exceeding defined limit values signals a warning or alarm condition.

For the simultaneous monitoring of several characteristic values of a machine or plant, several such characteristic values are generally monitored in parallel and independently of each other. Level increases or limit violations indicate an error in the associated machine element or – in the case of broadband monitoring – a deterioration in the overall dynamic condition. A possibly existing statistical connection between the characteristic functions is not taken into account with this method.

Disregarding global broadband monitoring for the moment, error messages are obtained focussing on the associated machine element, e.g. about the condition of a particular rolling bearing. If the bearing is assessed as faulty, the machine has actually become more or less a problem. On the other hand, if there is no fault in the bearing, there is no precise and comprehensive indication of the overall condition of the machine with this monitoring technology. Here, a combination of all parameters to a single parameter about the overall condition shall be aimed for.

Ein solcher Kennwert wird für ein Überwachungskonzept gewünscht, da damit (genau wie bei einer Breitbandüberwachung) eine schnelle und präzise Beurteilung durch den Anlagenführer möglich ist.

Ein einzelner Gesamtkennwert ist aber auch zur Beurteilung einer guten Maschine wertvoll. Wird dadurch etwa der Zustand als gut angezeigt, kann daraus unmittelbar gefolgert werden, ob die Anlage etwa für ein bevorstehendes Großprojekt geeignet ist oder besser zuvor überholt werden sollte.

In der multivariaten Statistik werden multivariate Verfahren (auch multivariate Analysemethoden) zur simultanen Untersuchung mehrerer statistischer Variablen oder Zufallsvariablen eingesetzt. Solche Verfahren werden in dieser Richtlinie vorgestellt.

In der Statistik sind multivariate Verfahren längst etabliert, sie werden auch in diversen praktischen Fachbereichen bereits routinemäßig eingesetzt, z.B. zur automatischen Diagnose in der Humanmedizin.

Im Bereich der Statistik hat sich eine eigenständige Nomenklatur von Fachbegriffen eingebürgert, teilweise als Synonyme von Begriffen der Schwingungstechnik. In Übereinstimmung mit der Fachliteratur wird diese Nomenklatur auch in dieser Richtlinie weitgehend übernommen. Querverbindungen und Synonymbezeichnungen befinden sich im Abschnitt 3.

Da ein wesentlicher Anwendungsfall im industriellen Bereich die Konzeption ganzheitlicher Überwachungssysteme mit Methoden der FMEA mit dem Ziel einer praxisnahen quantitativen Beurteilung über eine Leistungskennzahl (KPI) sein wird, wurde dieses Verfahren im Anhang ausführlich erläutert.

## 1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie wendet sich an alle, die mit der Konzeption umfassender Überwachungssysteme vor allem bei komplexen Maschinen und Anlagen, befasst sind. Wenn auch vorwiegend Schwingungsgrößen im Mittelpunkt des Interesses stehen, können in multivariate Systeme vom Konzept her zusätzlich Kenngrößen und Parameter anderer Natur integriert werden.

Bei sorgfältiger Auswahl der Parameter kann letztendlich ein Überwachungssystem bis zur vollständigen Komplettüberwachung ausgebaut werden – man spricht dann von einer ganzheitlichen Überwachung. Zu Auswahl und Priorisierung von Parametern und Kenngrößen wurden spezielle Verfahren entwickelt, die in diesem Zusammenhang durchaus interessant und wichtig sind. Sie werden im Anhang dieser Richtlinie vorgestellt.

Such a characteristic value is desired for a monitoring concept, since it enables a quick and precise assessment by the system operator (just as with broadband monitoring).

A single overall characteristic value is also valuable for assessing a good machine. If, for example, the condition is indicated as good, it can be immediately concluded whether the system is suitable for an upcoming major project or whether it should be overhauled first.

In multivariate statistics, multivariate methods (also multivariate analysis methods) are used for the simultaneous analysis of several statistical variables or random variables. Such procedures are presented in this standard.

Multivariate methods have long been established in statistics and are already routinely used in various practical fields, for example, for automatic diagnosis in human medicine.

