

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Merkmale und Erkennbarkeit von nichtlinearen
schwingungsfähigen Systemen
Freie, erzwungene und selbsterregte Schwingungen
Characteristics and recognition of non-linear
vibratory systems
Free, forced and self-excited vibrations

VDI 2060

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	Contents	Page
Vorbemerkung.....	2	Preliminary note.....	2
1 Anwendungsbereich.....	2	1 Scope.....	2
2 Begriffe.....	3	2 Terms and definitions.....	3
3 Formelzeichen.....	8	3 Symbols.....	8
4 Lineares und nichtlineares schwingungsfähiges System.....	9	4 Linear and non-linear oscillatory system.....	9
4.1 Lineares schwingungsfähiges System.....	9	4.1 Linear oscillatory system.....	9
4.2 Nichtlineares schwingungsfähiges System.....	9	4.2 Non-linear oscillatory system.....	9
4.3 Besonderheiten nichtlinearer Kennlinien.....	10	4.3 Special features of non-linear characteristics.....	10
5 Ursachen von Nichtlinearitäten.....	11	5 Causes of non-linearities.....	11
5.1 Übersicht.....	11	5.1 Overview.....	11
5.2 Geometrische Nichtlinearitäten.....	14	5.2 Geometric non-linearities.....	14
5.3 Nichtlineare Eigenschaften von Werkstoffen ..	14	5.3 Non-linear properties of materials.....	14
5.4 Nichtlineare Eigenschaften von Bauteilen.....	22	5.4 Non-linear properties of components.....	22
6 Merkmale und Auswirkungen von Nichtlinearitäten.....	31	6 Characteristics and effects of non-linearities.....	31
6.1 Übersicht.....	31	6.1 Overview.....	31
6.2 Auswirkungen von Nichtlinearitäten bei freien Schwingungen (AF).....	32	6.2 Effects of non-linearities with free vibrations (AF).....	32
6.3 Auswirkungen von Nichtlinearitäten bei erzwungenen Schwingungen (AZ).....	42	6.3 Effects of non-linearities with forced vibrations (AZ).....	42
6.4 Selbsterregung – reiberregte Schwingungen....	45	6.4 Self-excitation – friction-excited vibrations....	45
7 Schwingungserregung, -messung und -analyse ...	46	7 Vibration excitation, measurement and analysis ...	46
7.1 Übersicht.....	46	7.1 Overview.....	46
7.2 Schwingungserregung.....	46	7.2 Excitation of vibration.....	46
7.3 Schwingungsmessung.....	48	7.3 Vibration measurement.....	48
7.4 Schwingungsanalyse.....	48	7.4 Vibration analysis.....	48
8 Erkennen von Nichtlinearitäten aus Messergebnissen.....	48	8 Detection of non-linearities from measurement results.....	48
8.1 Übersicht.....	48	8.1 Overview.....	48
8.2 Nichtlinearitäten des Systems bei freien Schwingungen (F).....	49	8.2 Non-linearities in the system with free vibrations (F).....	49
8.3 Nichtlinearitäten des Systems bei erzwungenen Schwingungen (Z).....	56	8.3 Non-linearities in the system with forced vibrations (Z).....	56
9 Begleitende rechnerische Untersuchungen.....	64	9 Concurrent computational analyses.....	64
9.1 Übersicht.....	64	9.1 Overview.....	64
9.2 Linearisierungen.....	64	9.2 Linearizations.....	64
9.3 Freie und erzwungene Schwingungen.....	64	9.3 Free and forced vibrations.....	64
9.4 Quasieigenfrequenzen.....	64	9.4 Quasi-natural frequencies.....	64
9.5 Quasieigenschwingungsformen.....	65	9.5 Quasi-normal modes of vibration.....	65
9.6 Quasiübertragungsfunktionen (Quasiamplituden- und Quasiphasenfrequenzgänge).....	65	9.6 Quasi-transfer functions (quasi-amplitude response and quasi-phase spectra).....	65
Schrifttum.....	66	Bibliography.....	66

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 VDI-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 VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

1 Anwendungsbereich

Nichtlinearitäten sind Eigenschaften eines schwingungsfähigen Systems. Deren Schwingungsantworten werden bei gegebener Erregung fälschlicherweise als nichtlineare Schwingungen bezeichnet. Sie entstehen jedoch durch das nichtlineare System. Nichtlinearitäten sind immer Systemeigenschaften und nicht Erregereigenschaften.

