

DIN 69888**DIN**

ICS 21.120.40; 21.240

Auswuchtanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme

Requirements for balancing of rotating tool systems

Exigences d'équilibrage pour systèmes d'outillage rotatifs

Gesamtumfang 37 Seiten

Normenausschuss Werkzeuge und Spannzeuge (FWS) im DIN
Normenausschuss Werkzeugmaschinen (NWM) im DIN

Inhalt

Seite

Vorwort	3
Einleitung.....	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen.....	4
3 Begriffe und Formelzeichen	5
3.1 Begriffe	5
3.2 Formelzeichen.....	6
4 Anforderungen	7
4.1 Allgemeines	7
4.1.1 Spann-ungenauigkeiten.....	7
4.1.2 Erreichbare Restunwucht	8
4.1.3 Gegenüberstellung der Restunwuchten	8
4.1.4 Eigenverhalten von Werkzeugmaschinen und Komponenten.....	8
4.2 Auswuchtanforderungen auf Basis der Schwingungsbelastung der Spindel	9
4.2.1 Allgemeines.....	9
4.2.2 Ermittlung der Auswuchtanforderungen	9
4.2.3 Behandlung von Fehlern der Wuchtmaschinen und der Wiederholgenauigkeit	10
4.2.4 Auswuchtanforderungen an Werkzeugkomponenten	10
4.2.5 Auswuchtanforderungen an Werkzeugsysteme mit Führung im Werkstück.....	10
4.2.6 Behandlung der Unwuchtartern – Statisches/Dynamisches Auswuchten	12
4.2.7 Einfluss der Kegel-Hohlschäfte (HSK) auf die dynamische Unwucht.....	16
4.3 Auswuchtanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme.....	17
5 Bezeichnung.....	25
Anhang A (informativ) Zulässige Restunwucht — theoretischer Ansatz und Berechnungsbeispiele	26
A.1 Theoretischer Ansatz	26
A.1.1 Theoretische Grundlagen	26
A.1.2 Theoretischer Ansatz	26
A.2 Berechnungsbeispiele	28
A.2.1 Berechnungsbeispiel für zulässige statische Restunwucht eines Zerspanungswerkzeuges mit $L < L_{\text{stat, zul}}$	28
A.2.2 Berechnungsbeispiel für die zulässige statische und dynamische Restunwucht eines Zerspanungswerkzeuges mit $L > L_{\text{stat, zul}}$	32
A.2.3 Berechnungsbeispiel für Werkzeuge mit einer Umfangsgeschwindigkeit größer 1 000 m/min	34
A.3 Komponentenwuchten	34
A.4 Reproduzierbar messbare Restunwuchten	35
Anhang B (informativ) Auswuchten von modular aufgebauten Werkzeugen.....	36
B.1 Allgemeines.....	36
B.2 Auswuchten des Gesamtsystems.....	36
B.3 Auswuchten von Komponenten.....	37

Vorwort

Diese Norm wurde vom Normenausschuss Werkzeuge und Spannzeuge (FWS) von Fachleuten des Unterausschusses NA 121-01-14-01 UA „Wuchtanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme“ im Arbeitsausschuss NA 121-01-14 AA „Werkzeuge für die spanende Bearbeitung auf Metallbearbeitungsmaschinen — Sicherheit“, erarbeitet.

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

Einleitung

Die Drehzahlen bei der spanenden Bearbeitung sind aufgrund weiterentwickelter Schneidstoffe und Werkzeuge in den letzten Jahren gestiegen. Daraus resultieren neue Anforderungen an den Wuchtzustand der Gesamtsysteme (Maschinenspindel, Spannzeug und Werkzeug).

Die in DIN ISO 1940-1 enthaltenen Anforderungen über die Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem (starrem) Zustand lassen sich aus folgenden Gründen nicht auf diese Gesamtsysteme übertragen:

Maschinenspindeln, Spannzeuge und Werkzeuge weisen im Gegensatz zu anderen starren Rotoren (z. B. Elektromotorenanker usw.) wesentliche Besonderheiten auf:

- Spindel, Spannzeug und Werkzeug bilden ein System mit z. T. hoher zeitlicher Varianz (z. B. häufige Werkzeugwechsel in Bearbeitungszentren).
- Aufgrund radialer sowie winkelbezogener Spann-Ungenauigkeiten führt ein wiederholter Werkzeugwechsel in der Spindel zu einer Änderung des Auswuchtzustands des Gesamtsystems.
- Passungstoleranzen der einzelnen Bauelemente (Spindel, Spannzeug und Werkzeug) setzen Grenzen beim Auswuchten.

