

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Schwingungsanalysen
Verfahren und Darstellung der Ergebnisse
Begriffe und grundlegende Verfahren

VDI 4550
Blatt 1 / Part 1

Vibration analysis
Procedures and presentation of results
Terminology and basic principles

Ausg. 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
1 Anwendungsbereich.....	4
2 Begriffe.....	4
3 Formelzeichen und Abkürzungen.....	8
4 Allgemeine Anleitungen für grafische Darstellungen.....	9
4.1 Koordinatenachsen.....	9
4.2 Beschriftung.....	10
4.3 Skalierung.....	10
4.4 Notierungen.....	14
4.5 Zweidimensionale Darstellungen.....	15
4.6 Dreidimensionale Darstellungen.....	22
5 Einteilung von Schwingungen nach ihrem zeitlichen Verhalten.....	26
6 Zeitbereichsanalysen.....	27
6.1 Kennwerte und Kennfunktionen.....	27
6.2 Statistische Kenngrößen.....	29
6.3 Hüllkurven.....	35
6.4 Korrelationsfunktion.....	40
6.5 Zeitbereichsmittelung.....	43
6.6 Orbitanalyse.....	43
7 Methodik der Frequenzanalyse.....	48
7.1 Filter.....	48
7.2 Transformation.....	48
7.3 Unschärferelation.....	49
8 Fouriertransformation.....	50
8.1 Übersicht.....	50
8.2 Definition der Fouriertransformation.....	51
8.3 Spektrale Funktionen.....	60
8.4 Zweikanalanalysen.....	61
8.5 Langzeitfrequenzanalyse.....	65
9 Ordnungsanalyse.....	66
9.1 Mitlaufanalyse.....	67
9.2 Selektionsverfahren.....	67
9.3 Resamplingverfahren.....	67
9.4 Zeitvariante Fouriertransformation (Time Variant Discrete Fourier Transform, TVDFT).....	68
9.5 Vold-Kalman-Verfahren.....	68
9.6 Gabor-Ordertracking (GOT).....	68
9.7 Literatur zur Ordnungsanalyse.....	69
10 Separationsverfahren.....	69
10.1 Zielsetzungen.....	69
10.2 Cepstrumanalyse.....	69
10.3 Hilberttransformation.....	71
Schrifttum.....	73

Contents	Page
Preliminary note.....	2
Introduction.....	2
1 Scope.....	4
2 Terms and definitions.....	4
3 Symbols and abbreviations.....	8
4 General information about graphic presentations.....	9
4.1 Coordinate axes.....	9
4.2 Labelling.....	10
4.3 Scaling.....	10
4.4 Annotations.....	14
4.5 Two-dimensional presentation.....	15
4.6 Three-dimensional plots.....	22
5 Classification of vibrations according to their time behaviour.....	26
6 Time domain analyses.....	27
6.1 Characteristic values and characteristic functions.....	27
6.2 Statistical parameters.....	29
6.3 Envelopes.....	35
6.4 Correlation function.....	40
6.5 Time-domain averaging.....	43
6.6 Orbit analysis.....	43
7 Methodology of frequency analysis.....	48
7.1 Filters.....	48
7.2 Transformation.....	48
7.3 Uncertainty principle.....	49
8 Fourier transform.....	50
8.1 Overview.....	50
8.2 Definition of the Fourier transform.....	51
8.3 Spectral functions.....	60
8.4 Two-channel analyses.....	61
8.5 Long-term frequency analysis.....	65
9 Order analysis.....	66
9.1 Tracking analysis.....	67
9.2 Selection procedure.....	67
9.3 Resampling method.....	67
9.4 Time-variant Fourier transform (time-variant discrete Fourier transform, TVDFT).....	68
9.5 Vold-Kalman method.....	68
9.6 Gabor order tracking (GOT).....	68
9.7 Literature dealing with order tracking.....	69
10 Separation methods.....	69
10.1 Objectives.....	69
10.2 Cepstrum analysis.....	69
10.3 Hilbert transform.....	71
Bibliography.....	73

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), 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 Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/4550.

Einleitung

Diese Richtlinie behandelt, einem steigenden Bedürfnis folgend, die Analyse und Darstellung von Schwingungen. Primäres Ziel sollte es zunächst sein, einheitliche Richtlinien zur Präsentation von Ergebnissen festzulegen, um die Vergleichbarkeit, vor allem in der Zusammenarbeit verschiedener Institutionen zu gewährleisten.

