

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEUREDrehschwingungen im Antriebsstrang  
Berechnung, Messung, Reduzierung  
Torsional vibration of drivelines  
Calculation, measurement, reduction

VDI 2039

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 . . . . .	4	Preliminary note . . . . .	4
Einleitung . . . . .	4	Introduction . . . . .	4
<b>1 Anwendungsbereich . . . . .</b>	<b>5</b>	<b>1 Scope . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>2 Normative Verweise . . . . .</b>	<b>6</b>	<b>2 Normative references . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>3 Formelzeichen . . . . .</b>	<b>6</b>	<b>3 Symbols . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>4 Grundlagen zur Berechnung und Messung von Drehschwingungen . . . . .</b>	<b>8</b>	<b>4 Basic principles of calculating and measuring torsional vibration . . . . .</b>	<b>8</b>
4.1 Übersicht . . . . .	8	4.1 Overview . . . . .	8
4.2 Drehschwingung . . . . .	10	4.2 Torsional vibration . . . . .	10
4.3 Winkel, Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung . . . . .	10	4.3 Angle, angular velocity and angular acceleration . . . . .	10
4.4 Drehzahl, Drehfrequenz und Drehwinkelgeschwindigkeit . . . . .	10	4.4 Rotational speed, rotational frequency, and rotation angle velocity . . . . .	10
4.5 Drehmoment . . . . .	11	4.5 Torque . . . . .	11
4.6 Drehmasse, Massenträgheitsmoment . . . . .	11	4.6 Rotating mass, mass moment of inertia . . . . .	11
4.7 Drehfeder, Drehsteifigkeit . . . . .	11	4.7 Torsion spring, torsional stiffness . . . . .	11
4.8 Drehschwingungsdämpfung . . . . .	11	4.8 Torsional vibration damping . . . . .	11
4.9 Drehschwingungsfähiges System, Massensystem . . . . .	15	4.9 Systems capable of torsional vibration, mass-elastic system . . . . .	15
4.10 Eigenfrequenz, Eigenwert und Eigenschwingungsform . . . . .	15	4.10 Natural frequency, eigenvalue and natural modes of vibration . . . . .	15
4.11 Starrkörper-Eigenfrequenz und zugehörige Eigenschwingungsform . . . . .	16	4.11 Rigid-body natural frequency and associated mode shape . . . . .	16
4.12 Elastische Moden . . . . .	17	4.12 Elastic modes . . . . .	17
4.13 Modale Größen . . . . .	17	4.13 Modal values . . . . .	17
4.14 Resonanz, Resonanzfrequenz . . . . .	17	4.14 Resonance, resonance frequency . . . . .	17
4.15 Ungleichförmigkeitsgrad . . . . .	17	4.15 Degree of irregularity . . . . .	17
4.16 Ordnung, Ordnungszahl . . . . .	17	4.16 Order, harmonic number . . . . .	17
4.17 Haupt- und Nebenordnung . . . . .	18	4.17 Major and minor orders . . . . .	18
4.18 Harmonische Analyse, Harmonische . . . . .	18	4.18 Harmonic analysis, harmonics . . . . .	18
4.19 Synthese . . . . .	18	4.19 Synthesis . . . . .	18
4.20 Ordnungsdiagramm, Wasserfall- und Campbelldiagramm . . . . .	18	4.20 Order diagram, waterfall diagram and Campbell diagram . . . . .	18

VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)