Insbesondere Spann-Ungenauigkeiten von Werkzeugsystem und Spindel setzen dem reproduzierbaren Wuchtzustand eine systemspezifische Grenze, wenn nicht das Auswuchten des gesamten gefügten Systems einschließlich der Spindel erfolgt. Für das Auswuchten des Gesamtsystems werden in dieser Norm keine Details festgelegt.

Vor diesem Hintergrund wurden auf Basis von DIN ISO 1940-1 Verfahren entwickelt, mit denen Auswuchtanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme, unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussgrößen abgeleitet werden können. Diese sind in Form von Diagrammen und mathematischen Ableitungen dargestellt.

Wesentliches Ziel ist die Begrenzung von unwuchtbedingten Maschinenschwingungen und daraus resultierenden Systembelastungen sowie Prozessbeeinträchtigungen. Die Unwucht wirkt hierbei als drehzahlharmonische Anregung der Maschinenstruktur. Hierbei ergibt sich aus Unwuchtbetrag und Drehzahl die Größe der anregenden Kraft.

Die vorliegende Norm DIN 69888 ist das Ergebnis von Forschungsergebnissen des PTW Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Darmstadt, der GFE Gesellschaft für Fertigungstechnologie und Entwicklung e. V. in Schmalkalden und den Beratungen des NA 121-01-14-01 Wuchtanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme.

Aufgrund der Forschungsergebnisse wurde nachgewiesen, dass sich diese Norm für den wesentlichen Teil der praktischen Anwendungen aus technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eignet.

Eine Einführung in das Thema Auswuchten enthält die Norm DIN ISO 19499, Mechanische Schwingungen — Auswuchttechnik — Einführung und Leitfaden für die Auswahl und Anwendung von Auswuchtnormen (ISO 19499:2007). Dieses Dokument enthält nützliche Informationen zu weiteren Normen, die sich mit dem Auswuchten von Rotoren befassen.

Für das Auswuchten von Holzbearbeitungswerkzeugen enthält DIN EN 847-1 zusätzliche Festlegungen.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm legt Auswuchtanforderungen für Werkzeugsysteme mit Schnittstellen HSK25 bis HSK100 nach DIN 69063-1, DIN 69063-2, DIN 69063-5, DIN 69063-6, DIN 69893-1, DIN 69893-2, DIN 69893-5 und DIN 69893-6 bezogen auf ihre jeweilige Betriebsdrehzahl fest. Für die Schnittstellen HSK125 und HSK160 sind in dieser Norm keine Angaben enthalten, es wird empfohlen, die Grenzwerte für HSK100 anzuwenden.

Sinngemäß kann die Norm für Werkzeugsysteme mit Schnittstellen und Aufnahmen wie ABS, CAPTO, KM, SK und Zylinderschaft angewendet werden. Hierbei sind die bauartspezifischen Belange der Schnittstellen und Aufnahmen zu berücksichtigen.

Die Norm gilt unter folgenden Voraussetzungen:

- a) Das Werkzeugsystem wird im Bereich der Betriebsdrehzahlen als starr angenommen.
- b) Die Grenze der schwingungsmechanischen Belastung wird durch die zulässige Lagerbelastung der Maschinenspindel definiert.
- c) Die Einhaltung der nach dieser Norm festgelegten Anforderungen für Werkzeugsysteme (Lagerbelastung und damit Schwinggeschwindigkeit) zielt darauf ab, dass es zu keinen unwuchtbedingten Beeinträchtigungen in der Fertigung kommt.

Die in der Praxis möglichen Störeinflüsse, wie z. B. Eigenfrequenzen und äußere Störeinflüsse, werden in dieser Norm nicht behandelt.

ANMERKUNG 1 Unter Umständen kann es durch ungünstige Prozess- und Systemverhältnisse, wie Partialresonanzen der Maschinenstruktur in Kombination mit bestimmten Drehzahlen oder durch konstruktive sowie maschinentechnische Gegebenheiten (z. B. lang auskragende Achsen, beengte Platzverhältnisse, schwingungsanfällige Vorrichtungen/Spannzeuge und Werkstückgestaltung), zu erhöhten Schwingungsbelastungen und Auswuchtanforderungen kommen. Dies ist vom Zusammenwirken zwischen Maschine und Spindel-Werkzeugsystem im Einzelfall abhängig und kann nicht durch eine Norm abgedeckt werden. Eine Abweichung von den hier empfohlenen Grenzwerten kann in Einzelfällen erforderlich sein.

