

DIN ISO 16084

ICS 21.120.40; 25.100.01

Einsprüche bis 2020-06-03

Entwurf**Auswuchten von rotierenden Werkzeugen und Werkzeugsystemen
(ISO 16084:2017);
Text Deutsch und Englisch**

Balancing of rotating tools and tool systems (ISO 16084:2017);
Text in German and English

Équilibrage pour outils rotatifs et systèmes d'outillage (ISO 16084:2017);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-04-03 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 fws@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-Normenausschuss Werkzeuge und Spannzeuge (FWS), 10772 Berlin oder Saatwinkler Damm 42/43, 13627 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 159 Seiten

DIN-Normenausschuss Werkzeuge und Spannzeuge (FWS)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	5
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	6
Vorwort	7
Einleitung	8
1 Anwendungsbereich	10
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe, Definitionen, Symbole und Abkürzungen	10
3.1 Begriffe und Definitionen	10
3.2 Symbole und Abkürzungen	12
4 Anforderungen	17
4.1 Allgemeines	17
4.1.1 Einspannungsgenauigkeiten	17
4.1.2 Einfluss von Auswuchtmaschinen	18
4.1.3 Auswirkungen und häufige Folgen von zulässigen Restunwuchten nach ISO 1940-1	18
4.1.4 Systembedingte Eigenschaften von Werkzeugmaschinen und Komponenten	18
4.2 Auswuchtanforderungen, basierend auf der Spindellast	19
4.2.1 Allgemeines	19
4.2.2 Bestimmung der Auswuchtanforderungen	22
4.2.3 Messgenauigkeit von Auswuchtmaschinen, Einfluss der Rundlaufgenauigkeit und Wiederholbarkeit der Messergebnisse	25
4.2.4 Anwendungskriterium für statisches bzw. dynamisches Auswuchten	26
4.2.5 Zulässige dynamische Restunwuchten	27
4.2.6 Auswuchtanforderungen an geführte Werkzeugsysteme	32
4.2.7 Einfluss des HSK auf die dynamische Unwucht	33
4.3 Sicherheitsbezogene Unwuchtbegrenzung (G 40) nach ISO 15641	35
4.4 Graphische Darstellung der Auswuchtanforderungen	35
4.5 Sonderwerkzeuge mit asymmetrischen Grundkörpern	37
5 Auswuchten von Werkzeugsystemen	38
5.1 Allgemeines	38
5.2 Auswuchten von Werkzeugsystemkomponenten	40
5.3 Einfluss der Winkellage von Komponentenunwuchten	41
5.4 Einfluss von Einspannverlagerungen	41
5.5 Integration von nach ISO 1940-1 ausgewuchteten Werkzeugsystemkomponenten	43
5.6 Berechnung der zulässigen Drehzahl in Abhängigkeit einer tatsächlichen Unwucht	43
5.7 Bestimmung und Berechnung der axialen Lage eines Massenschwerpunkts	44
5.7.1 Experimentelle Bestimmung des Schwerpunkts	44
5.7.2 Berechnung des Schwerpunkts eines modularen Werkzeugsystems	44
5.8 Auswuchten von Werkzeugen und Komponenten mit alternativen Schnittstellen	46
5.9 HSK-Adapter mit rotationssymmetrischen Werkzeugen	46
5.10 Hinweise zum Aufbau und Auswuchten von Werkzeugsystemen	47
6 Datendarstellung und Datenaustausch	48
Anhang A (informativ) Zulässige Restunwuchten — Theoretischer Ansatz und Berechnungsbeispiele	50
A.1 Zusätzliche Symbole und Abkürzungen für Anhang A, Anhang B und Anhang D	50
A.2 Grundlagen	52
A.3 Ansatz	53
A.4 Umrechnung der zulässigen statischen Restunwucht in die zulässigen dynamischen Unwuchten zweier Ebenen	54
A.4.1 Fall D: Werkzeugschwerpunkt CG zwischen den Ebenen P1 und P2 (P1-CG-P2)	54
A.4.2 Werkzeugschwerpunkt CG nicht zwischen den Ebenen P1 und P2	56
A.4.3 Herleitung „Auswuchten von Komponenten eines Werkzeugsystems“	60

A.4.4	Maximale radiale Verlagerung von Komponenten innerhalb eines Werkzeugsystems . .	65
A.5	Berechnungsbeispiele	65
A.5.1	Statisches Auswuchten eines Einzelwerkzeugs ($L_{BL} \leq L_{STAT,MAX}$)	65
A.5.2	Momentenunwucht aufgrund quasi-statischen Auswuchtens ($L_{BL} \leq L_{STAT,MAX}$)	67
A.5.3	Dynamisches Auswuchten eines Einzelwerkzeugs ($L_{BL} > L_{STAT,MAX}$)	68
A.5.4	Dynamisches Auswuchten unter Berücksichtigung von ISO 15641	70
Anhang B	(informativ) Berechnungsbeispiele für Werkzeugsysteme	73
B.1	Berechnungsbeispiel für das Auswuchten eines Standardwerkzeugsystems aus drei Komponenten	73
B.2	Auswuchten der Werkzeugkomponenten nach 5.2	74
B.3	Dynamisches Auswuchten des zusammengebauten Werkzeugsystems von Bild B.1	76
Anhang C	(normativ) XML-Dateistruktur für die Dokumentation von Auswuchtinformationen . .	78
Anhang D	(informativ) Grundlegende Unwuchtgleichungen, Zusammenhänge und praktische Hinweise	81
Literaturhinweise		84

Bilder

Bild 1	— Mögliche Komponenten eines modularen Werkzeugsystems	11
Bild 2	— Werkzeug-Spindel-Modell mit unwuchtbedingten Kräften	19
Bild 3	— Modell einer Spindel und eines Werkzeugs mit dynamischer Zwei-Ebenen-Unwucht . .	20
Bild 4	— Statische Unwucht im Werkzeugschwerpunkt CG	20
Bild 5	— Momentenunwucht durch quasi-statisches Auswuchten	20
Bild 6	— Modell eines Werkzeug-Spindel-Systems mit den wesentlichen Parametern	21
Bild 7	— $\vec{U}_{STAT,MAX}$ und $\vec{U}_{STAT,PER}$ in Abhängigkeit des Winkels α zwischen $\vec{U}_{P1,PER}$ und $\vec{U}_{P2,PER}$. .	27
Bild 8	— Fall D: Werkzeugschwerpunkt CG zwischen den Ebenen P1 und P2 (P1-CG-P2)	28
Bild 9	— Fall E: Werkzeugschwerpunkt CG zwischen Spindelreferenzebene RP und Ebene P1 (CG-P1-P2)	30
Bild 10	— Fall F: Werkzeugschwerpunkt CG hinter Ebene P2 (P1-P2-CG)	31
Bild 11	— Kurzes Feinbohrwerkzeug mit Führungsleisten, $L < 2,2 \times D_S$ und $L_{BL} < b_{MIN}$	32
Bild 12	— Längeres Feinbohrwerkzeug mit Führungsleisten, $L > 2,2 \times D_S$ und $L_{BL} < b_{MIN}$	33
Bild 13	— Zulässige statische Restunwuchten eines HSK-63-Werkzeugs bzw. einer HSK-63-Komponente	36
Bild 14	— Sonderwerkzeug für Vorwärtsbearbeitung und einstufige Rückzugsbearbeitung	37
Bild 15	— Beispiele gebräuchlicher Standardwerkzeugsysteme ($k_{SYS} \leq 3$)	38
Bild 16	— Schwerpunkte $L_{CG,i,SYS}$ in einem Standardwerkzeugsystem	40
Bild 17	— Arten und Kombinationen von radialen und winkelbezogenen Verlagerungen	42
Bild 18	— Radiale Verlagerungen: zufällig (P) oder richtungsgleich (Q, R)	42
Bild 19	— Das Gleichgewicht bestimmt den Schwerpunkt einer Komponente bzw. eines Werkzeugsystems	44
Bild 20	— HSK-A 63-Spannzangenaufnahme mit unterschiedlichen Auswuchtlängen L_{BL}	47
Bild A.1	— Zwei-Feld-Balken zur Berechnung der Belastung des vorderen Lagers	53
Bild A.2	— Werkzeugschwerpunkt CG zwischen den Ebenen P1 und P2 (Fall D $\equiv$ P1-CG-P2)	54
Bild A.3	— Werkzeugschwerpunkt CG zwischen Referenzebene RP und Ebene P1 (Fall E $\equiv$ CG-P1-P2)	57
Bild A.4	— Werkzeugschwerpunkt CG zwischen der Ebene P2 und dem vorderen Werkzeugende (Fall F $\equiv$ P1-P2-CG)	58
Bild A.5	— Vergleich des zulässigen statischen Unwuchten eines Standardwerkzeugsystems (Summe der Einzelunwuchten und des Zusammenbaus)	64
Bild A.6	— HSK-A63-Einzelwerkzeug für statisches Auswuchten	66
Bild A.7	— Momentenunwucht aufgrund quasi-statischen Auswuchtens	67
Bild A.8	— HSK-A63-Einzelwerkzeug für dynamisches Auswuchten	69
Bild A.9	— HSK-A80-Einzelwerkzeug	71
Bild B.1	— Standardwerkzeugsystem aus drei Komponenten	73
Bild B.2	— Positionen der verschiedenen Schwerpunkte CG	74

Bild D.1 — Unwucht, verursacht durch die Masse m_U auf dem Radius r	81
Bild D.2 — Unwucht, bezogen auf die radiale Verlagerung e_{CG} des Massenschwerpunkts CG . . .	81
Bild D.3 — Durch den Massenausgleich wird der Schwerpunkt CG zurück auf die Drehachse verschoben	82

Tabellen

Tabelle 1 — Gewichtungsfaktoren f_{BAL}	22
Tabelle 2 — Schnittstellenspezifische Parameter	24
Tabelle 3 — Dynamische Unwuchten von statisch ausgewuchteten HSK-A- und HSK-C-Schäften .	34
Tabelle 4 — Parameter k_{SYS} für Sonderwerkzeugsysteme aus bis zu 6 Komponenten	41
Tabelle 5 — XML-Datendefinitionseinträge	49
Tabelle B.1 — Technische Daten der Komponenten und des Werkzeugsystems von Bild B.1	73
Tabelle B.2 — Zulässige statische Unwuchten der einzelnen Komponenten und des Werkzeugsystems aus Bild B.1	76

Nationales Vorwort

Dieses Dokument enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm ISO 16084-8:2017, die vom Technischen Komitee ISO/TC 29 „Small tools“ erarbeitet wurde, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Unterausschuss NA 121-01-14-01 UA „Wuchtanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme“ im DIN-Normenausschuss Werkzeuge und Spannzeuge (FWS).

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

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

ISO 1940-1:2003	siehe	DIN ISO 1940-1:2004-04
ISO 7388-1	siehe	DIN ISO 7388-1
ISO 7388-2	siehe	DIN ISO 7388-2
ISO 15641	siehe	DIN EN ISO 15641
ISO 21940-14	siehe	DIN ISO 21940-14
ISO 21940-21	siehe	DIN ISO 21940-21
ISO 26622-1	siehe	DIN ISO 26622-1
ISO 26622-2	siehe	DIN ISO 26622-2

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

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

DIN ISO 1940-1:2004-04, *Mechanische Schwingungen — Anforderungen an die Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem (starrem) Zustand — Teil 1: Festlegung und Nachprüfung der Unwuchttoleranz (ISO 1940-1:2003)*

DIN ISO 7388-1, *Werkzeugschäfte mit Kegel 7/24 für automatischen Werkzeugwechsel — Teil 1: Maße und Bezeichnung von Schäften der Formen A, AD, AF, U, UD und UF*

DIN ISO 7388-2, *Werkzeugschäfte mit Kegel 7/24 für automatischen Werkzeugwechsel — Teil 2: Maße und Bezeichnung von Schäften der Formen J, JD und JF*

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 26622-1, *Modulare Kegelschnittstelle mit Kugellaufbahnsystem — Teil 1: Maße und Bezeichnung von Schäften*

DIN ISO 26622-2, *Modulare Kegelschnittstelle mit Kugellaufbahnsystem — Teil 2: Maße und Bezeichnung von Aufnahmen*

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung von Nationalen Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird normalerweise von ISO Technischen Komitees 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 Organisationen, staatlich und nicht-staatlich, in Liaison mit ISO, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) bei allen elektrotechnischen Themen 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. Im Besonderen sollten die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien 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 empfangenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname wird als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellt keine Anerkennung dar.

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 29, *Small tools*, erarbeitet.

Einleitung

Höhere Schnittgeschwindigkeiten in Kombination mit höheren Auswuchtanforderungen führen zu strengeren Auswuchtbedingungen für das Werkzeug-Spindel-System (Maschinenspindel, Spannzeug und Werkzeugsystem). Insbesondere das Auswuchten von Werkzeugen und Werkzeugsystemen nach ISO 1940-1 wird häufig erschwert, indem zusätzlich die nächst höhere Auswuchtgüte gewählt wird (z. B. G 2,5 statt G 6,3). Dies ist nicht nur aus technischer Sicht oft unnötig und führt zu höheren Kosten, sondern ist in vielen Fällen auch nicht zu erreichen.

Unwucht wirkt als drehzahlharmonische Anregung der Maschinenstruktur. Die Höhe der ursächlichen Fliehkraft ergibt sich aus Unwucht und Drehzahl. Ein weiterer Gesichtspunkt in diesem Zusammenhang ist die Spindelbelastung aufgrund dynamischer Schnittkräfte (z. B. verursacht durch den unterbrochenen Zahneingriff eines Fräasers), die oft erheblich höher sind als die Fliehkraft, die durch eine geforderte zulässige Restunwucht verursacht wird.

Die in ISO 1940-1 angegebenen Anforderungen an die Auswuchtgüte von starren Rotoren (z. B. Läufer von Elektromotoren, usw.) können auf diese Werkzeug-Spindel-Systeme nicht korrekt angewendet werden, da Maschinenspindeln, Spannzeuge und Werkzeuge grundlegend verschiedene Eigenschaften aufweisen:

- Maschinenspindeln, Spannzeuge und Werkzeuge sind veränderliche Systeme (z. B. durch Werkzeugwechsel in Bearbeitungszentren);
- wiederholter Werkzeugwechsel führt zu radialen und winkelabhängigen Ungenauigkeiten in der Spindel, und damit zu unterschiedlichen Auswuchtbedingungen für Werkzeug-Spindel-Systeme;
- Passungstoleranzen der Einzelkomponenten (Spindel, Spannzeug und Werkzeug) setzen dem Auswuchtvorgang Grenzen.

Insbesondere durch die Ungenauigkeiten beim Einspannen zwischen Werkzeugsystem und Maschinenspindel werden der Wiederholgenauigkeit der Auswuchtbedingungen Grenzen gesetzt. Dieses Dokument legt jedoch keine Details für das Auswuchten von Werkzeug-Spindel-Systemen fest, welche die Maschinenspindeln beinhalten.

In Anbetracht dessen wurden Verfahren entwickelt, um die Auswuchtanforderungen für rotierende Werkzeugsysteme unter Berücksichtigung aller wesentlichen Parameter abzuleiten. Hauptziel ist die Begrenzung von unwuchtbedingten Maschinenschwingungen, Systemlasten und Prozessstörungen.

Die vorstehend genannten Umstände waren der Grund dafür, einen neuen Ansatz zu entwickeln um die Anforderungen an das Auswuchten von rotierenden Werkzeugsystemen festzulegen. Dieses Dokument basiert auf Forschungsergebnissen, die vom PTW „Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Darmstadt“, von der GFE „Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung e. V.“ in Schmalkalden (Deutschland) und in den Diskussionen der deutschen Normenarbeitsgruppe „Wuchtanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme“ gesammelt wurden.

Forschungsergebnisse und Erfahrungen aus der Praxis haben gezeigt, dass dieses Dokument sowohl aus technischer, als auch aus wirtschaftlicher Sicht geeignet ist.

Anhang A zeigt mehrere Beispiele für das statische und dynamische Auswuchten unterschiedlich geformter Werkzeuge, während modulare Werkzeugsysteme in den Beispielen in Anhang B behandelt werden. In Anhang A sind auch Herleitungen der Berechnungen der zulässigen dynamischen Restunwuchten für die drei verschiedenen, in diesem Dokument erwähnten geometrischen Fälle aufgeführt.

Eine Einführung in das Thema „Auswuchten“ ist auch in ISO 19499 enthalten. Dieses Dokument enthält nützliche Informationen mit Verweisungen auf andere Normen, die sich mit dem Auswuchten von Rotoren beschäftigen.

EN 847 (alle Teile) enthält zusätzliche Festlegungen für das Auswuchten von Werkzeugen für die Holzbearbeitung.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Anforderungen fest und enthält Gleichungen für die zulässigen statischen und dynamischen Restunwuchten von rotierenden Einzelwerkzeugen und Werkzeugsystemen. Es basiert auf der Vorgabe, dass unwuchtbedingte Fliehkräfte, die durch die Drehzahl verursacht werden, keinen Schaden an den Spindel-lagern hervorrufen, und unwuchtbedingte Beeinträchtigungen von Bearbeitungsvorgängen, der Werkzeuglebensdauer und der Werkstückqualität vermieden werden.

