

DIN ISO 21940-12

ICS 21.120.40

Entwurf

Einsprüche bis 2015-01-26
Vorgesehen als Ersatz für
DIN ISO 11342:1999-05 und
DIN ISO 11342
Berichtigung 1:2001-10

**Mechanische Schwingungen –
Auswuchten von Rotoren –
Teil 12: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit nachgiebigem
Verhalten (ISO/CD 21940-12:2014)**

Mechanical vibration –

Rotor balancing –

Part 12: Procedures and tolerances for rotors with flexible behaviour
(ISO/CD 21940-12:2014)

Vibrations mécaniques –

Équilibrage des rotors –

Partie 12: Modes opératoires et tolérances pour rotors à comportement flexible
(ISO/CD 21940-12:2014)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2014-09-26 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses
Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nals@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI, 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin).

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 43 Seiten

Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	3
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	5
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Grundlagen der Dynamik und des Auswuchtens von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten	9
4.1 Allgemeines	9
4.2 Unwuchtverteilung	9
4.3 Eigenformen von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten	9
4.4 Antwortverhalten eines Rotors mit nachgiebigem Verhalten gegenüber Unwucht	11
4.5 Ziele des Auswuchtens von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten	12
4.6 Vorzusehende Ausgleichsebenen	12
4.7 Gekuppelte Rotoren	13
5 Rotorkonfigurationen	13
6 Verfahren zum niedrigtourigen Auswuchten von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten	16
6.1 Allgemeines	16
6.2 Auswahl der Ausgleichsebenen	16
6.3 Betriebsdrehzahl des Rotors	17
6.4 Urunwucht	17
6.5 Verfahren des niedrigtourigen Auswuchtens	17
7 Verfahren zum hochtourigen Auswuchten von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten	19
7.1 Allgemeines	19
7.2 Aufstellung des Rotors zum Auswuchten	19
7.3 Verfahren G: Auswuchten bei mehreren Drehzahlen	20
7.4 Verfahren H: Auswuchten bei der Betriebsdrehzahl	22
7.5 Verfahren I: Auswuchten bei einer festen Drehzahl	23
8 Bewertungskriterien	23
8.1 Auswahl der Kriterien	23
8.2 Grenzwerte für die Schwingungen in der Auswuchtmaschine	24
8.3 Grenzwerte für die Restunwucht	26
9 Verfahren zur Bewertung	28
9.1 Verfahren zur Bewertung durch Grenzwerte für die Schwingungen	28
9.2 Bewertung durch Grenzwerte für die Restunwucht	29
Anhang A (informativ) Hinweise zur Fehlervermeidung bei Rotoren am Einsatzort	32
Anhang B (informativ) Auswuchten in den optimalen Ebenen – Niedrigtouriges Auswuchten in drei Ebenen	33
Anhang C (informativ) Korrekturfaktoren	35
Anhang D (informativ) Beispiel zur Berechnung der äquivalenten Restunwuchten in den Eigenformen	36
Anhang E (informativ) Verfahren zur Feststellung, ob ein Rotor starres oder nachgiebiges Verhalten zeigt	40
Anhang F (informativ) Verfahren zur Berechnung des Unwuchtausgleichs	42
Literaturhinweise	43

Nationales Vorwort

Der internationale Komitee-Entwurf ISO/CD 21940-12:2014 ist vom Technischen Komitee ISO/TC 108 „Mechanical vibration, shock and condition monitoring“, Unterkomitee SC 2 „Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures“, dessen Sekretariat vom DIN geführt wird, erarbeitet worden. Die deutsche Mitarbeit erfolgt durch den Ausschuss NA 001-03-06-01 UA (NALS/VDI C 6.1) „Auswuchten und Auswuchtmaschinen“ des Normenausschusses Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Für die in diesem Dokument zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

ISO 1925	siehe	DIN ISO 1925
ISO 1940-1	siehe	DIN ISO 1940-1
Normen der Reihe ISO 7919	siehe	Normen der Reihe DIN ISO 7919
Normen der Reihe ISO 10816	siehe	Normen der Reihe DIN ISO 10816
ISO 21940-14	siehe	DIN ISO 21940-14
ISO 21940-21	siehe	DIN ISO 21940-21
ISO 21940-32	siehe	DIN ISO 21940-32

Die Deutschen Normen sind im nationalen Anhang NA aufgeführt.

