

DIN ISO 21940-1



ICS 21.120.40

Entwurf

Einsprüche bis 2018-05-30
Vorgesehen als Ersatz für
DIN ISO 19499:2008-03

**Mechanische Schwingungen –
Auswuchten von Rotoren –
Teil 1: Einführung (ISO/DIS 21940-1:2018);
Text Deutsch und Englisch**

Mechanical vibration –
Rotor balancing –
Part 1: Introduction (ISO/DIS 21940-1:2018);
Text in German and English

Vibrations mécaniques –
Équilibrage des rotors –
Partie 1: Introduction (ISO/DIS 21940-1:2018);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2018-03-30 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe 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/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS), 10772 Berlin, 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 77 Seiten

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

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	6
Vorwort	8
Einleitung	9
1 Anwendungsbereich.....	10
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe	10
4 Grundlagen des Auswuchtens.....	10
4.1 Allgemeines	10
4.2 Massenunwucht einer einzelnen Scheibe.....	11
4.3 Unwuchtverteilung	12
4.4 Darstellung der Unwucht.....	13
5 Beim Auswuchten zu berücksichtigende Faktoren.....	14
5.1 Allgemeines	14
5.2 Rotoren mit starrem Verhalten.....	14
5.3 Rotoren mit wellenelastischem Verhalten.....	15
5.3.1 Allgemeines	15
5.4 Rotoren mit speziellem Verhalten	16
5.4.1 Allgemeines	16
5.4.2 Elastisches Verhalten von Bauteilen	16
5.4.3 Setzungsverhalten von Bauteilen	16
5.5 Beispiele für das Verhalten von Rotoren.....	16
6 Auswahl eines Auswuchtverfahrens	17
7 Unwuchttoleranzen	17
7.1 Allgemeines	17
7.2 Zulässige Restunwucht.....	18
7.2.1 Allgemeines	18
7.2.2 Zulässige Restunwucht bei Rotoren mit starrem Verhalten	18
7.2.3 Zulässige Restunwucht bei Rotoren mit wellenelastischem Verhalten	18
7.3 Grenzwerte für die Schwingungen.....	18
7.4 Einfluss von Eigenformen oberhalb der Betriebsdrehzahl.....	19
7.5 Faktoren mit Einfluss auf die Auswuchtverfahren.....	19
7.5.1 Allgemeines	19
7.5.2 Toleranzen	20
7.5.3 Drehzahl und Lagerungsbedingungen.....	20
7.5.4 Urunwucht.....	20
8 Auswahl einer Auswuchtmaschine	20
8.1 Allgemeines	20
8.2 Besondere Anforderungen.....	21
9 Internationale Normen über das Auswuchten	22
9.1 Allgemeines	22

9.2	Begriffe	23
9.2.1	ISO 21940-2 Balancing vocabulary	23
9.2.2	ISO 2041 Vibration and shock vocabulary	23
9.3	Auswuchtverfahren und -toleranzen	23
9.3.1	Allgemeines	23
9.3.2	ISO 21940-11 Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour	23
9.3.3	ISO 21940-12 Procedures and tolerances for rotors with flexible behaviour	23
9.3.4	ISO 21940-13 Criteria and safeguards for the in-situ balancing of medium and large rotors	24
9.3.5	ISO 21940-14 Procedures for addressing balancing errors	24
9.4	Auswuchtmaschinen	24
9.4.1	ISO 21940-21 Description and evaluation of balancing machines	24
9.4.2	ISO 21940-23 Enclosures and other protective measures for the measuring station of balancing machines	25
9.5	Maschinen-Auslegung für das Auswuchten	25
9.5.1	ISO 21940-31 Susceptibility and sensitivity of machines to unbalance	25
9.5.2	ISO 21940-32 Shaft and fitment key convention	25
9.6	Maschinenschwingungen	26
	Anhang A (informativ) Mathematische und graphische Darstellung des Unwuchtzustands	27
	Anhang B (informativ) Beispiele für verschiedenes Rotorverhalten, dargestellt an einer typischen kraftmessenden Auswuchtmaschine	35
	Literaturhinweise	41

Nationales Vorwort

Der internationale Norm-Entwurf ISO/DIS 21940-1:2018 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, erarbeitet worden. Die deutsche Mitarbeit erfolgt durch den Arbeitsausschuss NA 001-03-06 AA (NALS/VDI C 6) „Auswuchten und Auswuchtmaschinen“ des DIN/VDI-Normenausschusses Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfs gelten gleichermaßen auch für den englischen ISO-Text.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 7919 (all parts)	siehe	DIN ISO 7919 (alle Teile)
ISO 8528-9	siehe	DIN ISO 8528-9
ISO 10816 (all parts)	siehe	DIN ISO 10816 (alle Teile)
ISO 20816 (all parts)	siehe	DIN ISO 20816 (alle Teile)
ISO 21940 (all parts)	siehe	DIN ISO 21940 (alle Teile)
IEC 60034-14	siehe	DIN EN 60034-14 (VDE 0530-14)

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*
 - 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*

- *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 19499:2008-03 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Aufnahme von Verweisungen auf alle Internationalen Normen der Reihe ISO 21940;
- b) Streichung der Tabelle „Wegweiser zu den Auswuchtverfahren“;
- c) Streichung des Anhangs „Abschätzung der Wellenelastizität eines Rotors aus seiner äußeren Form“.

-
- 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 EN 60034-14 (VDE 0530-14), *Drehende elektrische Maschinen — Teil 14: Mechanische Schwingungen von bestimmten Maschinen mit einer Achshöhe von 56 mm und höher — Messung, Bewertung und Grenzwerte der Schwingstärke*

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

DIN ISO 8528-9, *Stromerzeugungsaggregate mit Hubkolben-Verbrennungsmotoren — Teil 9: Messung und Bewertung der mechanischen Schwingungen*

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

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

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

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

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

DIN ISO 20816-1, *Mechanische Schwingungen — Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen — Teil 1: Allgemeine Anleitungen* *)

DIN ISO 20816-2, *Mechanische Schwingungen — Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen — Teil 2: Stationäre Gasturbinen, Dampfturbinen und Generatoren über 40 MW mit Gleitlagern und Nenndrehzahlen von $1\,500 \text{ min}^{-1}$, $1\,800 \text{ min}^{-1}$, $3\,000 \text{ min}^{-1}$ und $3\,600 \text{ min}^{-1}$* **)

DIN ISO 20816-4, *Mechanische Schwingungen — Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen — Teil 4: Gasturbinensätze mit Gleitlagern* ***)

DIN ISO 20816-5, *Mechanische Schwingungen — Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen — Teil 5: Maschinensätze in Wasserkraft- und Pumpspeichieranlagen* ****)

*) Ersatz für DIN ISO 7919-1, DIN ISO 10816-1 und DIN ISO 10816-1/A1

**) Ersatz für DIN ISO 7919-2 und DIN ISO 10816-2

***) Z. Z. Entwurf, vorgesehen als Ersatz für DIN ISO 7919-4 und DIN ISO 10816-4

DIN ISO 21940-2, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 2: Begriffe*

DIN ISO 21940-11, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 11: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit starrem Verhalten*

DIN ISO 21940-12:2016-09, *Mechanische Schwingungen — Auswuchten von Rotoren — Teil 12: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit nachgiebigem Verhalten (ISO 21940-12:2016)*

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*

****) Z. Z. Entwurf, vorgesehen als Ersatz für DIN ISO 7919-5

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1, beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2, erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Eine Erläuterung zum freiwilligen Charakter von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen, sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT) berücksichtigt, enthält der folgende Link www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde 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* erarbeitet.

Diese erste Ausgabe von ISO 21940-1 ersetzt ISO 19499:2007, die inhaltlich überarbeitet wurde. Die wesentlichen Änderungen sind:

- Aufnahme von Verweisungen auf alle Internationalen Normen der Reihe ISO 21940;
- Streichung der Tabelle „Wegweiser zu den Auswuchtverfahren“;
- Streichung des Anhangs „Abschätzung der Wellenelastizität eines Rotors aus seiner äußeren Form“.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 21940 kann auf der ISO-Internetseite abgerufen werden.

