

Mechanische Schwingungen  
Anforderungen an die Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem  
(starrem) Zustand  
Teil 1: Festlegung und Nachprüfung der Unwuchttoleranz  
(ISO/DIS 1940-1:2001)

**DIN**  
**ISO 1940-1**

ICS 21.120.40

Einsprüche bis 2002-04-30

**Entwurf**

Vorgesehen als Ersatz für  
DIN ISO 1940-1:1993-12

Mechanical vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state – Part 1: Determination and verification of balance tolerances (ISO/DIS 1940-1:2001)

Vibrations mécaniques – Exigences en matière de qualité dans l'équilibrage pour les rotors dans un état constant (rigide) – Partie 1: Détermination et vérification des tolérances d'équilibrage (ISO/DIS 1940-1:2001)

### Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf 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 als Datei per e-Mail an [nals@din.de](mailto:nals@din.de) in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter <http://www.din.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).

**Das internationale Schriftstück ISO/DIS 1940-1:2001, „Mechanical vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state – Part 1: Determination and verification of balance tolerances“, ist unverändert in diesen deutschen Norm-Entwurf übernommen worden.**

### Nationales Vorwort

Der internationale Norm-Entwurf ISO/DIS 1940-1:2001 „Mechanical vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state – Part 1: Determination and verification of balance tolerances“ ist vom ISO/TC 108/SC 1 „Balancing, including balancing machines“ unter deutscher Projektleitung erarbeitet worden. Die Deutsche Fassung wurde im Gemeinschaftsausschuss NALS/VDI C 6 UA 1 „Auswuchten und Auswuchtmaschinen“ ausgearbeitet.

Einsprecher werden gebeten, ihre Einsprüche möglichst bereits bis zum 15. April 2002 an den NALS zu übermitteln, damit sie der Ausschuss NALS/VDI C 6 UA 1 in die deutsche Stellungnahme aufnehmen kann, die an die ISO abzugeben ist.

Fortsetzung Seite 2 bis 35

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



**Documents**

Document Sharing Hub

Der Index per für englisch permissible ist in der Übersetzung durchgängig mit zul für zulässig wieder-gegeben.

Zu den im Inhalt zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

|            |       |                                    |
|------------|-------|------------------------------------|
| ISO 1000   | siehe | DIN 1301-1                         |
| ISO 1925   | siehe | DIN ISO 1925 und E DIN ISO 1925/A1 |
| ISO 1940-2 | siehe | DIN ISO 1940-2                     |
| ISO 2041   | siehe | E DIN 1311 Bbl. 1                  |
| ISO 8821   | siehe | DIN ISO 8821                       |
| ISO 11342  | siehe | DIN ISO 11342                      |

### Änderungen

Gegenüber DIN ISO 1940-1:1993-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Einführung von Bezugsebenen für die Unwuchttoleranzen anstelle der Verwendung der Ausgleichsebenen als Toleranzebenen;
- b) Anhänge mit Beispielen aufgenommen, die die praktische Anwendung der Norm demonstrieren;
- c) Norm redaktionell überarbeitet und Titel geändert.

## Anhang NA (informativ)

### Literaturhinweise

DIN 1301-1, *Einheiten – Einheitenennamen, Einheitenzeichen*

E DIN 1311 Beiblatt 1, *Schwingungen und schwingungsfähige Systeme – Schwingungen und Stöße – Begriffe*

DIN ISO 1925, *Mechanische Schwingungen – Auswuchttechnik – Begriffe (ISO 1925:1990 + Amd. 1:1995)*

E DIN ISO 1925/A1, *Mechanische Schwingungen – Auswuchttechnik – Begriffe; Änderung 1 (ISO 1925:1990/DAM 2:1999)*

DIN ISO 1940-2, *Mechanische Schwingungen – Anforderungen an die Auswuchtgüte starrer Rotoren – Teil 2: Abweichungen beim Auswuchten (ISO 1940-2:1997)*

DIN ISO 8821, *Mechanische Schwingungen – Vereinbarung über die Passfeder-Art beim Auswuchten von Wellen und Verbundteilen; Identisch mit ISO 8821:1989*

DIN ISO 11342, *Mechanische Schwingungen – Verfahren und Kriterien für das mechanische Auswuchten nachgiebiger Rotoren (ISO 11342:1998)*  
(einschließlich Berichtigung DIN ISO 11342:1999-05/Ber. 1:2001-10)

Deutsche Übersetzung

Mechanische Schwingungen

Anforderungen an die Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem  
(starrem) Zustand