ISO 21940 mit dem Titel *Mechanical vibration — Rotor balancing* besteht aus den folgenden Teilen:

- *Part 1: Introduction* ¹⁾
- *Part 2: Vocabulary* ²⁾
- *Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour* ³⁾
- *Part 12: Procedures and tolerances for rotors with flexible behaviour* ⁴⁾

¹⁾ Überarbeitung von ISO 19499:2007, *Mechanical vibration — Balancing — Guidance on the use and application of balancing standards*

²⁾ Überarbeitung von ISO 1925:2001, *Mechanical vibration — Balancing — Vocabulary*

³⁾ Überarbeitung von ISO 1940-1:2003 + Cor.1:2005, *Mechanical vibration — Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state — Part 1: Specification and verification of balance tolerances*

⁴⁾ Überarbeitung von ISO 11342:1998 + Cor.1:2000, *Mechanical vibration — Methods and criteria for the mechanical balancing of flexible rotors*

- *Part 13: Criteria and safeguards for the in-situ balancing of medium and large rotors* ⁵⁾
- *Part 14: Procedures for assessing balance errors* ⁶⁾
- *Part 21: Description and evaluation of balancing machines* ⁷⁾
- *Part 23: Enclosures and other protective measures for the measuring station of balancing machines* ⁸⁾
- *Part 31: Susceptibility and sensitivity of machines to unbalance* ⁹⁾
- *Part 32: Shaft and fitment key convention* ¹⁰⁾

Änderungen

Gegenüber DIN ISO 11342:1999-05 und der Berichtigung 1:2001-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Berichtigung eingearbeitet und Norm redaktionell überarbeitet;
- b) Festlegung von Begriffen gestrichen, siehe dazu DIN ISO 1925;
- c) Anhang F gestrichen, da er eine Dopplung von Teilen des Abschnitts D.1 ist.

⁵⁾ Überarbeitung von ISO 20806:2009, *Mechanical vibration — Criteria and safeguards for the in-situ balancing of medium and large rotors*

⁶⁾ Überarbeitung von ISO 1940-2:1997, *Mechanical vibration — Balance quality requirements of rigid rotors — Part 2: Balance errors*

⁷⁾ Überarbeitung von ISO 2953:1999, *Mechanical vibration — Balancing machines — Description and evaluation*

⁸⁾ Überarbeitung von ISO 7475:2002, *Mechanical vibration — Balancing machines — Enclosures and other protective measures for the measuring station*

⁹⁾ Überarbeitung von ISO 10814:1996, *Mechanical vibration — Susceptibility and sensitivity of machines to unbalance*

¹⁰⁾ Überarbeitung von ISO 8821:1989, *Mechanical vibration — Balancing — Shaft and fitment key convention*

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 1925, *Mechanische Schwingungen — Auswuchttechnik — Begriffe*

DIN ISO 1940-1, *Mechanische Schwingungen — Anforderungen an die Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem (starrem) Zustand — Teil 1: Festlegung und Nachprüfung der Unwuchttoleranz*

DIN ISO 7919-1, *Mechanische Schwingungen von Maschinen mit Ausnahme von Kolbenmaschinen — Messung und Bewertung von Wellenschwingungen — Teil 1: Allgemeine Anleitungen*

DIN ISO 7919-2, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an rotierenden Wellen — Teil 2: Stationäre Dampfturbinen und Generatoren über 50 MW mit Nenn-Betriebsdrehzahlen von $1\,500\text{ min}^{-1}$, $1\,800\text{ min}^{-1}$, $3\,000\text{ min}^{-1}$ und $3\,600\text{ min}^{-1}$*

DIN ISO 7919-3, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an rotierenden Wellen — Teil 3: Gekuppelte industrielle Maschinen*