Fachbereich Schwingungstechnik

VDI-Handbuch Schwingungstechnik

	Seite		Page
4.21	21	4.21	21
4.22	21	4.22	21
4.23	21	4.23	21
4.24	22	4.24	22
4.25	23	4.25	23
4.26	23	4.26	23
4.27	24	4.27	24
4.28	24	4.28	24
<b>5</b>	<b>25</b>	<b>5</b>	<b>25</b>
5.1	25	5.1	25
5.2	26	5.2	26
5.3	28	5.3	28
5.4	29	5.4	29
<b>6</b>	<b>29</b>	<b>6</b>	<b>29</b>
6.1	29	6.1	29
6.2	30	6.2	30
6.3	34	6.3	34
6.4	40	6.4	40
6.5	41	6.5	41
6.6	42	6.6	42
6.7	43	6.7	43
6.8	45	6.8	45
6.9	46	6.9	46
6.10	46	6.10	46
6.11	48	6.11	48
6.12	48	6.12	48
6.13	49	6.13	49
6.14	51	6.14	51
6.15	54	6.15	54
6.16	54	6.16	54
<b>7</b>	<b>54</b>	<b>7</b>	<b>54</b>
7.1	54	7.1	54
7.2	59	7.2	59
7.3	59	7.3	59
7.4	60	7.4	60
7.5	65	7.5	65
<b>8</b>	<b>72</b>	<b>8</b>	<b>72</b>
8.1	72	8.1	72
8.2	73	8.2	73

	Seite		Page
8.3	73	8.3	73
8.4	73	8.4	73
8.5	80	8.5	80
8.6	81	8.6	81
8.7	83	8.7	83
<b>9</b>		<b>9</b>	
<b>9.1</b>	84	<b>9.1</b>	84
<b>9.2</b>	84	<b>9.2</b>	84
<b>9.3</b>	87	<b>9.3</b>	87
<b>9.4</b>	88	<b>9.4</b>	88
<b>9.5</b>	89	<b>9.5</b>	89
<b>9.6</b>	89	<b>9.6</b>	89
<b>9.7</b>	89	<b>9.7</b>	89
<b>10</b>	91	<b>10</b>	91
<b>10.1</b>	91	<b>10.1</b>	91
<b>10.2</b>	92	<b>10.2</b>	92
<b>10.3</b>	93	<b>10.3</b>	93
<b>11</b>	95	<b>11</b>	95
<b>11.1</b>	95	<b>11.1</b>	95
<b>11.2</b>	96	<b>11.2</b>	96
<b>11.3</b>	97	<b>11.3</b>	97
<b>11.4</b>	101	<b>11.4</b>	101
<b>11.5</b>	101	<b>11.5</b>	101
<b>11.6</b>	101	<b>11.6</b>	101
<b>11.7</b>	102	<b>11.7</b>	102
<b>11.8</b>	105	<b>11.8</b>	105
<b>12</b>	106	<b>12</b>	106
<b>12.1</b>	106	<b>12.1</b>	106
<b>12.2</b>	106	<b>12.2</b>	106
<b>12.3</b>	107	<b>12.3</b>	107
<b>12.4</b>	108	<b>12.4</b>	108
Schrifttum	108	Bibliography	108

### **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.

### **Einleitung**

Der Systemverantwortliche eines Maschinensatzes muss sicherstellen, dass eine Drehschwingungsbeurteilung für den Antriebsstrang durchgeführt wird. Liegen die erforderlichen Kenntnisse und Erfahrungen mit der Berechnung von Drehschwingungen nicht vor, ist es üblich, die Berechnung einem Drehschwingungsexperten zu übertragen. Hierfür ist eine enge Abstimmung und Zusammenarbeit aller Beteiligten erforderlich, um den Umfang der notwendigen Daten und die Berücksichtigung der relevanten Betriebszustände festzulegen.

Diese Richtlinie unterstützt den Projektingenieur dabei, die Bedeutung von Drehschwingungen für seinen Antriebsfall richtig einzuschätzen und ihm ein Verständnis zu vermitteln, das es ihm ermöglicht, notwendige Untersuchungen zu beauftragen oder selbst durchzuführen. Gleichzeitig bietet die Richtlinie bei der notwendigen Absprache zwischen Systemverantwortlichen und Drehschwingungsexperten eine Richtschnur für die vertragliche Festlegung des Umfangs einer Drehschwingungsuntersuchung, sofern keine übergeordneten Regularien vorhanden sind.

Dabei wurde berücksichtigt, dass sich aus der Vielzahl der heute im Einsatz befindlichen Antriebssysteme eine unüberschaubare Anzahl an schwingungsfähigen Systemen ergibt. Die Richtlinie beschränkt sich deshalb nur auf solche Antriebsanlagen, in denen Drehschwingungen von Bedeutung sind, sowie im Wesentlichen auf den Großmaschinenbau.

