

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Getriebedynamik  
Schwingungsfähige Mechanismen

VDI 2149

Blatt 2

Transmission dynamics –  
Elastic mechanisms

Inhalt	Seite
Vorbemerkung . . . . .	2
Einleitung . . . . .	2
<b>1 Anwendungsbereich . . . . .</b>	<b>2</b>
<b>2 Formelzeichen und Abkürzungen . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>3 Grundlagen . . . . .</b>	<b>3</b>
3.1 Lagefunktion (kinematische Übertragungsfunktion) . . . . .	3
3.2 Zeitverlauf und Spektrum . . . . .	4
3.3 Eigenfrequenz $f_1$ und Abstimmungsverhältnis $\eta$ . . . . .	5
<b>4 Schwingungsphänomene an Mechanismen. . . . .</b>	<b>8</b>
4.1 Allgemeine Bemerkungen . . . . .	8
4.2 Typische Einzelphänomene . . . . .	8
4.3 Beispiele zur Identifikation der Schwingungsphänomene . . . . .	16
<b>5 Hinweise zur Modellbildung . . . . .</b>	<b>22</b>
5.1 Allgemeines . . . . .	22
5.2 Berechnungsmodell „Elastischer Mechanismus“ . . . . .	23
5.3 Minimalmodell „Schwingungsfähiger Mechanismus“ . . . . .	24
<b>6 Elastischer Abtrieb . . . . .</b>	<b>26</b>
6.1 Einführende Bemerkungen . . . . .	26
6.2 Periodische kinematische Erregung. . . . .	26
6.3 Sprünge in den Lagefunktionen $j$ -ter Ordnung . . . . .	32
6.4 Spielstoß. . . . .	34
6.5 Richtungsumkehr der Reibkraft. . . . .	38
6.6 Technologische Stoßkraft . . . . .	40
<b>7 Elastische Glieder im Antrieb . . . . .</b>	<b>43</b>
7.1 Einführende Bemerkungen . . . . .	43
7.2 Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	43
7.3 Beispiel: Schubkurbelgetriebe . . . . .	44
Schrifttum. . . . .	46

VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)

Fachbereich Getriebe und Maschinenelemente

VDI-Handbuch Getriebetechnik I: Ungleichförmig übersetzte Getriebe  
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-richtlinien.de](http://www.vdi-richtlinien.de)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/2142](http://www.vdi.de/2142).

## Einleitung

Diese VDI-Richtlinie stellt eine Fortsetzung der Richtlinie VDI 2149 Blatt 1 dar, in der lediglich Starrkörpermechanismen behandelt werden.

Sie gibt Empfehlungen zur Analyse von Schwingungen in ungleichmäßig übersetzenden Getrieben (Mechanismen), wie sie vorwiegend in Verarbeitungsmaschinen eingesetzt werden. Elastische Deformationen und Schwingungen stören bei solchen Mechanismen meist bei höheren Drehzahlen, weil sie die Genauigkeit der Abtriebsbewegung vermindern und zusätzliche dynamische Kräfte (Vibrationskräfte) verursachen, die sich auf Lebensdauer, Verschleiß und die Lärmentwicklung der Maschinen negativ auswirken.

In Abschnitt 4 werden bekannte, häufig beobachtete Schwingungsphänomene bei Mechanismen erläutert, um Hinweise auf die Ursachen der störenden Schwingungen zu finden. Anhand vieler Beispiele wird gezeigt, wie Schwingungsursachen identifiziert worden sind. Es ist ratsam, durch die angegebenen Strategien die physikalische Ursache der wesentlichen Schwingungen zu klären. Generell ist die Analyse der Zeitverläufe und des Fourierspektrums der gemessenen Schwingungen erforderlich, aber auch der Einsatz moderner Methoden der Zeit-Frequenz-Analyse wird empfohlen [9].

Abschnitt 5 gibt Hinweise zur Modellbildung. Dabei erfolgt eine Beschränkung auf Berechnungsmodelle mit einem Freiheitsgrad und auf Mechanismen, die periodische Bewegungen oder periodisch fortschreitende Bewegungen ausführen. Es zeigt sich vielfach, dass die Verläufe der kinematischen Größen und die kinetostatischen Kraftverläufe, die aus dem Modell der Starrkörpermechanismen berechnet werden können,

die Erregerfunktionen der störenden Schwingungen bilden. Bei der Formulierung der Gleichungen werden lediglich Drehantriebe betrachtet, für die nicht explizit behandelten Linearantriebe gelten analoge Beziehungen.