DIN ISO 7919-4, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an rotierenden Wellen — Teil 4: Gasturbinensätze mit Gleitlagern*

DIN ISO 7919-5, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an rotierenden Wellen — Teil 5: Maschinensätze in Wasserkraft- und Pumpenanlagen*

DIN ISO 10816-1, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen — Teil 1: Allgemeine Anleitungen*

DIN ISO 10816-2, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen — Teil 2: Stationäre Dampfturbinen und Generatoren über 50 MW mit Nenn-Betriebsdrehzahlen von $1\,500\text{ min}^{-1}$, $1\,800\text{ min}^{-1}$, $3\,000\text{ min}^{-1}$ und $3\,600\text{ min}^{-1}$*

DIN ISO 10816-3, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen — Teil 3: Industrielle Maschinen mit Nennleistungen über 15 kW und Nenndrehzahlen zwischen 120 min^{-1} und $15\,000\text{ min}^{-1}$ bei Messungen am Aufstellungsort*

DIN ISO 10816-4, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen — Teil 4: Gasturbinensätze mit Gleitlagern*

DIN ISO 10816-6, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen — Teil 6: Hubkolbenmaschinen mit Leistungen über 100 kW*

DIN ISO 10816-7, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen — Teil 7: Kreiselpumpen für die Anwendung in der Industrie (einschließlich Messung der Wellenschwingungen)*

DIN ISO 10816-8, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen — Teil 8: Hubkolbenkompressoren^{*)}*

^{*)} z. Z. Entwurf

DIN ISO 10816-21, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen — Teil 21: Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse und Getriebe* *)

DIN ISO 21940-14, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 14: Verfahren zur Ermittlung von Abweichungen beim Auswuchten*

DIN ISO 21940-21, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 21: Beschreibung und Bewertung von Auswuchtmaschinen*

DIN ISO 21940-32, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 32: Behandlung von Passfederverbindungen*

*) z. Z. Entwurf

Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 12: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit nachgiebigem Verhalten

Einleitung

Einen Rotor auszuwuchten geschieht stets mit dem Ziel, dass er zufriedenstellend läuft, wenn er am Einsatzort aufgestellt ist. In diesem Zusammenhang bedeutet „zufriedenstellend laufen“, dass die Restunwucht des Rotors nur solche Schwingungen hervorruft, deren Größe noch akzeptiert werden kann. Bei einem Rotor mit nachgiebigem Verhalten bedeutet das zusätzlich, dass bei allen Drehzahlen bis hinauf zur höchsten Betriebsdrehzahl nur solche Durchbiegungen des Rotors auftreten, deren Größe noch akzeptiert werden kann.

Meistens werden Rotoren vor dem Zusammenbau der Maschine während der Fertigung ausgewuchtet, da andernfalls z. B. der Zugang zum Rotor eingeschränkt sein kann. Darüber hinaus ist das Auswuchten des Rotors häufig dasjenige Stadium, in dem der Rotor vom Kunden abgenommen wird. Obwohl es das Ziel ist, dass der Rotor am Einsatzort zufriedenstellend läuft, wird üblicherweise seine Auswuchtgüte erst einmal in einer Auswuchtmaschine beurteilt. Bei der Beurteilung, ob der Rotor am Einsatzort zufriedenstellend läuft, werden meistens alle Schwingungen einbezogen, während in der Auswuchtmaschine hauptsächlich die umlauffrequenten Wirkungen betrachtet werden.

Dieser Teil von ISO 21940 unterteilt Rotoren entsprechend ihren Auswuchtanforderungen und legt Verfahren zur Beurteilung der Restunwucht fest.

