

Maschinenfundamente

Elastische Stützkonstruktionen für Maschinen mit rotierenden Massen

DIN
4024
Teil 1

Machine foundations; elastic supporting constructions for machines with rotating masses

Ersatz für DIN 4024/01.55

Fondations de machines; constructions de soutènement élastiques pour machines avec masses tournantes

Zu den Normen der Reihe DIN 4024 gehören

DIN 4024 Teil 1 Maschinenfundamente; Elastische Stützkonstruktionen für Maschinen mit rotierenden Massen

DIN 4024 Teil 2 (z. Z. Entwurf) Maschinenfundamente; Steife (starre) Stützkonstruktionen für Maschinen mit periodischer Erregung

Die Benennung „Last“ wird für Kräfte verwendet, die von außen auf ein System einwirken; das gilt auch für zusammengesetzte Wörter mit der Silbe „...Last“ (siehe DIN 1080 Teil 1).

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich und Zweck	2	5.3 Eigenschwingungen	6
2 Begriffe	2	5.3.1 Eigenfrequenzen und -formen	6
2.1 Schwingung	2	5.3.2 Beurteilung des Schwingungsverhaltens anhand der Eigenschwingungen	7
2.2 Schwingungsarten	2	5.4 Unwuchtschwingungen – Verschiebungs- und Kraftgrößen	7
2.3 Dämpfung	2	5.4.1 Allgemeines	7
2.4 Schnittgrößen	3	5.4.2 Erzwungene Schwingungen	7
2.5 Rechenmodell	3	5.4.3 Eigenformverfahren	7
2.6 Maschinentechnik	3	5.4.4 Ersatzlastverfahren	8
2.7 Bautechnik	3	5.5 Transiente Schwingungen – Verschiebungs- und Kraftgrößen	8
3 Baustoffe, Baugrund	3	5.5.1 Allgemeines	8
3.1 Stahlbeton	3	5.5.2 Kurzschluß	8
3.2 Stahl	4	5.6 Einwirkungen auf die Unterstützung des Maschinenträgers und auf den Baugrund	8
3.3 Baugrund	4	6 Bemessungshinweise	8
4 Lasten	4	6.1 Bemessungsschnittgrößen	8
4.1 Maschinentechnischer Bereich	4	6.2 Stahlbetonfundamente	9
4.1.1 Allgemeines	4	6.3 Stahlfundamente	9
4.1.2 Statische Lasten	4	6.4 Baugrund	9
4.1.3 Dynamische Lasten	4	7 Konstruktion und Ausführung	9
4.2 Bautechnischer Bereich	4	7.1 Maschinenfundamente aus Stahlbeton	9
4.2.1 Ständige Lasten	4	7.1.1 Tischfundamente	9
4.2.2 Verkehrslasten	4	7.1.2 Federfundamente	9
4.2.3 Kriechen und Schwinden der Stahlbetonkonstruktion	5	7.1.3 Plattenfundamente	10
4.2.4 Temperatur, Wind, Erdbeben	5	7.1.4 Bühnenfundamente	10
5 Berechnung	5	7.2 Maschinenfundamente aus Stahl	10
5.1 Allgemeines	5	7.2.1 Tischfundamente	10
5.1.1 Ziele	5	7.2.2 Federfundamente	10
5.1.2 Statische Berechnung	5	7.2.3 Bühnenfundamente	10
5.1.3 Dynamische Berechnung	5	7.2.4 Korrosionsschutz	10
5.2 Modellbildung	5	Zitierte Normen und andere Unterlagen	11
5.2.1 Grundsätze	5		
5.2.2 Abbildungs-Regeln	5		
5.2.3 Vereinfachungen	6		

Fortsetzung Seite 2 bis 11

Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

1 Anwendungsbereich und Zweck

Diese Norm gilt für Baukonstruktionen aus Stahl oder Stahlbeton, die als Stützkonstruktionen von Maschinenanlagen mit überwiegend rotierenden Massen dienen, und deren Maschinenträger in mindestens einer Ebene Biegeschwingungen ausführen kann. Derartige Maschinenfundamente werden eingeteilt in:

- Tischfundamente
- Federfundamente
- Plattenfundamente
- Bühnenfundamente
- vergleichbare Konstruktionen.

