

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Drehschwingungen 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

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

Seite	Page
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 nicht- linearen 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
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

Seite	Page
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 Drehschwingun- gen 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 Torsionseigen- frequenzen	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 drehschwingungs- fähigen Systems	101
11.5 Reduzieren und Verändern der Drehschwingungserregung	101
11.6 Drehschwingungsdämpfung	101
11.7 Drehzahladaptiver Tilger (DAT)	102
11.8 Aktive Drehschwingungs- beeinflussung	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
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