ANMERKUNG 2 Aus Sicherheitsgründen darf nach DIN EN ISO 15641 bei Werkzeugen mit Umfangsgeschwindigkeiten > 1 000 m/min die Wuchtgüte nicht schlechter als G 40 sein. Dies ist bei der Anwendung dieser Norm zu berücksichtigen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 69063-1, *Werkzeugmaschinen — Aufnahmen für Kegel-Hohlschäfte — Teil 1: Für Form A und Form C nach DIN 69893, Anschlussmaße*

DIN 69063-2, *Werkzeugmaschinen — Aufnahmen für Kegel-Hohlschäfte — Teil 2: Für Form B und Form D nach DIN 69893, Anschlussmaße*

DIN 69063-5, *Werkzeugmaschinen — Aufnahmen für Kegel-Hohlschäfte — Teil 5: Für Form E nach DIN 69893; Anschlussmaße*

DIN 69063-6, *Werkzeugmaschinen — Aufnahmen für Kegel-Hohlschäfte — Teil 6: Für Form F nach DIN 69893, Anschlussmaße*

DIN 69893-1, *Kegel-Hohlschäfte mit Plananlage — Teil 1: Kegel-Hohlschäfte Form A und Form C, Maße und Ausführung*

DIN 69893-2, *Kegel-Hohlschäfte mit Plananlage — Teil 2: Kegel-Hohlschäfte Form B und Form D, Maße und Ausführung*

DIN 69893-5, *Kegel-Hohlschäfte mit Plananlage — Teil 5: Kegel-Hohlschäfte Form E; Maße*

DIN 69893-6, *Kegel-Hohlschäfte mit Plananlage — Teil 6: Kegel-Hohlschäfte Form F; Maße und Ausführung*

DIN EN 847-1, *Maschinen-Werkzeuge für die Holzbearbeitung — Sicherheitstechnische Anforderungen — Teil 1: Fräs- und Hobelwerkzeuge, Kreissägeblätter*

DIN EN ISO 15641, *Fräswerkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung — Sicherheitstechnische Anforderungen*

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

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

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

3 Begriffe und Formelzeichen

3.1 Begriffe

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

3.1.1

Gesamtsystem

Summe aller Bauteile, durch die aufgrund deren Gestaltung, Form, Abweichungen von Plan- und Rundlauf usw. Unwucht entstehen kann (u. a. Maschinenspindeln und Werkzeugsysteme)

3.1.2

Werkzeugsystem

Zusammenbau von Werkzeug und Spannzeug, wobei das Spannzeug im Werkzeug (z. B. Werkzeuggrundkörper mit einer HSK-Schnittstelle) integriert sein kann

3.1.3

Werkzeug

besteht aus dem Werkzeuggrundkörper (z. B. Schaft), Zwischenelementen (z. B. Kassette, modulare Bauteile) und der Schneide (z. B. Schneidplatte, Bohrerspitze)

3.1.4

Spannzeug

Spannmittel, mit dem das Werkzeug fixiert wird und die Verbindung zwischen Spindel und Werkzeug darstellt

3.1.5

Trennstelle

Kontaktstelle zwischen Spannzeug und Werkzeug oder zwischen Werkzeugteilen

3.1.6

Schnittstelle

Kontaktstelle zwischen Werkzeugsystem und Spindel

3.2 Formelzeichen

Tabelle 1 — Formelzeichen

Formelzeichen	Benennung	Einheit
a	Gesamthebelarm — Abstand vorderes Lager — Werkzeugschwerpunkt	mm
a_M	maschinenseitiger Hebelarm aus generalisiertem Spindelmodell (vorderes Lager/HSK-Planfläche) bis zur HSK-Planfläche	mm
a_W	werkzeugseitiger Hebelarm (Spindelnase bis zum Schwerpunkt des Werkzeuges)	mm
b	Lagerabstand aus generalisiertem Spindelmodell	mm
c	Wuchtebenenabstand	mm
C_{dyn}	dynamische Tragzahl eines Spindelwälzlagers	N
D_B	Bezugsdurchmesser	mm
e_{HSK}	Fügegenauigkeit der HSK-Schnittstelle	μm
F_m	Kraft infolge Momentenunwucht	N
$F_{m, L1}$	Kraft an Lager 1 des generalisierten Spindelmodells infolge Momentenunwucht	N
$F_{m, L2}$	Kraft an Lager 2 des generalisierten Spindelmodells infolge Momentenunwucht	N
F_s	Kraft infolge statischer Unwucht	N
$F_{s, L1}$	Kraft an Lager 1 des generalisierten Spindelmodells infolge statischer Unwucht	N
$F_{s, L2}$	Kraft an Lager 2 des generalisierten Spindelmodells infolge statischer Unwucht	N
$F_{res, L1}$	resultierende Gesamtkraft an Lager 1 des generalisierten Spindelmodells	N
$F_{res, L2}$	resultierende Gesamtkraft an Lager 2 des generalisierten Spindelmodells	N
F_u	Amplitude der Unwuchtkraft	N
G	Auswuchtgütestufe	mm/s
L	Gesamtlänge des Werkzeugsystems	mm
$L_{stat, max}$	maximale Länge eines noch statisch auswuchtbaren Werkzeugsystems	mm
m_W	Werkzeugmasse	kg
m_{W1}	minimale schnittstellenspezifische Werkzeugmasse	kg
m_{W2}	maximale schnittstellenspezifische Werkzeugmasse	kg
n	Drehzahl	min^{-1}
n_{max}	maximale schnittstellenspezifische Drehzahl im Rahmen dieser Norm	min^{-1}
n_{min}	minimale schnittstellenspezifische Drehzahl im Rahmen dieser Norm	min^{-1}
P	Äquivalente Lagerbelastung	N
P/C_{dyn}	Lagerbelastung, Ausnutzung der Tragfähigkeit eines Lagers	%
u	Unwuchtmasse	g