Es ist meist zweckmäßig, zunächst eine kinetostatische Analyse (gemäß VDI 2149 Blatt 1) vorzunehmen und danach erst die Schwingungsanalyse mit den angegebenen einfachen Modellen (Minimalmodelle) zu beginnen, bevor ein umfangreicheres Berechnungsmodell benutzt wird. Der begrenzte Umfang der vorliegenden Richtlinie erlaubt es nicht, auf Berechnungsmodelle einzugehen, die bei der Simulation des Schwingungsverhaltens den Einsatz von Software auf der Basis von MKS- oder FEM-Strukturen verlangen, was aber in speziellen Fällen durchaus nützlich sein kann.

Typische Minimalmodelle werden in Abschnitt 6 und Abschnitt 7 ausführlich behandelt, die unterschiedliche physikalische Schwingungsphänomene zeigen: Elastische Glieder im Antrieb **nach** dem (sich als Starrkörpersystem verhaltenden) Mechanismus und elastische Glieder **vor** dem Mechanismus. Dafür werden leicht auswertbare Formeln zur Berechnung der Schwingungen und der Stabilitätsgebiete angegeben, aus denen der Einfluss der wesentlichen kinematischen und mechanischen Parameter explizit hervorgeht. In derart vereinfachten Modellen realer Mechanismen kann somit näherungsweise analysiert werden, durch welche Maßnahmen (Veränderung der Lagefunktion, der Masse- oder Federparameter) sich unter Beachtung aller konstruktiven Nebenbedingungen die störenden Schwingungen beseitigen oder vermindern lassen.

## 1 Anwendungsbereich

Bei den in dieser Richtlinie betrachteten ungleichmäßig übersetzenden Getrieben (Mechanismen) kommt es meist auf eine genaue Erfüllung der Lagefunktion des Abtriebsglieds in bestimmten Getriebestellungen an, das heißt, Schwingungen an der Wirkstelle (Kontakt Werkzeug mit Werkstück oder Verarbeitungsgut) sind besonders störend und sollen so klein wie möglich sein, vgl. [1; 6; 7].

Es werden Regeln zur Analyse der an Mechanismen störenden Schwingungserscheinungen aufgestellt

Die vorliegende Richtlinie spiegelt Erfahrungen die bei der Bekämpfung unerwünschter Schwingungen an schnell laufenden Mechanismen gesammelt wieder, die in Textilmaschinen, Verpackungsmaschinen, Pressen, Umformmaschinen, Landmaschinen, Zuführ- und Transporteinrichtungen, Manipulatoren und Robotern gemacht wurden.

Die Richtlinie bietet eine Systematik der typischen Schwingungsphänomene an solchen Mechanismen, stellt Beispiele zur Identifikation dieser Schwingungsphänomene an realen Maschinen vor, gibt Hinweise zur Bildung einfacher Berechnungsmodelle und enthält Näherungsformeln, die einen Zusammenhang zwischen den Parametern der Mechanismen und den Schwingungen quantifizieren.

## 2 Formelzeichen und Abkürzungen

### Formelzeichen

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Formelzeichen verwendet:

$A_k, B_k, C_k$	Fourierkoeffizienten der Zusatzbewegungen
$a(t)$	Beschleunigungsverlauf (absolut)
$a_k, b_k, c_k$	Fourierkoeffizienten der Lagefunktionen
$c, b$	Feder-, Dämpferkonstante, auf Abtrieb bezogen
$c_T, b_T$	Feder-, Dämpferkonstante, auf Drehantrieb bezogen
$d(\varphi)$	Nachgiebigkeit, stellungsabhängig und auf $\varphi$ bezogen
$F$	äußere Kraft am Abtrieb
$F_S$	Amplitude der Stoßkraft
$f_0$	Drehfrequenz, $f_0 = \Omega_m/2 \cdot \pi = 1/T$
$f_1$	relevante Eigenfrequenz, $f_1 = 1/T_1$
$J(\varphi)$	auf Antriebskoordinate $\varphi$ reduziertes Trägheitsmoment
$M_{an}(t)$	Antriebsmoment
$\Delta M_{an}(t)$	Antriebsmoment (Abweichung vom Sollverlauf)
$m$	Masse
$n$	Drehzahl
$q(t)$	Zusatzweg oder -winkel (der periodischen Sollbewegung überlagert)
$\dot{q}(t), \ddot{q}(t)$	Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf (Abweichung vom Sollverlauf)
$T$	kinematische Periodendauer, Zykluszeit $T = 2\pi/\Omega_m$
$T_1$	Schwingungsdauer der relevanten Eigenfrequenz $T_1 = 1/f_1$
$t$	Zeit
$\Delta t$	Anregungszeit
$t_s$	Stoßzeit (Rechteck- oder Halbsinusstoß)
$U(\varphi)$	Lagefunktion
$U', U'', U''', U^{(4)}, \dots$	Lagefunktionen höherer Ordnung, z.B. $U^{(1)} = dU/d\varphi$
$U_i$	partielle Ableitung $\partial U/\partial q_i$
$y$	Absolutverschiebung am Abtrieb, $y = U(\varphi) + q$