ANMERKUNG 1 Die von diesem Dokument abgedeckten Werkzeuge und Werkzeugsysteme sind beispielsweise solche mit Hohlchaftkegel-Schnittstellen gemäß ISO 12164-1 und ISO 12164-2, modularen Kegelschnittstellen mit Kugellaufbahnsystem nach ISO 26622 (alle Teile), polygonalem Hohlchaftkegel (HSK) nach ISO 26623 (alle Teile), Kegel 7/24 nach ISO 7388-1, ISO 7388-2, ISO 9270-1 und ISO 9270-2.

Modulare Werkzeugsysteme sind ein weiteres wichtiges und komplexes Thema dieses Dokuments. Berechnungen und Prozessbeschreibungen für das Auswuchten von Komponenten und von zusammengebauten Werkzeugsystemen sind ebenfalls enthalten.

Ein bedeutender Schwerpunkt dieses Dokuments sind mögliche Fügeungenauigkeiten von Werkzeugschäften und deren Auswirkungen auf den Auswuchtvorgang. Diese Verlagerungen können zwischen einem Werkzeug bzw. einem Werkzeugsystem und der Maschinenspindel auftreten (z. B. bei jedem Werkzeugwechsel) sowie auch innerhalb eines modularen Werkzeugsystems während dessen Zusammenbaus.

ANMERKUNG 2 Ungünstige Prozess- oder Systembedingungen (z. B. durch bestimmte Drehzahlen erzeugte Teilresonanzen des Werkzeugs und/oder der Maschinenstruktur) oder konstruktions- und maschinenbedingte technische Bedingungen (z. B. überstehende Länge der Achsen, enge Platzverhältnisse, schwingungsempfindliche Vorrichtungen, Spannzeuge und Werkzeugkonstruktion) können zu erhöhten Schwingungsbelastungen und Auswuchtanforderungen führen. Dies hängt von der wechselseitigen Beziehung der Maschine und dem Werkzeug-Spindel-System ab und kann nicht durch eine Norm abgedeckt werden. In Einzelfällen kann auch eine Abweichung von den in diesem Dokument empfohlenen Grenzwerten erforderlich sein.

ANMERKUNG 3 Verschleiß an Werkzeugaufnahmen und Schaftschnittstellen kann zu möglichen Veränderungen des Einspannzustands und somit zu schlechteren Rundlauf- und Auswuchtungsbedingungen führen. Auf diese Fehler kann in einer Norm nicht speziell eingegangen werden.

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 1925, *Mechanical vibration — Balancing — Vocabulary*

3 Begriffe, Definitionen, Symbole und Abkürzungen

3.1 Begriffe und Definitionen

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

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

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

ANMERKUNG Das Fachgebiet des Auswuchtens erfordert die Aufnahme von Begriffen, die nicht der Normenreihe ISO 13399 entsprechen.

3.1.1

Werkzeug-Spindel-System

Baugruppe bestehend aus allen Komponenten, d. h. Maschinenspindel und Werkzeugsystem (3.1.2), die aufgrund ihrer Konstruktion, Form, Rundlaufgenauigkeit usw. eine Unwucht hervorrufen kann

3.1.2

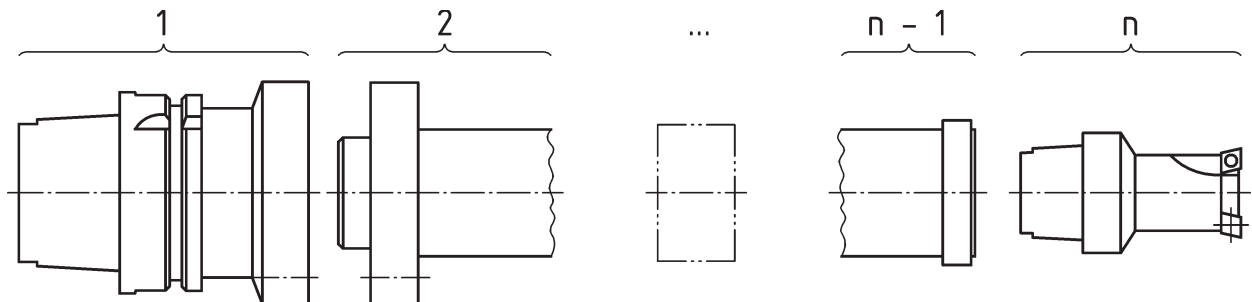
Werkzeugsystem

Baugruppe bestehend aus mindestens zwei Komponenten

BEISPIEL Ein (HSK-)Adapter und ein Einzelwerkzeug (3.1.3)

Anmerkung 1 zum Begriff: In diesem Dokument wird der Begriff „modulares Werkzeugsystem“ gleichbedeutend mit „Werkzeugsystem“ verwendet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Komponente 1 (Grundadapter) in Bild 1 könnte auch ein Werkzeug sein, das eine Schnittstelle zur Aufnahme von Komponente 2 besitzt.



Legende

- 1 Komponente 1: Schaftadapter
- 2 Komponente 2: Zwischenadapter
- n-1 Komponente n-1: Zwischenadapter
- n Komponente n: (einzelnes) Bearbeitungswerkzeug

Bild 1 — Mögliche Komponenten eines modularen Werkzeugsystems

3.1.3

Einzelwerkzeug

Zusammensetzung aus dem Werkzeugkörper, Zwischenstücken (z. B. Kassetten, modularen Komponenten) und der/den Schneide(n) (z. B. Schneidspitze, Schneidmeißel) zum Abtragen von Material von einem Werkstück durch Scherwirkung definierter Schneide(n)

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Begriff „Einzelwerkzeug“ hat die Bedeutung eines „einzelnen Bearbeitungswerkzeugs“.

3.1.4

Grundadapter

adaptierendes Element mit Schnittstellen unterschiedlicher Art und Größe (3.1.7), sowohl maschinen- als auch werkstückseitig

3.1.5

Zwischenadapter

adaptierendes Element zwischen einem Grundadapter (3.1.4) und einem Einzelwerkzeug (3.1.3) oder einem weiteren Zwischenadapter

3.1.6

Spannmittel

Element, welches die Verbindung zwischen der Maschinenspindel und dem Werkzeugsystem (3.1.2) herstellt

3.1.7

Schnittstelle

Fügestelle zwischen den Komponenten eines Werkzeugsystems (3.1.2) oder zwischen einem Werkzeug bzw. einem Werkzeugsystem und der Maschinenspindel

3.1.8

Unwuchtmoment

durch eine Unwucht mit axialem Abstand (d. h. einem Hebelarm) zum vorderen Spindellager hervorgerufenen Moment

3.1.9

Momentenunwucht

besondere Form eines Unwuchtmoments (3.1.8), hervorgerufen durch zwei Unwuchtvektoren derselben Länge, entgegengesetzter Richtung und axialem Abstand zueinander

Anmerkung 1 zum Begriff: Es tritt hauptsächlich durch quasi-statisches Auswuchten auf (siehe Bild 5 und A.5.2).

3.2 Symbole und Abkürzungen

Symbole und Abkürzungen	Einheit	Beschreibung
a	mm	Gesamter Hebelarm – Abstand von Lager B1 zum Werkzeugschwerpunkt CG
a_M	mm	Maschinenseitiger Hebelarm vom vorderen Lager zur Spindelnase (z. B. HSK-Planfläche)
B1	—	Spindellager 1
B2	—	Spindellager 2
b	mm	Abstand zwischen den Ausgleichsebenen P1 und P2
b_{MIN}	mm	kleinster Abstand zwischen den Ausgleichsebenen P1 und P2
CG	—	Massenschwerpunkt (auch nur Schwerpunkt)
CS	—	Anwender
C_{DYN}	N	dynamische Tragzahl(en) des/der Spindellager(s)
D	mm	Durchmesser
D_{REF}	mm	Referenzdurchmesser eines Werkzeugs oder einer Komponente für die G 40-Prüfung
D_S	mm	Bunddurchmesser einer Werkzeugaufnahme (z. B. HSK-63 $\rightarrow D_S = 63$ mm)
$e_{k,SYS,MAX}$	mm	Maximale radiale Verlagerung der Komponente k innerhalb eines Werkzeugsystems
e_S	mm	Rein radiale Verlagerung des Werkzeugschafts eines Werkzeugs oder einer Werkzeugkomponente

Symbole und Abkürzungen	Einheit	Beschreibung
$e_{S,i}$	mm	Radiale Ungenauigkeit des Werkzeugschafts einer Komponente i
f_{BAL}	—	Gewichtungsfaktor für die Auswuchtqualität
$f_{BAL,FINE}$	—	Gewichtungsfaktor für das Feinwuchten
$f_{BAL,STND}$	—	Gewichtungsfaktor für das Standardwuchten
$f_{P,MIN}$	—	Faktor zur Vermeidung des Unterschreitens der kleinsten zulässigen Unwucht pro Ebene
$f_{SYS,k}$	—	Faktor zur Berechnung der zulässigen Komponentenunwuchten von Sonderwerkzeugsystemen
$\vec{F}$	N	Kraftvektor
F_B	N	Gesamtkraft an einem Spindellager
F_{B1}	N	(Dynamische) Kraft am Spindellager B1 aufgrund einer Unwucht
F_{B2}	N	(Dynamische) Kraft am Spindellager B2 aufgrund einer Unwucht
$F_{B1,CPL}$	N	Kraft am Lager B1 aufgrund einer Momentenunwucht
$F_{B1,RES}$	N	Resultierende Kraft am Lager B1
$F_{B1,STAT}$	N	Kraft am Lager B1 aufgrund einer statischen Unwucht
$G(x)$	mm/s	Auswuchtgüte $G(x)$ nach ISO 1940-1, z. B. G 6,3
G_{40}	mm/s	Sicherheitsbeschränkung der zulässigen Unwucht nach ISO 15641
h_{P1}	mm	Abstand zwischen RP und Ebene P1
h_{P2}	mm	Abstand zwischen RP und Ebene P2
$HSK-(x)$	—	HSK der Größe (x) , der alle verschiedenen Formen repräsentiert (A, C, E, T, usw.), z. B. HSK-63
i	—	Index für fortlaufend nummerierte Parameter oder Komponenten (Ausgleichsebenen, Werkzeugkomponenten, usw.)
k	—	Anzahl der Komponenten in einem Werkzeugsystem
k_{SYS}	—	Gesamtzahl der Komponenten eines Werkzeugsystems
$k_{SYS,STND}$	—	Gesamtzahl der Komponenten eines Standardwerkzeugsystems ($k_{SYS,STND} = 3$)
L	mm	Länge eines Einzelwerkzeugs oder einer Komponente eines Werkzeugsystems
L_B	mm	Abstand zwischen den Spindellagern B1 und B2
L_{BL}	mm	Maximale Länge von RP zur Ebene P2, bei der noch ein Massenausgleich möglich ist (d. h. $L_{BL} < L$)
L_{CG}	mm	Hebelarm von RP zum Schwerpunkt CG eines Einzelwerkzeugs

Symbole und Abkürzungen	Einheit	Beschreibung
$L_{CG,i}$	mm	Hebelarm zum Schwerpunkt der Komponente i
$L_{CG,i,SYS}$	mm	Hebelarm von RP zum Schwerpunkt der Komponente i innerhalb eines Werkzeugsystems
$L_{CG,SYS}$	mm	Hebelarm von RP zum Schwerpunkt eines Werkzeugsystems (Abstand zwischen RP und CG)
$L_{CG,SYS,i}$	mm	Hebelarm von RP zum Schwerpunkt eines Werkzeugsystems aus (i) Komponenten
$L_{CG,SYS,k}$	mm	Hebelarm von RP zum Schwerpunkt eines Werkzeugsystems aus (k) Komponenten
$L_{CG,SYS,3}$	mm	Hebelarm von RP zum Schwerpunkt eines Werkzeugsystems aus (3) Komponenten
L_{CPL}	mm	Abstand zwischen den Ebenen der ursprünglichen Unwucht und der ausgleichenden Unwucht (Momentenunwucht, entstanden durch quasi-statisches Auswuchten)
L_{P1}	mm	Abstand von der Referenzebene RP zur Ebene P1
L_{P2}	mm	Abstand von der Referenzebene RP zur Ebene P2
L_{SYS}	mm	Länge eines Werkzeugsystems
$L_{STAT,MAX}$	mm	Maximale Länge eines Werkzeugs oder eines Werkzeugsystems für statisches Auswuchten
m	g (kg)	Masse eines Werkzeugs oder einer Komponente ANMERKUNG Die Masse wird in allen Gleichungen in Gramm (g) eingesetzt.
m_{AVG}	g (kg)	Mittlere schnittstellenrelevante Referenzmasse eines Werkzeugs oder eines Werkzeugsystems
m_i	g (kg)	Masse der Komponente i eines Werkzeugsystems
m_k	g (kg)	Masse der Komponente k eines Werkzeugsystems
m_{MAX}	g (kg)	Größte schnittstellenrelevante Referenzmasse eines Werkzeugs oder eines Werkzeugsystems
m_{MIN}	g (kg)	Kleinste schnittstellenrelevante Referenzmasse eines Werkzeugs oder eines Werkzeugsystems
m_{SYS}	g (kg)	Masse eines Werkzeugsystems
m_U	g	Unwuchtmasse
$m_{U,P1}$	g	Unwuchtmasse in Ebene P1
$m_{U,P2}$	g	Unwuchtmasse in Ebene P2
n	min^{-1}	Drehzahl
$n_{MAX,PER}$	min^{-1}	Maximal zulässige Drehzahl

Symbole und Abkürzungen	Einheit	Beschreibung
n_{SYS}	min^{-1}	Drehzahl eines Werkzeugsystems
P1	—	Ausgleichsebene 1
P2	—	Ausgleichsebene 2
RP	—	Referenzebene an der Spindelnase bzw. an der Werkzeugaufnahme (z. B. die HSK-Planfläche)
r	mm	Radius
R_{DYN}	—	Nutzungsgrad der dynamischen Tragzahl C_{DYN}
$R_{\text{L/D}}$	—	Verhältnis von Länge zu Durchmesser eines Werkzeugs bzw. Werkzeugsystems (zur Entscheidung zwischen statischem und dynamischem Auswuchten)
$R_{\text{STAT,MAX}}$	—	Grenzverhältnis für statisches Auswuchten ($R_{\text{STAT,MAX}} = 2,2$)
$R_{\text{STAT,MAX}}^*$	—	Grenzverhältnis für statisches Auswuchten von Werkzeugen mit Führung
TM	—	Werkzeug- oder Komponentenhersteller
U	gmm	Unwucht bzw. Restunwucht ANMERKUNG Die Einheit „gmm“ entspricht „g · mm“.
$\vec{U}$	gmm	Unwuchtvektor
$U_{\text{BM,ACC}}$	gmm	Messgenauigkeit einer Auswuchtmaschine
$U_{\text{BM,MIN}}$	gmm	Kleinste, durch eine Auswuchtmaschine messbare Unwucht
U_{CPL}	gmm^2	Momentenunwucht
U_{ECC}	gmm	Unwucht durch radiale Verlagerung (Exzentrizität) eines Schwerpunkts relativ zur Spindeldrehachse
$U_{\text{ECC},i}$	gmm	Unwucht der Komponente i durch radiale Verlagerung relativ zur Spindeldrehachse
$U_{\text{ECC},i,\text{SYS}}$	gmm	Unwucht durch radiale Verlagerung der Komponente i relativ zur Komponente $i-1$ innerhalb eines Werkzeugsystems
$U_{\text{ECC},k,\text{MAX}}$	gmm	Maximale Unwucht einer Komponente k durch radiale Verlagerung innerhalb eines Werkzeugsystems
$U_{\text{ECC,MAX}}$	gmm	Unwucht durch maximale radiale Verlagerung (d. h. Exzentrizität)
$U_{\text{G(x)},\text{PER}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht nach ISO 1940-1
U_{G40}	gmm	Sicherheitsbedingte Unwucht G 40 nach ISO 15641
U_{MIN}	gmm	Kleinste reproduzierbar erreichbare Restunwucht
$U_{\text{MIN,SYS},k}$	gmm	Kleinste reproduzierbar erreichbare Unwucht eines Werkzeugsystems aus k Komponenten

