

DIN ISO 21940-11

ICS 21.120.40; 29.160.10

Ersatz für
DIN ISO 1940-1:2004-04 und
DIN ISO 1940-1
Berichtigung 1:2005-04

**Mechanische Schwingungen –
Auswuchten von Rotoren –
Teil 11: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit starrem Verhalten
(ISO 21940-11:2016)**

Mechanical vibration –
Rotor balancing –
Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour (ISO 21940-11:2016)

Vibrations mécaniques –
Équilibrage des rotors –
Partie 11: Modes opératoires et tolérances pour rotors à comportement rigide
(ISO 21940-11:2016)

Gesamtumfang 34 Seiten

DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich.....	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	8
4 Wesentliche Gesichtspunkte des Auswuchtens.....	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Darstellung der Unwucht.....	8
4.3 Unwuchtwirkungen	10
4.4 Bezugsebenen für Unwuchttoleranzen	10
4.5 Ausgleichsebenen	10
4.5.1 Allgemeines	10
4.5.2 Rotoren, die nur eine Ausgleichsebene benötigen.....	10
4.5.3 Rotoren, die zwei Ausgleichsebenen benötigen.....	11
4.5.4 Rotoren mit mehr als zwei Ausgleichsebenen.....	11
4.6 Zulässige Restunwucht.....	11
5 Ähnlichkeitsbetrachtungen	11
5.1 Allgemeines	11
5.2 Zulässige Restunwucht und Rotormasse	12
5.3 Zulässige spezifische Restunwucht und Betriebsdrehzahl	12
6 Festlegung der Unwuchttoleranzen.....	13
6.1 Allgemeines	13
6.2 Ableitung der Unwuchttoleranzen.....	13
6.3 Auswucht-Gütestufe G.....	13
6.3.1 Klassifizierung.....	13
6.3.2 Sonderkonstruktionen	16
6.3.3 Zulässige Restunwucht.....	16
6.4 Experimentelle Ermittlung	16
6.5 Unwuchttoleranzen, die auf Lagerkräften oder Schwingungen gründen.....	17
6.5.1 Lagerkräfte.....	17
6.5.2 Schwingungen	17
6.6 Auf nachgewiesener Erfahrung gründende Verfahren.....	17
7 Zuordnung der zulässigen Restunwucht zu den Toleranzebenen	17
7.1 Eine Ebene	17
7.2 Zwei Ebenen.....	17
7.2.1 Allgemeines	17
7.2.2 Grenzen für Innenbord-Rotoren.....	18
7.2.3 Grenzwerte für Außenbord-Rotoren.....	18
8 Zuordnung der Unwuchttoleranzen zu den Ausgleichsebenen.....	19
8.1 Allgemeines	19
8.2 Eine Ebene	20
8.3 Zwei Ebenen.....	20

9	Zusammengebaute Rotoren	20
9.1	Allgemeines	20
9.2	Auswuchten des Rotors als Zusammenbau	20
9.3	Auswuchten der einzelnen Bauteile	20
10	Berücksichtigung von Abweichungen beim Nachweis von zulässigen Restunwuchten.....	21
10.1	Allgemeines	21
10.2	Unwuchttoleranz	21
10.3	Gesamtabweichung von Unwuchtmessungen.....	21
10.4	Nachweis der zulässigen Restunwucht.....	22
10.4.1	Allgemeines	22
10.4.2	Unwuchtmesswerte innerhalb der Toleranz	22
10.4.3	Unwuchtmesswerte außerhalb der Toleranz	22
10.4.4	Bereich der Unsicherheit.....	22
Anhang A (informativ)	Beispiel zum Festlegen der zulässigen Restunwucht, ausgehend von der Auswucht-Gütestufe G, und ihre Verteilung auf die Toleranzebenen.....	23
Anhang B (informativ)	Festlegen der Unwuchttoleranzen, ausgehend von Grenzwerten für die Lagerkräfte	27
Anhang C (informativ)	Festlegen der Unwuchttoleranzen, ausgehend von nachgewiesener Erfahrung.....	29
Anhang D (informativ)	Regeln zur Zuordnung der Unwuchttoleranzen von den Toleranzebenen zu den Ausgleichsebenen.....	31
Literaturhinweise.....		34