In dieser Norm werden Anforderungen an derartige Stützkonstruktionen festgelegt, um unzulässige Schwingungen und Schäden an den Maschinen und Fundamenten infolge der statischen und dynamischen Beanspruchungen zu verhüten und unerwünschte Erschütterungen in der Umgebung zu vermeiden. Ferner werden Regeln zur Berechnung des Schwingungsverhaltens und der Bemessungsschnittgrößen sowie Grundsätze für Entwurf, Konstruktion und Ausführung angegeben, die auf Erfahrungen mit bisher ausgeführten Fundamenten beruhen.

2 Begriffe

2.1 Schwingung

Als Schwingung im Sinne dieser Norm wird ein Vorgang bezeichnet, bei dem sich eine mechanische Größe q in Abhängigkeit von der Zeit t so verändert, daß sie unter Vorzeichenwechsel ihres Anstieges wenigstens je einmal einen Höchstwert und einen Mindestwert (Scheitelwerte) annimmt (siehe Bild 1).

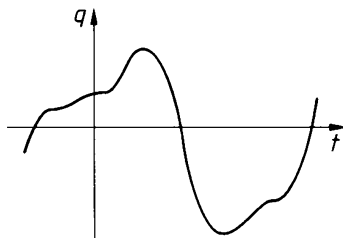


Bild 1. Schwingung

Wesentliche mechanische Schwingungsgrößen sind:

- Schwingweg (Schwingungsauslenkung, Verformung)
- Schwinggeschwindigkeit (Schwingschnelle)
- Schwingbeschleunigung
- Rückstellkräfte und -momente (von den Schwingwegen abhängig)
- Dämpfungskräfte und -momente (meist von den Schwinggeschwindigkeiten abhängig)
- Massenkräfte (Trägheitskräfte) und Massenmomente (den Schwingbeschleunigungen proportional)
- Erregerkräfte und -momente (auf das System von außen einwirkend).

2.2 Schwingungsarten

2.2.1 Periodische Schwingung

Eine periodische Schwingung ist ein Schwingungsvorgang, bei welchem die schwingende Größe q einen periodischen Zeitverlauf hat (siehe Bild 2):

$$q(t) = q(t + nT) \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

n ganze Zahl,

T Periodendauer

Der Kehrwert von T in s ist die Frequenz f in Hz.

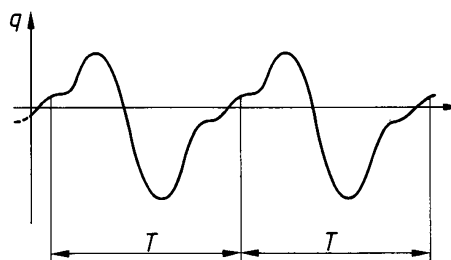


Bild 2. Periodische Schwingung

2.2.2 Harmonische Schwingung

Eine harmonische Schwingung ist ein periodischer Schwingungsvorgang nach einem Sinus-(Cosinus-)Gesetz

$$q(t) = \hat{q} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

Hierin bedeuten (siehe auch Bild 3):

$\hat{q}$ Amplitude

ω Kreisfrequenz nach der Beziehung

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

φ_0 Nullphasenwinkel

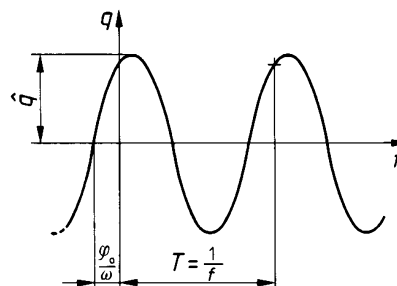


Bild 3. Harmonische Schwingung

2.2.3 Transiente Schwingung

Eine transiente Schwingung ist ein vorübergehender Schwingungsvorgang mit veränderlichem Scheitelwert und/oder veränderlicher Schwingungszeit (z.B. An- und Auslaufvorgänge, Ein- und Ausschwingvorgänge, Kurzschluß).

2.2.4 Eigenschwingung (freie Schwingung)

Eine Eigenschwingung ist ein Schwingungsvorgang eines einmal angeregten linearen Systems, auf das keine zeitlich veränderlichen Lasten mehr einwirken. Dieser Schwingungsvorgang ist zusammengesetzt aus systembedingten Eigenformen, denen Eigenfrequenzen zugeordnet sind. Die niedrigste Eigenfrequenz wird als erste Eigenfrequenz bezeichnet.

2.2.5 Erzwungene (fremderregte) Schwingung

Eine erzwungene Schwingung ist ein Schwingungsvorgang, der durch zeitlich veränderliche äußere Lasten hervorgerufen wird.