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Benennung	Einheit
U	Unwucht	g·mm
U_{E1}	gemessener Unwuchtanteil in Auswuchtebene 1 bei dynamischer Unwucht	g·mm
U_{E2}	gemessener Unwuchtanteil in Auswuchtebene 2 bei dynamischer Unwucht	g·mm
$U_{E, zul}$	zulässige Restunwucht für eine Auswuchtebene	g·mm
U_m	Unwucht in einer Ausgleichsebene infolge Momentenunwucht	g·mm
$U_{m, zul}$	zulässige Unwucht infolge Momentenunwucht	g·mm
U_{min}	minimal erzielbare Restunwucht eines Werkzeugsystems im Betrieb	g·mm
U_{Moment}	Momentenunwucht	g·mm ²
U_{stat}	statische Unwucht	g·mm
$U_{stat, zul}$	zulässige statische Unwucht	g·mm
$U_{stat, zul, Standard}$	zulässige statische Restunwucht — Standardbearbeitung	g·mm
$U_{stat, zul, Schlicht}$	zulässige statische Restunwucht — Schlichtbearbeitung	g·mm
U_{WM}	auf einer Auswuchtmaschine reproduzierbare Restunwucht	g·mm
$U_{zul, G40}$	zulässige Restunwucht, um G40 nach DIN EN ISO 15641 nicht zu überschreiten	g·mm
α	Winkel	°
$\Delta\alpha_U$	Winkel zwischen statischer und Momentenunwucht	°
v_c	Umfangsgeschwindigkeit	m/min
Ω	Drehfrequenz	rad/s

4 Anforderungen

4.1 Allgemeines

4.1.1 Spann-Ungenauigkeiten

Aufgrund von passungs- und montagebedingten Ungenauigkeiten beim Einsetzen eines Werkzeugs in die Spindel entstehen Unwuchten, die durch das Auswuchten des Werkzeugs nicht vermieden werden können. Selbst wenn das Werkzeug auf kleinere zulässige Restexzentrizitäten als das Maß der radialen Montagefehler ausgewuchtet wird, kann dieser Unwuchtzustand nach dem Einsetzen in die Spindel nicht reproduzierbar erreicht werden.

Beim Einsetzen eines HSK-Werkzeuges nach DIN 69893 in die Spindel kann eine Fügegenauigkeit von 2 µm bis 4 µm (je nach HSK-Größe) erreicht werden. Faktoren wie Verschleiß und Rundlauffehler der Spindel können zu einer schlechteren Fügegenauigkeit führen. Dadurch kann die reproduzierbare Restunwucht des Gesamtsystems ungünstiger werden. Dies gilt insbesondere bei Werkzeugen mit anderen Schnitt- und/oder Trennstellen, z. B. mit seitlicher Spannfläche. Dadurch wird grundsätzlich die Spann- und Fügegenauigkeit beeinträchtigt.

In A.4 ist der Bereich reproduzierbar erreichbarer Restunwuchten für verschiedene Werkzeugschnittstellen und Werkzeugmassen dargestellt.

Systematische Spannfehler können auf einer Auswuchtmaschine durch Auswuchten auf Umschlag reduziert werden (siehe DIN ISO 1940-2).

4.1.2 Erreichbare Restunwucht

Die erreichbare Restunwucht eines Werkzeugs wird zudem durch die Auswuchtmaschine begrenzt (siehe A.4).

ANMERKUNG ISO 2953 beschreibt Testverfahren, um die Grenzen und Leistungen einer Auswuchtmaschine zu prüfen.