Teil 1: Festlegung und Nachprüfung der Unwuchttoleranz

# Inhalt

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Vorwort.....                                                                                                                                                  | 4  |
| Einleitung .....                                                                                                                                              | 5  |
| 1 Anwendungsbereich.....                                                                                                                                      | 5  |
| 2 Normative Verweisungen.....                                                                                                                                 | 5  |
| 3 Begriffe .....                                                                                                                                              | 6  |
| 4 Wesentliche Gesichtspunkte des Auswuchtens.....                                                                                                             | 6  |
| 4.1 Allgemeines.....                                                                                                                                          | 6  |
| 4.2 Darstellung der Unwucht.....                                                                                                                              | 6  |
| 4.3 Unwuchtwirkungen.....                                                                                                                                     | 6  |
| 4.4 Bezugsebenen für die Unwuchttoleranzen.....                                                                                                               | 8  |
| 4.5 Ausgleichsebenen.....                                                                                                                                     | 8  |
| 4.6 Zulässige Restunwucht.....                                                                                                                                | 9  |
| 5 Ähnlichkeitsbetrachtungen.....                                                                                                                              | 9  |
| 5.1 Allgemeines.....                                                                                                                                          | 9  |
| 5.2 Zulässige Restunwucht und Rotormasse.....                                                                                                                 | 9  |
| 5.3 Zulässige spezifische Restunwucht und Betriebsdrehzahl.....                                                                                               | 10 |
| 6 Festlegung der Unwuchttoleranzen.....                                                                                                                       | 10 |
| 6.1 Allgemeines.....                                                                                                                                          | 10 |
| 6.2 Auswucht-Gütestufen G.....                                                                                                                                | 11 |
| 6.3 Experimentelle Festlegung.....                                                                                                                            | 12 |
| 6.4 Verfahren mit besonderer Zielsetzung.....                                                                                                                 | 12 |
| 6.5 Von nachgewiesener Erfahrung ausgehende Verfahren.....                                                                                                    | 12 |
| 7 Zuordnung der zulässigen Restunwucht zu den Toleranzebenen.....                                                                                             | 15 |
| 7.1 Eine Ebene.....                                                                                                                                           | 15 |
| 7.2 Zwei Ebenen .....                                                                                                                                         | 15 |
| 8 Zuordnung der Unwuchttoleranz zu den Ausgleichsebenen.....                                                                                                  | 16 |
| 8.1 Allgemeines.....                                                                                                                                          | 16 |
| 8.2 Eine Ebene.....                                                                                                                                           | 17 |
| 8.3 Zwei Ebenen .....                                                                                                                                         | 17 |
| 9 Zusammengebaute Rotoren.....                                                                                                                                | 17 |
| 9.1 Allgemeines.....                                                                                                                                          | 17 |
| 9.2 Auswuchten des Rotors als Ganzes.....                                                                                                                     | 17 |
| 9.3 Auswuchten der einzelnen Bauteile.....                                                                                                                    | 18 |
| 10 Nachprüfung der Restunwucht.....                                                                                                                           | 18 |
| 10.1 Allgemeines.....                                                                                                                                         | 18 |
| 10.2 Akzeptanzkriterien.....                                                                                                                                  | 18 |
| 10.3 Nachprüfung auf einer Auswuchtmaschine.....                                                                                                              | 19 |
| 10.4 Nachprüfung ohne Auswuchtmaschine.....                                                                                                                   | 19 |
| Anhang A (informativ) Beispiel zur Festlegung der zulässigen Restunwucht, ausgehend von<br>der Auswucht-Gütestufe G, und Zuordnung zu den Toleranzebenen..... | 20 |
| Anhang B (informativ) Festlegung der Unwuchttoleranzen, ausgehend von Grenzwerten für die<br>Lagerkräfte.....                                                 | 23 |
| Anhang C (informativ) Festlegung der Unwuchttoleranzen, ausgehend von Grenzwerten für die<br>Schwingungen.....                                                | 24 |

|                                                                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Anhang D (informativ) Festlegung der Unwuchttoleranzen, ausgehend von nachgewiesener Erfahrung.....</b>                              | <b>27</b> |
| <b>Anhang E (informativ) Regeln zur Zuordnung der für die Toleranzebenen angegebenen Unwuchttoleranzen zu den Ausgleichsebenen.....</b> | <b>29</b> |
| <b>Anhang F (informativ) Begriffe.....</b>                                                                                              | <b>31</b> |
| <b>Literaturhinweise .....</b>                                                                                                          | <b>35</b> |

## Vorwort

Die ISO (Internationale Organisation für Normung) ist die weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedskörperschaften). Die Erarbeitung Internationaler Normen obliegt den Technischen Komitees der ISO. Jede Mitgliedskörperschaft, die sich für ein Thema interessiert, für das ein Technisches Komitee eingesetzt wurde, ist berechtigt, in diesem Komitee mitzuarbeiten. Internationale (staatliche und nichtstaatliche) Organisationen, die mit der ISO in Verbindung stehen, sind an den Arbeiten ebenfalls beteiligt. Die ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) auf allen Gebieten elektrotechnischer Normung zusammen.