Symbole und Abkürzungen	Einheit	Beschreibung
$U_{\text{MOM,STAT}}$	gmm	Moment einer statischen Unwucht U_{STAT} (im Schwerpunkt CG)
U_{P}	gmm	Unwucht je Ebene
$U_{\text{P,MIN}}$	gmm	Kleinste Unwucht je Ebene
$U_{\text{P,PER}}$	gmm	Zulässige Restunwucht je Ebene
U_{P1}	gmm	Unwucht in Ausgleichsebene P1
$U_{\text{P1,PER}}$	gmm	Zulässige Restunwucht in Ausgleichsebene P1
$U_{\text{P1,PER}}^*$	gmm	$U_{\text{P1,PER}}$, jedoch mit der (theoretisch angenommenen) selben Winkellage wie $U_{\text{P2,PER}}$
$U_{\text{P1,PER,LIM}}$	gmm	Begrenzte zulässige Restunwucht in Ausgleichsebene P1 (Fall F)
U_{P2}	gmm	Unwucht in Ausgleichsebene P2
$U_{\text{P2,PER}}$	gmm	Zulässige Restunwucht in Ausgleichsebene P2
$U_{\text{P2,PER,LIM}}$	gmm	Begrenzte zulässige Restunwucht in Ausgleichsebene P2 (Fall F)
U_{QS}	gmm	Quasi-statische Unwucht (siehe Bild 5)
U_{STAT}	gmm	Statische Unwucht
$U_{\text{STAT,ACT}}$	gmm	Tatsächliche, gemessene statische Unwucht
$U_{\text{STAT,BAL}}$	gmm	Statische Unwucht, gewichtet mit f_{BAL}
$U_{\text{STAT,MAX}}$	gmm	Maximale statische Unwucht
$U_{\text{STAT,i,MAX}}$	gmm	Maximale statische Restunwucht einer Werkzeugkomponente i in einem Werkzeugsystem aus k_{SYS} Komponenten
$U_{\text{STAT,i,SYS,PER}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht einer universellen Komponente i , die an jeder axialen Position innerhalb eines Werkzeugsystems aus k_{SYS} Komponenten angeordnet werden kann
$U_{\text{STAT,1\%}}$	gmm	Statische Unwucht, um $F_{\text{B1}}/C_{\text{DYN}} \leq 1\%$ am Spindellager B1 sicherzustellen
$U_{\text{STAT,MAX,A}}$	gmm	Größtmögliche statische Unwucht im Fall A in Bild 7
$U_{\text{STAT,MAX,B}}$	gmm	Größtmögliche statische Unwucht im Fall B in Bild 7
$U_{\text{STAT,MAX,C}}$	gmm	Größtmögliche statische Unwucht im Fall C in Bild 7
$U_{\text{STAT,PER}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht
$U_{\text{STAT,PER,CS}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht für den Anwender
$U_{\text{STAT,PER,FINE}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht beim Feinwuchten
$U_{\text{STAT,PER,FINE,RES}}$	gmm	Resultierende zulässige statische Restunwucht eines Werkzeugs oder einer Komponente nach dem Feinwuchten unter Berücksichtigung von U_{MIN} und G 40 (siehe Bild 13)

Symbole und Abkürzungen	Einheit	Beschreibung
$U_{\text{STAT,PER,FINE,4}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht einer Komponente, feingewuchtet für ein Werkzeugsystem aus 4 Komponenten
$U_{\text{STAT,PER,FINE,5}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht einer Komponente, feingewuchtet für ein Werkzeugsystem aus 5 Komponenten
$U_{\text{STAT,PER,FINE,6}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht einer Komponente, feingewuchtet für ein Werkzeugsystem aus 6 Komponenten
$U_{\text{STAT,PER,STND}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht beim Standardwuchten
$U_{\text{STAT,PER,TM}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht für den Werkzeughersteller
$U_{\text{STAT,SYS,PER}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht eines Werkzeugsystems
$U_{\text{STAT,SYS,PER,FINE}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht für das Feinwuchten eines zusammengebauten (quasi-monolithischen) Werkzeugsystems
$U_{\text{STAT,SYS,PER,STND}}$	gmm	Zulässige statische Restunwucht für das Standardwuchten eines zusammengebauten (quasi-monolithischen) Werkzeugsystems
$U_{\text{STAT,P1,P2}}$	gmm	Resultierende statische Unwucht nach einem dynamischen (Zwei-Ebenen-) Auswuchtungsprozess
v_C	m/min	Umfangsgeschwindigkeit an der Schneide (Schnittgeschwindigkeit)
v_{G40}	m/min	Grenze der Umfangsgeschwindigkeit nach ISO 15641 ($v_{G40} = 1\,000\text{ m/min}$)
v_{REF}	m/min	Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugreferenzdurchmessers (d. h. des größten Werkzeugdurchmessers)
x_{P1}	mm	Abstand zwischen Ebene P1 und dem Werkzeugschwerpunkt CG
x_{P2}	mm	Abstand zwischen Ebene P2 und dem Werkzeugschwerpunkt CG
α	°	Winkel
α_{P1}	°	Winkellage der Unwucht in Ebene P1
α_{P2}	°	Winkellage der Unwucht in Ebene P2
α_U	°	Winkel zwischen statischer Restunwucht und Momentenunwucht
ρ_{ST}	mg/mm ³	Dichte von Stahl (7,8 mg/mm ³)
Ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit einer Komponente oder eines Werkzeugs

4 Anforderungen

4.1 Allgemeines

4.1.1 Einspannungsgenauigkeiten

Unwuchten, die nicht mit der Auswuchtqualität eines Werkzeugs zusammenhängen, können durch Ungenauigkeiten beim Einspannen verursacht werden. Diese werden durch Passungstoleranzen hervorgerufen, z. B. beim Einsetzen eines Werkzeugs in die Maschinenspindel. Selbst wenn ein Auswuchtergebnis für eine geringere als

die mögliche Exzentrizität des Schaftes steht, kann die gleiche Spannsituation dieses Werkzeugs in der Spindel einer Werkzeugmaschine oder einer Auswuchtmaschine nicht bei jedem Werkzeugwechsel reproduziert werden. Je nach Schaftform und -größe kann es zu einer radialen Einspannungsgenauigkeit von mehreren Mikrometern kommen (siehe Tabelle 2 für radiale Einspannverlagerungen verschiedener Werkzeugschnittstellen). Des Weiteren kann der Faktor Verschleiß zu schlechterer Einspannungsgenauigkeit und einer dadurch größeren Unwucht des Werkzeug-Spindel-Systems führen.

4.1.2 Einfluss von Auswuchtmaschinen

Die erreichbare Restunwucht eines Werkzeugs wird auch durch die Messgenauigkeit der Auswuchtmaschinen begrenzt (siehe 4.2.2 und 4.2.3). Tabelle 2 zeigt die Unwucht-Messgrenzen von Auswuchtmaschinen, die für unterschiedliche Prüfkörpermassen hergestellt wurden.

Systematische Exzentrizitäten, wie ein Rundlauffehler der Auswuchtspindel oder eines darin verwendeten Adapters, können durch Auswuchten auf Umschlag beseitigt werden. Dieses Verfahren ist in ISO 21940-14 beschrieben.

ANMERKUNG ISO 21940-21 beschreibt Prüfverfahren für die Bestimmung der Grenzen und der Leistungsfähigkeit von Auswuchtmaschinen.

4.1.3 Auswirkungen und häufige Folgen von zulässigen Restunwuchten nach ISO 1940-1

Die folgenden zwei Beispiele zeigen, dass durchaus gängige Auswuchtgüten nach ISO 1940-1 technisch mögliche Grenzen bereits überschreiten.

Die häufig geforderte Gütestufe G 2,5 bei einer Drehzahl von $25\,000\text{ min}^{-1}$ bedeutet eine zulässige Restunwucht von nur 1 gmm/kg. Die Restunwucht von 1 gmm bei einer Werkzeugmasse von 1 000 g entspricht einer zulässigen Exzentrizität des Werkzeugschwerpunkts von gerade einmal $1\text{ }\mu\text{m}$. Selbst ein neuer HSK kann dies nicht reproduzierbar gewährleisten (siehe Tabelle 2).

Bei Werkzeugen mit noch geringeren Massen und höheren Drehzahlen erhöhen sich die Anforderungen zunehmend. Ein HSK-40-Werkzeug von 350 g darf nur eine Restunwucht von 0,21 gmm aufweisen (d. h. 0,6 gmm/kg), um G 2,5 bei einer Drehzahl von $40\,000\text{ min}^{-1}$ zu entsprechen. Dies bedeutet alternativ eine maximale Exzentrizität des Werkzeugschwerpunkts von nur $0,6\text{ }\mu\text{m}$.

Beide Beispiele zeigen, dass aufgrund der Einspannungsgenauigkeiten in einer Auswuchtmaschine selbst und auch wegen der Messungenauigkeit handelsüblicher Auswuchtmaschinen weder die Messung dieser Restunwuchten noch deren Realisierung zuverlässig und reproduzierbar umzusetzen sind.

Aus ISO 1940-1 geht außerdem hervor, dass ein und dieselbe Gütestufe bei gleicher Drehzahl, aber unterschiedlichen Werkzeugmassen, verschiedene Restunwuchten zulässt. Diese führen infolgedessen zu entsprechend unterschiedlichen Fliehkräften und damit Spindellasten. Die dynamische Spindellast hängt jedoch nicht von der Werkzeugmasse, sondern von der Unwucht eines Werkzeugsystems und den daraus entstehenden Kräften ab.

4.1.4 Systembedingte Eigenschaften von Werkzeugmaschinen und Komponenten

Die Schwingungsamplituden einer Maschinenstruktur stehen in Zusammenhang mit der Anregungskraft und deren Frequenz sowie den dynamischen Eigenschaften des Werkzeugmaschinensystems. Dieselbe Intensität der Anregung führt zu höheren Schwingungsamplituden, wenn die frequenzabhängige dynamische Nachgiebigkeit eines Systems bei bestimmten Anregungsfrequenzen schlechter ist.

Was die Maschine und insbesondere das Werkzeug-Spindel-System betrifft, hängt die Sinnhaftigkeit von Auswuchtanforderungen daher auch von den dynamischen Eigenschaften des Werkzeug-Spindel-Systems ab. Eine allgemeine Beschreibung dynamischer Eigenschaften von Werkzeugmaschinen ist aber nicht möglich. Dennoch kann auch in solchen Fällen eine Begrenzung unwuchtbedingter Maschinenschwingungen erreicht werden, indem ein Werkzeug bis zu seiner kleinsten reproduzierbaren Unwucht U_{MIN} ausgewuchtet wird (siehe 4.2.3).

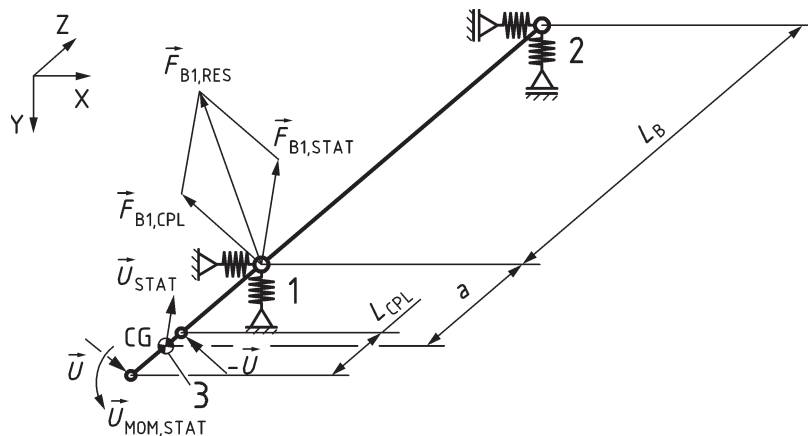
Eine Verringerung von Maschinenschwingungen kann auch durch die Änderung der Schnittgeschwindigkeit erreicht werden, sofern der entsprechende Bearbeitungsprozess eine Änderung technischer Parameter innerhalb des relevanten Betriebsdrehzahlbereichs zulässt. Dadurch könnte die Anregung in einem dynamisch stabileren Frequenzbereich der Maschine erfolgen.

4.2 Auswuchtanforderungen, basierend auf der Spindellast

4.2.1 Allgemeines

Zur Begrenzung unwuchtbedingter periodischer Belastungen der Spindellager ist es notwendig, Werkzeugsysteme in Abhängigkeit von Drehzahl und Eigenschaften der in diesem Dokument beschriebenen Spindelsysteme auszuwuchten (siehe Anhang A für den theoretischen Ansatz). Bild 2 zeigt die Struktur und die geometrischen Verhältnisse des allgemeinen Werkzeug-Spindel-Modells mit Werkzeugunwuchten und deren zugehörigen Kräften für das Lager B1, welches die größte Belastung erfährt.

ANMERKUNG Dieses Dokument gibt alle zulässigen Restunwuchten und sonstigen Unwuchten in „gmm“ an. Es gelten keine spezifischen Gütestufen wie z. B. „G 6,3“ entsprechend ISO 1940-1.



Legende

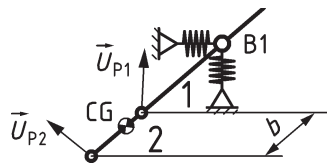
- 1 Lager B1
- 2 Lager B2
- 3 Schwerpunkt CG

Bild 2 — Werkzeug-Spindel-Modell mit unwuchtbedingten Kräften

Mit dem allgemeingültigen Ansatz zur Bestimmung der Last $F_{B1,RES}$ an Lager B1 wird die Vektorsumme der Kräfte $F_{B1,STAT}$ und $F_{B1,CPL}$ berechnet. Diese Kräfte werden durch eine sogenannte „dynamische Unwucht“ erzeugt – der Kombination einer statischen Unwucht U_{STAT} im Werkzeugschwerpunkt mit einer Momentenunwucht, U_{CPL} . Beim statischen Auswuchten sollte Werkstoff an oder nahe der Stelle der Unwucht entfernt oder hinzugefügt werden, um dynamische Restunwuchten auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Last $F_{B1,RES}$ am vorderen Spindellager B1 darf 1 % der dynamischen Tragzahl C_{DYN} innerhalb des relevanten Drehzahlbereichs nicht überschreiten. Dabei ist es wichtig anzumerken, dass dieses dynamische Grenzverhältnis der Lagerlast $F_{B1,RES}/C_{DYN} = 1 \%$ nicht von der Werkzeugmasse abhängig ist.

Die dynamische Unwucht eines starren Rotors kann alternativ auch durch zwei unabhängige Unwuchtvektoren $\vec{U}_{P1}$ und $\vec{U}_{P2}$ in zwei axialen Ebenen P1 und P2 mit einem Abstand b beschrieben werden (siehe Bild 3). Dieses „Zwei-Ebenen-Auswuchten“ hat sich in der industriellen Auswuchtpraxis für starre Werkzeuge und Werkzeugsysteme durchgesetzt.



Legende

- 1 Ebene P1
- 2 Ebene P2

Bild 3 — Modell einer Spindel und eines Werkzeugs mit dynamischer Zwei-Ebenen-Unwucht

Die zulässige statische Restunwucht $U_{STAT,1} \%$ [siehe Gleichung (3)] ist Berechnungsgrundlage für alle weiteren Betrachtungen und wurde für eine statische Unwucht hergeleitet, die sich im Massenschwerpunkt CG des Werkzeugs befindet (Bild 4). Die Entscheidung, ob statisches oder dynamisches Auswuchten erforderlich ist, hängt von einem bestimmten Verhältnis L/D der Werkzeuglänge zu dessen Durchmesser ab (Details in 4.2.4).

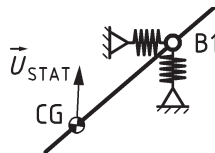
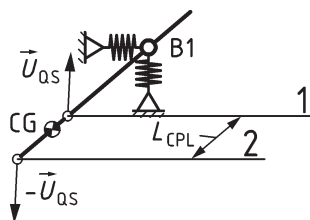


Bild 4 — Statische Unwucht im Werkzeugschwerpunkt CG

Die zulässigen Unwuchten $U_{P1,PER}$ und $U_{P2,PER}$ für das dynamische Auswuchten wurden von $U_{STAT,PER}$ im Werkzeugschwerpunkt CG abgeleitet. Es gilt die obligatorische Anforderung, dass die Last am Spindellager B1 nicht diejenige Last überschreiten darf, die durch die zulässige statische Unwucht $U_{STAT,PER}$ erzeugt würde (siehe 4.2.5).

Ein „kurzes“ Einzelwerkzeug (siehe 4.2.4) wird statisch ausgewuchtet. Schneidplatten und Spanräume befinden sich in der Regel an der Vorderseite eines Werkzeuggrundkörpers, wodurch der Mittelpunkt einer dadurch entstandenen Unwucht nicht im Werkzeugschwerpunkt CG liegt. Es entsteht eine sogenannte quasi-statische Unwucht U_{QS} (siehe Bild 5).



Legende

- 1 Ausgleichsebene
- 2 Mittelpunkt der quasi-statischen Unwucht

Bild 5 — Momentenunwucht durch quasi-statisches Auswuchten

Für den Bediener der Auswuchtmaschine ist es schwierig, die Unwuchtposition zu bestimmen. Selbst bei offensichtlich erkennbarer Position der Unwucht ist es oftmals nicht möglich, Werkstoff direkt auf der gegenüberliegenden Seite des Werkzeugkörpers zu entfernen.

Statischer Massenausgleich wird daher wegen der dort größeren Durchmesser oft nahe des Bundes vorgenommen. Daraus ergibt sich ein Abstand L_{CPL} zwischen der ursprünglichen Unwucht U_{QS} und der Ebene der ausgleichenden Unwucht $-U_{QS}$.