4.1.3 Gegenüberstellung der Restunwuchten

In dieser Norm werden alle zulässigen Restunwuchten in „g·mm“ angegeben und nicht einer Gütestufe nach DIN ISO 1940-1 zugeordnet.

Zwei Beispiele auf Basis DIN ISO 1940-1 sollen zeigen, dass durchaus übliche Forderungen schnell die Grenzen des Machbaren überschreiten.

Die zulässige Restunwucht beträgt bei einer Drehzahl von $25\,000\text{ min}^{-1}$ für die oft geforderte Gütestufe G 2,5 nur 1 g mm/kg. Dies ergibt eine von der Werkzeugmasse abhängige Restunwucht, die z. B. für ein Werkzeug mit einer Masse von 1 kg lediglich 1 g mm beträgt, was einer zulässigen Schwerpunktexzentrizität von 1 μm entspricht.

Bei leichteren Werkzeugen und höheren Drehzahlen steigen die Anforderungen noch weiter an. So darf ein HSK40-Werkzeug von 0,35 kg Masse bei der Forderung G 2,5 bei $40\,000\text{ min}^{-1}$ lediglich eine Restunwucht von 0,21 g·mm, d. h. eine Schwerpunktexzentrizität von 0,6 μm aufweisen.

Beide Forderungen können jedoch mit praxistauglichen Auswuchtmaschinen nicht gemessen und somit auch nicht ausgeglichen werden. DIN ISO 1940-1 ergibt außerdem, dass die gleiche Gütestufe G 2,5 bei einer bestimmten Drehzahl für unterschiedliche Werkzeugmassen unterschiedliche Restunwuchten und somit unterschiedliche Unwuchtkräfte zulässt, wodurch keine gleichmäßige Systembelastung erreicht wird.

Die dynamische Belastung ist aber nicht von der Werkzeugmasse, sondern nur von der Unwucht des Werkzeugsystems und den Bearbeitungskräften abhängig.

4.1.4 Eigenverhalten von Werkzeugmaschinen und Komponenten

Die Amplituden der von der Maschinenstruktur ausgeführten Schwingungen werden außer durch die Größe der anregenden Kraft von den dynamischen Eigenschaften des Systems bestimmt. Dabei sind die Schwingungen einer Struktur bei gleicher Anregung umso größer je größer die frequenzabhängige dynamische Nachgiebigkeit des Systems bei der jeweiligen Anregungsfrequenz ist.

Die Auswuchtanforderungen (insbesondere an das Werkzeug-Spindel-System) hängen aus dem Blickwinkel der Maschine somit von den dynamischen Eigenschaften des jeweiligen Gesamtsystems ab. Eine allgemeingültige Beschreibung der dynamischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen ist nicht möglich. Eine Begrenzung von unwuchtbedingten Maschinenschwingungen kann jedoch dadurch erreicht werden, dass die Auswuchtanforderungen in Richtung der unteren Grenzkurve erhöht werden. Die Grenze zur Reduzierung von unwuchtbedingten Maschinenschwingungen wird durch Auswuchten des Werkzeuges bis zur Grenze der reproduzierbar erreichbaren Restunwucht $U_{\min}$ erreicht (siehe 4.2.3).

Zur Anpassung der Auswuchtanforderungen an die Gegebenheiten des jeweiligen Werkzeugmaschinen-systems müssen die dynamischen Schwachstellen im Betriebsdrehzahlbereich bekannt sein. Eine Reduzierung der Schwingungen kann durch Änderung der Einsatzdrehzahl erreicht werden, damit die Anregung in einem dynamisch stabileren Frequenzbereich der Maschine erfolgt. Dieses Verfahren wird durch den zulässigen Bereich der Technologieparameter des jeweiligen Prozesses bestimmt.

4.2 Auswuchtanforderungen auf Basis der Schwingungsbelastung der Spindel

4.2.1 Allgemeines

Zur Begrenzung unwuchtbedingter, periodischer Belastungen der Spindellagerung ist es notwendig, Werkzeugsysteme in Abhängigkeit der Drehzahl sowie der Eigenschaften der in dieser Norm zugrunde gelegten Spindelsysteme auszuwuchten. Theoretischer Ansatz, siehe Anhang A.

Die in den Bildern 8 bis 14 dargestellten Auswuchtanforderungen beruhen auf Berechnungen an generalisierten mechanischen Ersatzmodellen von wälzgelagerten Spindeln mit den Schnittstellen HSK25 bis HSK100. Dabei sind die Grenzen so berechnet, dass jeweils im rechnerisch höchstbelasteten Lager eine konstante Lagerbelastung von $P/C_{\text{dyn}} < 1\%$ über den betrachteten Drehzahlbereich (siehe Tabelle 3) wirkt. Die dargestellten Grenzen sind unabhängig von der Werkzeugmasse.

