ICS 17.160, 21.200

Juni 2016
June 2016

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Drehschwingungen im Antriebsstrang
Berechnung, Messung, Reduzierung

Torsional vibration of drivelines
Calculation, measurement, reduction

VDI 2039

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Frühere Ausgabe: 08.14 Entwurf, deutsch
Former edition: 08/14 Draft, in German only

Zu beziehen durch / Available at Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin – Alle Rechte vorbehalten / All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2016

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

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.

BESTÄTIGT VDI zuletzt 2025

Inhalt Seite

Vorbemerkung 4
Einleitung 4
1 Anwendungsbereich 5
2 Normative Verweise 6
3 Formelzeichen 6
4 Grundlagen zur Berechnung und Messung von Drehschwingungen 8
4.1 Übersicht 8
4.2 Drehschwingung 10
4.3 Winkel, Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung 10
4.4 Drehzahl, Drehfrequenz und Drehwinkelgeschwindigkeit 10
4.5 Drehmoment 11
4.6 Drehmasse, Massenträgheitsmoment . . . 11
4.7 Drehfeder, Drehsteifigkeit 11
4.8 Drehschwingungsdämpfung 11
4.9 Drehschwingungsfähiges System, Massensystem 15
4.10 Eigenfrequenz, Eigenwert und Eigenschwingungsform 15
4.11 Starrkörper-Eigenfrequenz und zugehörige Eigenschwingungsform 16
4.12 Elastische Moden 17
4.13 Modale Größen 17
4.14 Resonanz, Resonanzfrequenz 17
4.15 Ungleichförmigkeitsgrad 17
4.16 Ordnung, Ordnungszahl 17
4.17 Haupt- und Nebenordnung 18
4.18 Harmonische Analyse, Harmonische . . . 18
4.19 Synthese 18
4.20 Ordnungsdiagramm, Wasserfall- und Campbelldiagramm 18

Contents Page

Preliminary note 4
Introduction 4
1 Scope 5
2 Normative references 6
3 Symbols 6
4 Basic principles of calculating and measuring torsional vibration 8
4.1 Overview 8
4.2 Torsional vibration 10
4.3 Angle, angular velocity and angular acceleration 10
4.4 Rotational speed, rotational frequency, and rotation angle velocity 10
4.5 Torque 11
4.6 Rotating mass, mass moment of inertia . . 11
4.7 Torsion spring, torsional stiffness 11
4.8 Torsional vibration damping 11
4.9 Systems capable of torsional vibration, mass-elastic system 15
4.10 Natural frequency, eigenvalue and natural modes of vibration 15
4.11 Rigid-body natural frequency and associated mode shape 16
4.12 Elastic modes 17
4.13 Modal values 17
4.14 Resonance, resonance frequency 17
4.15 Degree of irregularity 17
4.16 Order, harmonic number 17
4.17 Major and minor orders 18
4.18 Harmonic analysis, harmonics 18
4.19 Synthesis 18
4.20 Order diagram, waterfall diagram and Campbell diagram 18

VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)

Fachbereich Schwingungstechnik

VDI-Handbuch Schwingungstechnik

 Alle Rechte vorbehalten © Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2016

Seite

4.21 Arbeitspunkt (AP) . . . 21
4.22 Maximalwert, Betragsmaximalwert, Spitze-Spitze-Halbe-Wert . . . 21
4.23 Linearer Mittelwert, Effektivwert . . . 21
4.24 Drehschwingungsfähiges System als Kettenschwinger . . . 22
4.25 Verzweigtes drehschwingungsfähiges System, offen und geschlossen verzweigt . 23
4.26 Selbsterregte Schwingungen . . . 23
4.27 Parametererregte Schwingungen . . . 24
4.28 Tangentialdruck, indizierter und effektiver Druck . . . 24

5 Definition eines linearen und eines nichtlinearen schwingungsfähigen Systems . . . 25
5.1 Lineares schwingungsfähiges System . . . 25
5.2 Nichtlineares schwingungsfähiges System . 26
5.3 Auswirkungen von nichtlinearen Systemeigenschaften . . . 28
5.4 Komponenten mit frequenzabhängigen Eigenschaften . . . 29

6 Bestimmung des Schwingungsverhaltens von Komponenten eines Antriebsstrangs . . . 29
6.1 Einführung und Übersicht . . . 29
6.2 Kurbeltriebe . . . 30
6.3 Hubkolbenmaschinen – Motoren und Verdichter . . . 34
6.4 Gasturbinen und Turbokompressoren . . . 40
6.5 Elektromotoren und Generatoren . . . 41
6.6 Kupplungen . . . 42
6.7 Schiffspropeller . . . 43
6.8 Windenergieanlagen (WEA) . . . 45
6.9 Zahnradgetriebe . . . 46
6.10 Gelenkwellen . . . 46
6.11 Hülltriebe . . . 48
6.12 Hubkolbenmotor mit Generator . . . 48
6.13 Hubkolbenmotor mit Propeller – Schiffsantrieb . . . 49
6.14 Fahrzeugantriebe . . . 51
6.15 Drehmomentstützen . . . 54
6.16 Lager . . . 54

7 Drehschwingungsberechnungen . . . 54
7.1 Modellbildung . . . 54
7.2 Kenngrößen und Kennfunktionen der Strukturelemente . . . 59
7.3 Aufstellen der Bewegungsgleichungen . . . 59
7.4 Lösen der Bewegungsgleichungen . . . 60
7.5 Ergebnisse, Beurteilung . . . 65