Am Beginn jeder Untersuchung von Schwingungen steht entweder ein analytischer Ansatz als Basis einer Berechnung oder eine Schwingungsmessung – in vielen Fällen auch beides parallel. Die Ergebnisse werden schließlich, je nach dem Ziel der Untersuchung, in unterschiedlichen Formen präsentiert: als numerischer Kennwert oder als Kollektiv von Kennwerten, in Form von Tabellen, grafischen Darstellungen und Ähnlichem. Grundsätzlich kann alles, was zwischen Messung oder rechnerischem Ansatz und repräsentativem Ausgabeformat liegt, als *Darstellung* interpretiert werden. In diesem Sinne wurde diese Richtlinie auch ausgelegt, sie soll auch einen möglichst umfassenden Überblick über verfügbare Analyseverfahren geben und Hilfestellung zur Auswahl von Verfahren bieten. Hier eröffnet sich ein sehr weites Feld von Anwendungen, weshalb die Richtlinienreihe VDI 4550 in mehrere Blätter aufgeteilt ist.

Blatt 1 behandelt, neben allgemeinen Empfehlungen über Analyse und Darstellung, die heute üblichen, weitgehend standardisierten Verfahren, die schon seit Längerem in routinemäßigem Einsatz stehen. Vorwiegend handelt es sich dabei um Verfahren zur Analyse stationärer und weitgehend quasistationärer Vorgänge.

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) 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 can be accessed on the Internet at www.vdi.de/4550.

Introduction

Following a growing demand, this standard deals with the analysis and presentation of vibrations. Primary objective should be first to set uniform guidelines for presenting results in order to ensure comparability, especially when different institutions are working together.

At the beginning of any study of vibrations there is either an analytical approach as basis of a calculation, or vibrations are measured – in many cases even both in parallel. Depending on the aim of the study the results are finally presented in different forms: as a numerical characteristic value or as a collective of characteristic values in the form of tables, graphs, and the like. Basically everything which lies between measurement or the calculation-based approach and the representative output format can be interpreted as *presentation*. This standard has also been prepared with this in mind: it should also provide as comprehensive an overview as possible of the analytical methods available and give assistance in the selection of methods. A very broad field of applications opens up here which is why this series of standards is divided into several parts.

In addition to making general recommendations about analysis and presentation, Part 1 deals with the largely standardized methods as of today which have been in routine use for a relatively long period. It is mainly concerned with methods for analysing stationary and largely quasi-stationary events.

Blatt 2 wird Verfahren zur Zeit-Frequenz-Analyse, die insbesondere zur Untersuchung instationärer Prozesse sowie von transienten Vorgängen geeignet sind, behandeln. Verfahren dieser Klasse sind zum Großteil nicht unbedingt neu, sie sind lediglich durch die zunehmende Leistungsfähigkeit der Rechner, vor allem im Bereich von Personal Computern, erst in den letzten Jahren in den Fokus der praktischen Anwendbarkeit gerückt. Als Bestandteil moderner Software- und Analysepakete sind sie vielfach schon auf einem Rechner installiert, jedoch weitgehend ungenutzt infolge mangelnden Informationsgrads.

Blatt 3 wird sich den heute zunehmend aufkommenden multivariaten Verfahren widmen. Rechnergestützte, vor allem automatisierte Analysen und Bewertungen laufen meist auf eine Beurteilung einzelner Kennwerte hinaus. Sind mehrere Kennwerte, also ein Kollektiv zu beurteilen, erfolgt dieses auf herkömmliche Art vorwiegend parallel und für die einzelnen Werte voneinander unabhängig, obwohl hier in der Regel ein Zusammenhang besteht und demnach statistische Abhängigkeiten gegeben sind. Multivariate Verfahren ermöglichen eine Gesamtbeurteilung basierend auf statistischen Methoden, die bis hin zu einer Gesamtaussage in Form eines globalen Kennwerts führt. Solche Verfahren werden einerseits durch entsprechende Angebote an Hard- und Software sowie durch standardisierte Datenformate gestützt und andererseits für ferngesteuerte Überwachungssysteme in Großanlagen, z.B. Windparks, in zunehmendem Maß auch notwendig.

Insbesondere mit Blatt 3 sind aber auch Entwickler von Messsystemen, vor allem von fernbedienten und vernetzten Systemen angesprochen, wie sie in zunehmendem Maß für verteilte Anlagen erforderlich werden, wo ein direkter Zugang zu den Maschinen nicht zu jeder Zeit möglich, zum Teil sogar nur eingeschränkt planbar ist, z.B. bei Offshore-Anlagen. Hier kommt der Anzeige der Ergebnisse besondere Bedeutung zu, da der Anlagenführer in der Operationszentrale jederzeit den Überblick über eine Vielzahl von Maschinen behalten muss. Dazu müssen Abweichungen oder Fehler klar erkennbar angezeigt werden, Handlungsanweisungen ausgegeben werden oder zumindest zielsicher ableitbar sein.