Internationale Normen werden in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 3, erstellt.

Die von den Technischen Komitees verabschiedeten internationalen Norm-Entwürfe werden den Mitgliedskörperschaften zur Abstimmung vorgelegt. Die Veröffentlichung als Internationale Norm erfordert Zustimmung von mindestens 75 % der abstimmenden Mitgliedskörperschaften.

Es besteht die Möglichkeit, dass Bestandteile dieses Teils von ISO 1940 Gegenstand von Patentrechten sind. Die ISO hat nicht die Verantwortung, das Vorhandensein einzelner oder aller dieser Patentrechte festzustellen.

Die Internationale Norm ISO 1940-1 ist vom Technischen Komitee ISO/TC 108 „Mechanical vibration and shock“, Unterkomitee SC 1 „Balancing, including balancing machines“ erarbeitet worden.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 1940-1:1986), die inhaltlich überarbeitet wurde.

Die wesentlichste Neuerung ist die Einführung von Bezugsebenen für die Unwuchttoleranzen anstelle der Verwendung der Ausgleichsebenen als Toleranzebenen.

ISO 1940 besteht aus den folgenden Teilen mit dem Haupttitel "Mechanische Schwingungen — Anforderungen an die Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem (starrem) Zustand":

- Teil 1: Festlegung und Nachprüfung der Unwuchttoleranz
- Teil 2: Abweichungen beim Auswuchten.

Die Anhänge A bis F dienen nur der Information.

## Einleitung

Eine allgemeine Einführung in die Normen der Auswuchttechnik wird in ISO 19499 gegeben. Bei Rotoren in konstantem (starrem) Zustand sind lediglich die resultierende Unwucht und die resultierende Momentenunwucht von Interesse, beide zusammen werden häufig als die dynamische Unwucht angegeben.

Die heutzutage zur Verfügung stehenden Auswuchtmaschinen ermöglichen es, die Unwucht auf niedrige Werte zu reduzieren. Es ist jedoch unwirtschaftlich, übertriebene Anforderungen an die Auswuchtgüte zu stellen. Daher ist es notwendig festzulegen, wie weit die Unwucht reduziert werden sollte und wo der beste Kompromiss zwischen den wirtschaftlichen und den technischen Anforderungen an die Auswuchtgüte liegt.

Eine ähnliche Bedeutung hat die Nachprüfung der Restunwucht. Es wird ein verbessertes Vorgehen zur Behandlung von Abweichungen der Auswuchtmaschine in Verbindung mit ISO 1940-2 beschrieben.

## 1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von ISO 1940 enthält Empfehlungen für Rotoren in konstantem (starrem) Zustand. Er legt Folgendes fest:

- a) Festlegung der Unwuchttoleranzen;
- b) die notwendige Anzahl von Ausgleichsebenen;
- c) Verfahren zur Nachprüfung der Restunwucht eines Rotors.

In Tabelle 1 und in Bild 2 werden auf weltweiter Erfahrung basierende Empfehlungen für die erforderliche Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem (starrem) Zustand gegeben, die sich jeweils einer Maschinenart und der höchsten Betriebsdrehzahl zuordnen lässt.

ANMERKUNG Dieses Vorgehen sowie Weiteres werden in Abschnitt 6 erläutert.

Dieser Teil von ISO 1940 hat auch den Zweck, die Verständigung zwischen Hersteller und Abnehmer von Maschinen mit rotierenden Teilen zu erleichtern, indem Abnahmekriterien für die Nachprüfung der Restunwucht genannt werden.

Die mit dem Auswuchten und der Ermittlung der Restunwucht verbundenen Abweichungen werden im Einzelnen in ISO 1940-2 behandelt.

Die in diesem Teil von ISO 1940 festgelegten Begriffe können bei der Erstellung technischer Spezifikationen verwendet werden.

Dieser Teil von ISO 1940 behandelt nicht Rotoren in elastischem Zustand. Die Anforderungen an die Auswuchtgüte von Rotoren in elastischem Zustand sind in ISO 11342 angegeben.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden normativen Dokumente enthalten Festlegungen, die durch Verweisung in diesem Text Bestandteil des vorliegenden Teils von ISO 1940 sind. Bei datierten Verweisungen gelten spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nicht. Anwender dieses Teils von ISO 1940 werden jedoch gebeten, die jeweils neuesten Ausgaben der nachfolgend angegebenen normativen Dokumente anzuwenden. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen normativen Dokuments. Mitglieder von ISO und IEC führen Verzeichnisse der gültigen Internationalen Normen.