Nationales Vorwort

Die Internationale Norm ISO 21940-11:2016 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 von DIN geführt wird, unter deutscher Projektleitung erarbeitet worden. Die deutsche Mitarbeit erfolgte durch den Arbeitsausschuss NA 001-03-06 AA (NALS/VDI C 6) „Auswuchten und Auswuchtmaschinen“ des DIN/VDI-Normenausschusses Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. 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 19499 siehe DIN ISO 19499
Normen der Reihe ISO 21940 siehe Normen der Reihe DIN ISO 21940

Die Deutschen Normen sind im nationalen Anhang NA aufgeführt.

ISO 21940 mit dem Titel *Mechanical vibration — Rotor balancing* besteht aus 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*)}
- *Part 13: Criteria and safeguards for the in-situ balancing of medium and large rotors* ^{5*)}
- *Part 14: Procedures for assessing balance errors* ^{6*)}

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

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*

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*

- *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 1940-1:2004-04 und DIN ISO 1940-1 Berichtigung 1:2005-04 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Berichtigung eingearbeitet und Norm überarbeitet, wobei die Erläuterung zur Anwendung von zulässigen Restunwuchten in den Prozessen zum Auswuchten eines Rotors und zum Nachweis seiner Restunwucht stärker betont wird;
- b) Festlegung von Begriffen gestrichen;
- c) Angaben zur Spezifikation von Unwuchttoleranzen auf der Grundlage von Schwingungsgrenzen gestrichen;
- d) den internationalen Gepflogenheiten folgend wurden die Formelzeichen und Indizes beibehalten und nicht durch deutsche Abkürzungen ersetzt.

Frühere Ausgaben

DIN ISO 1940-1: 1993-12, 2004-04
DIN ISO 1940-1 Berichtigung 1: 2005-04

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 19499, *Mechanische Schwingungen — Auswuchttechnik — Einführung und Leitfaden für die Auswahl und Anwendung von Auswuchtnormen*

DIN ISO 21940-2, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 2: Begriffe* ^{11*)}

DIN ISO 21940-12, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 12: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit nachgiebigem Verhalten*

DIN ISO 21940-12 Beiblatt 1, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 12: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit nachgiebigem Verhalten — Beiblatt 1: Verfahren zum Auswuchten bei mehreren Drehzahlen*

DIN ISO 21940-13, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 13: Kriterien und Sicherheitshinweise für das Auswuchten von mittleren und großen Rotoren am Aufstellungsort*

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 21940-23, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 23: Verkleidungen und andere Schutzmaßnahmen für die Messstation von Auswuchtmaschinen*

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

11*) Z. Z. Entwurf

Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 11: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit starrem Verhalten

Einleitung

Auswuchten von Rotoren ist ein Verfahren, bei dem die Massenverteilung eines Rotors (oder Teils oder Moduls) überprüft und, sofern erforderlich, korrigiert wird, um sicherzustellen, dass die Unwuchttoleranz eingehalten wird. Dieses Dokument behandelt das Auswuchten von Rotoren mit starrem Verhalten. Ein Rotor wird als starr bezeichnet, wenn seine Durchbiegung, die durch die Unwuchtverteilung erzeugt wird, hinsichtlich der vereinbarten Unwuchttoleranz bei jeder Drehzahl bis zur höchsten Betriebsdrehzahl vernachlässigt werden kann. Bei diesen Rotoren sind die resultierende Unwucht und häufig die resultierende Momentenunwucht von Interesse; beide zusammengefasst geben die dynamische Unwucht des Rotors an.

Die heutzutage verfügbaren Auswuchtmaschinen ermöglichen es, die Restunwuchten auf sehr niedrige Werte zu reduzieren. Deshalb ist es notwendig, für eine Auswuchtaufgabe eine Anforderung an die Auswuchtqualität festzulegen, da es in den meisten Fällen unwirtschaftlich wäre, die Unwucht auf die Grenzwerte der Auswuchtmaschine zu reduzieren.