2.3 Dämpfung

Dämpfung ist eine Systemeigenschaft, durch die dem Schwingungssystem Bewegungsenergie entzogen und in andere Energieformen, vor allem in Wärme, irreversibel umgewandelt oder in die Umgebung abgeleitet wird.

Wesentliche Dämpfungsarten sind:

- Baustoffdämpfung mit der Dämpfungskraft

$$F_D = \frac{d_B}{\Omega} \cdot \dot{x} \quad (3)$$

bei Steifigkeitsproportionalität

$$F_D = \frac{k_B}{\Omega} \cdot c \cdot \dot{x} \quad (4)$$

- Viskose Dämpfung mit der Dämpfungskraft

$$F_D = d_V \cdot \dot{x} \quad (5)$$

bei Steifigkeitsproportionalität

$$F_D = k_V \cdot c \cdot \dot{x} \quad (6)$$

Als Berechnungsgrößen werden verwendet

- Dämpfungsgrad (Lehrsches Dämpfungsmaß) $D^1)$

$$D = \frac{d_B}{2 \cdot \Omega \sqrt{c \cdot m}} \quad (7)$$

$$D = \frac{k_B}{2 \cdot \Omega} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (8)$$

$$D = \frac{d_V}{2 \sqrt{c \cdot m}} \quad (9)$$

$$D = \frac{k_V}{2} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (10)$$

- logarithmisches Dämpfungs-Dekrement

$$\Lambda = \frac{2\pi \cdot D}{\sqrt{1 - D^2}} \quad (11)$$

In den Gleichungen (3) bis (11) bedeuten:

Ω	Erregerkreisfrequenz
$d_B, d_V^1), k_B^1), k_V$	Dämpfungsgrößen (Größen mit unterschiedlichen Dimensionen)
c	Federkonstante
m	Masse
$\dot{x}$	Schwinggeschwindigkeit

2.4 Schnittgrößen

Schnittgrößen im Sinne dieser Norm sind Kraftgrößen (Kräfte, Momente) und Verschiebungsgrößen (Verschiebungen, Verdrehungen) an der jeweils betrachteten Schnittstelle des Systems aus statischer und/oder dynamischer Einwirkung.

2.5 Rechenmodell

Ein Rechenmodell ist die Abbildung des wirklichen Schwingungssystems für seine rechnerische Untersuchung mit seinen für die Lösung der Aufgabenstellung wesentlichen Eigenschaften. In diesem Rechenmodell wird jede unabhängige Verschiebungs- und/oder Verdrehungsmöglichkeit eines Massenpunktes oder Modellelementes im räumlichen Koordinatensystem als Freiheitsgrad bezeichnet. Wenn Schwingungen in bestimmten Freiheitsgraden des Gesamtsystems von untergeordnetem Einfluß auf die Schwingungen in den anderen Freiheitsgraden sind, darf das System durch mehrere, voneinander unabhängige Rechenmodelle abgebildet werden (Entkopplung).

¹⁾ In der Literatur werden auch folgende Formelzeichen verwendet:

statt D : θ

statt d_V : k oder b

statt k_B : ψ .

2.6 Maschinentechnik

2.6.1 Betriebsfrequenz (Betriebsdrehzahl)

Betriebsfrequenz ist die Drehzahl bei Normalbetrieb in s^{-1} . Die Drehzahl wird auch in min^{-1} angegeben.

2.6.2 Betriebsfrequenzbereich

Betriebsfrequenzbereich ist der Drehzahlbereich bei Normalbetrieb mit verschiedenen Drehzahlen.

2.6.3 Erregerfrequenz

Erregerfrequenz ist die Frequenz, mit der die dynamischen Lasten auf das System einwirken. Häufig ist die Erregerfrequenz gleich der Betriebsfrequenz.

2.6.4 Auswuchtgüte

Die Auswuchtgüte ist ein Maß für die Unwucht eines Rotors $Q = e \cdot \Omega$ mit e als Exzentrizität des Rotors (siehe auch VDI 2060).

2.6.5 Antriebsmoment

Ein Antriebsmoment ist das Drehmoment, welches eine angetriebene Maschine, z. B. ein Generator, aufnimmt.

2.6.6 Abtriebsmoment

Ein Abtriebsmoment ist das Drehmoment, welches eine antreibende Maschine, z. B. eine Turbine, abgibt.