ISO 1925:2001, *Mechanical vibration — Balancing — Vocabulary*

ISO 1940-2, *Mechanical vibration — Balance quality requirements of rigid rotors — Part 2: Balance errors*

ISO 2041, *Vibration and shock — Vocabulary*

### 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Teils von ISO 1940 gelten die Begriffe nach ISO 1925:2001 und ISO 2041. Zum leichteren Verständnis dieses Teils von ISO 1940 sind einige dieser Definitionen sowie einige weitere, die sich derzeit im ISO/TC 108/SC 1 in Überarbeitung befinden, in Anhang F angegeben.

## 4 Wesentliche Gesichtspunkte des Auswuchtens

### 4.1 Allgemeines

Auswuchten ist ein Vorgang, durch den die Massenverteilung eines Rotors geprüft und, wenn nötig, korrigiert wird, um sicherzustellen, dass die Restunwuchten oder die umlauffrequenten Schwingungen der Lagerzapfen und/oder die Lagerkräfte bei Betriebsdrehzahl in festgelegten Grenzen liegen.

Die Unwucht eines Rotors kann von der Konstruktion, dem Material, der Fertigung und dem Zusammenbau verursacht werden. Jeder Rotor, selbst bei Serienfertigung, hat eine individuelle Unwuchtverteilung über die Rotorlänge.

### 4.2 Darstellung der Unwucht

Ein und dieselbe Unwucht eines Rotors in konstantem (starrem) Zustand kann auf verschiedene Weise durch vektorielle Größen dargestellt werden, wie in den Bildern 1a) bis 1f) gezeigt.

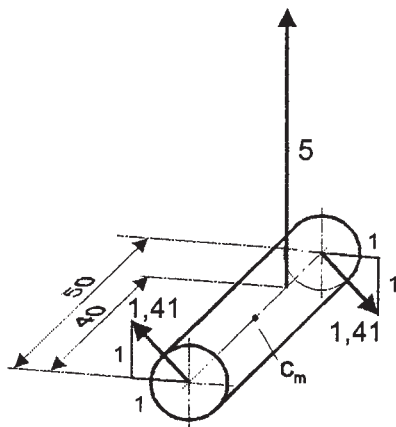
Die Bilder 1a) bis 1c) zeigen unterschiedliche Darstellungen mit der resultierenden Unwucht und der resultierenden Momentenunwucht, die Bilder 1d) bis 1f) mit der dynamischen Unwucht in zwei Ebenen.

ANMERKUNG Der resultierende Unwuchtvektor kann in jeder beliebigen Radialebene angesetzt werden (ohne den Unwuchtbetrag und den Unwuchtwinkel zu ändern), die zugehörige resultierende Momentenunwucht ist jedoch vom Angriffspunkt des resultierenden Unwuchtvektors abhängig.

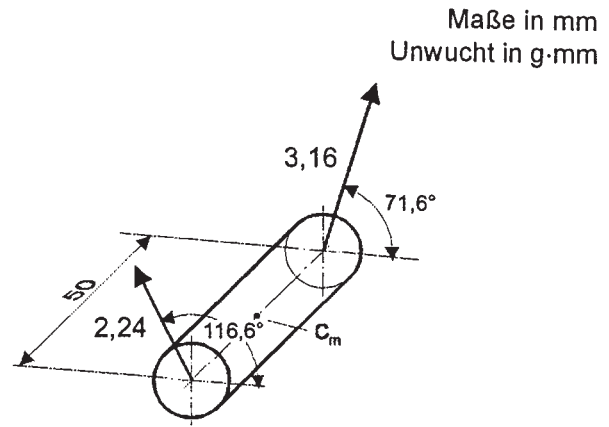
Wenn Ein-Ebenen-Auswuchten ausreichend ist (siehe 4.5.2) oder wenn die resultierende Unwucht/die resultierende Momentenunwucht betrachtet werden (siehe 4.5.4), ist die Darstellung in den Bildern 1a) bis 1c) zu bevorzugen (erste Spalte). Werden ausschließlich zwei Ebenen betrachtet, ist die Darstellung in den Bildern 1d) bis 1f) günstiger (zweite Spalte).