Zusätzlich zum Festlegen einer Unwuchttoleranz ist es außerdem erforderlich, die Abweichungen zu berücksichtigen, die durch den Auswuchtprozess herbeigeführt werden. Dieses Dokument berücksichtigt den Einfluss dieser Abweichungen, um eindeutig zwischen der spezifizierten zulässigen Restunwucht und den reduzierten Werten der Restunwucht zu unterscheiden, die während des Auswuchtprozesses erreicht werden müssen.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Verfahren und Unwuchttoleranzen für das Auswuchten von Rotoren mit starrem Verhalten fest. Es spezifiziert

- a) die Größe der zulässigen Restunwucht;
- b) die erforderliche Anzahl von Ausgleichsebenen;
- c) die Zuordnung der zulässigen Restunwucht zu den Toleranzebenen;
- d) den Umgang mit Abweichungen (Fehlern) beim Auswuchtprozess.

ANMERKUNG In ISO 21940-14 wird die Behandlung von Abweichungen beim Auswuchten ausführlich erörtert. Grundlagen des Auswuchtens von Rotoren sind in ISO 19499 mit einer Einführung in das Auswuchten enthalten.

Dieses Dokument umfasst nicht das Auswuchten von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten. Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit nachgiebigem Verhalten werden in ISO 21940-12 behandelt.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 21940-2.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: unter <http://www.iso.org/obp>

4 Wesentliche Gesichtspunkte des Auswuchtens

4.1 Allgemeines

Auswuchten von Rotoren ist ein Vorgang, durch den die Massenverteilung eines Rotors untersucht und, wenn nötig, korrigiert wird, um sicherzustellen, dass im Betriebszustand die Restunwucht oder die Schwingungen innerhalb festgelegter Grenzen liegen. Es sollte beachtet werden, dass die Schwingungen während des Betriebs auch andere Ursachen als Unwucht haben können.

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

4.2 Darstellung der Unwucht

Bei einem Rotor mit starrem Verhalten können zur Darstellung ein und desselben Unwuchtzustands unterschiedliche vektorielle Größen verwendet werden, wie in Bild 1 gezeigt.

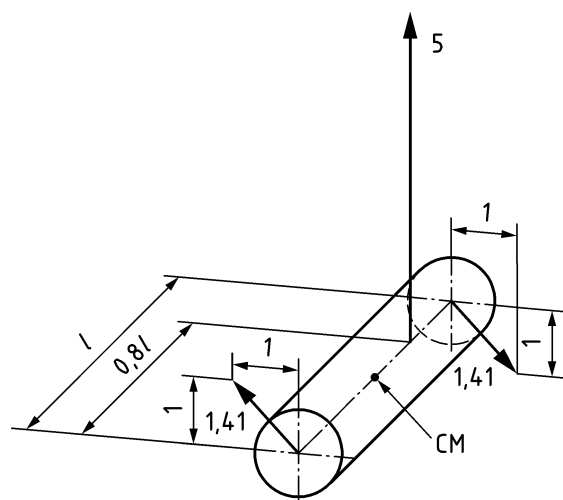
Die Bilder 1 a) bis c) zeigen verschiedene Darstellungen in Form der resultierenden Unwucht und des resultierenden Unwuchtpaars, die Bilder 1 d) bis f) verschiedene Darstellungen in Form der dynamischen Unwucht in zwei Ebenen.

ANMERKUNG 1 Der resultierende Unwuchtvektor kann in jeder beliebigen Radialebene liegen (ohne die Größe und den Winkel zu ändern), das zugehörige resultierende Unwuchtpaar ist jedoch von der Lage des resultierenden Unwuchtvektors abhängig.