Das Ergebnis ist ein statisch ausgewuchtetes Werkzeug mit einer verbleibenden Momentenunwucht U_{CPL} [siehe Gleichung (1)] – einer Sonderform der dynamischen Unwucht mit der Einheit $[gmm^2]$.

$$U_{CPL} = U_{QS} \cdot L_{CPL} \quad (1)$$

Der Abstand L_{CPL} ändert sich unvorhersehbar in Abhängigkeit der Werkzeugkonstruktion und der/den axialen Position(en) der Auswuchtmaßnahmen. Aus diesem Grund sind die durch eine Momentenunwucht U_{CPL} hervorgerufenen Kräfte an den Spindellagern nicht bekannt und können beim statischen Auswuchten nicht berücksichtigt werden. Dennoch besteht die Möglichkeit, die Lagerkräfte F_{B1} und F_{B2} zu berechnen, die aufgrund der Momentenunwucht für beide Lager identisch sind [siehe Gleichung (2)].

$$F_{B1} = F_{B2} = \frac{U_{CPL}}{L_B} \times \Omega^2 = U_{QS} \times \frac{L_{CPL}}{L_B} \times \left(\frac{2\pi \times n}{60} \right)^2 \quad (2)$$

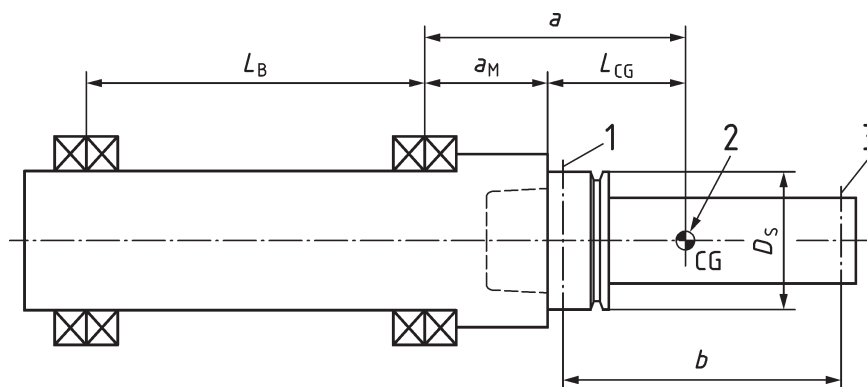
Gleichung (2) zeigt, dass das Verhältnis von L_{CPL} und L_B einen wesentlichen Einfluss auf die Lagerkräfte hat.

In der Praxis wird eine Momentenunwucht beim statischen Auswuchten nicht berücksichtigt. A.5.2 zeigt für ein Einzelwerkzeug mit einer einzigen Schneide, statisch „am ungünstigsten“ ausgewuchtet mit dem größtmöglichen Abstand L_{CPL} , dass dieser Effekt weit unter der „1 % von C_{DYN} -Regel“ liegt, und daher beim statischen Auswuchten vernachlässigt werden darf.

Trotzdem sollte die Materialkompensation beim statischen Auswuchten möglichst nahe der Stelle der auslösenden Unwucht erfolgen, um dynamische Restunwuchten auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Spindelparameter C_{DYN} , a_M und L_B sind für jede Schnittstellenart und -größe spezifiziert (siehe Tabelle 2).

Die Skizze eines Werkzeug-Spindel-Systems in Bild 6 zeigt die wesentlichen Parameter, die auch bereits in Bild 2 vorhanden sind.



Legende

- 1 Ebene P1
- 2 Schwerpunkt CG
- 3 Ebene P2

Bild 6 — Modell eines Werkzeug-Spindel-Systems mit den wesentlichen Parametern

Die Begrenzung der Lagerbelastungen bildet die Grundlage für das statische und das dynamische Auswuchten nach diesem Dokument. Die Lagerebenen stellen die Toleranzebenen des Werkzeug-Spindel-Systems nach ISO 1940-1 dar. Werkzeuge und Werkzeugsysteme sind die einzigen sich ändernden Komponenten in einem

Werkzeug-Spindel-System. Daher wäre es nicht sinnvoll, deren Unwucht an einer Maschinenspindel zu kompensieren.

Somit sind die Ebenen P1 und P2 am Werkzeugkörper auch die Ausgleichsebenen des Werkzeug-Spindel-Systems. Gleichzeitig sind sie sowohl Toleranzebenen als auch Ausgleichsebenen des Werkzeugsystems, und ermöglichen dadurch das dynamische Auswuchten unabhängig von der Maschinenspindel. Die zulässigen dynamischen Unwuchten (siehe 4.2.5) werden für die Ebenen P1 und P2 berechnet. Diese können für fliegend gelagerte Werkzeugsysteme nach diesem Dokument individuell definiert werden.

4.2.2 Bestimmung der Auswuchtanforderungen

Gleichung (3) zeigt die zulässige statische Restunwucht bei einem maximalen Lagerlastverhältnis von $F_{B1,RES}/C_{DYN} = 1\%$ am vorderen Spindellager B1. Wie bereits in Anmerkung 1 im Anwendungsbereich erwähnt, wurde dieses Dokument ursprünglich für HSK-Schnittstellen (Größen HSK-25 bis HSK-100) erarbeitet, kann aber auch für Schäfte und Spindeln ähnlicher Qualität und Baugröße mit bekannten möglichen Einspannverlagerungen (siehe Tabelle 2) angewendet werden.

$$U_{STAT,1\%} = 9,12 \times 10^5 \times \frac{C_{DYN}}{n^2} \times \left(\frac{L_B}{L_B + a} \right) \quad (3)$$

mit

$$a = a_M + L_{CG} \quad (4)$$

Die mit Gleichung (3) berechneten Restunwuchten stellen den Bereich dar, in dem die Spindellager unbeschädigt bleiben.

Damit eine Möglichkeit zur Anpassung der Auswuchtgüte an unterschiedliche Bearbeitungsprozesse besteht, werden in Tabelle 1 zwei Gewichtungsfaktoren f_{BAL} für das Standard- und das Feinwuchten vorgeschlagen. Beide f_{BAL} -Faktoren können sowohl auf Einzelwerkzeuge, als auch auf Werkzeugsysteme angewendet werden (siehe Abschnitt 5 für Komponenten).

Tabelle 1 — Gewichtungsfaktoren f_{BAL}

Standardwuchten	$f_{BAL} = f_{BAL,STND} = 0,8$
Feinwuchten	$f_{BAL} = f_{BAL,FINE} = 0,2$

Gleichung (4) und f_{BAL} ändern die Gleichung (3) in

$$U_{STAT,BAL} = f_{BAL} \times U_{STAT,1\%} = 9,12 \times 10^5 \times f_{BAL} \times \frac{C_{DYN}}{n^2} \times \left(\frac{L_B}{L_B + a_M + L_{CG}} \right) \quad (5)$$

Die zulässige statische Restunwucht $U_{STAT,PER}$ muss außerdem den möglichen Fehler U_{MIN} berücksichtigen [Einzelheiten siehe Gleichung (10) bis Gleichung (12)].

$$U_{MIN} = U_{BM,ACC} + U_{ECC} \quad (6)$$

Ein Werkzeug wird $U_{STAT,1\%}$ in einer Maschinenspindel nicht überschreiten, sofern U_{MIN} vorher subtrahiert worden ist, wodurch die zulässige statische Unwucht $U_{STAT,PER}$ für seinen Auswuchtprozess wie folgt definiert ist

$$U_{STAT,PER} = U_{STAT,1\%} - U_{MIN} \quad (7)$$

Somit ergibt sich letztendlich die folgende Gleichung für die zulässige statische Restunwucht.

$$U_{\text{STAT,PER}} \leq 9,12 \times 10^5 \times \frac{f_{\text{BAL}} \times C_{\text{DYN}}}{n^2} \times \left(\frac{L_{\text{B}}}{L_{\text{B}} + a_{\text{M}} + L_{\text{CG}}} \right) - (U_{\text{BM,ACC}} + m \times e_{\text{S}}) \quad (8)$$

Nach dem Einsetzen in die Maschinenspindel zeigen Werkzeuge und Werkzeugsysteme gewisse radiale und winkelbezogene Rundlauffehler bezüglich der Spindelachse (d. h. der Drehachse). Im ungünstigsten Fall kann die volle radiale Verlagerung e_{S} auftreten. In der Praxis muss zur Abschätzung der maximal möglichen tatsächlichen Unwucht $U_{\text{STAT,MAX}}$ der Wert U_{ECC} erneut zur zulässigen Unwucht $U_{\text{STAT,PER}}$ addiert werden, was mit Gleichung (8) berechnet wird.

$$U_{\text{STAT,MAX}} \leq U_{\text{STAT,PER}} + U_{\text{ECC}} = U_{\text{STAT,PER}} + m \times e_{\text{S}} \quad (9)$$

ANMERKUNG Radiale Verlagerungen treten auch zwischen den Komponenten modularer Werkzeugsysteme auf. Anhang B.1 zeigt ein Berechnungsbeispiel für ein Werkzeugsystem, das aus drei Komponenten besteht.

Die dynamische Tragzahl C_{DYN} , der maschinenseitige Hebelarm a_{M} und der Abstand zwischen den Spindellagern L_{B} (siehe Bild 2 und Bild 6) sind spezifisch für jede Spindelschnittstelle und können Tabelle 2 entnommen werden. Der gesamte Hebelarm vom vorderen Lager zum Werkzeugschwerpunkt setzt sich aus dem maschinenseitigen Hebelarm a_{M} (siehe Tabelle 2) und dem Werkzeughebelarm L_{CG} zusammen. L_{CG} muss vom Anwender bestimmt werden, und ist definiert als der Abstand von der Referenzposition RP an der Spindelnase (z. B. HSK-Planfläche) zum Werkzeugschwerpunkt CG. Der Faktor $9,12 \times 10^5$ ergibt sich aus den umgerechneten Einheiten der verschiedenen Parameter. Die Drehzahl n muss in min^{-1} eingetragen werden.

Die kleinste erreichbare Unwucht wird durch die kleinste messbare Unwucht $U_{\text{BM,MIN}}$ bestimmt, die ihrerseits von der Qualität der Auswuchtmaschine abhängt. Dies zu erreichen ist nur ohne Rundlauffehler möglich.

In der Praxis kann die gemessene kleinste Unwucht U_{MIN} größer als $U_{\text{BM,MIN}}$ sein. Sie hängt von der Messgenauigkeit der Auswuchtmaschinen $U_{\text{BM,ACC}}$ und von U_{ECC} , verursacht durch radiale Verlagerung(en), ab. U_{MIN} muss von $U_{\text{STAT,1\%}}$ subtrahiert werden, damit die zulässige statische Unwucht $U_{\text{STAT,PER}}$ eines Werkzeugs den Wert $U_{\text{STAT,1\%}}$ nicht überschreiten kann, auch wenn beide Effekte während des Auswuchtprozesses und/oder danach in der Maschinenspindel auftraten.

Im Falle von schweren Werkzeugen und hohen Drehzahlen kann $U_{\text{STAT,PER}}$ niedrige Werte nahe U_{MIN} annehmen. Dieser Systemzustand kann jedoch nur durch Auswuchten des gefügten Werkzeug-Spindel-Systems, bestehend aus Maschinenspindel und Werkzeugsystem, erreicht werden.

Falls die Unwucht $U_{\text{ECC,MAX}}$, verursacht durch Exzentrizität, die Unwucht $U_{\text{STAT,1\%}}$ überschreitet, nimmt die zulässige Unwucht $U_{\text{STAT,PER}}$ theoretisch sogar negative Werte an. U_{MIN} bleibt jedoch der kleinstmögliche Wert. Gleichung (10) bis Gleichung (12) geben einen Überblick über diese Umstände.

Tabelle 2 — Schnittstellenspezifische Parameter

			SZ								
Schaftform	Name	ISO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	HSK	12164-1 12164-2	25	32	40	50	63	80	100	125	160
		Andere ^a	32	40	50	63	80	100	125	160	200
	PSC	26623-1 26623-2	—	32	40	50	63	80	100	—	—
	TS	26622-1 26622-2	—	32	40	50	63	80	100	—	—
	Kegel 7/24	7388-1 7388-2 9270-1 9270-2	—	—	30	—	40	45	50	—	60
Schnittstellen- relevante Kompo- nentenmasse eines Werkzeugs bzw. eines Werkzeugsystems	m_{MIN} [kg] ^b		0,1	0,2	0,4	0,6	1,0	2,0	3,0	5,0	10
	m_{MAX} [kg] ^b		0,3	0,6	1,2	2,0	4,5	7,0	13	25	60
	m_{AVG} [kg]		0,2	0,4	0,8	1,3	2,8	4,5	8,0	15	35
Parameter		Einheiten									
C_{DYN}		N	6 800	8 800	12 200	17 600	25 000	30 000	42 500	42 500	42 500
a_{M}		mm	20	25	35	45	50	60	90	110	130
L_{B}		mm	170	200	230	300	415	650	730	730	730
D_{S}^{c}	HSK	mm	25	32	40	50	63	80	100	125	160
	PSC	mm	—	32	40	50	63	80	100	—	—
	TS	mm	—	32	40	50	63	80	100	—	—
	7/24	mm	—	—	50	—	63,55	82,55	97,50	—	155
e_{S}	HSK	mm	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004
	PSC	mm	—	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,004	—	—
	TS	mm	—	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,004	—	—
	7/24	mm	—	—	0,003	—	0,003	0,004	0,005	—	0,006
$U_{\text{BM,MIN}}^{\text{d,e}}$		gmm	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,5	3,0	3,0

Tabelle 2 (fortgesetzt)

$U_{BM,ACC}^f$	gmm	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,5	3,0	3,0
b_{MIN}^e	mm	60	60	60	60	60	60	80	100	100
^a „Andere“ bedeutet einen um eine Größe kleineren Kegelschaft im Vergleich zum Flanschdurchmesser (z. B. ein Durchmesser von Ø 63 mm in Verbindung mit einem HSK-50-Kegel). ^b m_{MIN} und m_{MAX} sind Referenzmassen für Komponenten mit nicht aufgelisteten Schaftformen zur Klassifizierung in die Spindelgrößen 1 bis 9. ^c D_S ist der Bunddurchmesser des Aufnahmeschaftes. ^d Auswuchten auf $U_{BM,MIN}$ erfordert optimale Einspannbedingungen in der Auswuchtmaschine. ^e $U_{BM,MIN}$ und b_{MIN} beziehen sich auf die mittlere Komponentenmasse m_{AVG}. ^f Die Werte von $U_{BM,ACC}$ können mit $U_{BM,MIN}$ gleichgesetzt werden.										

4.2.3 Messgenauigkeit von Auswuchtmaschinen, Einfluss der Rundlaufgenauigkeit und Wiederholbarkeit der Messergebnisse

Die Messgenauigkeit von Auswuchtmaschinen ist begrenzt, und Unwuchtmessungen können auch aufgrund verschiedener Einflüsse, die während des Messvorgangs auftreten, schwanken.

Werkzeug-/Komponentenschafts weisen in Spindelschnittstellen von Bearbeitungs- und Auswuchtmaschinen gewisse minimale radiale und winkelbezogene Rundlauffehler auf. Die entsprechende Unwucht U_{ECC} hat Einfluss auf das Messergebnis und hängt von der Einspanngenauigkeit in der Auswuchtmaschinenspindel ab. Tabelle 2 zeigt Referenzwerte für e_s der gebräuchlichsten Aufnahmearten. Es wird angenommen, dass die Einspanngenauigkeit in einer Auswuchtmaschine besser ist als in einer Werkzeugmaschinen-spindel.

Der zweite Faktor ist die kleinste messbare Unwucht $U_{BM,MIN}$, die von der Art und Größe der Auswuchtmaschinen abhängt. Bei Auswuchtmaschinen für geringe Werkzeugmassen (< 1,5 kg) kommen die Messgrenzen deutlicher zum Vorschein. $U_{BM,ACC}$ ist die Messgenauigkeit von Auswuchtmaschinen. Werte für $U_{BM,MIN}$ und $U_{BM,ACC}$ sind in Tabelle 2 aufgelistet.

U_{ECC} und $U_{BM,ACC}$ summieren sich zu der reproduzierbar messbaren Restunwucht U_{MIN} eines Werkzeug-Spindel-Systems, wie in Gleichung (10) dargestellt. Sind bessere Auswuchtergebnisse notwendig, z. B. aufgrund anwendungsbedingter Anforderungen, kann allein das Auswuchten des kompletten Werkzeug-Spindel-Systems (Werkzeugmaschinen-spindel mit eingesetztem Werkzeugsystem) eine Option darstellen.

Wie bereits vorstehend erwähnt, hängt die Genauigkeit des Auswuchtens von der Messgenauigkeit der Auswuchtmaschinen $U_{BM,ACC}$ und dem Einfluss der Rundlaufgenauigkeit e_s ab (siehe Tabelle 2).

$$U_{MIN} \leq U_{BM,ACC} + U_{ECC} = U_{BM,ACC} + m \times e_s \quad (10)$$

Das Beseitigen radialer und winkelbezogener Rundlauffehler (d. h. $U_{ECC} \rightarrow 0$) kann zum kleinstmöglichen Wert von U_{MIN} führen, wie in Gleichung (11) dargestellt:

$$U_{MIN} \geq U_{BM,MIN} \quad (11)$$

womit letztendlich für die Bandbreite von U_{MIN} nach Gleichung (12) gilt:

$$U_{BM,MIN} \leq U_{MIN} \leq U_{BM,ACC} + U_{ECC} \quad (12)$$

Die Messung dynamischer Unwuchten ist im Vergleich zu statischen Unwuchten komplexer und schwieriger. Demzufolge kann die kleinste zulässige Restunwucht je Ebene $U_{P,MIN}$ nicht kleiner sein als U_{MIN} , d. h. entsprechend Gleichung (13):

$$U_{P,MIN} \geq U_{MIN} \quad (13)$$

Das bedeutet im ungünstigsten Fall (d. h. die Unwuchten beider Ebenen haben dieselbe Winkellage), dass die resultierende statische Unwucht $U_{\text{STAT},P1,P2}$ den zweifachen Betrag von U_{MIN} annehmen kann [siehe Gleichung (14)].

$$U_{\text{STAT},P1,P2} = \left| \vec{U}_{P1,PER} + \vec{U}_{P2,PER} \right| \geq \left| \vec{U}_{P1,PER} \right| + \left| \vec{U}_{P2,PER} \right| \geq 2 \times U_{\text{MIN}} \quad (14)$$

$U_{\text{STAT},P1,P2}$ eines dynamisch gewuchteten Werkzeugs kann statisch den kleinsten Wert U_{MIN} also nur dann mit Sicherheit erreichen, wenn es abschließend noch einmal statisch gewuchtet wurde.