Dieser Teil von ISO 21940 zeigt auch auf, wie Kriterien zur Anwendung beim Auswuchten in einer Auswuchtmaschine abgeleitet werden können, und zwar sowohl aus Grenzwerten für die Schwingungen, die für die zusammengebaute und aufgestellte Maschine festgelegt sind, als auch aus Grenzwerten für die Unwucht, die für den Rotor festgelegt sind. Wenn solche Grenzwerte nicht vorliegen, so zeigt dieser Teil von ISO 21940 auf, wie sie aus ISO 7919 und ISO 10816 abgeleitet werden können, wenn es um Schwingungswerte geht, bzw. wie sie aus ISO 1940-1 abgeleitet werden können, wenn es um Werte der zulässigen Restunwucht geht. ISO 1940-1 behandelt die Auswuchtgüte rotierender starrer Körper und gilt nicht ohne weiteres für Rotoren mit nachgiebigem Verhalten, da Rotoren mit nachgiebigem Verhalten eine merkliche Durchbiegung aufweisen können. In diesem Teil von ISO 21940 werden dessenungeachtet Verfahren dargestellt, wie sich die Kriterien nach ISO 1940-1 auf Rotoren mit nachgiebigem Verhalten übertragen lassen.

Es kann vorkommen, dass ein anderweitig akzeptabel ausgewuchteter Rotor am Einsatzort inakzeptable Schwingungswerte aufgrund von Resonanzen der Aufstellungsstruktur aufweist. In einer Struktur mit geringer Dämpfung kann eine Resonanz oder die Nähe einer Resonanz zu einer immensen Schwingungsantwort auf eine kleine Unwucht führen. In solchen Fällen kann es günstiger sein, die Eigenfrequenz oder die Dämpfung der Struktur zu ändern als sehr fein auszuwuchten, ein Zustand, der im Laufe der Zeit eventuell nicht aufrechterhalten werden kann (siehe auch ISO 21940-31).

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von ISO 21940 gibt bezüglich ihrer Merkmale und Auswuchtanforderungen typische Konfigurationen von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten an, beschreibt Auswuchtverfahren, legt Verfahren zur Beurteilung des erreichten Unwuchtzustandes fest und enthält Anleitungen zu Kriterien für die Auswuchtgüte.

Dieser Teil von ISO 21940 kann auch als Grundlage für eingehendere Untersuchungen dienen, z. B. wenn eine sehr genaue Bestimmung der erforderlichen Auswuchtgüte notwendig ist. Wenn die festgelegten Fertigungsverfahren und die Unwuchttoleranzen gebührend berücksichtigt werden, können Bedingungen für eine zufriedenstellende Laufgüte erwartet werden.

Es ist nicht der Zweck dieses Teils von ISO 21940, als Abnahmespezifikation für einen Rotor zu dienen; vielmehr enthält er darüber Angaben, wie grobe Fehler und unnötig strenge Anforderungen vermieden werden.

Strukturresonanzen und ihre Behandlung fallen nicht in den Anwendungsbereich dieses Teils von ISO 21940.

Die angegebenen Verfahren und Kriterien beruhen auf der Erfahrung mit allgemeinen Maschinen in der Industrie. Sie können möglicherweise nicht ohne Weiteres auf Sondermaschinen oder auf außergewöhnliche Umstände übertragen werden. In einigen Fällen sind Abweichungen von diesem Teil von ISO 21940 möglich.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 1925, *Mechanical vibration — Balancing — Vocabulary* ¹¹⁾

ISO 1940-1, *Mechanical vibration — Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state — Part 1: Specification and verification of balance tolerances* ¹²⁾

ISO 2041, *Mechanical vibration, shock and condition monitoring — Vocabulary*

ISO 21940-14, *Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 14: Procedures for assessing balance errors*

ISO 21940-32, *Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 32: Shaft and fitment key convention*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 1925 und ISO 2041.

¹¹⁾ Die neue Nummer nach der Überarbeitung ist ISO 21940-2.

¹²⁾ Die neue Nummer nach der Überarbeitung ist ISO 21940-11.