Einleitung

Durch Unwucht von Rotoren bedingte Schwingungen gehören zu den kritischsten Bereichen bei der Konstruktion und Wartung von drehenden Maschinen. Die infolge der Unwucht steigenden dynamischen Kräfte haben negative Auswirkungen sowohl auf die Maschinen als auch auf die Gesundheit und das Wohlbefinden von Menschen. Zweck dieses Dokuments ist, einen Leitfaden für die Anwendung der anderen Teile der Internationalen Normenreihe ISO 21940 zur Verfügung zu stellen.

Das Auswuchten wird allgemein und unter Anwendung der speziellen Benennungen und Definitionen erläutert, um dem Leser bei der Wahl des für seine Anwendung geeigneten Auswuchtansatzes zu helfen.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument stellt allgemeines Hintergrundwissen zur Auswuchttechnik, wie sie in der Internationalen Normenreihe ISO 21940 angewendet wird, zur Verfügung und leitet den Leser zu den entsprechenden Teilen der Reihe, die die Begriffe, die Auswuchtverfahren und -toleranzen, die Auswuchtmaschinen und die Konstruktion von Maschinen für die Auswuchtung enthalten.

Einzelne Verfahren sind hierin nicht enthalten, weil sie in den entsprechenden Teilen von ISO 21940 zu finden sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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 2041, *Mechanical vibration, shock and condition monitoring — Vocabulary*

ISO 21940-2, *Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 2: Vocabulary*

ISO 21940-12:2016, *Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 12: Procedures and tolerances for rotors with flexible behaviour*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 2041 und 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 Grundlagen des Auswuchtens

4.1 Allgemeines

Auswuchten ist ein Vorgang, bei dem die Massenverteilung eines Rotors (oder eines Teils eines Rotors oder einer Baugruppe) gemessen und angepasst wird, um sicherzustellen, dass die Unwuchttoleranzen eingehalten werden.

Viele Faktoren können Rotorunwuchten verursachen, z.B. inhomogene Werkstoffe, Fertigung, Montage, Verschleiß während des Betriebs, Ablagerungen oder ein Vorfall im Betrieb. Es ist wichtig, sich darüber im Klaren zu sein, dass jeder Rotor, selbst wenn er in Serienfertigung hergestellt wurde, eine einzigartige individuelle Unwuchtverteilung hat.

Neue Rotoren werden im Allgemeinen vom Hersteller auf Auswuchtmaschinen ausgewuchtet, bevor sie in ihrer Betriebsumgebung installiert werden. Nach einer Überarbeitung oder einer Reparatur können Rotoren ebenfalls in einer Auswuchtmaschine nachgewuchtet werden oder sie können, falls keine entsprechenden Einrichtungen zur Verfügung stehen, im Betriebszustand ausgewuchtet werden (Einzelheiten hierzu siehe ISO 21940-13). Für das Auswuchten im Betriebszustand wird der Rotor in seine Betriebslager und Stützstrukturen eingesetzt und in seinem betriebsmäßigen Antriebsstrang gedreht.

Beim Drehen verursacht die Unwucht Kräfte, die entweder direkt durch in die Stützstruktur der Lagerung eingebaute Kraftaufnehmer oder indirekt durch Messung der Bewegung des Lagers oder der Welle gemessen werden können. Anhand dieser Messungen kann der Unwuchtvektor berechnet und der Ausgleich mittels Ansetzen, Abnehmen oder Bewegen von Ausgleichsmassen am Rotor durchgeführt werden. Abhängig von der Auswuchtaufgabe wird der Massenausgleich in einer, zwei oder mehr Ausgleichsebenen durchgeführt.

Trägheitskräfte aufgrund von Unwuchten oder während des Ausgleichsvorgangs angesetzten Ausgleichsmassen führen zu einer Anregung des Rotors und des Stützsystems, die sich als umlauffrequente Schwingung beobachten lässt. Umlauffrequente Schwingungen und Schwingungen anderer Frequenzen können auch von anderen Wirkungen, wie z.B. von asymmetrischer Steifigkeit und magnetischen oder hydraulischen Kräften, angeregt werden, durch das Auswuchten können jedoch nur die umlauffrequenten Wirkungen ausgeglichen werden. Nicht-lineare Systeme können auch andere Frequenzen erzeugen, bei diesen handelt es sich jedoch üblicherweise um eine nachgeordnete Wirkung.

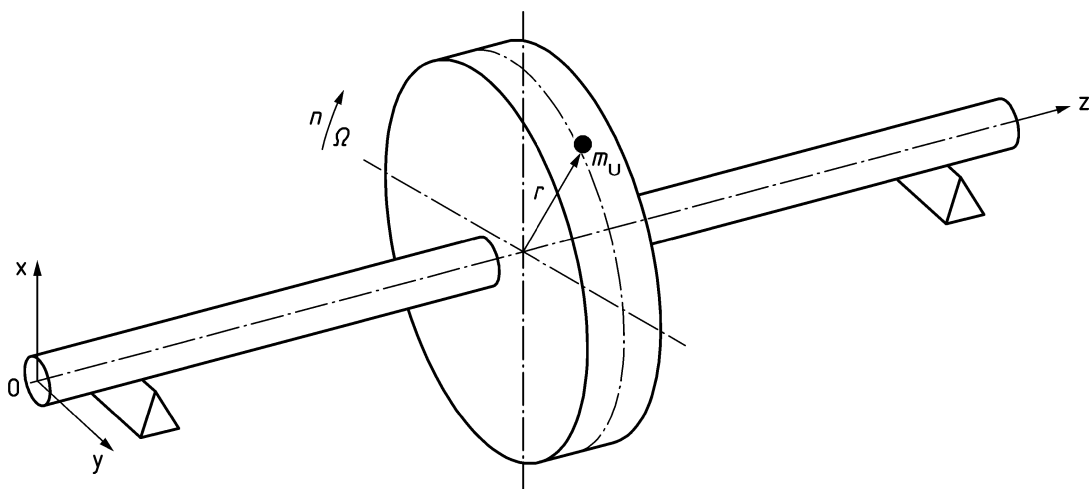
Die Theorie des Auswuchtens ist in der Fachliteratur ausführlich beschrieben (siehe z.B. die Literaturhinweise [17], [18]), weswegen im vorliegenden Dokument nur die Grundlagen dargelegt werden, um dem Leser zu helfen, die in den Auswuchtnormen verwendeten Begriffe zu verstehen und ihm zu ermöglichen, die für ihn zutreffenden Teile von ISO 21940 zu ermitteln.

4.2 Massenunwucht einer einzelnen Scheibe

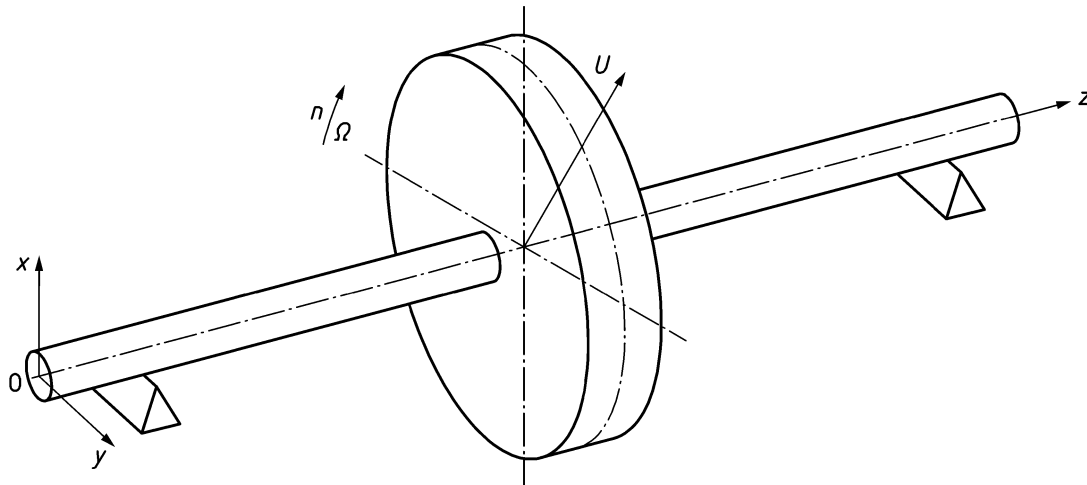
Das einfachste mechanische Modell eines Rotors besteht aus einer einzelnen Scheibe, die über eine masselose Welle auf zwei Lagern aufliegt, wie in Bild 1 dargestellt (derartige Rotoren werden häufig als Jeffcot- oder Laval-Rotoren beschrieben). Eine Unwuchtmasse m_U auf der Scheibe mit einem radialen Abstand r zur Schaftachse erzeugt den Unwuchtvektor $\mathbf{U}$ mit $\mathbf{U} = m_U \mathbf{r}$. $\mathbf{U}$ hat die Einheit Masse mal Länge, üblicherweise $\text{kg} \cdot \text{m}$, in der Praxis werden jedoch in der Regel kleinere Einheiten verwendet, z.B. $\text{kg} \cdot \text{mm}$, $\text{g} \cdot \text{mm}$ oder bei sehr kleinen Unwuchten $\text{mg} \cdot \text{mm}$.