Bei der Beurteilung von schwingungsfähigen mechanischen Systemen fester Körper treten immer wieder Phänomene auf, die nicht ohne Weiteres auf der Grundlage der Theorie linearer Schwingungen, durch die Anregung und durch die linearen Systemeigenschaften zu erklären sind. Eine mögliche Ursache kann hierbei darin liegen, dass das untersuchte schwingungsfähige System nichtlineare Eigenschaften hat. Diese können beispielsweise begründet sein durch:

- Fertigungsfehler
- Unstetigkeiten in Materialien
- Verschleiß und Bruch
- Einflüsse durch Überbeanspruchung
- nichtlineare Kennlinien von Lagerelementen

Diese Richtlinie soll in erster Linie bei der Beurteilung helfen, aus Messergebnissen das Vorhandensein von nichtlinearen Eigenschaften eines schwingungsfähigen Systems zu erkennen. Damit soll die Anregung als mögliche Ursache nicht erklärbarer Phänomene ausgeschlossen werden.

Weiter soll diese Richtlinie für einige bekannte Fälle eine Hilfe für die Identifikation der Ursache der Nichtlinearität (beispielsweise das Vorhandensein von Rissen oder Spiel) bieten.

Aufgrund der Kenntnis von Nichtlinearitäten in einem vorhandenen System und der dadurch vielfältig gegebenen andersartigen Schwingungsantworten ist es dann möglich, gezielt diese Nichtline-

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.

1 Scope

Non-linearities are properties of an oscillatory system. Its vibration responses under excitation are incorrectly referred to as non-linear vibrations although their occurrence is in fact due to the non-linear system. Non-linearities are always system properties but no exciter properties.

In the evaluation of the oscillatory mechanical systems of solid bodies phenomena are repeatedly encountered which, on the basis of the theory of linear vibrations, cannot simply be explained by the excitation and by linear system properties. One possible reason for this could be the fact that the oscillatory system under investigation has non-linear properties. These could, for example, be due to:

- manufacturing defects
- discontinuities in materials
- wear and fracture
- effects arising from overloading
- non-linear characteristics of bearing elements

This standard is primarily intended to assist in assessing from measurement results whether the presence of non-linear properties can be detected in an oscillatory system. Excitation as a possible cause of inexplicable phenomena should thereby be ruled out.

Furthermore for a number of known cases this guideline should provide assistance in identifying the cause of the non-linearity (for example, the presence of cracks or play).

With a knowledge of non-linearities in a system and the diverse vibration responses which arise thereby, it then becomes possible to selectively reduce these non-linearities and their unwanted

aritäten und deren unerwünschte Wirkungen zu reduzieren, auch oftmals zu vermeiden.

In mancher Hinsicht kann die nichtlineare Eigenschaft eines Systems ebenso methodisch verwendet werden. Einerseits werden Nichtlinearitäten konstruktiv umgesetzt, um z. B. die Größe der Amplituden in Resonanzen zu begrenzen oder mittels Spiel erzeugte stoßförmige Vorgänge für die Verdichtung von körnigen Substanzen zu nutzen. Andererseits kann die Existenz von Nichtlinearitäten als auch deren Quantität und/oder Qualität als Merkmal für die Beurteilung von Beschaffenheit, Verschleiß oder Überbeanspruchung eines Systems herangezogen werden.

Diese Richtlinie gibt Hinweise auf die Auswirkungen von Nichtlinearitäten. Hierbei werden Effekte in einem schwingungsfähigen System beschrieben und Hinweise auf mögliche Ursachen gegeben.

Es werden nachfolgend nur mechanische Schwingungen fester Körper betrachtet.

effects, or even to prevent them completely.

In many respects the non-linear property of a system can be used equally methodically. On the one hand non-linearities are built in, for example, to limit the magnitude of amplitudes in resonances or to use the shock-like processes generated by backlash as a way of compacting granular substances. On the other hand not only the existence of non-linearities but also their quantity and/or quality can be used as a characteristic for evaluating the condition of a system or its wear or overloading.

This standard provides information about the effects of non-linearities. It describes effects occurring in an oscillatory system and provides information about possible causes.

In what follows we shall only be concerned with the mechanical vibrations of solid bodies.