Drehschwingungen in Antriebssträngen sind die Auswirkungen einer Erregung auf ein drehschwingungsfähiges System.

Neben der Unterstützung für den Projektingenieur soll diese Richtlinie aber auch als Nachschlagewerk

### **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.

### **Introduction**

The system manager of a machine set must ensure that a torsional vibration assessment is carried out for the driveline. In the absence of the necessary knowledge and experience in calculation of torsional vibration it is usual to commission a torsional vibration expert to do the calculations. This calls for close coordination and collaboration between all parties involved in order to define the scope of the data required and to take into consideration relevant operating states.

The present standard helps the project engineer to make a correct assessment of the importance of torsional vibrations for his particular drive case and provides him with the understanding he needs for commissioning necessary investigations or carrying them out himself. At the same time, in the necessary discussions between the system supervisor and the torsional vibration expert the standard offers a guideline for contractual definition of the scope of a torsional vibration analysis in the absence of higher-level rules and regulations.

It takes into consideration the fact that the multitude of drive systems currently in service implies an incalculable number of oscillatory systems. For this reason this standard will limit itself to only those driveline systems in which torsional vibrations are of importance, and then basically to large machines.

Torsional vibrations in drivelines are the effects of an excitation applied to a system capable of torsional vibration.

In addition to support for the project engineer this standard should also serve as a work of reference for

für Drehschwingungsfachleute verstanden werden, da zum einen erstmalig eine einheitliche Nomenklatur vorgeschlagen wird, zum anderen Expertenwissen auf engem Raum zusammengefasst wird.

Außerdem sind Aussagen

- zur Beurteilung von Drehschwingungen, z.B. als Drehwinkel oder als Drehmomente,
- zur Reduzierung von Drehschwingungen mit den wesentlichen Maßnahmen
  - Schwingungsisolierung,
  - Schwingungsdämpfung,
  - Schwingungstilgung,
  - Veränderung der dynamischen Eigenschaften eines Antriebsstrangs durch Veränderung der Größe von Massenträgheitsmomenten und Drehsteifigkeiten sowie
  - Reduzierung der Drehschwingungserregungen,
- zur Erzeugung von Drehschwingungen zu Testzwecken mit den Schwerpunkten „technische Anforderungen an Drehschwingungserreger“ und „physikalische Grundprinzipien der Drehschwingungserzeugung“

Teil dieser Richtlinie.

## 1 Anwendungsbereich

In dieser Richtlinie werden die Komponenten von Antriebssträngen und die häufigsten Schwingungserregungen beschrieben und Fragen der Schwingungsberechnung und der Messung von Drehschwingungen in Antriebssträngen behandelt.

Translatorisch schwingende Systeme sind meistens gefesselt (eingespannt). Hingegen sind rotatorisch schwingende Systeme wie eine rotierende Welle meistens ungefesselt. Deshalb werden in dieser Richtlinie ausschließlich ungefesselte drehschwingungsfähige Systeme mit folgenden Eigenschaften betrachtet:

- Ungefesselte drehschwingungsfähige Systeme weisen die niedrigste Eigenfrequenz  $f_{00} = 0$  auf.
- Die zugehörige Eigenschwingungsform ist eine Starrkörperbewegung. Daher haben auch die Übertragungsfunktionen, gemessene wie berechnete, Resonanzen für  $f = 0$ .
- Die erste von null verschiedene Eigenfrequenz wird mit  $f_{01}$  bezeichnet.
- Drehschwingungsfähige Systeme besitzen mindestens zwei Freiheitsgrade, demgemäß mindestens zwei Eigenfrequenzen  $f_{00} = 0$  und  $f_{01} \neq 0$ .

Einen breiten Raum nimmt die Darstellung der Auswirkungen von Einflussgrößen auf das Schwingungsverhalten eines Antriebsstrangs ein. Dazu gehören:

torsional vibration specialists since, firstly, a uniform nomenclature is proposed for the first time and, secondly, expert knowledge is summarized in compact form.