ANMERKUNG Fett geschriebene Formelzeichen zeigen Vektorgrößen an.

Bei einer Drehzahl n (Winkelgeschwindigkeit Ω) verursacht die Unwucht eine Zentrifugalkraft von $\mathbf{F} = \mathbf{U} \Omega^2$. Bei Verwendung der Einheiten $\text{kg} \cdot \text{m}$ (oder ihrer Vielfachen) für die Unwucht $\mathbf{U}$ und Bogenmaß je Sekunde für die Winkelgeschwindigkeit Ω hat $\mathbf{F}$ die Einheit Newton.



a) Unwucht einer Scheibe als Unwuchtmasse m_U im Radius r



b) Unwucht einer Scheibe als Unwuchtvektor U

Bild 1 — Unwucht einer Scheibe

Wird die Unwucht durch die außermittig um die Schaftachse rotierende Scheibe dargestellt, so ist der Betrag der statischen Unwucht gleich dem Produkt aus Gesamtmasse M der Scheibe und radialem Abstand e ihres Massenmittelpunkts zur Schaftachse, also $U = M e$, wie in Bild 2 dargestellt.

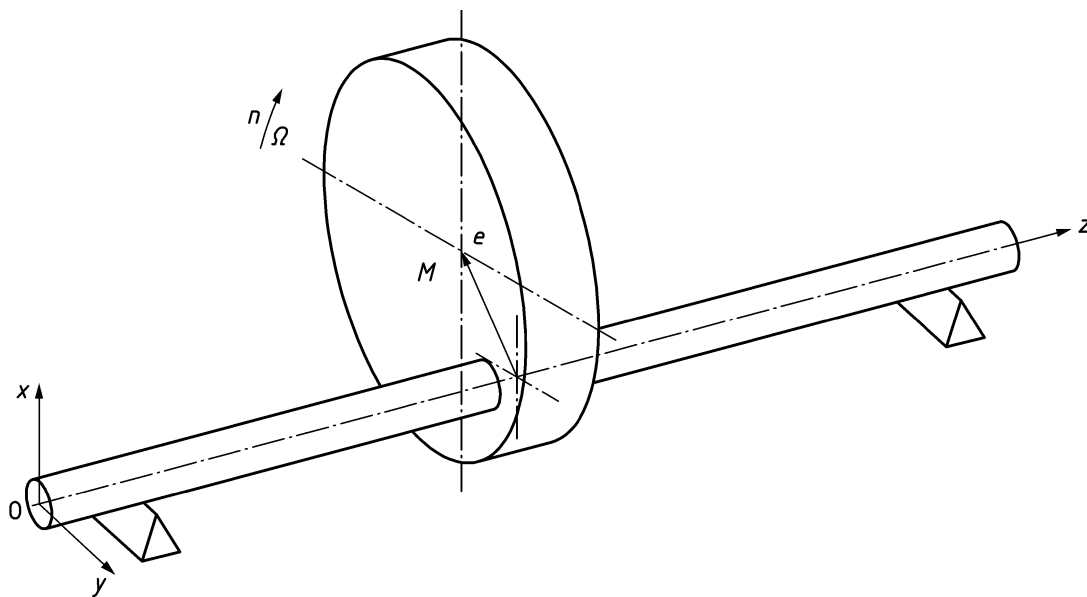


Bild 2 — Unwucht einer außermittig um die Schaftachse rotierenden Scheibe

4.3 Unwuchtverteilung

In der Praxis besteht die Unwucht aus einer unendlichen Anzahl von über die Schaftachse eines Rotors verteilten Unwuchtvektoren. Wenn zur Simulation des Rotorverhaltens ein Mehrmassen-Modell verwendet wird, kann die Unwucht durch eine endliche Anzahl von Unwuchtvektoren unterschiedlicher Größenwerte und Winkelrichtungen dargestellt werden, wie in Bild 3 dargestellt.

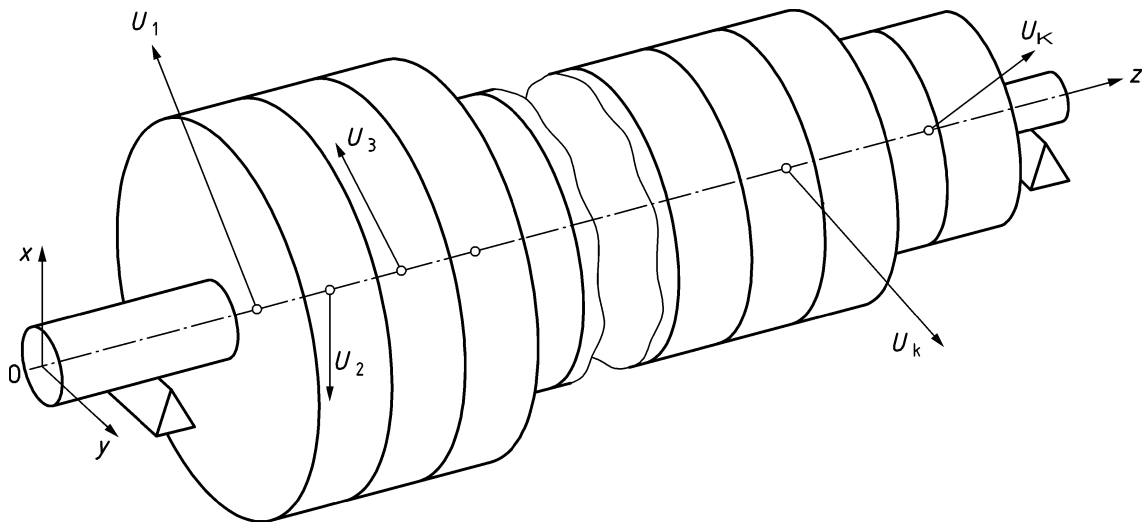


Bild 3 — Unwuchtverteilung eines Rotors, der mit K Scheibenelementen modelliert ist, die senkrecht auf der z -Achse stehen

4.4 Darstellung der Unwucht

Würden alle Unwuchtvektoren in ihren jeweiligen Ebenen ausgeglichen, so wäre der Rotor perfekt ausgewuchtet, in der Praxis ist es jedoch weder möglich noch notwendig, alle diese einzelnen Unwuchten zu messen. In allen Internationalen Normen der Reihe ISO 21940 werden zur Festlegung der Rotorunwucht die folgenden Darstellungen verwendet:

- a) die resultierende Unwucht $\mathbf{U}_r$, d.h. die Vektorsumme von allen entlang des Rotors verteilten Unwuchtvektoren;

ANMERKUNG Diese wird häufig als statische Unwucht bezeichnet.

- b) die resultierende Momentenunwucht $\mathbf{P}_r$, d.h. die Vektorsumme der Momente aller entlang des Rotors um eine frei gewählte Ebene verteilten Unwuchtvektoren;
- c) die Werte der resultierenden modalen Unwucht $\mathbf{U}_{ne,r}$, d.h. die Unwuchtverteilung, die Einfluss auf jede der n -ten Biegeeigenformen des Rotorsystems hat.

Mathematische und graphische Darstellungen der Unwucht sind in Anhang A beschrieben.