### 4.3 Unwuchtwirkungen

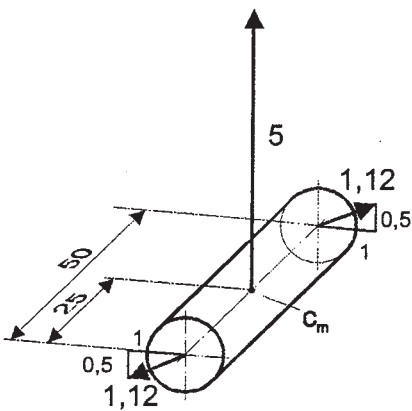
Die resultierende Unwucht und die resultierende Momentenunwucht haben unterschiedliche Wirkungen auf die Lagerkräfte und auf die Maschinenschwingungen. Dasselbe gilt, wenn die Unwucht als dynamische Unwucht in zwei Ebenen angegeben wird: In den meisten Fällen sind die Wirkungen unterschiedlich, abhängig davon, ob die Unwucht vornehmlich eine resultierende Unwucht oder eine resultierende Momentenunwucht darstellt.



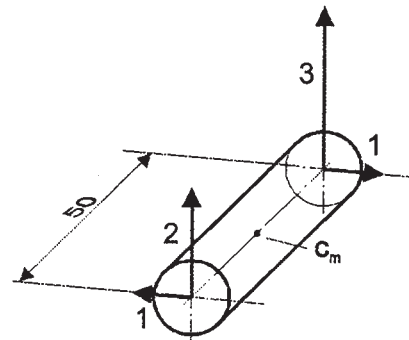
a) Eine Unwuchterresultierende zusammen mit einer zugehörigen Momentenunwucht in den Endebenen



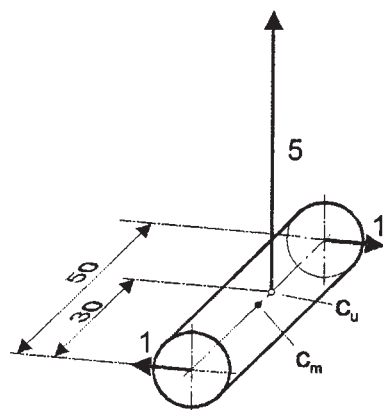
d) Jeweils ein Unwuchtvektor in den beiden Endebenen



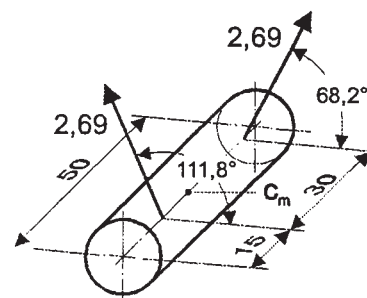
b) Sonderfall von a): Die Unwuchterresultierende greift im Massenmittelpunkt  $c_m$  an (statische Unwucht), dazu die zugehörige Momentenunwucht in den Endebenen



e) Jeweils zwei orthogonale Unwuchtkomponenten in den beiden Endebenen



c) Sonderfall von a): Die Unwuchterresultierende greift im Unwuchtzentrum  $c_u$  an; die zugehörige Momentenunwucht ist ein Minimum und liegt in einer Ebene, auf der die Unwuchterresultierende senkrecht steht



f) Jeweils ein Unwuchtvektor in zwei beliebigen Ebenen

$c_m$  Massenmittelpunkt  
 $c_u$  Unwuchtzentrum

**Bild 1 — Unterschiedliche Darstellungen ein und derselben Unwucht eines Rotors in konstantem (starrem) Zustand**

#### 4.4 Bezugsebenen für die Unwuchttoleranzen

Bei einem Rotor in konstantem (starrem) Zustand gibt es stets zwei ideale Ebenen für die Unwuchttoleranzen. Wenn die Unwuchttoleranzen für diese Ebenen angegeben werden, muss nur der Betrag jeder Restunwucht unabhängig von ihrer Winkellage unter dem jeweiligen Toleranzwert bleiben.

Meistens liegen diese Ebenen dicht neben den Lagerebenen. Abgesehen davon ist es in der Regel das Ziel des Auswuchtens, die über die Lager in die Umgebung übertragenen Schwingungen und Kräfte zu verringern. Damit dieses Ziel leichter erreicht werden kann, werden in diesem Teil von ISO 1940 die Lagerebenen A und B als Bezugsebenen für die Unwuchttoleranzen verwendet (Toleranzebenen).

#### 4.5 Ausgleichsebenen

##### 4.5.1 Allgemeines

Bei Rotoren, deren Unwucht außerhalb der Toleranzen liegt, ist es notwendig, die Unwucht auszugleichen. Der Ausgleich dieser Unwucht kann oft nicht in den Ebenen erfolgen, für die die Unwuchttoleranzen angegeben wurden, sondern in denjenigen, in denen Material hinzugefügt, entfernt oder umgesetzt werden kann.