4 Grundlagen der Dynamik und des Auswuchtens von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten

4.1 Allgemeines

Bei Rotoren mit nachgiebigem Verhalten ist es in der Regel erforderlich, sie in mehreren Ebenen hochtourig auszuwuchten. Trotzdem kann unter bestimmten Bedingungen ein Rotor mit nachgiebigem Verhalten auch niedrigtourig ausgewuchtet werden. Für das hochtourige Auswuchten sind zwei verschiedene Verfahren mit

dem Ziel entwickelt worden, einen zufriedenstellenden Auswuchtzustand zu erreichen, nämlich das Auswuchten nach Eigenformen und das Einflusskoeffizienten-Verfahren. Die diesen beiden Verfahren zugrundeliegende Theorie und ihre jeweiligen Vorteile sind in der Literatur ausgiebig dargelegt, deshalb wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet. Meistens ist das beim Auswuchten in der Praxis angewandte und übliche Verfahren eine Kombination dieser beiden Verfahren, häufig in Form eines Rechnerprogramms.

4.2 Unwuchtverteilung

Die Auslegung und das Herstellungsverfahren des Rotors können die Größe der Unwucht und ihre Verteilung entlang der Rotorachse erheblich beeinflussen. Rotoren können aus einem einzigen geschmiedeten Rohling gedreht oder durch das Zusammenfügen mehrerer Bauteile hergestellt sein. Beispielsweise werden die Rotoren von Strahltriebwerken durch die Verbindung vieler trommel- und scheibenförmiger Bauteile sowie Schaufeln hergestellt. Generatorläufer jedoch sind üblicherweise aus einem einzigen geschmiedeten Rohling gefertigt, an den weitere Bauteile angebaut sind. Durch große Unwuchten, die von aufgeschrumpten Scheiben, Kupplungen usw. herrühren, kann die Unwuchtverteilung ebenfalls erheblich beeinflusst werden.

Da die Unwuchtverteilung entlang der Rotorachse im Allgemeinen zufallsbedingt ist, ist die Verteilung entlang zweier Rotoren mit identischem Aufbau unterschiedlich. Bei einem Rotor mit nachgiebigem Verhalten ist die Unwuchtverteilung von größerer Bedeutung als bei einem Rotor mit starrem Verhalten, da sie den Grad bestimmt, bis zu dem die Biegeeigenformen angeregt werden. Die Wirkung der Unwucht an jedem Punkt entlang eines Rotors hängt von den Eigenformen des Rotors ab.

Der Unwuchtausgleich in Radialebenen des Rotors, die nicht denen entsprechen, in denen die Unwucht auftritt, kann Schwingungen bei solchen Drehzahlen entstehen lassen, die nicht mit denen gleich sind, bei denen der Rotor ursprünglich ausgewuchtet wurde. Diese Schwingungen können vorgegebene Grenzwerte überschreiten, insbesondere bei oder in der Nähe von Biegeresonanz-Drehzahlen. Solch ein Ausgleich kann sogar bei derselben Drehzahl zu Schwingungen führen, wenn die Biegeeigenformen am Einsatzort von denen abweichen, die während des Auswuchtens vorherrschten.

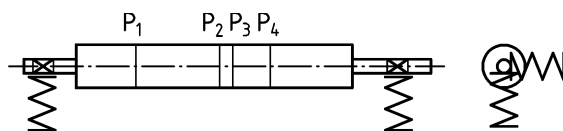
Desweiteren zeigen manche Rotoren, die sich während des Betriebs erwärmen, thermische Verformungen, die zu einer Änderung der Unwucht führen können. Wenn sich die Unwucht des Rotors von einem Lauf zum nächsten erheblich ändert, kann das Ziel unerreichbar sein, den Rotor unter vorgegebene Grenzwerte auszuwuchten.

4.3 Eigenformen von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten

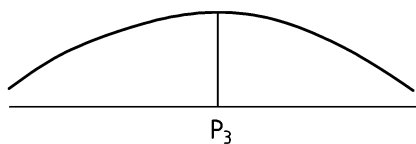
Wird der Einfluss von Dämpfung vernachlässigt, sind die Eigenformen des Rotors seine Biegeeigenformen; wenn der Rotor in Lagern abgestützt ist, die in allen radialen Richtungen dieselbe Steifigkeit aufweisen, sind die Eigenformen umlaufende ebene Linien. Bild 1 zeigt diese typischen Linien für die ersten drei Eigenformen eines einfachen Rotors, der nahe an seinen Enden in nachgiebigen Lagern abgestützt ist.