ANMERKUNG 1 Die Auswirkungen der resultierenden Unwucht [siehe a)] und der resultierenden Momentenunwucht [siehe b)] können zusammengefasst werden. Die Kombination wird als „dynamische Unwucht“ bezeichnet und durch zwei Unwuchtvektoren in zwei frei gewählten Ebenen senkrecht zur Schaftachse dargestellt.

ANMERKUNG 2 Die in der Normenreihe ISO 21940 beschriebenen Auswuchtverfahren gehen von der Annahme aus, dass das Rotorsystem linear und die Eigenformen der Schwingung orthogonal seien. So hat z.B. das Hinzufügen einer 2 g·mm Ausgleichsmasse zweifache Auswirkung im Verhältnis zu einer 1 g·mm Ausgleichsmasse, und die Eigenform der einen Mode wird durch andere Moden nicht beeinflusst. Gleitlager, wie sie häufig in hochtourigen Auswuchtmaschinen eingesetzt werden, können Nichtlinearitäten und eine Kreuzkopplung zwischen den Moden einführen, die Auswirkungen sind jedoch in der Regel klein, und die in der Normenreihe ISO 21940 beschriebenen Auswuchtverfahren können angewendet werden.

5 Beim Auswuchten zu berücksichtigende Faktoren

5.1 Allgemeines

Rotoren werden im Allgemeinen als entweder starr oder wellenelastisch klassifiziert. Die Benennungen „starr“ und „wellenelastisch“ stellen jedoch eine grobe Vereinfachung dar, die zu Fehldeutungen führen kann, weil sie den Schluss nahelegt, dass die Klassifizierung des Rotors für das Auswuchten nur von seinem physischen Aufbau abhängt. Der Unwuchtzustand ist eine inhärente Eigenschaft des Rotors, aber die Dynamik der Lagerung und der Stützstruktur sowie die Betriebsdrehzahl können das Ansprechen des Rotors auf Unwuchten beeinflussen. Die Auswuchtqualität, die der Rotor erreichen soll, sowie die Größe und Verteilung der Unwucht entlang des Rotors haben ebenfalls Einfluss darauf, welches Verfahren zur Auswuchtung des Rotors zu wählen ist. Aufgrund dessen kann ein Rotor, der sich unter bestimmten Bedingungen (von Drehzahl, Unwucht, Unwuchttoleranzen usw.) starr verhält, unter anderen Bedingungen wellenelastisches Verhalten zeigen.

Hinweise zur Klassifizierung des Rotorverhaltens als starr oder wellenelastisch werden in 5.2 und 5.3 gegeben.

Es gibt Sonderfälle von Rotoren mit Unwuchtanzeigen, die sich mit der Drehzahl oder mit der Zeit in Weisen ändern, die sich nicht durch eine Biegewelle erklären lassen. Diese werden in 5.4 betrachtet.

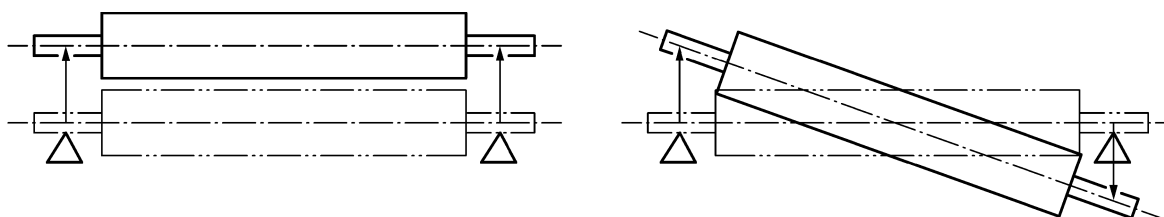
5.2 Rotoren mit starrem Verhalten

Ein Rotor verhält sich starr, wenn seine durch seine Unwuchtverteilung bedingte Durchbiegung in Bezug auf die vereinbarte Unwuchttoleranz bei jeder Drehzahl bis zur maximalen Betriebsdrehzahl vernachlässigbar ist. Die Mehrzahl dieser Rotoren werden bei Drehzahlen weit unter der Resonanzdrehzahl des Stützsystems des Rotors betrieben.

Die meisten Rotoren mit starrem Verhalten können nach den Anforderungen von ISO 21940-11 ausgewuchtet werden. Das Ziel einer solchen Auswuchtung ist der Ausgleich der resultierenden Unwucht, wobei im Falle von statischen Unwuchten mindestens ein Ein-Ebenen-Ausgleich und im Falle von dynamischen Unwuchten mindestens ein Zwei-Ebenen-Ausgleich durchgeführt wird.

Rotoren, für die ein starres Verhalten unter Betriebsbedingungen festgestellt wurde, können auf der Auswuchtmaschine bei einer beliebigen Drehzahl ausgewuchtet werden, vorausgesetzt diese Drehzahl ist niedrig genug, um sicherzustellen, dass der Rotor noch ein starres Verhalten ohne signifikante Durchbiegung zeigt, aber auch ausreichend hoch, um eine Unwuchtkraft zu erzeugen, die sich mit ausreichender Messabweichung messen lässt.

Ein nicht ausgewuchteter Rotor mit starrem Verhalten, der auf einer elastischen Lagerung rotiert, zeigt Verlagerungen, die eine Kombination der in Bild 4 dargestellten Starrkörper-Eigenformen sind, die sich auf statische und Momentenunwuchten zurückführen lassen. In diesem Falle liegt keine signifikante Durchbiegung des Rotors vor, und alle Verlagerungen des Rotors entstehen durch die Bewegung der Lager und ihrer Stützstruktur.



a) parallele Eigenform durch statische Unwucht b) geneigte Eigenform durch Momentenunwucht

Bild 4 — Drehende Starrkörper-Eigenformen eines symmetrischen Rotors auf einer symmetrischen elastischen Stützstruktur

In dem in Bild 4 a) dargestellten Beispiel ist die Hauptträgheitsachse des Rotors parallel zur Schaftachse verschoben und als statische Unwucht definiert.

Das in Bild 4 b) dargestellte Beispiel, in dem die Hauptträgheitsachse geneigt ist und die Schaftachse im Massenmittelpunkt des Rotors kreuzt, ist als Momentenunwucht definiert.

Die Hinzufügung von sowohl statischen als auch Momentenunwuchten, bei denen die Hauptträgheitsachse des Rotors sowohl geneigt als auch im Verhältnis zur Schaftachse verschoben ist, ist als dynamische Unwucht definiert.

In der Praxis zeigt jeder Rotor einige Durchbiegungen im Verhältnis zu der wesentlichen Starrkörper-Bewegung des Rotors, sind diese Durchbiegungen jedoch ausreichend klein, so kann das Verhalten des Rotors in der Regel als starr angesehen werden. ISO 21940-12:2016, Anhang E, enthält eine Beschreibung eines experimentellen Verfahrens zur Messung der Wellenelastizität des Rotors und Kriterien für den Grad der Wellenelastizität, unterhalb dessen der Rotor üblicherweise als starr angesehen werden würde.

ANMERKUNG Selbst bei einem Rotor, dessen Verhalten als starr angesehen wird und der bei Drehzahlen wesentlich unterhalb seiner ersten biegekritischen Drehzahl betrieben wird, kann es, wenn eine geringe Unwuchttoleranz gefordert wird (wie in 7.5.2), notwendig sein, das Biegeverhalten des Rotors zu berücksichtigen.

5.3 Rotoren mit wellenelastischem Verhalten

5.3.1 Allgemeines

Das Verhalten eines Rotors gilt als wellenelastisch, wenn die Unwucht dazu führt, dass sich der Körper des Rotors zusätzlich zu den in 5.2 beschriebenen Starrkörper-Eigenformen biegt. Bild 5 zeigt typische Biege-eigenformen für einen symmetrischen Rotor. Bei Rotoren mit wellenelastischem bzw. nachgiebigem Verhalten sind die in ISO 21940-12 festgelegten Auswuchtverfahren anzuwenden.

Wenn die Drehzahl erhöht, die Unwuchttoleranz verringert oder die Stützstruktur verändert wird, kann es bei Rotoren mit dem in 5.2 beschriebenen starren Verhalten notwendig sein, das wellenelastische Verhalten zu berücksichtigen, weil die Starrkörper-Auswuchtverfahren möglicherweise nicht ausreichen, um den gewünschten Wuchtungszustand zu erreichen.