U_{MIN} ist die horizontale untere Linie in Bild 13, die den Graphen eines typischen HSK-63-Werkzeugs mit einer Masse von 1 000 g zeigt.

Werte unter U_{MIN} – auch wenn sie von einer Auswuchtmaschine angezeigt werden – können nach einem Werkzeugwechsel nicht sicher reproduzierbar gemessen werden. Somit können die Auswuchtergebnisse unterhalb der horizontalen Linie U_{MIN} nur in einer Werkzeugmaschine durch Auswuchten des zusammengebauten Werkzeug-Spindel-Systems erreicht werden.

Unterschiedliche Auswuchtbedingungen bei Werkzeugherstellern (TM) und Anwendern (CS) können zu unterschiedlichen Auswuchtergebnissen für ein und dasselbe Werkzeug führen (z. B. zurückzuführen auf Werkzeugadapter mit unterschiedlichen Einspanngenauigkeiten, Auswuchtmaschinen unterschiedlicher Messgenauigkeit und Wartungszustand, usw.). Um diesbezügliche Unstimmigkeiten zu vermeiden, wird empfohlen, einen Toleranzbereich von 15 % für $U_{\text{STAT},PER}$ sowohl beim Hersteller als auch beim Anwender einzuführen.

Das bedeutet, dass die zulässigen Unwuchtwerte des statischen bzw. dynamischen Auswuchtens für den ursprünglichen Wuchtprozess um 15 % verringert, und für eine anschließende Verifizierung, um 15 %, erhöht werden dürfen. Beim dynamischen Auswuchten kann dieser Toleranzbereich pro Ebene angewendet werden.

ANMERKUNG ISO 1940-1 und ISO 21940-14 empfehlen eine ausführliche Betrachtung von maschinenbezogenen Fehlermöglichkeiten.

BEISPIEL Im Fall einer zulässigen statischen Unwucht von 10 gmm sollte also ein Werkzeug vom Hersteller auf $U_{\text{STAT},PER,TM} = 8,5 \text{ gmm}$ (–15 %) ausgewuchtet werden. Für die anschließende Verifizierung in einer anderen Auswuchtmaschine (z. B. beim Anwender) ist eine Restunwucht von $U_{\text{STAT},PER,CS} = 11,5 \text{ gmm}$ der maximal zulässige Wert.

4.2.4 Anwendungskriterium für statisches bzw. dynamisches Auswuchten

Der Parameter $R_{L/D}$ zur Entscheidung zwischen statischem (Ein-Ebenen-Auswuchten) und dynamischem Auswuchten (Zwei-Ebenen-Auswuchten) ist das Verhältnis von L_{BL} zu D_S und wird nach Gleichung (15) definiert.

$$R_{L/D} = \frac{L_{BL}}{D_S} \quad (15)$$

Das Grenzverhältnis $R_{\text{STAT},MAX}$ zur Angabe, ab wann dynamisches Auswuchten beginnen soll, ist in Gleichung (16) dargestellt.

$$R_{\text{STAT},MAX} = \frac{L_{\text{STAT},MAX}}{D_S} \leq 2,2 \quad (16)$$

L_{BL} und $L_{\text{STAT},MAX}$ sind die Längen von der Spindelreferenzebene RP (z. B. der HSK-Planfläche) zur vorderst möglichen Ausgleichsebene, wo der Werkzeugkörper noch einen Massenausgleich ermöglicht. Beide Längen sind damit kürzer als die Werkzeuglänge L , d. h. $L_{BL} \leq L$. Die Größe der Schnittstelle entspricht dem Referenzdurchmesser D_S (siehe Bild 6), z. B. HSK-A63 $\rightarrow D_S = 63 \text{ mm}$.

Werkzeuge und Werkzeugsysteme, die $L_{\text{STAT},MAX}$ überschreiten (d. h. $R_{L/D} > R_{\text{STAT},MAX}$), sollten dynamisch ausgewuchtet werden.

Dynamisches Auswuchten ist jedoch nur sinnvoll, wenn L_{BL} größer ist als der kleinste Abstand b_{MIN} zwischen den Ausgleichsebenen P1 und P2. Dieses Maß kann für unterschiedliche Auswuchtmaschinen anhand Tabelle 2 bestimmt werden.

4.2.5 Zulässige dynamische Restunwuchten

4.2.5.1 Allgemeines

Die Herleitung der zulässigen dynamischen Restunwuchten orientiert sich am Prinzip des statischen Auswuchtens, das besagt, dass die dynamische Belastung an dem/den vorderen Spindellager/n 1 % der dynamischen Tragzahl C_{DYN} nicht überschreiten darf. Dies ist dann der Fall, wenn die Belastung von Lager B1, verursacht durch eine dynamische Unwucht in zwei Ebenen, der Last einer unter denselben Bedingungen zulässigen statischen Unwucht entspricht.

Unwuchten sind Vektoren verschiedener Länge und Winkellage senkrecht zur Drehachse des Werkzeugs. Damit das dynamische Auswuchten so einfach wie möglich bleibt und die vorherrschende Auswuchtpraxis für Werkzeuge beibehalten werden kann, dürfen die zulässigen dynamischen Unwuchten nicht von ihrer jeweiligen Winkellage abhängig sein. Dies ist gegeben, wenn die Summe der Beträge der Unwuchtvektoren von Ebene P1 und Ebene P2 die zulässige statische Unwucht $U_{STAT,PER}$ nicht übersteigen kann.

Im Fall einer dynamischen Unwucht kann die statische Unwucht berechnet werden, indem die beiden Unwuchtvektoren $\vec{U}_{P1}$ und $\vec{U}_{P2}$ der Ausgleichsebenen P1 und P2 addiert werden. Bild 7 zeigt drei Unwuchtsituationen A, B und C mit jeweils unterschiedlichen Winkeln zwischen $\vec{U}_{P1}$ und $\vec{U}_{P2}$.

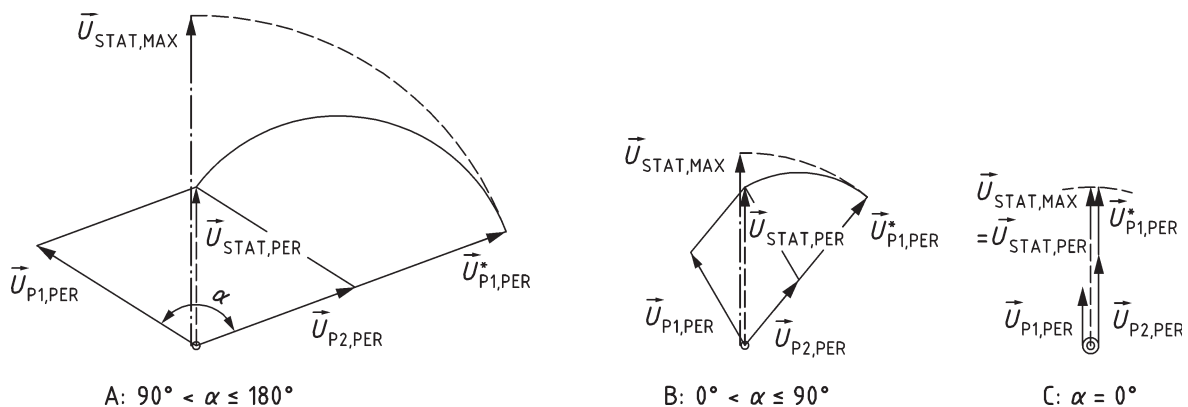


Bild 7 — $\vec{U}_{STAT,MAX}$ und $\vec{U}_{STAT,PER}$ in Abhängigkeit des Winkels α zwischen $\vec{U}_{P1,PER}$ und $\vec{U}_{P2,PER}$

$\vec{U}_{P1,PER}$ ist der Vektor der zulässigen statischen Restunwucht mit der gleichen Ausrichtung wie $\vec{U}_{P2,PER}$. Alle drei dynamischen Unwuchtsituationen in Bild 7 führen zum gleichen Betrag (d. h. Länge) von $\vec{U}_{STAT,PER}$. Unterschiedliche Winkel zwischen den Unwuchten der Ebenen P1 und P2 – siehe Fälle A und B – führen hingegen zu verschiedenen möglichen Höchstwerten von $\vec{U}_{STAT,MAX}$, die größer sind als $\vec{U}_{STAT,PER}$. Nur im Fall C, in dem beide Unwuchten dieselbe Ausrichtung aufweisen, d. h. $\alpha = 0^\circ$ zwischen $\vec{U}_{P1,PER}$ und $\vec{U}_{P2,PER}$, ist gewährleistet, dass $\vec{U}_{STAT,MAX}$ und $\vec{U}_{STAT,PER}$ zwingend gleich groß sind.

ANMERKUNG 1 Es wird angenommen, dass die Körper der Werkzeuge, Werkzeugkomponenten und modularen Werkzeugsysteme innerhalb ihres Betriebsdrehzahlbereichs starr sind.

ANMERKUNG 2 Der dynamische Auswuchtprozess mithilfe von zwei Ausgleichsebenen hat sich in der Praxis durchgesetzt und wird auch in diesem Dokument angewendet. Die Fälle D, E und F des dynamischen Auswuchtens resultieren aus drei verschiedenen möglichen Konstellationen der zwei Ausgleichsebenen in Bezug auf den Schwerpunkt. 4.2.5.2 und 4.2.5.3 enthalten die entsprechenden Berechnungen.

ANMERKUNG 3 Detaillierte mathematische Herleitungen der drei Fälle dynamischen Auswuchtens sind in A.4.1 und A.4.2 enthalten.

ANMERKUNG 4 Die Berechnungen der zulässigen Unwuchten in den Fällen D, E und F basieren jeweils auf der gleichen Winkellage (d. h. $\alpha = 0^\circ$, siehe Fall C in Bild 7) der beiden Unwuchten in Ebene P1 und Ebene P2.

Gleichung (17) stellt dies wie folgt dar:

$$U_{\text{STAT,PER}} = U_{\text{STAT,MAX,C}} < U_{\text{STAT,MAX,B}} < U_{\text{STAT,MAX,A}} \quad (17)$$

Für $\alpha = 0$ erfolgt die Bestimmung der größtmöglichen Unwucht $U_{\text{STAT,MAX}}$, hervorgerufen durch die Unwuchten in den Ebenen P1 und P2, dargestellt in Gleichung (18):

$$U_{\text{STAT,MAX}} = |\vec{U}_{\text{STAT,MAX}}| = |\vec{U}_{\text{P2,PER}} + \vec{U}_{\text{P1,PER}}^*| = |\vec{U}_{\text{P2,PER}}| + |\vec{U}_{\text{P1,PER}}| \quad (18)$$

4.2.5.2 Fall D: Werkzeugschwerpunkt CG zwischen den Ebenen P1 und P2 (P1-CG-P2)

ANMERKUNG 1 Fall D „P1-CG-P2“ stellt den Standardfall dar und sollte den Sonderfällen „CG-P1-P2“ (Fall E, 4.2.5.3.2) und „P1-P2-CG“ (Fall F, 4.2.5.3.3) vorgezogen werden.

Die Herleitung der Gleichung (19) und Gleichung (20) für die zulässigen Restunwuchten $U_{\text{P1,PER}}$ und $U_{\text{P2,PER}}$ basiert auf Bild 8, das außerdem zur besseren Übersicht die äquivalente, zulässige statische Unwucht $U_{\text{STAT,PER}}$ (gestrichelte Linie) zeigt. Es wird angenommen, dass alle Unwuchten die gleiche Winkellage aufweisen, wie für Fall C in Bild 7 beschrieben.

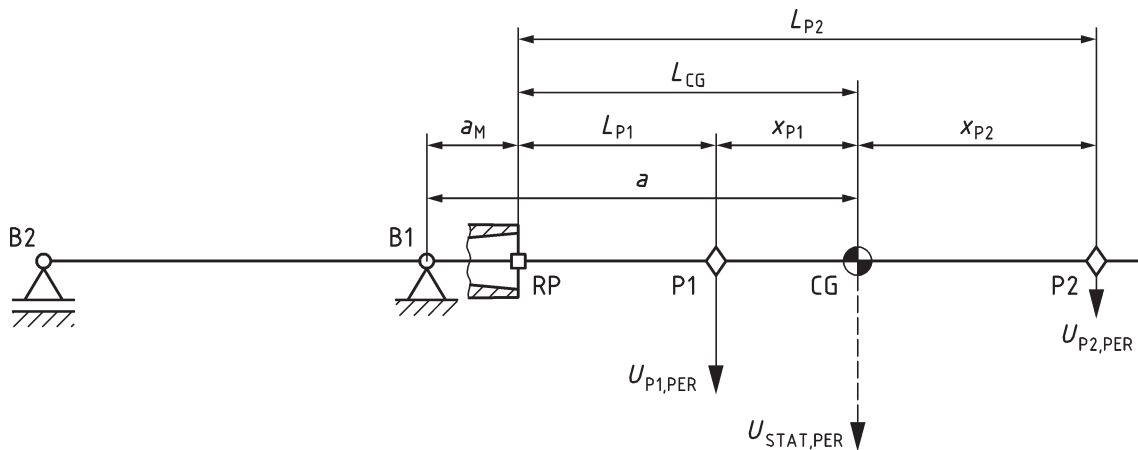


Bild 8 — Fall D: Werkzeugschwerpunkt CG zwischen den Ebenen P1 und P2 (P1-CG-P2)

Die Belastung der Spindellager aufgrund von Unwuchten in den Ebenen P1 und P2 darf nicht größer sein als die Belastung aufgrund der zulässigen statischen Unwucht im Schwerpunkt.

Die Gleichgewichtsbedingungen für die Unwuchten $U_{\text{STAT,PER}}$, $U_{\text{P1,PER}}$ und $U_{\text{P2,PER}}$ und deren Unwuchtmomente nach Bild 8 führen letztendlich zu den folgenden zulässigen Unwuchten für die Ebenen P1 und P2. Die Längenparameter in Gleichung (19) und Gleichung (20) beziehen sich auf den Schwerpunkt CG.

$$U_{\text{P1,PER}} = U_{\text{STAT,PER}} \times \frac{x_{\text{P2}}}{x_{\text{P1}} + x_{\text{P2}}} \quad (19)$$

$$U_{\text{P2,PER}} = U_{\text{STAT,PER}} \times \frac{x_{\text{P1}}}{x_{\text{P1}} + x_{\text{P2}}} \quad (20)$$

Für die Auswuchtmaschine kann es geeigneter sein, wenn sich die Längenparameter in den Gleichungen für $U_{P1,PER}$ und $U_{P2,PER}$ auf die Referenzebene RP beziehen. Dies führt zur alternativen Gleichung (21) und Gleichung (22).

$$U_{P1,PER} = U_{STAT,PER} \times \frac{L_{P2} - L_{CG}}{L_{P2} - L_{P1}} \quad (21)$$

$$U_{P2,PER} = U_{STAT,PER} \times \frac{L_{CG} - L_{P1}}{L_{P2} - L_{P1}} \quad (22)$$

Nehmen die Ausgleichsebenen im Hinblick auf den Schwerpunkt eine stark asymmetrische Position ein (d. h. eine der Ebenen liegt zu nahe an CG), kann es zu einer ungünstigen Aufteilung der zulässigen statischen Unwucht $U_{STAT,PER}$ kommen. Eine sinnvolle Aufteilung der zulässigen statischen Unwucht wird erreicht, wenn der kleinste Anteil je Ebene nicht weniger als 20 % von $U_{STAT,PER}$ beträgt ($f_{P,MIN} = 0,2$). Eine ähnliche Situation wird in ISO 1940-1:2003, 7.2.2 und 7.2.3 für die Toleranzebenen an den Lagern beschrieben.

Es gilt Gleichung (23):

$$U_{P,PER} \geq U_{P,MIN} = f_{P,MIN} \times U_{STAT,PER} = 0,2 \times U_{STAT,PER} \geq U_{MIN} \quad (23)$$

Eine zulässige Unwucht $U_{P,PER}$ sollte also in keiner Ebene kleiner als U_{MIN} sein. Dies kann sich aber bei niedrigen Werten von $U_{STAT,PER}$, die nur geringfügig über U_{MIN} liegen, ergeben.

4.2.5.3 Werkzeugschwerpunkt CG nicht zwischen den Ebenen P1 und P2

4.2.5.3.1 Allgemeines

Anstatt zwischen den Ebenen P1 und P2 kann sich der Schwerpunkt CG auch entweder zwischen der Referenzebene RP und Ebene P1 (Fall E, Bild 9) oder hinter Ebene P2 (Fall F, Bild 10) befinden. In beiden Fällen führt Gleichung (A.16) und Gleichung (A.18) zu einem negativen Unwuchtwert in einer der beiden Ebenen. Im Sinne der technischen Mechanik wäre dies korrekt, da die zulässigen Restunwuchten der beiden Ebenen dann gegenüber lägen.

Dies würde jedoch bedeuten, dass Unwuchten als Vektoren zu behandeln wären. Nur durch die Berücksichtigung ihrer Winkellagen könnte dann für die statische Restunwucht sicher verhindert werden, dass $U_{STAT,PER}$ nicht überschritten wird. In der Werkzeugindustrie war dies bisher noch nicht erforderlich und wäre auch nicht praktikabel.