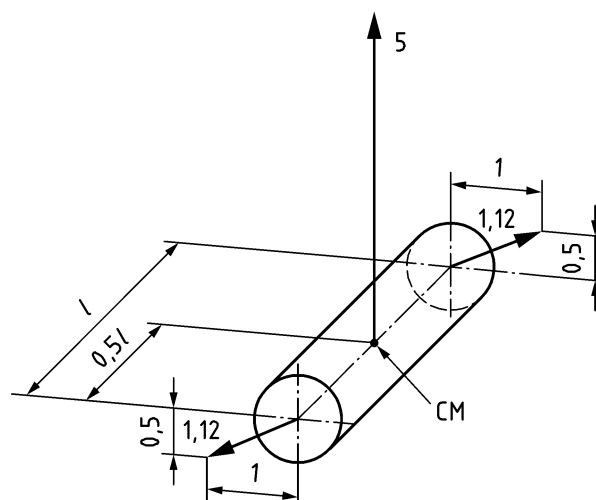
ANMERKUNG 2 Das Unwuchtzentrum ist jener Ort der resultierenden Unwucht auf der Schaftachse, für den das resultierende Unwuchtpaar ein Minimum ist.

Wenn Ein-Ebenen-Auswuchten ausreichend ist (siehe 4.5.2) oder wenn Überlegungen in Form der resultierenden Unwucht und des resultierenden Unwuchtpaars angestellt werden (siehe 4.5.4), ist die Darstellung in den Bildern 1 a) bis c) zu bevorzugen.

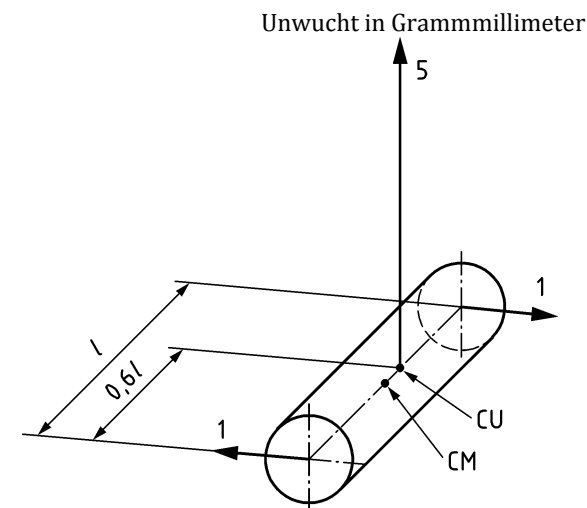
Bei typischen Zwei-Ebenen-Überlegungen ist die Darstellung in den Bildern 1 d) bis f) vorteilhafter.



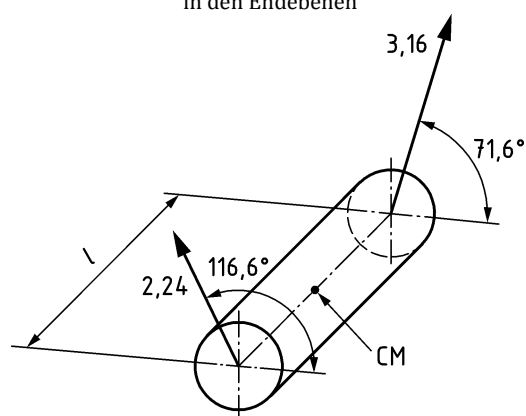
a) Vektor der resultierenden Unwucht mit einem zugehörigen Unwuchtpaar in den Endebenen



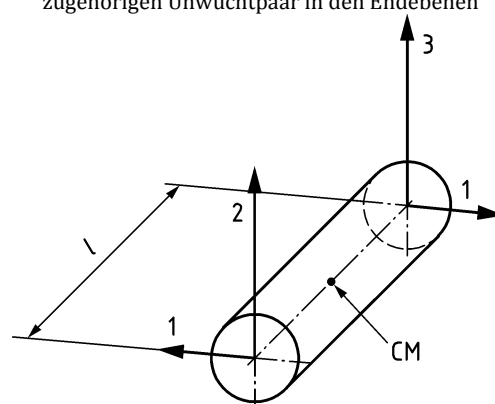
b) Sonderfall von a): Vektor der resultierenden Unwucht im Massenmittelpunkt CM (statische Unwucht) mit einem zugehörigen Unwuchtpaar in den Endebenen