2.6.7 Vakuumzug

Vakuumzüge sind statische Kräfte, die durch den Unterdruck im Kondensator einer Dampfturbine entstehen.

2.6.8 Klemmenkurzschluß und Fehlsynchronisation

Klemmenkurzschluß und Fehlsynchronisation sind Störfälle mit transient verlaufenden Momenten, die durch schnelle Veränderung der magnetischen Kräfte im Luftspalt einer elektrischen Maschine hervorgerufen werden.

2.7 Bautechnik

2.7.1 Maschinenträger

Ein Maschinenträger ist eine plattenförmige oder trägerrostartige, elastische Konstruktion, auf der die Maschinenanlage ruht und verankert ist.

2.7.2 Tischfundament

Ein Tischfundament ist ein Maschinenträger (Tischplatte) auf meist paarweise angeordneten Stützen, die in der Regel auf einer Stahlbeton-Sohlplatte stehen. Die Sohlplatte lagert auf dem Baugrund oder auf Pfählen.

2.7.3 Federfundament mit Unterkonstruktion

Ein Federfundament mit Unterkonstruktion ist ein Maschinenträger auf meist vorgefertigten Federelementen, unterstützt von einer Unterkonstruktion. In den Federelementen sind in der Regel mehrere Federn mit definierten Federkonstanten zusammengefaßt.

Als Unterkonstruktion wird die Gesamtkonstruktion unter den Federelementen einschließlich Baugrund bzw. Pfählen bezeichnet.

2.7.4 Plattenfundament

Ein Plattenfundament ist ein Maschinenträger aus Stahlbeton, der unmittelbar auf dem Baugrund oder auf Pfählen gegründet ist.

2.7.5 Bühnenfundament

Ein Bühnenfundament ist eine Platten- oder Balkenkonstruktion in Geschoßbauten, die unmittelbar als Maschinenträger dient.

3 Baustoffe, Baugrund

3.1 Stahlbeton

Es ist Beton mindestens der Festigkeitsklasse B 25 nach DIN 1045 zu verwenden.

Für die dynamische Berechnung dürfen die statischen E-Moduln des Betons nach DIN 1045 angesetzt werden. Sofern keine genaueren Daten über die Dämpfungscharakteristik bekannt sind, darf für die Dämpfung des Systems Maschinenträger mit Maschine ein konstanter Dämpfungsgrad $D = 0,02$ angesetzt werden. Wird mit steifigkeitsproportionaler viskoser Dämpfung gerechnet, sollte k_v so gewählt werden, daß für die höchste berechnete Eigenfrequenz f_n (siehe Abschnitt 5.3) $D \leq 0,02$ gilt. Für Lastfälle mit wesentlich höherer Beanspruchung als im Betriebsfall darf ein erhöhter Dämpfungsgrad berücksichtigt werden.

In den dynamisch beanspruchten Bauteilen darf nur Betonstahl verwendet werden, der für nicht vorwiegend ruhende Beanspruchung zugelassen ist. Glatte Betonstahl ist als tragende Bewehrung in diesen Bauteilen nicht zulässig.

3.2 Stahl

Als Stahlsorte ist mindestens St 37-2 nach DIN 17 100 zu verwenden.

Für die dynamische Berechnung darf der statische E-Modul des Stahls nach DIN 18 800 Teil 1 angesetzt werden. Sofern keine genaueren Daten über die Dämpfungscharakteristik des Systems bekannt sind, darf mit steifigkeitsproportionaler Baustoffdämpfung und $k_B = 0,02$ gerechnet werden.

Für Lastfälle mit wesentlich höherer Beanspruchung als im Betriebsfall darf eine erhöhte Dämpfung berücksichtigt werden.

3.3 Baugrund

Die Baugrundfederung braucht in der dynamischen Berechnung nur in Sonderfällen berücksichtigt zu werden (siehe Abschnitt 5.2). Bei Plattenfundamenten ist sie stets zu berücksichtigen.

Die zusätzliche Berücksichtigung der Baugrunddämpfung kann vorteilhaft sein.

Eine zuverlässige Bestimmung der dynamischen Baugrundkennwerte (Schubmodul und Poissonzahl) ist nur durch geeignete Feld- und/oder Laborversuche möglich. Da diese Werte im allgemeinen stark streuen, ist die dynamische Berechnung mit den Grenzwerten dieser Größen durchzuführen.

Anhaltswerte dieser Größen können der einschlägigen Literatur [1] bis [3] entnommen werden.