Mit Gleichung (24) und Gleichung (29) werden zwei verschiedene Quotienten eingeführt, die dies verhindern. Außerdem wird dadurch der Ebene P2, die einen längeren Hebelarm hat, der jeweils kleinere Anteil der zulässigen Restunwucht zugewiesen.

4.2.5.3.2 Werkzeugschwerpunkt CG zwischen Spindelreferenzebene RP und Ebene P1 (CG-P1-P2)

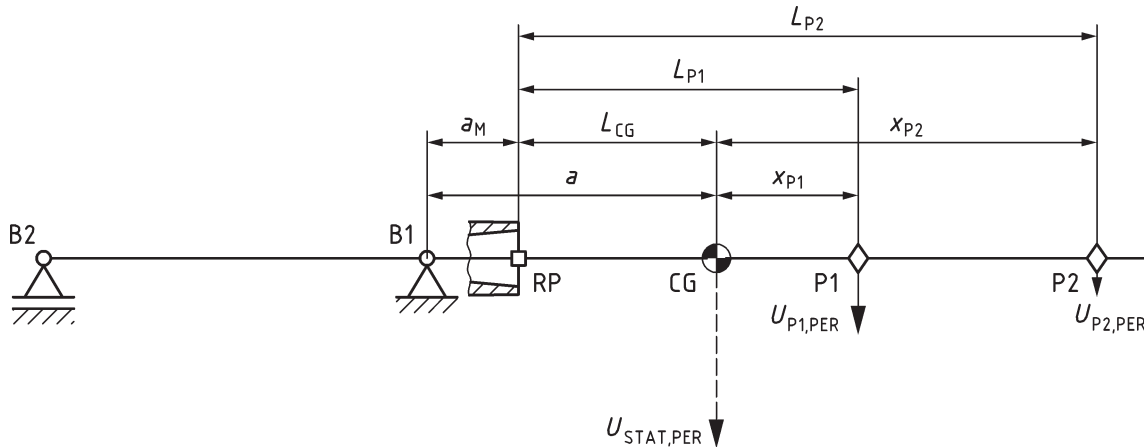


Bild 9 — Fall E: Werkzeugschwerpunkt CG zwischen Spindelreferenzebene RP und Ebene P1 (CG-P1-P2)

Gleichung (24) stellt für den Fall E von Bild 9 sicher, dass Ebene P2 mit dem längeren Hebelarm zum vorderen Lager den kleineren Anteil der zulässigen Unwucht erhält.

$$\frac{U_{P1,PER}}{U_{P2,PER}} = \frac{x_{P2}}{x_{P1}} \quad (24)$$

Zusammen mit Gleichung (A.34) und Gleichung (A.35) lauten die sich auf den Werkzeugschwerpunkt CG beziehenden Ergebnisse:

$$U_{P1,PER} = U_{STAT,PER} \times \frac{(a_M + L_{CG}) \times x_{P2}}{(a_M + L_{CG}) \times (x_{P1} + x_{P2}) + 2 \times x_{P1} \times x_{P2}} \quad (25)$$

$$U_{P2,PER} = U_{STAT,PER} \times \frac{(a_M + L_{CG}) \times x_{P1}}{(a_M + L_{CG}) \times (x_{P1} + x_{P2}) + 2 \times x_{P1} \times x_{P2}} \quad (26)$$

Bezugnehmend auf die Referenzebene RP können die vorstehend Gleichung (25) und Gleichung (26) umgewandelt werden in Gleichung (27) und Gleichung (28):

$$U_{P1,PER} = U_{STAT,PER} \times \frac{(a_M + L_{CG}) \times (L_{P2} - L_{CG})}{(a_M + L_{CG}) \times (L_{P1} + L_{P2} - 2 \times L_{CG}) + 2 \times (L_{P1} - L_{CG}) \times (L_{P2} - L_{CG})} \quad (27)$$

$$U_{P2,PER} = U_{STAT,PER} \times \frac{(a_M + L_{CG}) \times (L_{P1} - L_{CG})}{(a_M + L_{CG}) \times (L_{P1} + L_{P2} - 2 \times L_{CG}) + 2 \times (L_{P1} - L_{CG}) \times (L_{P2} - L_{CG})} \quad (28)$$

Beide Hebelarme der Ebenen P1 und P2 sind im Vergleich zum Hebel von CG länger, wodurch sich relativ kleine zulässigen Restunwuchten $U_{P1,PER}$ und $U_{P2,PER}$ ergeben. Deren Summe ist dann geringer als $U_{STAT,PER}$ und kann leicht zu rechnerischen Werten auch unter U_{MIN} führen.

Fall E tritt in der Praxis üblicherweise nicht auf bzw. sollte nach Möglichkeit vermieden werden.

4.2.5.3.3 Fall F: Werkzeugschwerpunkt CG hinter Ebene P2 (P1-P2-CG)

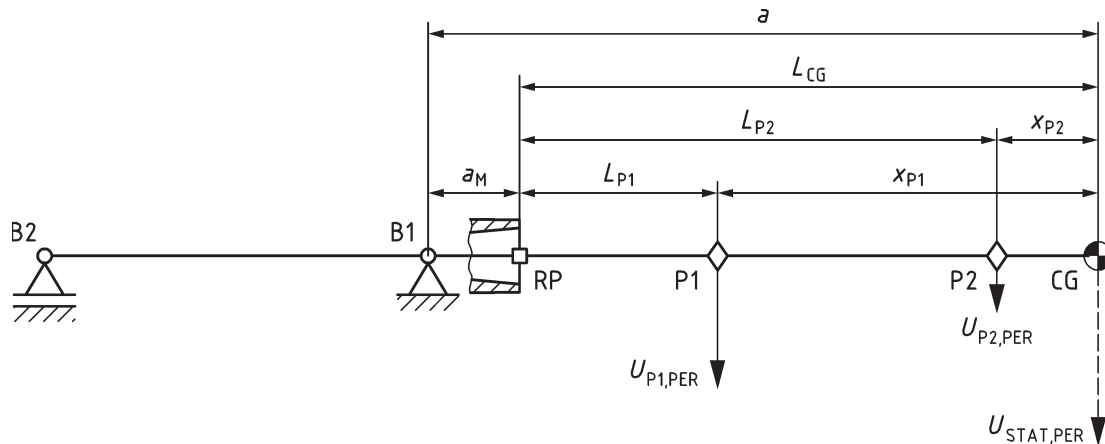


Bild 10 — Fall F: Werkzeugschwerpunkt CG hinter Ebene P2 (P1-P2-CG)

Fall F in Bild 10 ist in der Praxis wahrscheinlicher als Fall E. Wird der Ebene P2 (die Ebene mit dem längeren Hebelarm) erneut der kleinere Anteil der Unwucht zugewiesen, ergibt sich das Aufteilungsverhältnis von Gleichung (29).

$$\frac{U_{P1,PER}}{U_{P2,PER}} = \frac{x_{P1}}{x_{P2}} \quad (29)$$

Fall F mit den kleineren Hebelarmen der Ebenen P1 und P2 im Vergleich zu L_{CG} führt jedoch zu relativ großen Werten für $U_{P1,PER}$ und $U_{P2,PER}$ entsprechend der Gleichgewichtsbedingung der Unwuchtmomente in Gleichung (A.29). Deren Summe wäre größer als $U_{STAT,PER}$, während die Spindellast aber weiterhin korrekt begrenzt wäre. Je nach Winkellage kann dies eine höhere statische Unwuchtmessung als $U_{STAT,PER}$ ergeben und in der Praxis zu Verwirrungen führen. Deshalb müssen die beiden Unwuchten $U_{P1,PER}$ und $U_{P2,PER}$ so begrenzt werden, dass deren Summe den Wert $U_{STAT,PER}$ nicht überschreiten kann (siehe A.4.2.3 für Einzelheiten).

Zusammen mit dem Aufteilungsverhältnis von Gleichung (29) ergeben sich die korrigierten zulässigen Restunwuchten $U_{P1,PER,LIM}$ und $U_{P2,PER,LIM}$ mit Bezug auf CG in Gleichung (30) und Gleichung (31) zu:

$$U_{P1,PER,LIM} = U_{STAT,PER} \times \frac{x_{P1}}{x_{P1} + x_{P2}} \quad (30)$$

$$U_{P2,PER,LIM} = U_{STAT,PER} \times \frac{x_{P2}}{x_{P1} + x_{P2}} \quad (31)$$

Gleichung (32) und Gleichung (33) beziehen sich alternativ auf die Referenzebene RP:

$$U_{P1,PER,LIM} = U_{STAT,PER} \times \frac{L_{CG} - L_{P1}}{2 \times L_{CG} - (L_{P1} + L_{P2})} \quad (32)$$

$$U_{P2,PER,LIM} = U_{STAT,PER} \times \frac{L_{CG} - L_{P2}}{2 \times L_{CG} - (L_{P1} + L_{P2})} \quad (33)$$

Ein zu geringer Abstand zwischen Ebene P2 und dem Schwerpunkt CG würde hier ebenfalls zu einer ungünstigen Aufteilung der zulässigen statischen Unwucht führen. Der kleinste Wert einer Unwucht je Ebene $U_{P,MIN}$ nach Gleichung (23) muss hier ebenfalls beibehalten werden.

Schlussendlich wird auch hier durch die Anwendung der allgemeinen Regel von Gleichung (10) für den Fall F verhindert, dass keine der berechneten Ebenenunwuchten kleiner als U_{MIN} wird.

4.2.6 Auswuchtanforderungen an geführte Werkzeugsysteme

Zerspanungswerkzeuge mit Führung innerhalb und/oder außerhalb der Bohrung (z. B. schlanke Werkzeuge für die Bearbeitung von Ventilfehrungsbohrungen oder lange Bohrstangen für Nockenwellenbohrungen) übertragen ihre Schnittkräfte und die Last ihrer Restunwuchten hauptsächlich auf die Führungselemente entlang ihres Werkzeugkörpers. Die Festlegung der zulässigen Unwuchtwerte für jedes Stützlager liegt im Ermessen des Herstellers.

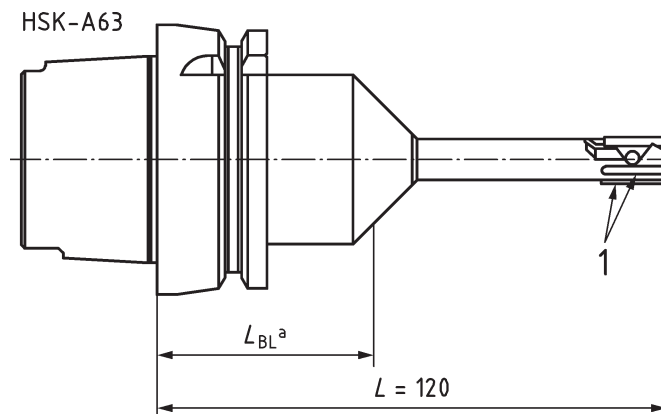
Standardwerkzeuge mit Führungseigenschaften, wie Spiralbohrer, Kernbohrer und Reibahlen, sind üblicherweise mehr oder weniger symmetrisch. Tiefbohrwerkzeuge, Einlippenbohrer sowie spezielle Reibahlen und Feinbohrwerkzeuge werden hingegen aufgrund der von ihnen geforderten Funktion oftmals asymmetrisch konstruiert.

Diese Werkzeuge werden in der Bohrung durch ihre eigenen Führungselemente gestützt (z. B. durch Führungsleisten). Schnittkräfte und unwuchtbedingte Fliehkräfte werden über diese Führungselemente auf das Werkstück übertragen. Deshalb sind die Spindellager nicht oder nur teilweise durch Fliehkräfte aufgrund der Unwucht der Ebene P2 belastet. Diese Art von Werkzeugen kann nach der folgenden Beschreibung ausgewuchtet werden.

ANMERKUNG 1 Aufgrund der Bauweise eines geführten Werkzeugs (L_{BL} ist zu kurz oder gar nicht verfügbar, siehe Bild 11 und Bild 12) bezieht sich die Berechnung des Verhältnisses $R_{STAT,MAX}^*$ auf L anstatt auf L_{BL} [siehe Gleichung (15)] wie in Gleichung (34) dargestellt.

$$R_{STAT,MAX}^* = \frac{L}{D_S} = 2,2 \quad (34)$$

Kurze Werkzeuge ($L < 2,2 \times D_S$, siehe 4.2.4) mit Führungselementen werden in dem gekennzeichneten Wuchtbereich von Bild 11 statisch ausgewuchtet.



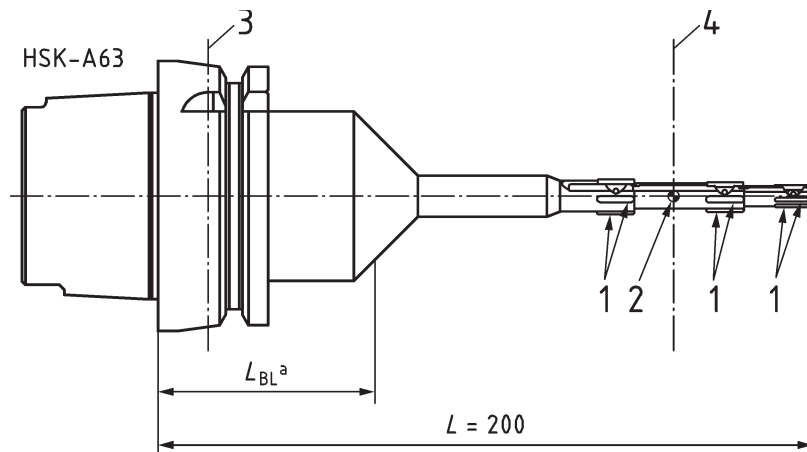
Legende

1 Führungsleisten

a Wuchtbereich

Bild 11 — Kurzes Feinbohrwerkzeug mit Führungsleisten, $L < 2,2 \times D_S$ und $L_{BL} < b_{MIN}$

Längere, oft einschneidige Werkzeuge ($L > 2,2 \times D_S$), wie in dem Beispiel von Bild 12 dargestellt, weisen aufgrund von Schneiden, Spanräumen und Führungsleisten im Schneidenbereich (Ausgleichsebene P2) oftmals beträchtliche Unwuchten auf.



Legende

- 1 Führungsleisten
- 2 Schwerpunkt der vorderen Unwucht
- 3 Ebene P1
- 4 Ebene P2
- a Wuchtbereich

Bild 12 — Längeres Feinbohrwerkzeug mit Führungsleisten, $L > 2,2 \times D_S$ und $L_{BL} < b_{MIN}$

Die Winkellage der Unwucht in Ebene P2 befindet sich gegenüber des Spanraums nahe der Führungsleisten, die meistens aus Material höherer Dichte als Stahl (z. B. Hartmetall) bestehen.

Bei Werkzeugen mit kleinem Durchmesser können diese Unwuchten aus Stabilitätsgründen nicht entfernt werden. Eine symmetrische Bauweise solcher Werkzeuge ist aufgrund ihrer geforderten Funktion meist nicht möglich. Nachstehend ist ein geeignetes Verfahren zum dynamischen Auswuchten von Werkzeugen wie dem in Bild 12 beschrieben.

Das Anordnen der Ebene P2 im Schwerpunkt dieser Unwucht simuliert die Bearbeitungssituation, da die Unwuchtlast von P2 durch die Führungselemente auf die Bohrung des Werkstücks und dessen Befestigung auf dem Werkzeugmaschinenstisch übertragen wird. Die Spindel wird dann also nicht durch die Unwucht der Ebene P2 belastet, wodurch dieser (ohnehin unmögliche) Auswuchtvorgang nicht erforderlich ist. Die Unwucht der Ebene P1 außerhalb der Bohrung würde jedoch die Spindellager während der Bearbeitung belasten und sollte daher entfernt werden.

Ein rein statisches Auswuchten solcher Werkzeuge im Wuchtbereich L_{BL} nahe der HSK-Aufnahme würde im Betrieb jedoch zu erheblich schlechteren dynamischen Auswuchtsituation führen, da eine höhere Unwucht als zuvor in der Ebene P1 die Folge wäre.

Werkzeuge, wie in Bild 12 gezeigt, haben außerhalb des Werkstücks oftmals keine Führung. Es wird empfohlen, mit einer reduzierten Drehzahl in das Werkstück, welches häufig eine Pilotbohrung aufweist, mit reduzierter Drehzahl einzufahren und bei aktiver Führung auf normale Parameter umzuschalten. Ausführliche Hinweise sollten von den Herstellern solcher Werkzeuge bereitgestellt werden.

Zur Minimierung von Restunwuchten sollte generell eine rotationssymmetrische Bauweise des Werkzeugsystems angestrebt werden.

4.2.7 Einfluss des HSK auf die dynamische Unwucht

Statisches Auswuchten von HSK-Adaptern mit den Formen A und C führt zu verbleibenden dynamischen Unwuchten. In diesem Fall handelt es sich aufgrund der asymmetrischen HSK-Bauweise um eine Momentenunwucht (Bild 5).

Dies hat Einfluss auf einfache modulare Werkzeugsysteme, die aus einem kurzen HSK-Adapter und einem Einzelwerkzeug bestehen. Hier werden rotationssymmetrische Adapter wie Schrumpfaufnahmen, hydraulische Dehnspannfutter oder Spannzangenfutter in Kombination mit symmetrischen Standardwerkzeugen wie Bohrern und Fräsern, sowie statisch oder dynamisch ausgewuchteten Spezialwerkzeugen eingesetzt.