Die Anzahl der notwendigen Ausgleichsebenen hängt sowohl von der Größe und Verteilung der Unwucht als auch von der Gestaltung des Rotors ab, beispielsweise von der Form der Ausgleichsebenen und ihrer Anordnung relativ zu den Toleranzebenen.

##### 4.5.2 Rotoren, die nur eine Ausgleichsebene benötigen

Bei manchen scheibenförmigen Rotoren ist lediglich die resultierende Unwucht außerhalb der Toleranz, sofern

- der Lagerabstand ausreichend groß ist,
- die Scheibe hinreichend geringen Axialschlag aufweist,
- die Ausgleichsebene für die resultierende Unwucht geeignet gewählt wurde (um die Momentenunwucht in Grenzen zu halten).

Ob diese Bedingungen erfüllt sind, müsste von Fall zu Fall untersucht werden. Nachdem an einer ausreichenden Anzahl von Rotoren das Auswuchten in einer Ebene durchgeführt worden ist, wird die größte verbleibende Momentenunwucht ermittelt und durch den Lagerabstand dividiert, was ein Unwuchtpaar ergibt. Sind die derart ermittelten Unwuchten selbst im ungünstigsten Fall zulässig, kann davon ausgegangen werden, dass eine Ein-Ebenen-Auswuchtung ausreichend ist.

Beim Ein-Ebenen-Auswuchten braucht sich der Rotor nicht zu drehen, doch werden wegen der Empfindlichkeit und Genauigkeit meistens fliehkraftnutzende Auswuchtmaschinen benutzt. Die resultierende Unwucht kann ermittelt und ausgeglichen werden, bis sie unterhalb der vorgegebenen Grenze liegt.

##### 4.5.3 Rotoren, die zwei Ausgleichsebenen benötigen

Wenn ein Rotor in konstantem (starrem) Zustand kein scheibenförmiger Rotor ist oder wenn er die Bedingungen nach 4.5.2 nicht erfüllt, muss auch die Momentenunwucht ausgeglichen werden. Meistens werden die resultierende Unwucht und die resultierende Momentenunwucht zur dynamischen Unwucht zusammengefasst: zwei Unwuchtvektoren in zwei Ebenen, sog. komplementäre Unwuchtvektoren [siehe Bild 1d)].

Beim Zwei-Ebenen-Auswuchten muss sich der Rotor drehen, da sich sonst die Momentenunwucht nicht bemerkbar macht.

#### 4.5.4 Rotoren mit mehr als zwei Ausgleichsebenen

Obwohl theoretisch alle Rotoren in konstantem (starrem) Zustand in zwei Ebenen ausgewuchtet werden können, werden manchmal mehr als zwei Ausgleichsebenen verwendet, beispielsweise

- wenn die resultierende Unwucht und die resultierende Momentenunwucht unabhängig voneinander ausgeglichen werden, sofern nämlich der Ausgleich der resultierenden Unwucht nicht in einer der (oder beiden) Ebenen der Momentenunwucht erfolgt,
- wenn der Ausgleich über die ganze Rotorlänge erfolgt.

ANMERKUNG Gelegentlich ist die Verteilung des Ausgleichs über die Rotorlänge wegen Einschränkungen in den Ausgleichsebenen notwendig (z. B. bei Kurbelwellen, bei denen der Ausgleich durch Bohrungen in den Gegengewichten erfolgt) oder aber ratsam, um die Funktion oder die Materialfestigkeit zu erhalten.

#### 4.6 Zulässige Restunwucht

Es sei der einfache Fall eines Innenbord-Rotors von geringer axialer Länge betrachtet, bei dem die Momentenunwucht vernachlässigt werden darf. Der Unwuchtzustand dieses Rotors kann dann durch eine einzige vektorielle Größe, die Unwucht  $\vec{U}$ , beschrieben werden.

Damit der Rotor zufriedenstellend läuft, sollte der Betrag dieser Unwucht, der Restunwucht  $U_{\text{residual}}$ , nicht größer als ein zulässiger Wert  $U_{\text{zul}}$  sein:

$$U_{\text{residual}} \leq U_{\text{zul}} \quad (1)$$

Ganz allgemein gilt das für jeden Rotortyp.

ANMERKUNG 1 Die SI-Einheit von  $U_{\text{zul}}$  ist kg·m, aber beim Auswuchten ist die Einheit g·mm praktischer.

ANMERKUNG 2  $U_{\text{zul}}$  ist als die gesamte Toleranz in der Ebene des Massenmittelpunktes definiert. Beim Zwei-Ebenen-Auswuchten ist diese Toleranz den beiden Toleranzebenen zuzuordnen (siehe Abschnitt 7).