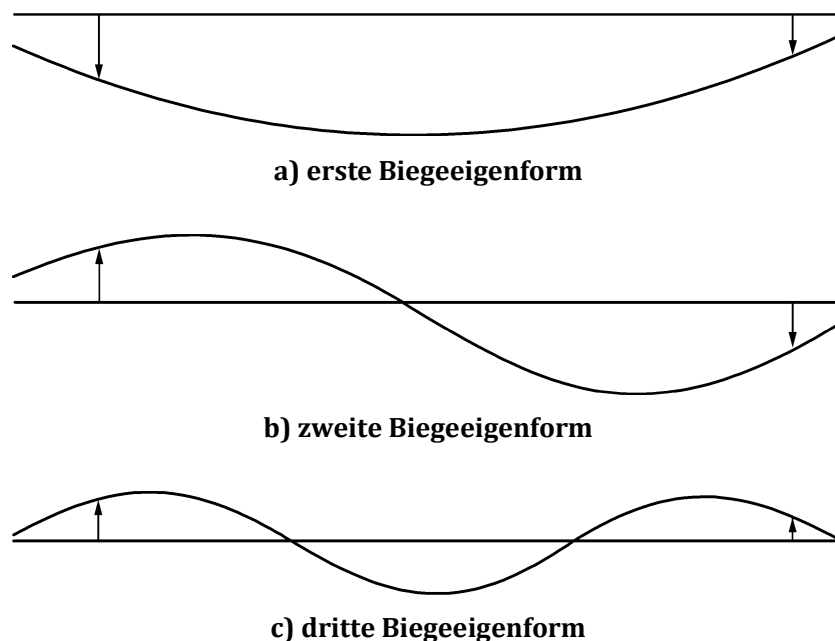


Bild 5 — Schematische Darstellung der ersten drei Biegeeigenformen eines Rotors mit wellenelastischem Verhalten auf einer elastischen Stützstruktur

5.4 Rotoren mit speziellem Verhalten

5.4.1 Allgemeines

Die meisten Rotoren zeigen ein entweder starres oder wellenelastisches Verhalten, es kommen aber auch die in 5.4 beschriebenen speziellen Verhaltensarten vor, und diese müssen berücksichtigt werden, um den Rotor erfolgreich auswuchten zu können.

5.4.2 Elastisches Verhalten von Bauteilen

Rotoren können ein oder mehrere Bauteile haben, das (die) entweder selbst wellenelastisch oder aber wellenelastisch montiert ist (sind), sodass sich die Unwucht des gesamten Systems gleichbleibend mit der Drehzahl ändern kann (z.B. Rotoren mit Zugankern, die bei hohen Drehzahlen ausbiegen, Ventilatoren mit Gummiblättern und Ein-Phasen-Induktionsmotoren mit einem Fliehkraftschalter).

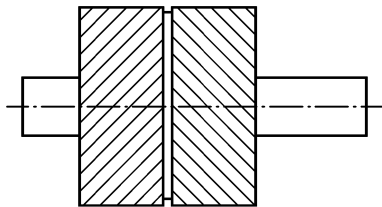
5.4.3 Setzungsverhalten von Bauteilen

Rotoren können eine Gestaltung aufweisen, bei der sich Bauteile setzen, nachdem eine bestimmte Drehzahl oder ein anderer Zustand erreicht wurde. Diese Bewegung wird nach einem oder nach einigen wenigen Ereignissen stabil. Sobald das Bauteil seine endgültige Position erreicht und sich setzt, kann ein weniger Auswuchten des Rotors notwendig werden (z.B. aufgeschrumpfte Turbinenscheiben, zusammengesetzte Rotoren, Kupferwicklungen in Generatoren und Endkappen von Generatoren.).

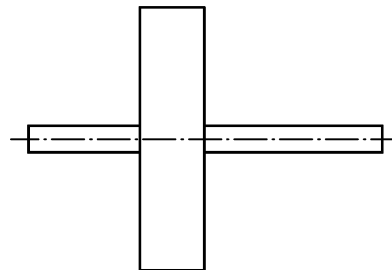
Sobald sich das Bauteil gesetzt hat, muss der Rotor nach dem entsprechenden Verfahren, wie in 5.2 und 5.3 erörtert, ausgewuchtet werden.

5.5 Beispiele für das Verhalten von Rotoren

Einige Beispiele für das Verhalten von Rotoren sind in Bild 6 veranschaulicht, und Einzelheiten zu diesen Verhaltensarten werden in Anhang B näher erläutert.



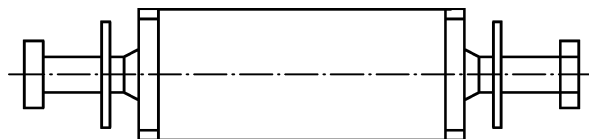
a) starres Verhalten (z. B. ein massives Getrieberad bei niedriger Drehzahl)



b) wellenelastisches Verhalten (z. B. eine Scheibe auf einer elastischen Welle bei hoher Drehzahl)



c) körperelastisches Verhalten (z. B. eine Trommel mit Zugankern, die elastisch unter der Fliehkraft ausbiegen)



d) Setzungsverhalten (z. B. ein Generator mit Wicklungen, die sich unter einer bestimmten Fliehkraft ein für alle Mal setzen)

Bild 6 — Beispiele von Rotorentypen, die bestimmtes Rotorverhalten zeigen

6 Auswahl eines Auswuchtverfahrens

Bei einer gegebenen Drehzahl steuern die physikalischen Eigenschaften des Rotors und die seiner Stützstruktur das Ansprechverhalten des Rotors auf eine entlang seiner Länge verteilte Unwucht. Das Auswuchten auf eine geforderte Toleranz hängt von diesen Parametern ab, und eine Veränderung dieser Parameter oder der festgelegten Unwuchttoleranz kann bedeuten, dass ein anderes Verfahren benötigt wird (für weitere Informationen siehe Abschnitt 7).

Da die verschiedenen Auswuchtverfahren den Einsatz unterschiedlicher Arten von Auswuchtmaschinen und unterschiedlichen Einsatz von Mitteln erfordern, ist es wichtig, ein geeignetes Verfahren zu wählen, um den Auswuchtprozess zu optimieren und die geforderten Unwuchttoleranzen einzuhalten. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der Verfahren für die in Abschnitt 5 genannten grundlegenden Verhaltensarten von Rotoren, detaillierte Anforderungen sollten jedoch ISO 21940-11 und ISO 21940-12 entnommen werden, wie in Tabelle 1 angezeigt.

Sofern möglich, sollte das am besten geeignete Auswuchtverfahren mit dem Rotorhersteller oder -abnehmer abgestimmt werden.

Tabelle 1 — Übersicht über Rotorverhalten, die maßgeblichen Teile von ISO 21940 und Auswuchtverfahren

Rotorverhalten	Beispiel	Maßgeblicher Teil von ISO 21940	Auswuchtaufgabe oder -verfahren
Starres Verhalten (wie in 5.2 beschrieben)	Bild 6 a)	ISO 21940-11	Ein- und Zwei-Ebenen-Auswuchten ^a
Wellenelastisches Verhalten (wie in 5.3 beschrieben)	Bild 6 b)	ISO 21940-12	6 niedrigtourige Auswuchtverfahren (A bis F) 1 Auswuchtverfahren bei mehreren Drehzahlen (G) 1 Auswuchtverfahren bei nur einer Drehzahl (üblicherweise Betriebsdrehzahl) (H)
Körperelastisches Verhalten (wie in 5.4.2 beschrieben)	Bild 6 c)		Auswuchtverfahren bei einer festen Drehzahl (üblicherweise Betriebsdrehzahl) (I)
Setzungsverhalten (wie in 5.4.3 beschrieben)	Bild 6 d)		Setzen von Bauteilen bei hoher Drehzahl ^b
^a Das Ein-Ebenen-Auswuchten kann für den Ausgleich der resultierenden Unwucht und das Zwei-Ebenen-Auswuchten für den Ausgleich der resultierenden Unwucht und der resultierenden Momentenunwucht sorgen.			
^b Dieses Verfahren ist in ISO 21940-12:2016, 7.3.3.12 erwähnt, es wurde ihm jedoch kein Buchstabe zugeordnet.			