HSK-Adapter der Formen A und C werden entsprechend den Vorgaben der ISO 12164-1 am HSK-Bund statisch ausgewuchtet. Der axiale Abstand zwischen den zwei unterschiedlich tiefen Mitnehmernuten (Ebene der tatsächlichen Unwucht) und der Wuchtebene am HSK-Bund erzeugt eine Momentenunwucht. Die Praxis des Auswuchtens modularer Werkzeugsysteme mit HSK-Grundadapter erzeugt somit gewisse, nicht zu beseitigende, dynamische Restunwuchten.

Obwohl sich statisches Auswuchten von HSK-Adaptoren wegen des geringen Einflusses einer Momentenunwucht auf das Werkzeug-Spindel-System in der Praxis durchgesetzt hat (siehe A.5.2), irritieren Messungen dieser dynamischen Restunwucht und führen seitens der Anwender oftmals zu Beschwerden. Der Grund für solche Unwuchten liegt jedoch ausschließlich im vorstehend beschriebenen obligatorischen Auswuchten von HSK-Adaptoren der Formen A und C.

Tabelle 3 zeigt diese Zwei-Ebenen-Unwuchten für unterschiedliche HSK-Größen. Ausgleichsebene P2 hat beispielhaft einen virtuellen Abstand von 150 mm zur Ebene P1, die sich auf Höhe der HSK-Planfläche befindet.

Der Vergleich einer anhand der Positionen der Ausgleichsebenen von Tabelle 3 gemessenen dynamischen Unwucht eines statisch ausgewuchteten HSK-Werkzeugs bzw. HSK-Werkzeugsystems ermöglicht es festzustellen, ob dies vor allem der HSK-Form A oder C geschuldet ist.

Tabelle 3 — Dynamische Unwuchten von statisch ausgewuchteten HSK-A- und HSK-C-Schäften

HSK-Größe	Statische Unwucht	Unwucht je Ebene ^b	Momentenunwucht ^a	Winkel ^c		Unwuchtmasse
D_S^d	U_{STAT}	$U_P = U_{P1} = U_{P2}$ ($L_{P1} = 0 \text{ mm}$) ($L_{P2} = 150 \text{ mm}$)	U_{CPL} ($= U_P \times 150 \text{ mm}$)	α_{P1}	α_{P2}	$m_{U,P1} = m_{U,P2}$
mm	gmm	gmm	gmm ²	°	°	g
25 ^e	0	0,2	30	0	180	0,02
32	0	0,5	75	25	205	0,03
40	0	1,5	225	15	195	0,08
50	0	5,2	780	12	192	0,21
63	0	15,9	2385	5	185	0,51
80	0	29,8	4470	7	187	0,75

Tabelle 3 (fortgesetzt)

HSK-Größe	Statische Unwucht	Unwucht je Ebene ^b	Momentenunwucht ^a	Winkel ^c		Unwuchtmasse
100	0	97,9	14685	6	186	1,96
ANMERKUNG Bestimmte Anwendungen wie das Schleifen benötigen keine Adapter mit einer durch die beiden unterschiedlichen HSK-Mitnehmernuten definierten Winkellage. Sowohl ein HSK mit zwei tiefen Nuten, als auch die HSK-Form E bieten solche rotationssymmetrischen Schäfte ohne konstruktionsbedingte dynamische Restunwuchten.						
^a Siehe 3.1.9, Bild 5 und A.5.2 zu Erläuterungen und Einzelheiten einer Momentenunwucht. ^b Dynamische Unwuchten von HSK-A (mit oder ohne Einbauraum für Datenträger) im ausgewuchteten Zustand entsprechend den Bestimmungen der HSK-Norm ISO 12164-1 ($h_1 = 0$ mm repräsentiert die HSK-Planfläche). ^c Winkelangaben: Die 0°-Lage entspricht der Schneidenposition einschneidiger Werkzeuge nach ISO 12164-1 an der niederen Mitnehmernut. Die Winkellagerorientierung ist in Uhrzeigerichtung (Blickrichtung vom Schaft in Richtung Werkzeugspitze). HSK-C: Beide Winkel α_{p1} und α_{p2} sind 0° bzw. 180° (für alle Größen) aufgrund des rotationssymmetrischen HSK-Bundes. ^d Bezieht sich auf die HSK-Nenn Durchmesser D_S (z. B. HSK-A 63 → $D_{p1} = D_{p2} = D_S = 63$ mm). ^e HSK-C 25.						

4.3 Sicherheitsbezogene Unwuchtbegrenzung (G 40) nach ISO 15641

ISO 15641 enthält die Sicherheitsanforderung „G 40“, die für rotierende Werkzeugsysteme zu berücksichtigen ist. Diese besagt, dass die Auswuchtgüte von Werkzeugen mit einer Umfangsgeschwindigkeit über 1 000 m/min aus Sicherheitsgründen nicht schlechter sein darf als G 40. Das bedeutet, dass die statische Unwucht U_{G40} nicht überschritten werden darf, wenn die Umfangsgeschwindigkeit v_{REF} am größten Werkzeugdurchmesser D_{REF} (Schneiden- oder Werkzeugkörperdurchmesser) größer ist als $v_{G40} = 1\,000$ m/min. Siehe Gleichung (35):

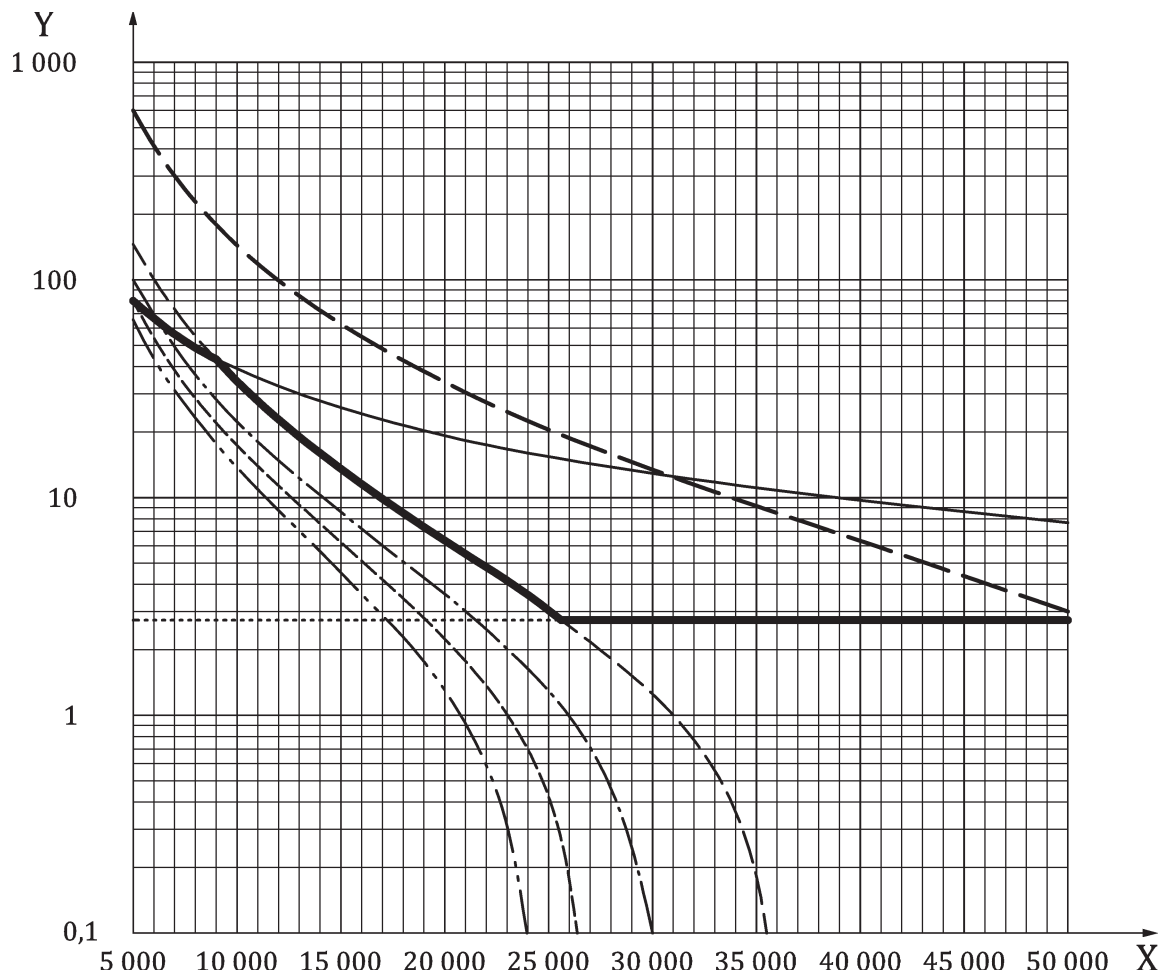
$$U_{G40} = \frac{m \times G40}{\Omega} = m \times 40 \times \frac{60}{2\pi \times n} \quad (35)$$

U_{G40} muss mit den zulässigen Unwuchten des Standard- und/oder Feinwuchtens verglichen werden. Der kleinere dieser Werte ist anzuwenden.

4.4 Graphische Darstellung der Auswuchtanforderungen

Dieses Dokument berücksichtigt in Bezug auf Werkzeuge, Spindeln und Bearbeitung zu viele Parameter, als dass Auswuchtvorgaben aus wenigen Diagrammen (ähnlich ISO 1940-1) abgeleitet werden könnten. Es ist einfacher, weniger fehleranfällig und auch komfortabler, die zulässigen Restunwuchten mit den Gleichungen dieses Dokuments durch ein Computerprogramm zu berechnen.

Die einfach-logarithmischen Graphen in Bild 13 veranschaulichen die zulässigen statischen Restunwuchten eines HSK-A63-Einzelwerkzeugs bzw. einer Komponente verschiedener Werkzeugsysteme ($m = 1\,000$ g, $L_{CG} = 60$ mm) und deren Beschränkungen (siehe Abschnitt 5).



Legende

X Drehzahl (min^{-1})

Y zulässige statische Unwucht (gmm)

	$U_{\text{STAT,PER,STND}}$		$U_{\text{STAT,PER,FINE,RES}}$
	$U_{\text{STAT,PER,FINE}}$		$U_{\text{STAT,PER,FINE,4}}$
	U_{G40}		$U_{\text{STAT,PER,FINE,5}}$
	U_{MIN}		$U_{\text{STAT,PER,FINE,6}}$

Bild 13 — Zulässige statische Restunwuchten eines HSK-63-Werkzeugs bzw. einer HSK-63-Komponente

Die horizontale Linie von U_{MIN} bildet die untere Grenze der Kurven des Standard- und Feinwuchtens. Im oberen Bereich können sie durch den U_{G40} -Graphen begrenzt sein. (siehe 4.3). Die Begrenzung durch U_{MIN}

(siehe 4.2.3) resultiert aus der Genauigkeit der Auswuchtmaschine $U_{BM,ACC}$ und der Unwucht U_{ECC} aufgrund einer radialen Einspannverlagerung e_S . Die Unwucht U_{ECC} ist nach Gleichung (10) für jede Werkzeugmasse und deren mögliche radiale Verlagerung zu berechnen (siehe Tabelle 2). Die fett gezeichnete Linie stellt die Resultierende für ein „feingewuchtetes“ Einzelwerkzeug bzw. die (feingewuchtete) Komponente eines dreiteiligen Standardwerkzeugsystems dar.

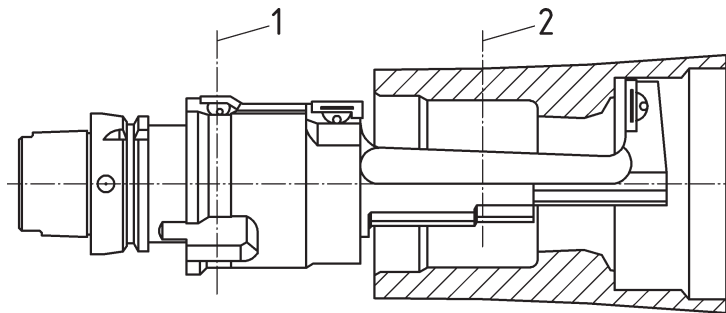
ANMERKUNG Siehe A.5.4 für ein G 40-Berechnungsbeispiel.

Restunwuchten unterhalb einer U_{MIN} -Linie [siehe Gleichung (6)] können nicht durch alleiniges Auswuchten eines Werkzeugsystems prozesssicher erreicht werden. Wäre dies jedoch notwendig, müsste das gesamte Werkzeug-Spindel-System ausgewuchtet werden, um die Unwucht U_{ECC} aufgrund radialer Verlagerung zu beseitigen. In diesem Fall werden die Maschinenspindel und das Werkzeugsystem als monolithisch betrachtet, und die Unwucht kann bestenfalls auf $U_{MIN} \geq U_{BM,MIN}$ reduziert werden.

4.5 Sonderwerkzeuge mit asymmetrischen Grundkörpern

Fertigungsvorgänge, die asymmetrische Werkzeugkörper erfordern, führen zu großen Unwuchten, die mitunter nicht beseitigt werden können.

Bild 14 zeigt ein Spezialwerkzeug, das eine zweistufige Aufbohroperation mit der Rückzugsbearbeitung eines vergrößerten Durchmessers durch eine einzelne Schneide kombiniert.



Legende

- 1 Ebene P1
- 2 Ebene P2

Bild 14 — Sonderwerkzeug für Vorwärtsbearbeitung und einstufige Rückzugsbearbeitung

Die Form des Werkzeugkörpers basiert auf dem radialen Versatz des Werkzeugs zum Einfahren in die Bohrung und erlaubt daher keinen Massenausgleich gegenüber der exzentrischen Schneide. Das Abtragen von ausreichend Material auf der Seite der Schneide ist aus stabilitätsbedingten Gründen ebenfalls nicht möglich. Die Folge ist, dass diese Art von Werkzeugen oftmals nicht so ausgewuchtet werden kann, dass die Anforderungen dieses Dokuments erfüllt werden können.

Zur Optimierung der Bedingungen, sowohl für den Bearbeitungsprozess, als auch für die Spindellager, wird empfohlen:

- die Restunwucht(en) so weit wie möglich zu reduzieren;
- die Maschine mit den stabilsten Spindellagern auszuwählen;
- die Lagerbelastung durch die Unwucht zu kontrollieren;
- die Maschinenparameter anzupassen, falls der Prozess dies zulässt;

— Dämpfungsmaßnahmen anzuwenden, um unwuchtbedingte Schwingungen auf ein Mindestmaß zu verringern.

ANMERKUNG In diesen besonderen Fällen unwuchtbehafteter Spezialwerkzeuge besteht das Hauptziel in der Fertigung des Werkstücks. Die Ermittlung der besten Bearbeitungsparameter dient zwar in erster Linie der Optimierung des Bearbeitungsprozesses, verringert aber in der Regel auch die dynamische Belastung der Spindellager.

5 Auswuchten von Werkzeugsystemen

5.1 Allgemeines

Werkzeugsysteme bestehen aus zwei oder mehr Komponenten wie Adaptern, Verlängerungen, Reduzierungen und Zerspanungswerkzeugen. Der Großteil der Werkzeugsysteme besteht aus zwei oder drei Komponenten, die entweder alle Standardkomponenten sind (siehe Bild 15, G und I), oder mindestens einen Standardadapter und bis zu zwei weitere Komponenten, wie einen Zwischenadapter und ein Einzelwerkzeug (siehe Bild 15, H und K), besitzen. Standard-Einzelwerkzeuge wie Bohrer und Fräser, die üblicherweise in Schrumpf- oder Spannzangenaufnahmen eingespannt sind, werden für die Gesamtzahl der Komponenten k_{SYS} nicht mitgezählt (siehe Anmerkung 1). „Standardwerkzeugsysteme“ sind dreiteilige Werkzeugsysteme und bilden die Regel für das Auswuchten von Komponenten (z. B. sogenannten „Katalogkomponenten“). Siehe Gleichung (36):

$$k_{\text{SYS,STND}} = 3 \quad (36)$$

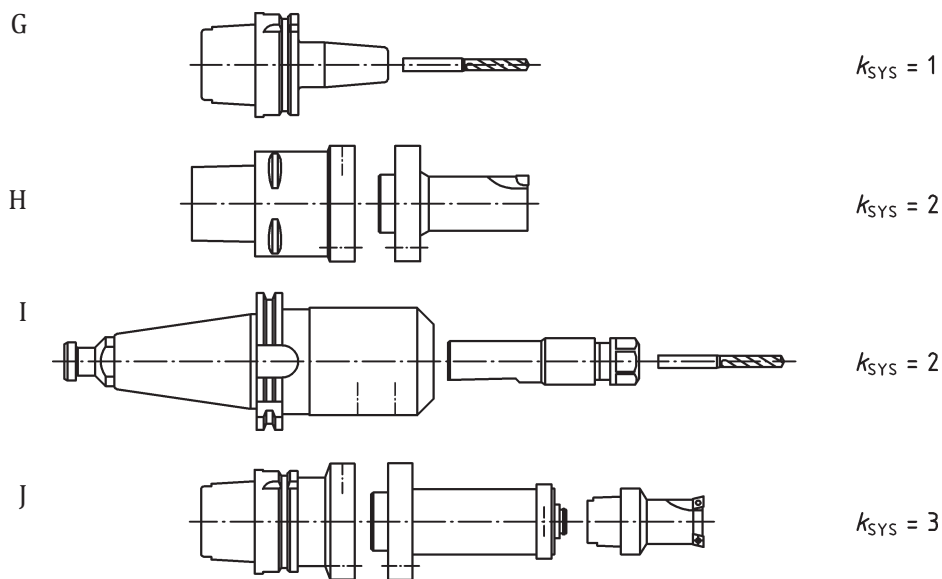


Bild 15 — Beispiele gebräuchlicher Standardwerkzeugsysteme ($k_{\text{SYS}} \leq 3$)

Werkzeugsystem „G“ muss als Einzelwerkzeug angesehen werden ($k_{\text{SYS}} = 1$). Die beteiligte HSK-Schrumpfaufnahme ist jedoch eine Werkzeugsystemkomponente und muss nach Gleichung (37) ausgewuchtet werden. Dadurch könnte dieses Werkzeugsystem „G“ auch als „modulares Einzelwerkzeug“ des Werkzeugsystems „J“ verwendet werden.