### 5 Ähnlichkeitsbetrachtungen

#### 5.1 Allgemeines

Ähnlichkeitsbetrachtungen können zum Verständnis beitragen und bei der Berechnung des Einflusses der Rotormasse und der Betriebsdrehzahl auf die zulässige Restunwucht helfen.

#### 5.2 Zulässige Restunwucht und Rotormasse

Im Allgemeinen ist die zulässige Restunwucht  $U_{\text{zul}}$  bei Rotoren des gleichen Typs proportional zur Rotormasse  $m$ :

$$U_{\text{zul}} \sim m \quad (2)$$

Wenn der Wert der zulässigen Restunwucht auf die Rotormasse bezogen wird, ergibt sich die zulässige spezifische Restunwucht  $e_{\text{zul}}$  wie in folgender Gleichung angegeben:

$$e_{\text{zul}} = U_{\text{zul}}/m \quad (3)$$

ANMERKUNG 1 Die SI-Einheit von  $U_{\text{zul}}/m$  ist kg·m/kg, aber praktischer ist die Einheit g·mm/kg, was zur Einheit  $\mu\text{m}$  in Anmerkung 2 konform ist.

ANMERKUNG 2 Die SI-Einheit von  $e_{\text{zul}}$  ist kg·m/kg oder m. Praktischer ist die Einheit  $\mu\text{m}$ , da die Mehrzahl der zulässigen spezifischen Restunwuchten zwischen  $0,1\mu\text{m}$  und  $10\mu\text{m}$  liegt. Die Größe  $e_{\text{zul}}$  ist besonders dann nützlich, wenn geometrische Toleranzen (Schlag, Spiel) mit Unwuchttoleranzen in Zusammenhang gebracht werden sollen.

ANMERKUNG 3 Bei der rein theoretischen Modellvorstellung, dass die gesamte Masse des Rotors in nur einem Punkt konzentriert ist, stellt  $e_{zul}$  die zulässige Exzentrizität des Massenmittelpunktes von der Schaftachse dar; bei einem realen Rotor ist  $e_{zul}$  jedoch nicht anschaulich.

ANMERKUNG 4 Für die erreichbare spezifische Restunwucht  $e_{zul}$  gibt es Grenzen, die vom Maschinenaufbau abhängen, z. B. Zentrierung, Lager und Antrieb.

ANMERKUNG 5 Kleine Werte von  $e_{zul}$  können in der Praxis nur dann erreicht werden, wenn die Maßhaltigkeit der Lagerzapfen (Kreisform des Querschnitts, Ausrichtung des Lagerzapfens usw.) entsprechend hoch ist. In einigen Fällen kann es notwendig sein, den Rotor in seinen Betriebslagern auszuwuchten und dabei Band-, Luft- oder Eigenantrieb zu benutzen. In anderen Fällen ist es sogar notwendig, dass der Rotor zum Auswuchten vollständig zusammengebaut in seinem Gehäuse mit Betriebslagern und Eigenantrieb unter Betriebsbedingungen und bei Betriebstemperatur läuft.

### 5.3 Zulässige spezifische Restunwucht und Betriebsdrehzahl

Die Erfahrung zeigt, dass sich bei Rotoren des gleichen Typs der Wert der zulässigen spezifischen Restunwucht  $e_{zul}$  im Allgemeinen umgekehrt proportional zur Betriebsdrehzahl  $n$  des Rotors verhält:

$$e_{zul} \sim 1/n \quad (4)$$

Anders ausgedrückt lässt sich diese Beziehung durch die folgende Gleichung angeben, wobei  $\Omega$  die Winkelgeschwindigkeit des Rotors bei der höchsten Betriebsdrehzahl ist:

$$e_{zul} \cdot \Omega = \text{konstant} \quad (5)$$

Diese Beziehung ergibt sich auch aus der Tatsache, dass bei geometrisch ähnlichen Rotoren mit gleicher Umfangsgeschwindigkeit die Spannungen im Rotor und die spezifischen Lagerkräfte (aufgrund der Zentrifugalkraft) gleich sind. Die Auswucht-Gütestufen (siehe 6.2, Tabelle 1 und Bild 2) sind auf dieser Beziehung aufgebaut.

ANMERKUNG Bei Rotoren, deren Betriebsdrehzahl deutlich unterhalb der konstruktiv vorgesehenen Höchstdrehzahl liegt (z. B. bei manchen Wechselstrommotoren, deren Rotor für  $3000 \text{ min}^{-1}$  ausgelegt ist, aber in einem Stator für  $1000 \text{ min}^{-1}$  läuft), können diese Ähnlichkeitsbetrachtungen zu einschränkend sein. In solchen Fällen darf für  $e_{zul}$  ein größerer Wert (entsprechend  $3000/1000$ ) zugelassen werden.