7 Unwuchttoleranzen

7.1 Allgemeines

Moderne Auswuchtmaschinen ermöglichen eine sehr weitgehende Verringerung der Restunwuchten, es ist jedoch nicht wirtschaftlich, im Übermaß Anforderungen an die Unwuchttoleranz festzulegen. Im Allgemeinen ist es nur notwendig, die Unwuchttoleranz festzulegen, die erforderlich ist, damit der Rotor in seiner normalen Betriebsumgebung mit zulässigen Schwingungen und dynamischen Kräften läuft.

7.2 Zulässige Restunwucht

7.2.1 Allgemeines

Um annehmbare Schwingungswerte und dynamische Kräfte für den Rotor im Betriebszustand erreichen zu können, sollten die für die Restunwucht zulässigen Werte beim Hersteller des Rotors erfragt werden. Für den Fall, dass diese Angabe nicht vorliegt, können jedoch die Internationalen Normen der Reihe ISO 21940 Hinweise geben.

7.2.2 Zulässige Restunwucht bei Rotoren mit starrem Verhalten

Beim Auswuchten von Rotoren mit starrem Verhalten stehen die gemessenen Kräfte und Schwingungen in direkter Beziehung zur zulässigen Restunwucht U_{per} , die sich anhand von Erfahrungen mit dem Maschinentyp, der Rotormasse und der Drehzahl bestimmen lässt und in ISO 21940-11 beschrieben ist. Auf diese Weise können sowohl die statische Restunwucht U_r als auch die Momentenrestunwucht P_r bis auf die für den Rotor geforderte Toleranz ausgeglichen werden.

7.2.3 Zulässige Restunwucht bei Rotoren mit wellenelastischem Verhalten

Beim Auswuchten von Rotoren mit wellenelastischem Verhalten können die gemessenen Kräfte und Schwingungen von der Dynamik des gesamten Rotorsystems, einschließlich der Lager und des Stützsystems, abhängig sein. In ISO 21940-12 werden Verfahren zur Berechnung der Unwuchttoleranz beschrieben, die entweder auf Schwingungswerten oder auf zulässigen Restunwuchten beruhen, die aus den nach ISO 21940-11 berechneten Restunwuchten abgeleitet wurden.

Für die Auswuchtung von Rotoren mit wellenelastischem Verhalten ist es erforderlich, die statische Restunwucht U_r , die Momentenrestunwucht P_r und die Werte der äquivalenten Restunwucht in den Eigenformen $U_{n e, r}$ ($n = 1, 2, \dots$) auf die für den Rotor geforderte Toleranz zu verringern. Dies kann die Betrachtung der Schwingungsarten über der Betriebsdrehzahl (wie in 7.4 beschrieben) umfassen.

Die Verfahrensweisen zur Bewertung der Unwucht in den Eigenformen und die Verfahren zur Bestimmung der zulässigen Restunwucht in den Eigenformen sind in ISO 21940-12 beschrieben.

7.3 Grenzwerte für die Schwingungen

Beim Auswuchten von Rotoren mit wellenelastischem Verhalten in hochtourigen Auswuchtmaschinen werden häufig Grenzwerte für die Schwingungen angewendet. Der Betreiber der Auswuchtmaschine kann Grenzwerte für die Schwingungen zur Verfügung stellen, sofern nachgewiesen werden kann, dass ähnliche Rotoren, die unter Einhaltung dieser Grenzwerte ausgewuchtet wurden, im Betriebszustand vorschriftsmäßig liefen.

ANMERKUNG Auswuchtmaschinen können unterschiedliche Lagerständersteifigkeiten aufweisen, weswegen die Grenzwerte für die Schwingungen für jede einzelne Auswuchtmaschine gesondert und für einen gewählten Drehzahlbereich festgelegt werden dürfen.

Für den Fall, dass detaillierte Informationen zur Beziehung der Stützsteifigkeit und der Messstellen zwischen der Auswuchtmaschine und den Bedingungen am Einsatzort zur Verfügung stehen, wird in ISO 21940-12 ein Verfahren zur Abschätzung der Grenzwerte für die Schwingungen vorgestellt.

7.4 Einfluss von Eigenformen oberhalb der Betriebsdrehzahl

Wenn eine geringe Restunwucht oder ein niedriger Schwingungswert erforderlich ist, kann es notwendig sein, Biegeeigenformen der Welle zu berücksichtigen, die bei Frequenzen oberhalb der Betriebsdrehzahl auftreten. Die Auswirkungen dieser höheren Eigenformen können in Abhängigkeit von ihrer Nähe zur Betriebsdrehzahl, der Unwuchtverteilung, die durch die vorangegangenen Auswuchtschritte beeinflusst werden kann, und vom Betrag der Dämpfung durch das Rotorsystem bedeutsam werden (siehe ISO 21940-31). So wird z.B. das in Bild 7 schematisch dargestellte Antwortverhalten des Rotors bei der Betriebsdrehzahl ($3\,000\text{ min}^{-1}$, d.h. 50 Hz) durch die höhere Eigenform in signifikantem Maße beeinflusst, obwohl die niedrigeren Eigenformen so ausgewuchtet wurden, dass die Grenzwerte eingehalten werden. Hier würde der Rotor – in Abhängigkeit vom Betrag der Dämpfung – die Grenzwerte für die Schwingungen basierend auf einem Effektivwert von 5 mm/s bei einer Normalbetriebsdrehzahl von 50 Hz wegen der höheren Eigenform nicht einhalten, obwohl die niedrigeren Eigenformen annehmbar sind.