8 Drehschwingungsmessungen . . . 72
8.1 Einführung . . . 72
8.2 Messgrößen und allgemeine Vorgehensweise . . . 73

Page

4.21 Operating point . . . 21
4.22 Peak value, peak magnitude, half peak-to-peak value . . . 21
4.23 Linear mean value, RMS value . . . 21
4.24 Torsional vibratory system as oscillator chain . . . 22
4.25 Branched torsional vibratory systems, open- and closed-branched . . . 23
4.26 Self-excited vibrations . . . 23
4.27 Parameter-excited vibrations . . . 24
4.28 Tangential pressure, indicated and effective pressure . . . 24

5 Definition of a linear and a non-linear vibratory system . . . 25
5.1 Linear vibratory system . . . 25
5.2 Non-linear vibratory system . . . 26
5.3 Effects of non-linear system properties . . . 28
5.4 Components with frequency-dependent properties . . . 29

6 Determining the vibratory behaviour of driveline components . . . 29
6.1 Introduction and overview . . . 29
6.2 Crank mechanisms . . . 30
6.3 Reciprocating piston engines – combustion engines and compressors . . . 34
6.4 Gas turbines and turbocompressors . . . 40
6.5 Electric motors and generators . . . 41
6.6 Couplings . . . 42
6.7 Ship propellers . . . 43
6.8 Wind energy plants . . . 45
6.9 Gearing . . . 46
6.10 Cardan shafts . . . 46
6.11 Belt and chain drives . . . 48
6.12 Reciprocating piston engines with generator . . . 48
6.13 Reciprocating piston engines with propeller – Ship propulsion . . . 49
6.14 Vehicle drives . . . 51
6.15 Torque arms . . . 54
6.16 Bearings . . . 54

7 Torsional vibration calculations . . . 54
7.1 Modelling . . . 54
7.2 Characteristic quantities and characteristic functions of the structural elements . . . 59
7.3 Setting up the motion equations . . . 59
7.4 Solving the equations motion of . . . 60
7.5 Results, evaluation . . . 65

8 Torsional vibration measurements . . . 72
8.1 Introduction . . . 72
8.2 Measured variables and general procedure . . . 73

All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2016

Seite

8.3 Frequenzbereiche 73
8.4 Messaufnehmer 73
8.5 Probleme bei Drehmomentmessungen . . 80
8.6 Hinweise zur Auswertung und Aufzeichnung von Messergebnissen . . . 81
8.7 Messtechnische Probleme und Anwendung verschiedener Methoden . . 83

9 Nichtlinearitäten, Parametererregungen und Besonderheiten bei Drehschwingungen in Antriebssträngen 84
9.1 Übersicht 84
9.2 Nichtlinearitäten – Ursachen und Auswirkungen 84
9.3 Reiberregte Schwingungen 87
9.4 Parametererregte Schwingungen 88
9.5 Starrkörper-Eigenfrequenzen und resonanzartige Verstärkungen 89
9.6 Veränderungen der Torsionseigenfrequenzen 89
9.7 Wechselwirkungen von Drehschwingungen auf die mechanischen und nicht mechanischen Komponenten eines Antriebsstrangs 89

10 Beurteilung von Drehschwingungen . . . 91
10.1 Übersicht 91
10.2 Beurteilungskennwerte 92
10.3 Anhaltswerte und Grenzen für die Beurteilung – Schwingwinkel, -geschwindigkeit, -beschleunigung . . 93

11 Reduzierung von Drehschwingungen . . . 95
11.1 Einführung 95
11.2 Drehschwingungsisolierung 96
11.3 Drehschwingungstilgung und -tilger . 97
11.4 Verstimmen des drehschwingungsfähigen Systems 101
11.5 Reduzieren und Verändern der Drehschwingungserregung 101
11.6 Drehschwingungsdämpfung 101
11.7 Drehzahladaptiver Tilger (DAT) 102
11.8 Aktive Drehschwingungsbeeinflussung 105

12 Erzeugen von Drehschwingungen 106
12.1 Anwendungsgebiete 106
12.2 Technische Anforderungen 106
12.3 Grundsätzliche physikalische Prinzipien 107
12.4 Anwendungsbeispiel – Ermittlung der Torsionsdauerfestigkeit einer Kurbelwelle 108

Schrifttum 108

Page

8.3 Frequency domains 73
8.4 Transmitter 73
8.5 Problems in torque measurement 80
8.6 Evaluating and recording measurement results 81
8.7 Metrological problems and application of different methods 83

9 Non-linearities, parametric excitations, and special aspects in driveline torsional vibration 84
9.1 Overview 84
9.2 Non-linearities – Causes and effects . . . 84
9.3 Friction-excited vibrations 87
9.4 Parameter-excited vibrations 88
9.5 Rigid-body natural frequencies and resonance-like amplifications 89
9.6 Changes in the torsional naturalfrequencies 89
9.7 Interactions of torsional vibrations with respect to the mechanical and non-mechanical components of a driveline . . 89

10 Evaluation of torsional vibration 91
10.1 Overview 91
10.2 Evaluation characteristics 92
10.3 Guide values and limits for the evaluation – Vibration angle, vibration velocity, vibration acceleration 93

11 Reduction of torsional vibrations 95
11.1 Introduction 95
11.2 Torsional vibration insulation 96
11.3 Torsional vibration absorption and absorbers 97
11.4 Detuning the torsional vibratory system 101
11.5 Reducing and changing torsional vibration excitation 101
11.6 Torsional vibration damping 101
11.7 Speed-adaptive absorber (DAT) 102
11.8 Active influencing of torsional vibration 105

12 Generating torsional vibrations 106
12.1 Areas of application 106
12.2 Technical requirements 106
12.3 Basic physical principles 107
12.4 Example of application – Determining the torsional fatigue strength of a crankshaft 108

Bibliography 108