4 Lasten

4.1 Maschinentechnischer Bereich

4.1.1 Allgemeines

Vom Maschinenhersteller sind anzugeben:

- Montagelasten
- Lasten des Normalbetriebes
- Lasten aus Störfällen
- Betriebsfrequenzen bzw. Betriebsfrequenzbereich
- Temperatureinwirkung von Maschinen und Rohrleitungen auf das Fundament.

Bei den Lasten sind statische und dynamische Lasten zu unterscheiden.

Werden vom Maschinenhersteller besondere Anforderungen an die Steifigkeit des Maschinenfundamentes gestellt, so sind die Lasten anzugeben, unter denen bestimmte Verschiebungswerte nicht überschritten werden sollen.

Sollen auch bei Störfällen die Schwingwege des Systems begrenzt werden (um Schäden an der Maschine und ihren Rohrleitungsanschlüssen auszuschließen), so sind vom Maschinenhersteller entsprechende Grenzwerte zu nennen.

4.1.2 Statische Lasten

Statische Lasten aus dem Normalbetrieb sind:

- Gewichtsbelastung durch die Rotoren und durch die Gehäuse
- Gewichtsbelastung durch die Kondensatoren (je nach Aufstellungsart) unter Berücksichtigung der verschiedenen Wasserfüllungen
- Vakuumszug bei Turbinen, deren Kondensatoren über Kompensatoren mit dem Turbinengehäuse verbunden sind (vertikal und horizontal)
- An- und Abtriebsmomente der Maschine, die sich über die Gehäuse gegen das Fundament abstützen (vertikale Kräftepaare)
- Reibungsbelastung an den Auflagerflächen, die durch Wärmedehnungen von Gehäusen verursacht wird (vorwiegend horizontal)
- Belastung durch Gewichte, Kräfte und Momente aus den Rohrleitungen (Wärmedehnungen, Strömungs- und Dampfdruckkräfte; vertikal und horizontal)
- Temperatureinwirkung aus Maschine und Rohrleitungen im Bereich von Turbinen ist, soweit keine anderen Angaben vom Maschinenhersteller vorliegen, mit 20 K Temperaturdifferenz im Fundamentquerschnitt zwischen innen und außen zu rechnen.

Montagelasten sind im wesentlichen Gewichtsbelastungen aus vorübergehenden Montagezuständen, die nicht während des Betriebes auftreten. Dazu gehören auch Lasten aus Hilfsgeräten und Hebezeugen.

4.1.3 Dynamische Lasten

Dynamische Lasten aus dem Normalbetrieb sind:

- unwuchtverursachte, umlauffrequente Lagerkräfte (vertikal und horizontal)
- betriebliche periodische Lasten, die von der Funktionsweise der Maschine herrühren und sich über Gehäuse oder Lager auf das Fundament auswirken, z. B. doppel- oder mehrfach umlauffrequente Kräfte bei Einphasenwechselstrommaschinen oder Gebläsen, doppelnetzfrequente Gehäusekräfte bei Drehstrommaschinen, schlupffrequente magnetische Kräfte bei Asynchronmaschinen
- Kräfte und Momente aus An- und Abschaltvorgängen oder anderen transienten Vorgängen der Anlage, z. B. bei Stoßleistungsumformern oder Synchronisationsvorgängen.

Dynamische Lasten aus Störfällen sind im wesentlichen:

- Erhöhung der periodischen Lagerlasten durch außergewöhnliche Unwuchtvergrößerungen (z. B. Schaufelbruch, Läuferverkrümmungen)
- Klemmenkurzschluß oder Fehlsynchronisierung von Generatoren oder Motoren
- Stoßkräfte aus Rohrleitungen und Armaturen bei Schnellschluß.

4.2 Bautechnischer Bereich

4.2.1 Ständige Lasten

Die Rechenwerte für die Eigenlasten der Konstruktion sind DIN 1055 Teil 1 zu entnehmen.

4.2.2 Verkehrslasten

Für die Gesamtkonstruktion brauchen Verkehrslasten nicht berücksichtigt zu werden. Einzelne Bauteile sind jedoch dafür auszulegen. Diese Lasten sind im Einvernehmen mit dem Maschinenhersteller, dem Fundamentplaner und dem Betreiber zu bestimmen. Wenn keine Angaben vorliegen, ist für die Bemessung dieser Bauteile eine Last von 5 kN/m^2 anzusetzen.