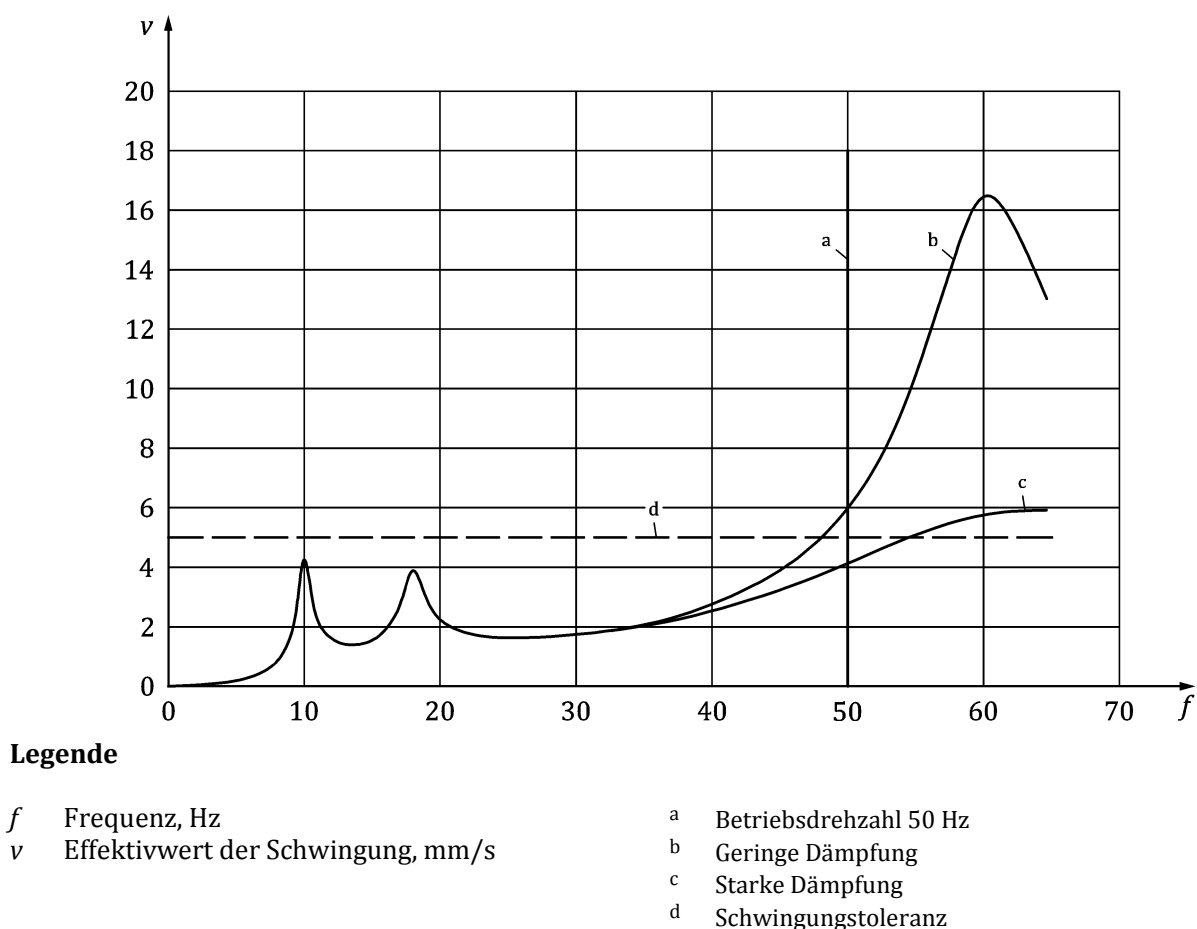


Bild 7 — Einfluss von Eigenformen des Rotors oberhalb der Betriebsdrehzahl

7.5 Faktoren mit Einfluss auf die Auswuchtverfahren

7.5.1 Allgemeines

Bei einer gegebenen Drehzahl steuern die physikalischen Eigenschaften des Rotors und die seiner Stützstruktur das Ansprechverhalten des Rotors auf eine entlang seiner Länge verteilte Unwucht. Das Auswuchten auf eine geforderte Qualität hängt von diesen Parametern ab, und eine Veränderung dieser Parameter oder der festgelegten Unwuchttoleranz kann bedeuten, dass ein anderes Verfahren benötigt wird, um die Auswuchtungsanforderungen einzuhalten.

7.5.2 Toleranzen

Wird nur die Unwuchttoleranz verringert, so kann es notwendig sein, das Verhalten des Rotors erneut zu betrachten und ein anderes Verfahren anzuwenden, um den Rotor in die Toleranz zu bringen. Dies ist z.B. bei Folgendem der Fall:

- a) bei Rotoren mit starrem Verhalten, die nach einem Ein-Ebenen-Verfahren ausgewuchtet wurden, um die resultierende Unwucht zu verringern, ist möglicherweise nur ein Ein-Ebenen-Auswuchten mit engerer Toleranz erforderlich;
- b) bei Rotoren mit starrem Verhalten, die nach einem Ein-Ebenen-Verfahren ausgewuchtet wurden, um die resultierende Unwucht zu verringern, ist möglicherweise ein Zwei-Ebenen-Verfahren erforderlich, um der Momentenunwucht Rechnung zu tragen;
- c) bei Rotoren mit starrem Verhalten, die nach einem Zwei-Ebenen-Verfahren ausgewuchtet wurden, um sowohl die resultierende Unwucht als auch die Momentenunwucht zu verringern, sind möglicherweise zusätzliche Verfahren für ein wellenelastisches Verhalten erforderlich, um die Beiträge aus den modalen Unwuchten zu verringern; das kann selbst dann der Fall sein, wenn der Rotor unterhalb seiner ersten biegekritischen Drehzahl läuft;
- d) bei Rotoren mit wellenelastischem Verhalten, die nach einem Verfahren für wellenelastisches Verhalten ausgewuchtet wurden, um die dynamische Unwucht und eine Anzahl von modalen Unwuchten zu verringern, sind möglicherweise zusätzliche Verfahren für wellenelastisches Verhalten erforderlich, um Unwuchten von noch mehr (höheren) Biegeeigenformen des Rotors zu verringern, auch wenn der Rotor unterhalb der kritischen Drehzahlen (Resonanzdrehzahlen) der höheren Eigenformen läuft;
- e) bei einem Rotor mit entweder starrem oder wellenelastischem Verhalten, der erfolgreich nach dem entsprechenden Verfahren ausgewuchtet wurde, kann weiteres Auswuchten erforderlich sein, um körperelastischem Verhalten oder dem Setzungsverhalten von Bauteilen Rechnung zu tragen;
- f) wenn die höhere Toleranz nur bei einer einzigen Drehzahl erreicht werden kann, kann es erforderlich sein, das Auswuchtverfahren bei Betriebsdrehzahl zu erwägen.

7.5.3 Drehzahl und Lagerungsbedingungen

Andere Veränderungen des Rotorverhaltens können auftreten, wenn Betriebsbedingungen geändert werden (z.B. durch Änderung der Betriebsdrehzahl oder der Ausführungsart der Lager oder der Stützstruktur).

7.5.4 Urunwucht

Die Verteilung der Urunwucht beeinflusst das Schwingungsansprechverhalten des Rotorsystems. Sie entscheidet darüber, welche Unwucht (siehe Abschnitt 4) außerhalb der Toleranz ist und deshalb der Aufmerksamkeit bedarf. Unterschiedliche Fertigungs- und Montageverfahren können zu unterschiedlichen Werten der Urunwucht führen.

8 Auswahl einer Auswuchtmaschine

8.1 Allgemeines

Das Verhalten des Rotors und das gewählte Auswuchtverfahren entscheiden gemeinsam darüber, ob eine niedrigtourige oder eine hochtourige Auswuchtmaschine erforderlich ist. Beispiele für die Anforderungen an Auswuchtmaschinen sind in Tabelle 2 angegeben, und ISO 21940-21 enthält weitere Einzelheiten zu niedrigtourigen Auswuchtmaschinen.

Tabelle 2 — Beispiele für Anforderungen an Auswuchtmaschinen

	Anforderungen an Auswuchtmaschinen
1	Rotormasse
2	Lagertypen, Lagergröße und Lagerabstand
3	Rotorlänge
4	Rotordurchmesser
5	Kleinste erreichbare Restunwucht
6	Unwuchtreduziervverhältnis
7	Steifigkeit der Lagerabstützung, um zur Betriebsumgebung zu passen
8	Vakuumanlage für hochtourige beschaufelte Rotoren
9	Maximal zulässige Drehzahl für beschaufelte Rotoren auf niedrigtourigen Maschinen
10	Induzierter elektrischer Strom bei hochtourigen Elektrorotoren
11	Einfluss des Rotorüberhangs in der Auswuchtanlage
ANMERKUNG 1 Diese Liste ist nicht vollständig, und bei speziellen Maschinen sind möglicherweise andere Anforderungen angemessen.	
ANMERKUNG 2 ISO 21940-21 enthält detaillierte Anforderungen an niedrigtourige Auswuchtmaschinen.	

Unterschiedliche Unwuchtarten erfordern den Einsatz unterschiedlicher Typen von Auswuchtmaschinen, z. B.:

- a) resultierende Unwucht: Eine Ein-Ebenen-Auswuchtmaschine (niedrigtourig) ist ausreichend;
- b) resultierende Momentenunwucht: Es wird eine Zwei-Ebenen-Auswuchtmaschine (niedrigtourig) benötigt;
- c) modale Unwucht: Im Allgemeinen wird eine hochtourige Auswuchtmaschine benötigt.

ANMERKUNG 1 Das Ein-Ebenen-Auswuchten kann auch auf einer Zwei-Ebenen-Auswuchtmaschine durchgeführt werden.

ANMERKUNG 2 Auf einer hochtourigen Auswuchtmaschine kann üblicherweise sowohl das Ein-Ebenen- als auch das Zwei-Ebenen-Auswuchten durchgeführt werden.

ANMERKUNG 3 Rotoren mit wellenelastischem Verhalten, wie nach den Verfahren A bis F von ISO 21940-12 klassifiziert, können bei niedrigen Drehzahlen angemessen ausgewuchtet werden.

8.2 Besondere Anforderungen

Während sich der Rotor in der Auswuchtmaschine befindet, dürfen zusätzliche Prüfungen durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass er für den Einsatz geeignet ist. Tabelle 3 enthält Beispiele für zusätzliche Prüfungen, die (z. B. bei einem Rotor für einen großen Elektrogenerator) durchgeführt werden können, während sich der Rotor noch in der Auswuchtmaschine befindet. In ähnlicher Weise sollte auch bei Sonder-Rotoren erwogen werden, ob zusätzliche Prüfungen (während sich der Rotor in der Auswuchtmaschine befindet) erforderlich sind.