Blatt 4 ist schließlich der Strukturanalyse vorbehalten. Im Zuge schwingungstechnischer Untersuchungen werden sowohl Schwingungen als physikalische Prozesse wie auch die Eigenschaften schwingungsfähiger Strukturen untersucht. Im ersten Fall wird von *Signalanalyse* zur Untersuchung von Prozessen gesprochen, im zweiten von

Part 2 will deal with procedures for time-frequency analysis which are in particular suitable for investigating non-stationary processes and also transient behaviour. Procedures of this type are for the most part not necessarily new, it is only in recent years, due to the increasing performance of computers, especially personal computers, that they have captured attention with regard to practical applicability. In many cases they are already installed on computers as a part of modern software and analysis packages but remain largely untapped due to lack of adequate information.

Part 3 will be devoted to the multivariate methods which are increasingly emerging today. Computer-aided and in particular automated analyses and evaluations boil down in most cases to an assessment of individual characteristic values. If several characteristic values – in other words, a collective – are to be assessed, the usual way is to do so predominantly in parallel and to examine individual values independently of each other despite that there is usually a relationship between them and thus statistical dependencies. With multivariate methods it is possible to make an overall assessment on the basis of statistical methods which leads right up to a general conclusion in the form of a global characteristic value. Procedures of this kind on the one hand are supported by the software and hardware available and by standardized data formats and on the other hand are even becoming increasingly necessary for remote-controlled monitoring systems in large-scale installations, such as wind farms.

However, Part 3 in particular also addresses the developers of measuring systems, especially remotely controlled and networked systems, such as are becoming increasingly necessary for distributed installations where direct access to machines is not always possible and sometimes can only be scheduled to a limited extent, as can be the case with offshore installations, for example. Here presentation of the results takes on particular importance since the plant operator in the operations centre must at all times keep track of a plurality of machines. Deviations or faults must be displayed in a clearly recognizable manner, and instructions issued or at least be readily deducible.

Finally, Part 4 will be dedicated to structural analysis. During the course of vibration-related studies not only vibrations as physical processes are investigated but also the properties of vibratory structures. In the first case we speak of *signal analysis* for investigating processes, in the second case of *structural analysis*, such as modal analysis or

Strukturanalyse wie Modalanalyse oder Betriebs-schwingungsanalyse.

Anmerkung: Um ein komplexes Gebiet wie die Signalanalyse in sein Umfeld – Messtechnik oder analytischer Ansatz – einzubinden, werden fallweise etwas ausholende mathematische Formulierungen nicht zu vermeiden sein, damit die Verständlichkeit gewahrt bleibt. Es wurde jedoch in dieser Beziehung größter Wert darauf gelegt, dass einerseits durch knappe Formulierung der Lesefluss nicht gestört wird, dass jedoch andererseits eine hohe Durchgängigkeit besteht und Einstiegspunkte für ein vertieftes Studium markiert werden.

1 Anwendungsbereich

Schwingungsanalysen sind auf diversen Gebieten erforderlich: für die Beurteilung des Zustands einer Maschine, von Einwirkungen auf Mensch und Umwelt, zur Ursachensuche und Behebung oder Reduzierung von Schwingungen, zur Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen, zur Fehlerdiagnose.

Die Richtlinie wendet sich an alle, die Schwingungsanalysen durchführen und die Ergebnisse dauerhaft und nachvollziehbar dokumentieren wollen, sei es im eigenen Archiv für spätere Vergleiche, für Trendanalysen oder als Basis für Prognostik, sei es in Form von Fachberichten oder Publikationen.

Nicht zuletzt soll auch dem Anwender von Softwarepaketen ein Überblick über die verfügbaren Werkzeuge mit einer Hilfestellung für deren korrekte Anwendung zur Verfügung gestellt werden.

operational vibration analysis.

Note: In integrating a complex field such as signal analysis into its environment – measurement technology or an analytical approach – somewhat sweeping mathematical formulations will from time to time be unavoidable if intelligibility is to be preserved. However, in this regard the very greatest value has been placed firstly readability not being disrupted by terse formulations and secondly on still maintaining a high degree of consistency and marking points of entry for deeper study.

1 Scope

Vibration analyses are required in various fields: for assessing the condition of a machine, the impacts on humans and the environment, for troubleshooting and the elimination or reduction of vibration, for monitoring the condition of machines and installations, for fault diagnosis.

This standard is addressed to anyone carrying out vibration analyses and wishing to document the results durably and comprehensibly, be this in one's own archive for later comparisons, for trend analyses, or as a basis for prognoses, whether in the form of technical reports or publications.

Last but not least it should provide even the user of software packages with an overview of the tools available together with help regarding their correct application.