4.2.2 Ermittlung der Auswuchtanforderungen

Mit den nachfolgenden Formeln können für die verschiedenen Schnittstellengrößen HSK25 bis HSK100 die zulässigen Werte der Restunwucht für eine maximale Lagerbelastung von $P/C_{\text{dyn}} < 1\%$ ermittelt werden. Es gilt:

$$U_{\text{stat, zul}} \leq 9,12 \cdot 10^5 \frac{C_{\text{dyn}}}{n^2} \cdot \left(1 + \frac{a}{b}\right)^{-1} - U_{\text{WM}} - (m_{\text{WKZ}} \cdot e_{\text{HSK}}) \quad (1)$$

mit

$$a = a_{\text{M}} + a_{\text{W}}$$

Die nach Gleichung (1) berechneten zulässigen Restunwuchten stellen den Bereich dar, in dem die Spindellagerung keine Schäden davon trägt. Um negative Auswirkungen der Restunwucht auf die Bearbeitungsergebnisse auszuschließen, muss die zulässige Restunwucht an den Bearbeitungsvorgang angepasst werden. Für verschiedene Bearbeitungen werden folgende Skalierungen vorgeschlagen:

Tabelle 2 — Beiwerte für $U_{\text{stat, zul}}$

Standardbearbeitung	$U_{\text{stat, zul, Standard}} = 0,8 \cdot U_{\text{stat, zul}}$
Schlichtbearbeitung	$U_{\text{stat, zul, Schlicht}} = 0,2 \cdot U_{\text{stat, zul}}$

Dabei sind die dynamische Tragzahl der Lagerung (C_{dyn}), der Hebelarm a_{M} und der Lagerabstand b aus dem generalisierten Modell schnittstellenspezifisch und können mit den zu verwendenden Einheiten aus Tabelle 3 entnommen werden. Der gesamte Hebelarm von der vorderen Lagerung bis zum Schwerpunkt des Werkzeuges setzt sich aus einem maschinenseitigen (a_{M} , siehe Tabelle 3) und einem werkzeugseitigen Hebelarm a_{W} zusammen. Der werkzeugseitige Teil a_{W} ist dabei durch den Anwender zu bestimmen und definiert sich von der Spindelnase zum Schwerpunkt des Werkzeuges. Der Faktor $9,12 \times 10^5$ entsteht durch Umrechnung der Einheiten. Die Drehzahl muss in 1/min eingesetzt werden.

Die kleinste erreichbare Restunwucht der Wuchtmaschinen (U_{WM}) und die durch Exzentrizitäten beim Einwechseln der Werkzeuge hervorgerufene Unwucht ($m_{\text{W}} \cdot e_{\text{HSK}}$) werden von der zulässigen Restunwucht abgezogen. Dadurch werden auch für den ungünstigsten Fall die Auswuchttoleranzen eingehalten. Nimmt $U_{\text{stat, zul}}$ nach Gleichung (1) jedoch kleinere Werte an als U_{min} nach Gleichung (2) (sehr hohe Drehzahlen und niedrige Tragzahlen), so kann durch Auswuchten des Werkzeuges alleine der geforderte Systemzustand nicht erzielt werden. Im Bedarfsfall ist das gefügte Gesamtsystem aus Spindel und Werkzeug auszuwuchten.

Tabelle 3 – Schnittstellenspezifische Parameter zur Berechnung der zulässigen Restunwuchten

Schnittstellen-spezifische Parameter	Einheit	HSK25	HSK32	HSK40	HSK50	HSK63	HSK80	HSK100	HSK125	HSK160
C_{dyn}	N	6 800	8 800	12 200	17 600	25 000	30 000	42 500		
a_M	mm	20	25	35	45	60	60	60		
b	mm	170	200	230	300	415	650	730		
e_{HSK}	µm	2	2	2	2	2	3	4		

4.2.3 Behandlung von Fehlern der Wuchtmaschinen und der Wiederholgenauigkeit

Der Einfluss des Wechselfehlers ist in den Bildern 8 bis 14 für die typische mittlere Werkzeugmasse einer HSK-Schnittstelle angegeben. Auch wenn an der Auswuchtmaschine ein geringerer Wert angezeigt wird, ist dieser beim nächsten Fügevorgang möglicherweise nicht reproduzierbar. Bei Auswuchtanforderungen, die unterhalb der gezeigten Kurven für den Wechselfehler liegen, kann nur durch Auswuchten des Gesamtsystems ein zulässiger Auswuchtzustand erreicht werden. Der Einfluss des Wechselfehlers berechnet sich unter Berücksichtigung von Auswucht- und Auswuchtmaschinengenauigkeit zu:

$$U_{min} \geq (m_W \cdot e_{HSK}) + U_{WM} \quad (2)$$

Zur Ermittlung der minimal erreichbaren Restunwucht ist die Werkzeugmasse in Gleichung (2) einzusetzen. Die Exzentrizitäten der HSK-Schnittstellen liegen zwischen 2 µm und 4 µm und sind in Tabelle 3 aufgeführt. Werte für U_{WM} siehe Tabelle A.1.