Bei einem gedämpften System aus Rotor und Lagerung können die Biegeeigenformen räumliche Linien sein, die um die Schaftachse rotieren; das gilt insbesondere im Fall hoher Dämpfung, die z. B. von ölgeschmierten Gleitlagern herrührt. Wie die erste und die zweite Eigenform mit Dämpfung möglicherweise aussehen, ist in Bild 2 dargestellt. Häufig können für die gedämpften Eigenformen näherungsweise die Eigenformen des ungedämpften Systems genommen werden, sodass sie als umlaufende ebene Linien angesehen werden können.

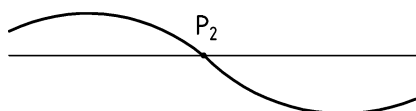
Es ist zu beachten, dass die Gestalt der Eigenformen und das Verhalten des Rotors gegenüber Unwuchten in starkem Maße von den dynamischen Eigenschaften und der axialen Anordnung der Lager und ihrer Abstützung beeinflusst wird.



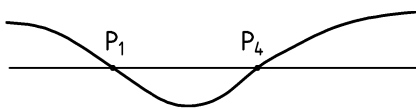
a) Typischer Rotor



b) Erste Biegeeigenform



c) Zweite Biegeeigenform



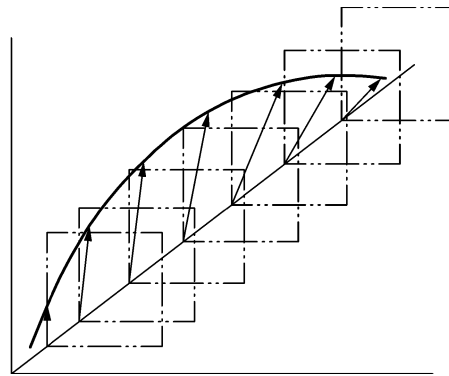
d) Dritte Biegeeigenform

Legende

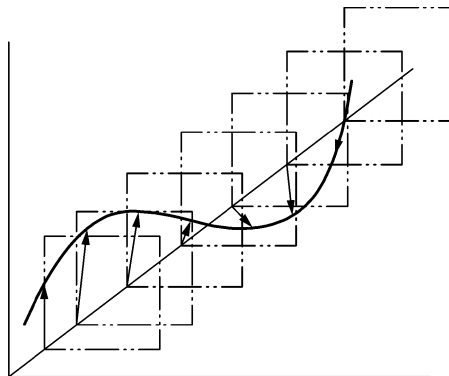
P_1, P_2, P_4 Knoten

P_3 Bauch

Bild 1 — Vereinfachte Eigenformen eines Rotors mit nachgiebigem Verhalten in nachgiebigen Lagern



a) Erste Eigenform



b) Zweite Eigenform

Bild 2 — Beispiele möglicher Eigenformen mit Dämpfung

4.4 Antwortverhalten eines Rotors mit nachgiebigem Verhalten gegenüber Unwucht

Die Unwuchtverteilung kann als Funktion der Unwucht in den Eigenformen angegeben werden. Die Auslenkung jeder Eigenform ist durch die Unwucht in dieser Eigenform bestimmt. Dreht sich ein Rotor mit einer Drehzahl, die in der Nähe einer Resonanzdrehzahl liegt, bestimmt üblicherweise die Eigenform die Durchbiegung des Rotors, die zu dieser Resonanzdrehzahl gehört. Der Grad, bis zu dem unter diesen Umständen große Durchbiegungen des Rotors vorkommen, ist abhängig hauptsächlich von

- a) der Größe der modalen Unwuchten,
- b) der Nähe der aktuellen Drehzahl zu einer Resonanzdrehzahl,
- c) dem Betrag der Dämpfung in dem System aus Rotor und Lagerung.