In the field of statistics, an independent nomenclature of technical terms has become established, in some cases as synonyms of terms as used in vibration technology. In accordance with the specialised literature, this nomenclature is largely adopted in this standard. Cross-connections and synonym names can be found in Section 3.

Since an essential application in the industrial area will be the conception of holistic monitoring systems with methods of the FMEA with the goal of a practical quantitative assessment over a key performance indicator (KPI), this procedure is explained in detail in the Annex.

## 1 Scope

This standard is addressed to anyone involved in the design of comprehensive monitoring systems, especially for complex machines and systems. Although vibration parameters are the main focus of interest, characteristic variables and parameters of a different nature can also be integrated conceptually in multivariate systems.

With a careful selection of the parameters, a monitoring system can ultimately be upgraded to a complete total monitoring system – this is termed holistic monitoring. Special procedures have been developed for the selection and prioritization of parameters and characteristic variables that are of particular interest and importance in this context. They are presented in the Annex to this standard.

Als Ergebnis statistischer Auswertungen ist es möglich, Beurteilungen nicht nur auf feste Grenzwerte einer Kenngröße zu beziehen, es können auch andere, mehr zielgerichtete Kriterien eingeführt werden, wie etwa Fehler- und Fehlalarmwahrscheinlichkeit oder Kostenrisiken bei Maschinenausfall oder durch unnötige Abschaltung.

Einige der vorgestellten Verfahren reduzieren die Beurteilung auf einen einzelnen Zahlenwert, der eine quantitative Aussage über den Gesamtzustand der Maschine liefert. Dieses ermöglicht eine schnelle Beurteilung, die von einer Aussage „gut“ bis zur Anzeige eines Schadens reicht. Die Skalierung kann auf standardisierte Bereiche erfolgen, z.B. 0 bis 10 entsprechend einem Health-Index nach ISO 13374-1. Als Bezeichnung für einen solchen Kennwert wird hier der Begriff *Performance-Index* (entsprechend einer sinngemäßen Interpretation des englischsprachigen Begriffs *Health-Index* nach ISO 13374-1) vorgeschlagen.

Im Gegensatz zur breitbandigen Beurteilung nach DIN ISO 20816 stehen hinter dem Performance-Index die ausgewerteten Kennwerte mit ihren jeweiligen diagnostischen Aussagen. Bei gutem Performance-Index nahe 10 kann von einem guten Maschinenzustand ausgegangen werden. Wird ein schlechter Performance-Index angezeigt, stehen im Hintergrund bereits die schadensrelevanten Kennwerte zur Verfügung und können sofort, manuell oder automatisch, abgerufen und angezeigt werden, gegebenenfalls mit entsprechenden Handlungsanweisungen an das Betriebspersonal.

Besondere Bedeutung wird solchen Verfahren im Zusammenhang mit Industrie 4.0 bei der Vernetzung cyber-physischer Systeme zukommen (Internet der Dinge, IoT).

As a result of statistical evaluations, it is possible not only to relate assessments to fixed limit values of a characteristic variable, other, more targeted criteria can also be introduced, such as the probability of errors and false alarms, or cost risks in the event of a machine failure or due to an unnecessary shutdown.

Some of the methods presented reduce the assessment to a single numerical value, providing a quantitative statement about the overall condition of the machine. This enables a quick assessment, which ranges from a “good” rating to the indication of damage. Scaling can be done on standardized ranges, e.g. from 0 to 10 according to a health index according to ISO 13374-1. The term *performance index* (corresponding to an analogous interpretation of the English-language term *health index* according to ISO 13374-1) is proposed here as a term for such a characteristic value.

In contrast to the broadband assessment according to DIN ISO 20816, the performance index is based on the evaluated parameters with their respective diagnostic statements. With a good performance index close to 10, good machine condition can be assumed. If a poor performance index is displayed, the characteristic values relevant to the damage are already available in the background and can be called up and displayed immediately, manually or automatically, if necessary with appropriate instructions to the operating personnel.

Such processes will be of particular importance in connection with Industry 4.0 when networking cyber-physical systems (Internet of Things, IoT).