In addition, information about

- evaluating torsional vibrations as, e.g. angles of rotation or as torques,
- reducing torsional vibrations by means of the essential steps of vibration
  - insulation,
  - vibration damping,
  - dynamic vibration absorption,
  - changing the dynamic properties of a driveline by changing the magnitudes of mass moments of inertia and torsional stiffnesses, as well as
  - reduction of the torsional vibration excitations,
- generating torsional vibrations for test purposes with an emphasis on “the technical requirements made of torsional vibration excitors” and on “the basic physical principles behind the generation of torsional vibration”

forms part of this standard.

## 1 Scope

In this standard the components of drivelines and the most frequent types of vibration excitation are described and questions relating to vibration calculations and the measurement of torsional vibrations in drivelines are treated.

Translatory vibrating systems are in most cases constrained (clamped). On the other hand, rotationally vibrating systems such as a rotating shaft are in most cases unconstrained. For this reason this standard will be exclusively concerned with unconstrained systems capable of torsional vibration and having the following properties:

- Unconstrained torsional vibratory systems have the lowest natural frequency  $f_{00} = 0$ .
- The corresponding mode shape is a rigid body movement. For this reason, the transfer functions, both measured and calculated, have resonances for  $f = 0$ .
- The first natural frequency not equal to zero is designated as  $f_{01}$ .
- Torsional vibratory systems have at least two degrees of freedom, and thus at least two natural frequencies  $f_{00} = 0$  and  $f_{01} \neq 0$ .

Presentation of the effects of influence quantities on the vibratory behaviour of a driveline is given a lot of attention. This includes:

- Nichtlinearitäten, insbesondere der Einfluss von Spielen
  - zeitvariante Kenngrößen von Systemkomponenten, die zu parametererregten Schwingungen führen
  - reiberregte Schwingungen als eine bei Antriebssträngen besonders relevante Form von selbsterregten Schwingungen
  - regenerative Schwingungen
  - Abhängigkeit der Torsionseigenfrequenzen von der Gangwahl bei Schaltgetrieben
  - Auswirkungen von Verschleiß
- non-linearities, especially the influence of backlash
  - time-variant characteristics of system components which lead to parameter-excited vibrations
  - friction-excited vibrations as a form of self-excited vibration of special relevance in drivelines
  - regenerative vibrations
  - dependence of natural torsional frequencies on gear selection in speed-change transmissions
  - effects of wear

---

## 2 Normative Verweise / Normative references

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich: /

The following referenced documents are indispensable for the application of this standard:

DIN 1311-1:2000-02 Schwingungen und schwingungsfähige Systeme; Teil 1: Grundbegriffe, Einteilung ((Mechanical) vibrations, oscillation and vibration systems; Part 1: Basic concepts, survey)

DIN 1311-3:2000-02 Schwingungen und schwingungsfähige Systeme; Teil 3: Lineare, zeitinvariante schwingungsfähige Systeme mit endlich vielen Freiheitsgraden ((Mechanical) vibration, oscillation and vibration systems; Part 3: Linear time-invariant vibration systems with a finite number of degrees of freedom)

VDI 2060:2014-12 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 2062 Blatt 1:2011-05 Schwingungsisolierung; Begriffe und Methoden (Vibration insulation; Terms and methods)

VDI 2722:2003-08 Gelenkwellen und Gelenkwellenstränge mit Kreuzgelenken; Einbaubedingungen für Homokinematik (Cardan shafts and cardan shaft lines; Homokinematic mechanisms)

VDI 3833 Blatt 1:2014-09 Schwingungsdämpfer und Schwingungstilger; Schwingungsdämpfer; Grundlagen, Kenngrößen, Realisierung, Anwendung (Dynamic damper and dynamic vibration absorber; Dynamic damper; Fundamentals, characteristics, implementation, application)

VDI 3833 Blatt 2:2006-12 Schwingungsdämpfer und Schwingungstilger; Schwingungstilger und Schwingungstilgung (Dynamic damper and dynamic vibration absorber; Dynamic vibration absorber and dynamic vibration absorption)