Beim Auswuchten sowie bei späteren Kontrollen des Auswuchtzustandes sind aufgrund der erwähnten Messfehler die Toleranzgrenzen um $\pm 15\%$ zu erweitern. Dies gilt für statisches und dynamisches Auswuchten. Beim dynamischen Auswuchten ist diese Toleranz je Ebene anzuwenden.

ANMERKUNG DIN ISO 1940-1 und -2 empfehlen eine detaillierte Betrachtung der maschinenbedingten Fehler.

Bei einem vorgegebenen Grenzwert von 10 g·mm ist auf 8,5 g·mm auszuwuchten (-15%) jedoch 10 g·mm Restunwucht nach der in dieser Norm vorgegeben Bezeichnungssystematik anzugeben. Bei einer späteren Kontrolle der Restunwucht wird der obere Toleranzwert (11,5 gmm) angewendet.

4.2.4 Auswuchtanforderungen an Werkzeugkomponenten

Das Auswuchten modular aufgebauter Werkzeugsysteme und deren Einzelkomponenten wird in Anhang B ausführlich behandelt.

4.2.5 Auswuchtanforderungen an Werkzeugsysteme mit Führung im Werkstück

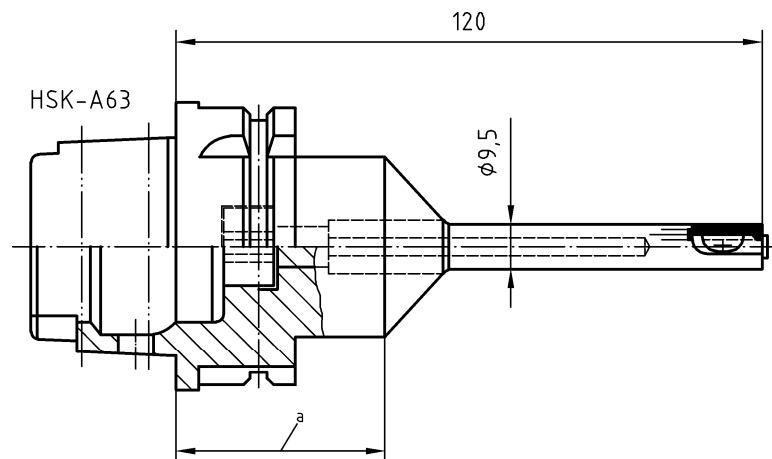
Beim Einsatz von Werkzeugen, die durch Stützlager zusätzlich geführt werden (z. B. lange schlanke Bohrstangen zur Bearbeitung von Nockenwellenlagern), verteilt sich die aus der Unwucht resultierende Lagerbelastung anteilig auf die Spindellagerung sowie auf die Stützlager. Beim Auswuchten dieser Werkzeuge kann für jede Lagerstelle eine Unwucht zugelassen werden. Die Festlegung erfolgt nach Wahl des Herstellers.

Werkzeuge mit Führungseigenschaften (Spiralbohrer, Senker usw.) sind in der Regel symmetrisch aufgebaut. Tiefbohrwerkzeuge und Reibwerkzeuge sind konstruktionsbedingt häufig unsymmetrisch gestaltet.

Im Eingriff werden solche Werkzeuge durch ihre Führungselemente (z. B. Führungsleisten) an der Bohrungswand abgestützt. Schnittkräfte als auch die durch eine Unwucht resultierenden Fliehkräfte werden durch die Führungsleisten an das Werkstück abgegeben. Während der Bearbeitung wird die Spindellagerung deshalb durch diese Fliehkräfte nicht oder nur gering belastet. Die meist unsymmetrisch gestalteten Werkzeuge sollten entsprechend nachstehender Beschreibung ausgewuchtet werden.

Werkzeuge mit Führungsleisten und $L \leq 2,2 D_B$ (siehe 4.2.6), wie in Bild 1 beispielhaft gezeigt, können statisch ausgewuchtet werden.