Tabelle 3 — Beispiele für Prüfungen, die an einem Elektrogenerator-Rotor auf einer Auswuchtmaschine durchgeführt werden können

	Zusätzliche Prüfanforderungen
1	Schleudern des Rotors zum Setzen der Endkappen
2	Auswuchten des Rotors während des Durchfahrens von Resonanzdrehzahlen, bei Betriebsdrehzahl und bei Schleuderdrehzahl
3	Durchführen von Versuchen zur thermischen Stabilität
4	Durchführen von elektrischen Versuchen, um den Zustand der Wicklungen zu prüfen
Diese Prüfungen sollten nur dann durchgeführt werden, wenn geeignete Anlagen zur Verfügung stehen und die Anforderungen an die Sicherheit erfüllt sind.	

9 Internationale Normen über das Auswuchten

9.1 Allgemeines

Zur Unterstützung der Anwender stehen Internationale Normen zu fünf Hauptbereichen des Themengebiets Auswuchten zur Verfügung, wie in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 — Abdeckung des Themengebiets durch Internationale Normen zum Auswuchten

Thema	ISO-Nummer	Zugehörige Internationale Normen
Einführung	21940-1	Einführung
Begriffe	21940-2 2041	Begriffe zum Auswuchten Begriffe zu Schwingungen und Stößen
Auswuchtverfahren und -toleranzen	21940-11 21940-12 21940-13 21940-14	Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit starrem Verhalten Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit wellenelastischem Verhalten Kriterien und Sicherheitshinweise für das Auswuchten von mittleren und großen Rotoren am Aufstellungsort Verfahren zur Ermittlung von Abweichungen beim Auswuchten
Auswuchtmaschinen	21940-21 21940-23	Beschreibung und Bewertung von Auswuchtmaschinen Verkleidungen und andere Schutzmaßnahmen für die Messstation von Auswuchtmaschinen
Maschinen-Auslegung für das Auswuchten	21940-31 21940-32	Anfälligkeit und Empfindlichkeit von Maschinen gegenüber Unwucht Behandlung von Passfederverbindungen

9.2 Begriffe

9.2.1 ISO 21940-2 Balancing vocabulary

ISO 21940-2 legt Begriffe zur Auswuchttechnik fest. Sie enthält außerdem

- a) ein alphabetisches Stichwortverzeichnis der Begriffe zum Auswuchten; und
- b) sie stellt anhand von Illustrationen einen Leitfaden zur Terminologie zu Auswuchtmaschinen zur Verfügung.

9.2.2 ISO 2041 Vibration and shock vocabulary

ISO 2041 legt die allgemeinen Begriffe fest, die in Bezug auf Schwingungen und Stöße sowie Zustandsüberwachung verwendet werden.

9.3 Auswuchtverfahren und -toleranzen

9.3.1 Allgemeines

ISO 21940-11, ISO 21940-12, ISO 21940-13 und ISO 21940-14 enthalten Angaben dazu, wie grobe Mängel und unnötig restriktive Anforderungen vermieden werden können. Sie sind nicht für die Anwendung als Abnahmevorschrift vorgesehen.

9.3.2 ISO 21940-11 Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour

In ISO 21940-11 werden die bei Rotoren mit starrem Verhalten anzuwendenden Verfahren und Toleranzen beschrieben. Festgelegt werden darin:

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

9.3.3 ISO 21940-12 Procedures and tolerances for rotors with flexible behaviour

In ISO 21940-12 werden die bei Rotoren mit wellenelastischem bzw. nachgiebigem Verhalten anzuwendenden Verfahren und Toleranzen beschrieben und

- a) typische Konfigurationen von Rotoren mit wellenelastischem Verhalten dargestellt;
- b) Auswuchtanforderungen entsprechend den Merkmalen,
- c) Auswuchtverfahren
- d) und Verfahren zur Beurteilung des erreichten Unwuchtzustandes festgelegt; und
- e) Anleitungen bezüglich der Unwuchttoleranzen gegeben.

Die in ISO 21940-12 gegebenen Hinweise zu den annehmbaren Unwuchttoleranzen gelten in der Regel für Maschinen, die die in ISO 21940-31 umrissenen Anfälligkeits- und Empfindlichkeitsanforderungen erfüllen (zu weiteren Information hierzu siehe 9.5.1).

9.3.4 ISO 21940-13 Criteria and safeguards for the in-situ balancing of medium and large rotors

In ISO 21940-13 sind Verfahren festgelegt, die anzuwenden sind, wenn mittlere und große Rotoren in ihren eigenen Lagern im Betriebszustand ausgewuchtet werden. Sie nennt die Bedingungen, unter denen es angebracht ist, ein Auswuchten im Betriebszustand durchzuführen, die benötigte Messeinrichtung, die Folgerungen hinsichtlich Schutz und die Anforderungen an die Erstellung und Archivierung von Berichten.

Die Anforderungen von ISO 21940-13 dürfen als Grundlage für den Entwurf von Verträgen zur Durchführung von Auswuchtungen im Betriebszustand verwendet werden, sie geben aber keine Hinweise zu den zur Berechnung der Ausgleichsmassen anhand von gemessenen Schwingungsdaten anzuwendenden Verfahren.

ANMERKUNG Die in ISO 21940-13 behandelten Verfahren sind für mittlere und große Maschinen geeignet, eingeschlossen kleine Hauptkesselspeisepumpen unter 1 MW bis hin zu großen Dampf- und Gasturbinen über 40 MW. Viele der dargelegten Grundsätze sind jedoch ebenso auf kleinere Maschinen anwendbar, bei denen es erforderlich ist, gute Aufzeichnungen zum Schwingungsverhalten und zu den Ausgleichsmassenkonfigurationen zu führen.

9.3.5 ISO 21940-14 Procedures for addressing balancing errors

ISO 21940-14 enthält die Verfahren zur Ermittlung von Abweichungen beim Auswuchten und Festlegungen zu Folgendem:

- a) Erkennen von Abweichungen bei der Messung der Unwucht eines Rotors;
- b) Ermittlung der erkannten Abweichungen; und
- c) Berücksichtigung der Abweichungen bei der Bestimmung und Verifizierung von Unwuchttoleranzen.

ISO 21940-14 legt Akzeptanzkriterien für den Auswuchtzustand, charakterisiert durch die Restunwucht, für die Anwendung sowohl direkt nach dem Auswuchten als auch für eine spätere Überprüfung der Unwuchttoleranz durch den Abnehmer fest.

9.4 Auswuchtmaschinen

9.4.1 ISO 21940-21 Description and evaluation of balancing machines

ISO 21940-21 legt fest, wie Auswuchtmaschinen zu bewerten sind, die

- a) Rotoren mit bei Auswuchtdrehzahl starrem Verhalten (für eine Beschreibung siehe ISO 21940-11); oder
- b) Rotoren mit wellenelastischem Verhalten, die nach niedrigtourigen Verfahren ausgewuchtet werden, aufnehmen und antreiben.

ANMERKUNG 1 Niedrigtouriges Auswuchten wird im Allgemeinen bei Rotoren mit starrem Verhalten angewendet und hochtouriges Auswuchten bei Rotoren mit wellenelastischem Verhalten. Bei Anwendung angemessener Verfahrensweisen ist es jedoch unter Umständen möglich, Rotoren mit wellenelastischem Verhalten bei niedriger Drehzahl so auszuwuchten, dass sichergestellt ist, dass sie nach dem endgültigen Einbau zufriedenstellend laufen. Die Einzelheiten dieser speziellen Anforderungen werden in ISO 21940-12 beschrieben.

Die Anforderungen von ISO 21940-21 gelten sowohl für wegmessende Auswuchtmaschinen als auch für kraftmessende Auswuchtmaschinen.

ANMERKUNG 2 Kraftmessende Auswuchtmaschinen haben einen Auswuchtdrehzahlbereich unterhalb der Resonanzdrehzahl der gesamten aus Rotor und Stützsystem bestehenden Baugruppe, während der Auswuchtdrehzahlbereich von wegmessenden Auswuchtmaschinen über dieser Resonanzdrehzahl liegt.