Wird eine bestimmte modale Unwucht durch Anbringung mehrerer diskreter Ausgleichsmassen verringert, verringert sich der dazugehörige modale Anteil an der Durchbiegung in gleicher Weise. Verringerung der modalen Unwuchten in der gezeigten Weise ist das Prinzip der Auswuchtverfahren, die in diesem Teil von ISO 21940 beschrieben sind.

Die modalen Unwuchten einer Unwuchtverteilung sind eine Funktion der Biegeeigenformen des Rotors. Bei einem vereinfachten Rotor wie in Bild 1 hängt die Wirkung eines Ausgleichsvorgangs auf eine Eigenform von der radialen Auslenkung dieser Eigenform an der axialen Stelle ab, in der der Ausgleichsvorgang stattfindet: maximale Wirkung in den Bäuchen, geringste Wirkung in der Nähe der Knoten. Wenn beispielsweise die Linien in den Bildern 1 b) bis d) die Eigenformen des Rotors nach Bild 1 a) sind, hat eine Ausgleichsmasse in der Ebene P_3 maximale Wirkung auf die erste Eigenform, während ihre Wirkung auf die zweite Eigenform gering ist.

Eine Ausgleichsmasse in der Ebene P_2 hat auf die zweite Eigenform überhaupt keine Wirkung, beeinflusst aber die beiden anderen Eigenformen.

Ausgleichsmassen in den Ebenen P_1 und P_4 wirken sich auf die dritte Eigenform nicht aus, beeinflussen aber die beiden anderen Eigenformen.

4.5 Ziele des Auswuchtens von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten

Die Ziele des Auswuchtens werden von den Anforderungen an den Betriebszustand der Maschine bestimmt. Bevor ein Rotor ausgewuchtet wird, sollte entschieden werden, welche Art von Auswuchtgüte als zufriedenstellend angesehen werden kann. Auf diese Weise kann der Auswuchtvorgang effizient und wirtschaftlich sein, während er gleichzeitig den Bedürfnissen des Anwenders genügt.

Es ist das Ziel des Auswuchtens, akzeptable Werte für die von der Unwucht erzeugten Schwingungen der Maschine, die Durchbiegungen der Welle und die Kräfte, die auf die Lager wirken, zu erreichen.

Das Ideal beim Auswuchten von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten besteht darin, die örtliche Unwucht in jedem Längenelement durch Auswuchtmaßnahmen an dem Element selbst auszugleichen. Dadurch würde der Massenmittelpunkt jedes Längenelements auf der Schaftachse des Rotors liegen.

Ein auf diese ideale Weise ausgewuchteter Rotor hätte weder eine statische Unwucht noch eine Momentenunwucht noch Unwuchten in den einzelnen Eigenformen. Solch ein vollkommen ausgewuchteter Rotor würde bei allen Drehzahlen zufriedenstellend laufen (soweit es die Unwucht betrifft).

In der Praxis wird die nötige Verminderung der Unwucht üblicherweise dadurch erreicht, dass in einer begrenzten Anzahl von Ausgleichsebenen Masse hinzugefügt oder abgenommen wird. Auch nach dem Auswuchten gibt es immer eine gewisse über den Rotor verteilte Restunwucht.

Es ist erforderlich, Schwingungen oder Schwingkräfte aufgrund dieser Restunwucht im Betriebsdrehzahlbereich auf akzeptable Werte zu verringern. Nur in besonderen Fällen reicht es aus, Rotoren mit nachgiebigem Verhalten bei nur einer einzigen Drehzahl auszuwuchten. Es sei angemerkt, dass ein Rotor, der für einen vorgegebenen Betriebsdrehzahlbereich zufriedenstellend ausgewuchtet ist, erhebliche Schwingungen ausführen kann, wenn er auf dem Weg zur Betriebsdrehzahl durch eine Resonanzdrehzahl laufen muss. Daher dürfen die zulässigen Schwingungen beim Durchlaufen einer Resonanzdrehzahl größer als die bei Betriebsdrehzahl zulässigen sein.