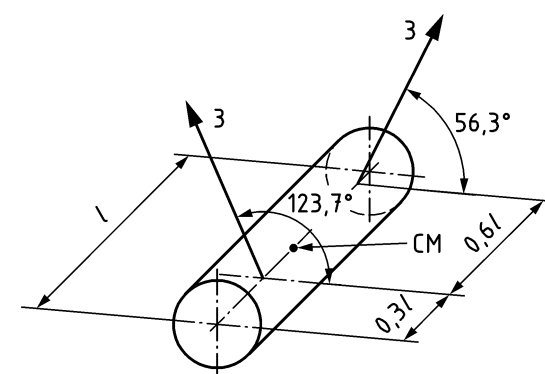
c) Sonderfall von a): Vektor der resultierenden Unwucht im Unwuchtzentrum CU



d) Ein Unwuchtvektor in jeder Endebene



e) Zwei 90°-Unwuchtkomponenten in jeder Endebene



f) Je ein Unwuchtvektor in zwei beliebigen anderen Ebenen

Legende

CM Massenmittelpunkt

CU Unwuchtzentrum

l Rotorlänge

ANMERKUNG Zu Bild 1 c): Das zugehörige Unwuchtpaar ist ein Minimum und liegt in einer Ebene senkrecht zum Vektor der resultierenden Unwucht.

Bild 1 — Unterschiedliche Darstellung ein und desselben Unwuchtzustands eines Rotors mit starrem Verhalten

4.3 Unwuchtwirkungen

Die resultierende Unwucht und die resultierende Momentenunwucht (letztere kann auch als resultierendes Unwuchtpaar ausgedrückt werden) haben unterschiedliche Wirkungen auf die Lagerkräfte und auf die Maschinenschwingungen. Daher werden diese beiden Unwuchtarten in der Praxis häufig separat betrachtet. Auch wenn die Unwucht als dynamische Unwucht in zwei Ebenen angegeben wird, sollte beachtet werden, dass in den meisten Fällen die Wirkungen unterschiedlich sind, je nachdem ob die Unwucht vornehmlich eine resultierende Unwucht oder eine resultierende Momentenunwucht darstellt.

4.4 Bezugsebenen für Unwuchttoleranzen

Es wird empfohlen, zur Angabe der Unwuchttoleranzen Bezugsebenen zu verwenden. Für diese Ebenen muss nur der Betrag jeder Restunwucht innerhalb der jeweiligen Unwuchttoleranz bleiben, wie auch immer die Winkellage sein mag.

Das Ziel des Auswuchtens ist in der Regel, die über die Lager in die Umgebung übertragenen Schwingungen und Kräfte zu verringern. Zu diesem Zweck werden in diesem Dokument die Lagerebenen als Bezugsebenen für die Unwuchttoleranzen verwendet. Jedoch ist die Verwendung der Lagerebenen nicht immer möglich.

ANMERKUNG Bei einem Bauteil ohne Welle (z. B. einem scheibenförmigen Bauteil), bei dem aber die endgültige Lageranordnung bekannt ist (oder abgeschätzt werden kann), können diese Ebenen verwendet werden.

4.5 Ausgleichsebenen

4.5.1 Allgemeines

Rotoren, deren Unwucht außerhalb der Toleranzen liegt, erfordern einen Ausgleich. Dieser Unwuchtausgleich kann oft nicht in den Ebenen erfolgen, für die Unwuchttoleranzen angegeben wurden, sondern muss dort durchgeführt werden, wo Material hinzugefügt, entfernt oder verlagert werden kann.

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

4.5.2 Rotoren, die nur eine Ausgleichsebene benötigen

Bei manchen Rotoren ist lediglich die resultierende Unwucht außerhalb der Toleranz, während die resultierende Momentenunwucht innerhalb der Toleranz ist. Das ist typisch für Rotoren mit einer einzelnen Scheibe, vorausgesetzt, dass

- a) der Lagerabstand ausreichend groß ist,
- b) die Scheibe eine hinreichend geringe Planlaufabweichung aufweist und
- c) die Ausgleichsebene für die resultierende Unwucht richtig gewählt wurde.