Maße in Millimeter

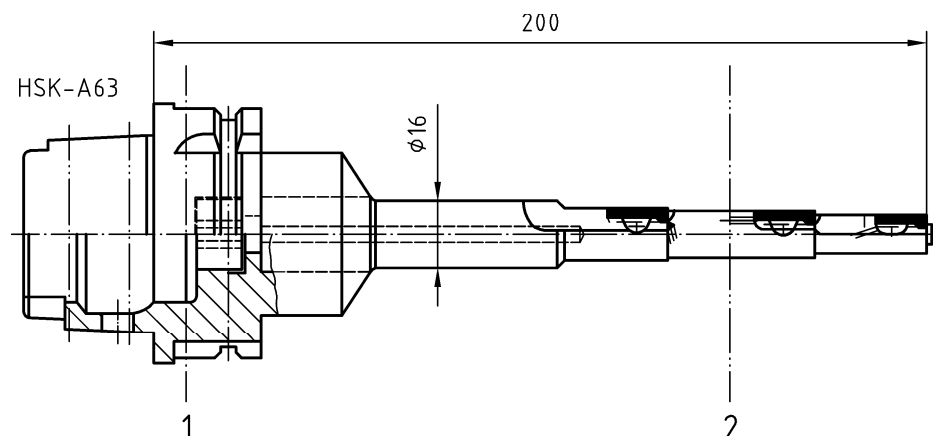


a Wuchtbereich

Bild 1 — Reibwerkzeug mit Führungsleisten und $L \leq 2,2 D_B$

Werkzeuge mit Führungsleisten und $L > 2,2 D_B$ (siehe 4.2.6), wie in Bild 2 beispielhaft gezeigt, weisen im Schneidenbereich (Auswuchtebene 2) aufgrund des erforderlichen Spanraums und der gegenüberliegenden Führungsleisten (häufig aus Werkstoffen höherer Dichte als Stahl) teilweise erhebliche Unwuchten auf. Diese können in der Regel aus praktischen Gründen nicht ausgeglichen werden. Eine symmetrische Gestaltung dieser Werkzeuge ist insbesondere bei kleinen Durchmessern aus Stabilitäts- und Funktionsgründen nicht möglich.

Maße in Millimeter



Legende

- 1 Auswuchtebene 1
- 2 Auswuchtebene 2

Bild 2 — Reibwerkzeug mit Führungsleisten und $L > 2,2 D_B$

Beim dynamischen Auswuchten von Werkzeugen mit Führungsleisten und $L > 2,2 D_B$ ist wie folgt vorzugehen:

Die Auswuchtebene 2 wird so eingestellt, dass diese durch den Schwerpunkt des unsymmetrischen Bereiches (des Spanraums und der Führungsleisten) geht, siehe Bild 2.

Dies „simuliert“ bezüglich der Auswuchtebene 1 den Einsatzfall. Die Unwucht der Auswuchtebene 1 belastet die Spindellager und muss deshalb ausgeglichen werden. Die Unwucht in Auswuchtebene 2 wird im Einsatz von der Bohrungswand aufgenommen und braucht deshalb nicht ausgeglichen werden.

Statisches Auszuwuchten solcher Werkzeuge würde zu einem deutlich schlechteren dynamischen Auswuchtzustand führen. Die Einsatzbedingungen solcher Werkzeuge sind vom Hersteller festzulegen.

ANMERKUNG Um den Aufwand zur Beseitigung der Restunwucht gering zu halten, ist möglichst eine rotations-symmetrische Gestaltung der Werkzeugsysteme anzustreben

4.2.6 Behandlung der Unwucharten – Statisches/Dynamisches Auswuchten

Bei kurzen Werkzeugen ist ein statisches Auswuchten (in einer Ebene) ausreichend. Die Grenze, zum dynamischen Auswuchten (in zwei Ebenen) definiert sich wie folgt:

$$L_{\text{stat, max}} = D_B \cdot 2,2 \quad (3)$$

Dabei ist $L_{\text{stat, max}}$ für statisch auszuwuchtende Werkzeuge die Länge von der Spindelnase bis zur vordersten Auswuchtebene, die noch einen Massenausgleich ermöglicht. Der Bezugsdurchmesser D_B ist

- a) Schnittstellennenngröße für HSK-Werkzeuge (z. B. HSK63 $\rightarrow D_B = 63 \text{ mm}$)

Bei Werkzeugsystemen, die $L_{\text{stat, max}}$ überschreiten erfolgt dynamisches Auswuchten.

Bei Werkzeugen die $L_{\text{stat, max}}$ nicht überschreiten, jedoch der werkzeugseitige Hebelarm a_W aufgrund einseitiger Massenverteilung sehr groß ist, kann dynamisches Auswuchten erforderlich sein.

Dynamische Unwuchten werden als Kombination einer statischen Unwucht mit einer Momentenunwucht behandelt.