Welches Auswuchtverfahren auch immer angewandt wird, es ist das Ziel, die Unwuchtverteilung derart auszugleichen, dass die Wirkungen der Unwucht bei allen Drehzahlen bis hinauf zur höchsten Betriebsdrehzahl einschließlich Hochfahren, Auslauf und möglicherweise Schleudern minimiert werden. Bei der Verfolgung dieses Ziels kann es notwendig sein, den Einfluss von Eigenformen, die zu Resonanzdrehzahlen oberhalb des Betriebsdrehzahlbereichs gehören, zu berücksichtigen.

4.6 Vorzusehende Ausgleichsebenen

Die genaue Anzahl von benötigten Stellen (Ausgleichsebenen) entlang der Rotorachse hängt in gewissem Maße von dem angewandten Auswuchtverfahren ab. Beispielsweise werden die zusammengebauten Läufer von Zentrifugalkompressoren manchmal nur in den Endebenen ausgewuchtet, nachdem jede Scheibe und die Welle für sich in einer Auswuchtmaschine niedrigtourig ausgewuchtet wurden. Wenn die Drehzahl des Rotors die n -te Biegeresonanz-Drehzahl erreicht oder übersteigt, dann sind jedoch im Allgemeinen mindestens n und üblicherweise $n+2$ Ausgleichsebenen entlang des Rotors notwendig.

Schon während der Konstruktion muss eine ausreichende Anzahl von Ausgleichsebenen an geeigneten Stellen entlang der Rotorachse vorgesehen werden. In der Praxis ist die Anzahl von Ausgleichsebenen oft durch konstruktive Vorgaben und beim Betriebsauswuchten durch eine verminderte Zugänglichkeit beschränkt.

4.7 Gekoppelte Rotoren

Wenn zwei Rotoren zusammengekuppelt sind, hat die ganze Einheit eine Reihe von Resonanzdrehzahlen und Eigenformen. Im Allgemeinen sind diese Drehzahlen den Resonanzdrehzahlen der einzelnen, ungekuppelten Rotoren weder gleich noch auf eine einfache Weise verwandt. Weiterhin braucht die Verformung jedes Teils der gekuppelten Einheit nicht auf eine einfache Weise verwandt zu irgendeiner Eigenform zu sein, die dieser Rotor in ungekuppeltem Zustand hat. Daher sollte die Unwuchtverteilung von zwei oder mehreren gekuppelten Rotoren idealerweise in Abhängigkeit von den modalen Unwuchten des gekuppelten Systems und nicht der ungekuppelten Rotoren bewertet werden.

Aus Gründen der Praktikabilität wird meistens jeder Rotor als ungekuppelte Welle einzeln ausgewuchtet, und dieses Vorgehen stellt üblicherweise einen zufriedenstellenden Betriebszustand der gekuppelten Rotoren sicher. Der Grad, bis zu dem diese Technik angewandt werden darf, ist abhängig z. B. von den Eigenformen und den Resonanzdrehzahlen der ungekuppelten und gekuppelten Rotoren, der Unwuchtverteilung, der Art der Kupplung und der Lageranordnung des Wellenstrangs. Wenn darüber hinaus Auswuchten am Einsatzort erforderlich ist, ist Anhang A zu beachten.

5 Rotorkonfigurationen

Tabelle 1 zeigt typische Rotorkonfigurationen, nennt ihre Merkmale und führt empfohlene Auswuchtverfahren auf. Tabelle 1 beschreibt die Merkmale des Rotors ganz knapp; ausführlich werden diese Merkmale und Anforderungen zusammen mit den dazugehörigen Verfahren in den Abschnitten 6 und 7 beschrieben. Diese Verfahren sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Manchmal kann es angeraten sein, Auswuchtverfahren zu kombinieren. Wenn mehr als ein Auswuchtverfahren angewandt werden kann, so sind sie in aufsteigender Reihenfolge nach Zeit- und Kostenaufwand angegeben. Rotoren beliebiger Konfiguration können stets bei mehreren Drehzahlen ausgewuchtet werden (siehe 7.3), unter besonderen Umständen gelegentlich auch bei der Betriebsdrehzahl (siehe 7.4) oder bei einer festen Drehzahl (siehe 7.5).