Nachdem das Auswuchten in einer Ebene an einer ausreichenden Anzahl von Rotoren durchgeführt worden ist, wird die größte verbleibende Momentenunwucht ermittelt und durch den Lagerabstand dividiert, sodass sich ein Unwuchtpaar ergibt.

Ist das derart ermittelte Unwuchtpaar selbst im ungünstigsten Fall zulässig, kann erwartet werden, dass Ein-Ebenen-Auswuchten ausreichend ist.

Beim Ein-Ebenen-Auswuchten braucht der Rotor nicht zu rotieren, doch werden aus Gründen der Empfindlichkeit und Genauigkeit meistens fliehkraftnutzende Auswuchtmaschinen verwendet.

4.5.3 Rotoren, die zwei Ausgleichsebenen benötigen

Wenn ein Rotor mit starrem Verhalten die Bedingungen von 4.5.2 nicht erfüllt, muss auch die Momentenunwucht reduziert werden. Meistens werden die resultierende Unwucht und die resultierende Momentenunwucht zu einer dynamischen Unwucht zusammengefasst: zwei Unwuchtvektoren in zwei Ebenen, siehe Bild 1 d). ^{N1)}

Beim Zwei-Ebenen-Auswuchten muss der Rotor rotieren, da sonst die Momentenunwucht unbemerkt bleiben würde.

4.5.4 Rotoren mit mehr als zwei Ausgleichsebenen

Obwohl theoretisch alle Rotoren mit starrem Verhalten in zwei Ebenen ausgewuchtet werden können, werden manchmal mehr als zwei Ausgleichsebenen verwendet, beispielsweise

- a) wenn die resultierende Unwucht und das resultierende Unwuchtpaar unabhängig voneinander ausgeglichen werden und der Ausgleich der resultierenden Unwucht nicht in einer der (oder beiden) Ebenen des Unwuchtpaares erfolgt,
- b) wenn der Ausgleich über die Rotorlänge verteilt wird.

In Sonderfällen kann die Verteilung des Ausgleichs über die Rotorlänge wegen Einschränkungen in den Ausgleichsebenen notwendig sein (z. B. bei Kurbelwellen, bei denen der Ausgleich durch Bohrungen in den Gegengewichten erfolgt) oder aber ratsam sein, um die Funktion und die Festigkeit des Bauteils zu erhalten.

4.6 Zulässige Restunwucht

Im einfachen Fall eines Innenbord-Rotors, bei dem das Unwuchtpaar vernachlässigt werden darf (siehe 4.5.2), kann der Unwuchtzustand durch eine einzige vektorielle Größe, die Unwucht U , beschrieben werden.

Damit der Rotor zufriedenstellend läuft, darf der Betrag dieser Unwucht, d. h. die Restunwucht U_{res} , nicht größer als ein zulässiger Wert U_{per} sein:

$$U_{\text{res}} \leq U_{\text{per}} \quad (1)$$

Generell gilt das für jeden Rotortyp mit starrem Verhalten, doch dann umfasst U_{per} die resultierende Unwucht und die resultierende Momentenunwucht (siehe auch 5.2).

ANMERKUNG Die SI-Einheit von U_{per} ist kg·m (Kilogramm-meter), aber beim Auswuchten sind die Einheiten g·mm (Gramm-millimeter), kg·mm (Kilogramm-millimeter) oder mg·mm (Milligramm-millimeter) praktischer.

Definiert ist U_{per} als die gesamte Toleranz in der Ebene des Massenmittelpunkts. Beim Zwei-Ebenen-Auswuchten muss diese Toleranz auf die Toleranzebenen aufgeteilt werden (siehe Abschnitt 7).

5 Ähnlichkeitsbetrachtungen

5.1 Allgemeines

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

N1) Nationale Fußnote: Bild 1 d) ist nur ein Beispiel für zwei Unwuchtvektoren in zwei Ebenen.