## 6 Festlegung der Unwuchttoleranzen

### 6.1 Allgemeines

Die Unwuchttoleranzen können nach fünf verschiedenen Verfahren festgelegt werden, wie in 6.2 bis 6.5 beschrieben. Diese Verfahren gehen aus von

- Auswucht-Gütestufen, die aus der langjährigen praktischen Erfahrung mit einer großen Anzahl verschiedener Rotoren abgeleitet wurden (siehe 6.2),
- experimentellem Vorgehen, wie es häufig beim Auswuchten in der Serienfertigung erfolgt (siehe 6.3),
- Grenzwerten für die von der Unwucht hervorgerufenen Lagerkräfte (siehe 6.4.1),
- Grenzwerten für die von der Unwucht hervorgerufenen Schwingungen (siehe 6.4.2),
- nachgewiesener Erfahrung mit Unwuchttoleranzen (siehe 6.5).

Die Wahl des Verfahrens sollte zwischen Hersteller und Anwender verabredet werden.

## 6.2 Auswucht-Gütestufen G

### 6.2.1 Einteilung in Klassen

Auf der Basis von Ähnlichkeitsbetrachtungen (siehe Abschnitt 5) und weltweiter Erfahrung sind Auswucht-Gütestufen G festgelegt worden, die für typische Maschinenarten eine Einteilung der erforderlichen Auswuchtgüte in Klassen ermöglichen (siehe Tabelle 1).

Die Auswucht-Gütestufen G werden entsprechend dem Betrag des Produkts  $e_{zul} \cdot \Omega$ , angegeben in mm/s, bezeichnet. Wenn diese Größe gleich 6,3 mm/s ist, wird die Auswucht-Gütestufe als G6,3 bezeichnet.

Die Auswucht-Gütestufen sind mit dem Faktor 2,5 abgestuft. In manchen Fällen kann eine feinere Unterteilung nötig sein, insbesondere wenn hohe Auswuchtgüte verlangt wird; die Unterteilung sollte jedoch nicht feiner als mit 1,6 abgestuft werden.

Die Werte von  $e_{zul}$  (identisch mit  $U_{zul}/m$ ) sind in Bild 2 über der höchsten Betriebsdrehzahl aufgetragen.

ANMERKUNG Bild 2 enthält des Weiteren Angaben zu allgemein gebräuchlichen Bereichen (Drehzahl und Auswucht-Gütestufe G), die sich aus der allgemeinen Erfahrung ergeben.

### 6.2.2 Sonderkonstruktionen

Die Auswucht-Gütestufen leiten sich von typischen Maschinenkonstruktionen ab, bei denen die Rotormasse ein bestimmter Teil der kompletten Maschine ist. In besonderen Fällen sind Modifikationen notwendig.

**BEISPIEL** Elektromotoren mit einer Wellenhöhe unter 80 mm fallen in die Klasse G 6,3, woraus sich die zulässige Unwucht ergibt (siehe 6.2.3). Dieser Wert der zulässigen Unwucht ist richtig, solange die Rotormasse einen typischen Prozentsatz der Maschinenmasse darstellt, beispielsweise 30 %. Bei leichten (beispielsweise eisenlosen) Rotoren kann die Rotormasse durchaus nur 10 % der Gesamtmasse ausmachen; dann darf die 3fache zulässige Unwucht zugelassen werden.

Wenn im Gegensatz dazu die Rotormasse extrem groß ist (durchaus bis 90 %), beispielsweise bei einem Motor mit Außenrotor, kann es notwendig sein, die zulässige Unwucht auf ein Drittel zu reduzieren.

### 6.2.3 Zulässige Restunwucht

Ausgehend von einer gewählten Auswucht-Gütestufe  $G_x$  kann die zulässige Restunwucht  $U_{zul}$  nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$U_{zul} = 1000 \frac{G_x \cdot m}{\Omega} \quad (6)$$

Alternativ kann Bild 2 zur Ermittlung von  $e_{zul}$  verwendet werden; dann gilt:

$$U_{zul} = e_{zul} \cdot m \quad (7)$$

Dabei ist:

$U_{zul}$  Zahlenwert der zulässigen Restunwucht in g·mm

$G_x$  Zahlenwert der gewählten Auswucht-Gütestufe in mm/s

$m$  Zahlenwert der Rotormasse in kg

$\Omega$  Zahlenwert der Winkelgeschwindigkeit in rad/s bei der Betriebsdrehzahl  $n$  in  $\text{min}^{-1}$ ; es gilt  $\Omega \approx n/10$

$e_{zul}$  Zahlenwert der zulässigen spezifischen Restunwucht in g·mm/kg