Sonderwerkzeugsysteme gelten als Baugruppen aus vier oder mehr Komponenten. Unabhängig von der Anzahl der Komponenten können alle modularen Werkzeugsysteme entsprechend der Vorgehensweise in 5.2 behandelt werden.

ANMERKUNG 1 Symmetrische Zerspanungswerkzeuge (z. B. monolithische Werkzeuge wie Bohrer, Fräser usw.) mit weniger als 20 % einer Werkzeugsystemmasse müssen wegen ihres geringen Einflusses auf den Gesamtwuchtzustand des Werkzeugspindelsystems nicht ausgewuchtet werden. Diese Werkzeuge werden daher bei der Zählung der Bauteile nicht berücksichtigt (siehe Bild 15).

Der grundlegende Ansatz dieses Dokumentes besteht darin, die unwuchtbedingte dynamische Belastung der Lager, die nur von Fliehkräften abhängig ist, auf maximal 1 % der dynamischen Tragzahl C_{DYN} zu begrenzen (siehe 4.2). Die Werkzeugmasse hat keinen Einfluss auf den grundlegenden Unwuchtwert $U_{\text{STAT},1\%}$. Die zulässige statische Unwucht $U_{\text{STAT,PER}}$ ist aufgrund der Subtraktion von U_{MIN} jedoch von der Werkzeugmasse abhängig [siehe Gleichung (10)]. Die mögliche Unwucht U_{ECC} ist Teil von U_{MIN} und wird durch radiale Verlagerung hervorgerufen. Somit erzeugen schwerere Werkzeuge aufgrund einer möglichen radialen Verlagerung höhere Fliehkräfte und müssen daher besser ausgewuchtet werden als leichte Werkzeuge, die mit der gleichen Drehzahl rotieren.

ANMERKUNG 2 ISO 1940-1:2003, 6.2.3 erlaubt bei zunehmender Werkzeugmasse eine proportional höhere Unwucht.

Es ist wichtig zu beachten, dass dann auch modulare Werkzeugsysteme die gleichen Auswuchtanforderungen erfüllen müssen wie monolithische Werkzeuge ähnlicher Konstruktion bei gleicher Masse und Drehzahl. Ihre Werkzeugkomponenten erfordern daher eine entsprechend bessere Wuchtgüte, um die Wuchtanforderungen an Werkzeugsysteme zu erfüllen. Das Auswuchten ein und desselben Werkzeugs als Werkzeugsystemkomponente anstatt als Einzelwerkzeug reduziert daher $U_{\text{STAT},1\%}$, weil die Anzahl der Komponenten k_{SYS} berücksichtigt werden muss (siehe A.4.3 für Einzelheiten).

Die Kurven in Bild 13 beschreiben diese Situation für ein HSK-63-Einzelwerkzeug und für Komponenten von Werkzeugsystemen. Ein feingewuchtetes Einzelwerkzeug kann mit $24\,500\text{ min}^{-1}$ laufen, um die Kriterien des Feinwuchtens zu erfüllen, bevor U_{MIN} unterschritten wird. Die Kriterien für eine Werkzeugsystemkomponente sind dieselben. Ein Einzelwerkzeug, das jedoch in Standardqualität ausgewuchtet ist, vergrößert seinen Drehzahlbereich theoretisch auf fast $50\,000\text{ min}^{-1}$.

Schnittstellentoleranzen zwischen modularen Komponenten können zu radialen Verlagerungen und zusätzlichen Unwuchten eines Werkzeugsystems führen. Gerade radial und/oder im Winkel einstellbare Komponenten sollten daher bei der Montage eines Werkzeugsystems sorgfältig ausgerichtet werden.

ANMERKUNG 3 Die Anforderungen von Abschnitt 5 gelten für statisches und dynamisches Auswuchten. Das dynamische Auswuchten von Werkzeugsystemen kann jedoch komplex sein und erfordert individuelle Maßnahmen, da statisch ausgewuchtete Komponenten zu einer gewissen unvorhersehbaren dynamischen Restunwucht führen (siehe 5.10). Die folgenden Regeln für Komponenten modularer Systeme gelten zwar für das statische Auswuchten, sie können jedoch nach 4.2.5 und B.3 auf das dynamische Auswuchten übertragen werden.

Adapter werden als Bestandteile von Standardwerkzeugsystemen gesehen und müssen dementsprechend ausgewuchtet werden. Einzelwerkzeuge mit spindelgängigen Aufnahmen (z. B. 7/24-Kegel oder HSK) werden sehr wahrscheinlich separat ausgewuchtet und sollten vor ihrer Verwendung in einem Werkzeugsystem überprüft werden.

ANMERKUNG 4 Alle Ansätze von Abschnitt 5 und die Berechnungsbeispiele in Anhang B gehen vom ungünstigsten Fall (Worst-Case-Szenario) aus, dass die Unwuchtvektoren aller Komponenten die gleiche Ausrichtung ($\alpha = 0$) haben.

Unterschiedliche axiale Positionen von Komponenten innerhalb eines modularen Werkzeugsystems resultieren in unterschiedlichen Hebelarmen ihrer Schwerpunkte. Nur die erste Komponente, die direkt in die Maschinenspindel eingespannt wird, behält ihren Abstand $L_{\text{CG},i}$ von der Spindelreferenzebene zu ihrem Schwerpunkt. Die Hebelarme aller anderen Komponenten werden in Richtung des vorderen Endes eines Werkzeugsystems verlängert (siehe Bild 16).

Sich verändernde Hebelarme bedeuten jedoch unterschiedliche Anforderungen an die zulässige Unwucht ein und derselben Komponente. Dies wäre aber nicht praktikabel, da Komponenten innerhalb eines Werkzeugsystems flexibel einsetzbar sein müssen. In Gleichung (37) wird diese Problematik gelöst, A.4.3 zeigt die ausführliche Herleitung.

5.2 Auswuchten von Werkzeugsystemkomponenten

Folgende Aspekte werden betrachtet:

- Die zugrundeliegende, zulässige statische Unwucht $U_{\text{STAT},1\%}$ ist von der Masse unabhängig [siehe Gleichung (3)]. Deshalb wären die zulässigen statischen Unwuchten jeder Einzelkomponente und die eines daraus zusammengebauten Standard-Werkzeug-Systems bei gleicher Drehzahl identisch. In der Folge könnten sich die einzelnen statischen Unwuchten aller Komponenten zur statischen Unwucht dieses Werkzeugsystems zum dreifachen Wert aufsummieren, wenn alle Einzelunwuchten dieselbe Ausrichtung aufwiesen (siehe 5.4). Die Anzahl der Werkzeugsystemkomponenten ist daher ein wichtiges Kriterium.
- Die endgültigen axialen Positionen von „Katalogkomponenten“, insbesondere von Adaptern, in Werkzeugsystemen sind unbekannt. Dadurch ändert sich jedoch der „aktive“ Hebelarm des jeweiligen Schwerpunkts. Der Hebel wird größer, wenn sich eine Komponente an der zweiten oder dritten Position in Richtung des vorderen Endes eines Werkzeugsystems befindet (siehe Bild 16). Dementsprechend variiert die Auswirkung einer Komponentenunwucht je nach Position innerhalb eines Werkzeugsystems. Sein individueller Aufbau sollte jedoch keinen Einfluss auf die zulässige Unwucht eines Werkzeugsystems haben.

Komponenten, die an einer beliebigen Position des Werkzeugsystems angeordnet werden können, erfordern daher eine bessere Auswuchtqualität im Vergleich zu Komponenten an der ersten Position, d. h. direkt in der Maschinenspindel eingespannt. Sie werden wie bei einem Einzelwerkzeug durch Gleichung (8) berechnet.

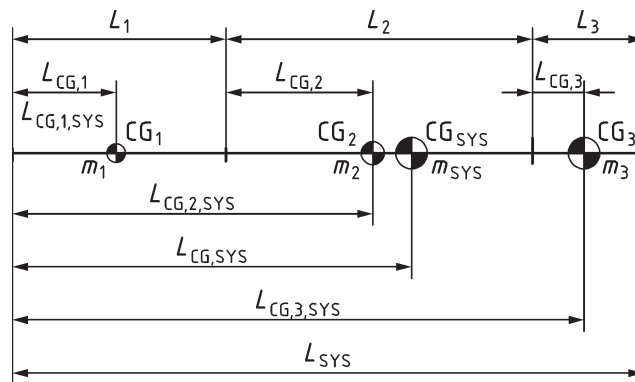


Bild 16 — Schwerpunkte $L_{\text{CG},i,\text{SYS}}$ in einem Standardwerkzeugsystem

Die Herleitung von Gleichung (37) enthält beide vorstehend genannten Kriterien (siehe A.4.3), und führt zu dem Ergebnis, dass alle drei Komponenten eines Standardwerkzeugsystems in der Qualität „fine“ gewuchtet werden sollten, d. h. $f_{\text{BAL},\text{FINE}} = 0,2$.

Der Faktor $f_{\text{SYS},k}$ ermöglicht die Berechnung der zulässigen Unwuchten von Komponenten in Sonderwerkzeugsystemen aus vier und mehr Komponenten.

$$U_{\text{STAT},i,\text{SYS},\text{PER}} = 9,12 \times 10^5 \times f_{\text{BAL},\text{FINE}} \times f_{\text{SYS},k} \times \frac{C_{\text{DYN}}}{n^2} \times \left(\frac{L_{\text{B}}}{L_{\text{B}} + a_{\text{M}} + L_{\text{CG},i}} \right) - (U_{\text{BM},\text{ACC}} + m_i \times e_{\text{S},i}) \quad (37)$$

Die folgenden Punkte sind beim Auswuchten von Komponenten und Werkzeugsystemen von Bedeutung:

- Die Drehzahl eines Werkzeugsystems n_{SYS} sollte nicht höher sein als die niedrigste zulässige Drehzahl n_i der enthaltenen Komponenten.
- Falls Komponenten speziell für ein bestimmtes Werkzeugsystem ausgewuchtet werden, sollten die Drehzahlen n_i der Komponenten nicht niedriger als die Drehzahl n_{SYS} des Werkzeugsystems sein.

- Gut ausgerichtete Werkzeugsysteme, die aus „fine“ ausgewuchteten Komponenten bestehen, erfüllen die Standardqualität des statischen Auswuchtens $f_{\text{BAL,STND}} = 0,8$.

Sonderwerkzeugsysteme sind aus vier oder mehr Komponenten zusammengesetzt. Tabelle 4 zeigt Werte von $f_{\text{SYS,k}}$ für Systeme aus bis zu sechs Komponenten.

Tabelle 4 — Parameter k_{SYS} für Sonderwerkzeugsysteme aus bis zu 6 Komponenten

Werkzeugsystemkomponenten k_{SYS}	bis zu 3	4	5	6
$f_{\text{SYS,k}}$	1,00	0,70	0,55	0,45

Es wird stets empfohlen und ist häufig auch erforderlich, die Unwucht von Werkzeugsystemen nach deren Montage nochmals zu überprüfen. Nachträglicher Materialabtrag beim Auswuchten eines zusammengebauten Werkzeugsystems bedeutet aber, dass es wie ein monolithisches Werkzeug behandelt werden muss. Auch nach jeder Demontage und jedem erneuten Zusammenbau eines Werkzeugsystems – selbst in derselben Konfiguration – ist ein erneuter Auswuchtvorgang erforderlich.

ANMERKUNG 1 Radiale Verlagerungen und axiale Winkelausrichtungen von Komponenten innerhalb der Werkzeugsysteme hängen von Schaftform und Art der Montage ab. Sie können sich zum vorderen Ende eines Werkzeugsystems hin summieren und zu einer Erhöhung der „tatsächlichen“ statischen und/oder dynamischen Unwucht führen. Nicht einstellbare Schäfte, wie in Tabelle 2 angegeben, weisen radiale Verlagerungen mit willkürlicher Winkellage auf. Deshalb wird angenommen, dass sich radiale Verlagerungen solcher Schaftschnittstellen wie HSK, Kegel 7/24 usw. in einem Werkzeugsystem nicht summieren. Bei der Berechnung der zulässigen statischen Unwucht wird daher die mögliche radiale Verlagerung jeder Komponente nur einmal berücksichtigt. Eine sorgfältige Montage minimiert radiale Verlagerungen. Radial und im Winkel einstellbare Schnittstellen können wie ein HSK behandelt werden.

ANMERKUNG 2 Siehe 5.10 für weitere Informationen über den Aufbau und das Auswuchten von Werkzeugsystemen.

5.3 Einfluss der Winkellage von Komponentenunwuchten

Restunwuchten von Komponenten weisen innerhalb von modularen Werkzeugsystemen zufällige, radiale Winkellagen auf, wodurch ein gewisser Ausgleich erzielt wird. Dieser statistische Effekt erlaubt eine geringfügige Erhöhung der zulässigen Komponentenunwuchten $U_{\text{STAT,PER}}$ nach Gleichung (37), ohne die zulässige Unwucht des Werkzeugsystems $U_{\text{STAT,SYS,PER}}$ zu überschreiten, die mit dem Hebel des Systemschwerpunkts $L_{\text{CG,SYS}}$ berechnet wird. Die Summe der zulässigen Komponentenunwuchten kann bis zu 15 % größer sein als die für ein zusammengebautes Werkzeugsystem selbst berechnete zulässige Unwucht.

5.4 Einfluss von Einspannverlagerungen

Ein Zusammenbau von Werkzeugsystemkomponenten kann sowohl radiale als auch winkelbezogene Einspannverlagerungen aufweisen. Bild 17 zeigt die verschiedenen Arten und deren mögliche Kombinationen.

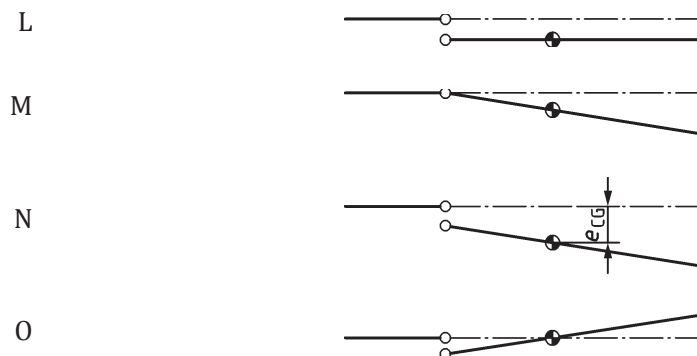


Bild 17 — Arten und Kombinationen von radialen und winkelbezogenen Verlagerungen

Das Ausmaß dieser Verlagerungen hängt von den Schaftformen ab und variiert innerhalb deren Bereichen willkürlich.

Der Einfluss von axialen Winkelfehlern auf die Unwucht hängt nicht nur von der Masse der Komponenten ab, sondern auch von deren Länge, d. h. von der axialen Position des Schwerpunkts. Durch das Messen der Rundlaufgenauigkeit am Schaft und im Schwerpunkt einer Komponente kann die statische Unwucht in Zusammenhang mit einem axialen Winkelfehler bewertet werden.

Radiale Einspannungsgenauigkeiten von nicht einstellbaren Schäften treten hinsichtlich ihrer radialen Winkel-lage (siehe Bild 18, Fall P) im Bereich der möglichen Rundlaufgenauigkeit $e_{s,i}$ willkürlich auf und führen zu den Unwuchten $U_{ECC,i,SYS}$. Die Fälle M, N und O stellen Situationen mit radialen und/oder winkelbezogenen Einspannverlagerungen in einem Werkzeugsystem dar.

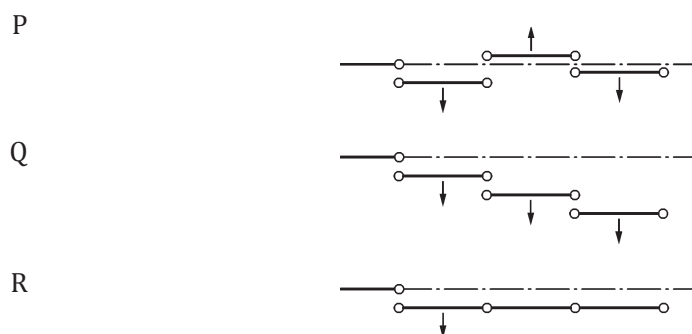


Bild 18 — Radiale Verlagerungen: zufällig (P) oder richtungsgleich (Q, R)

Fall Q stellt den ungünstigsten Fall radialer Verlagerungen dar, da alle Komponentenunwuchten in dieselbe Richtung wirken und sich zum vorderen Ende hin summieren. Dies passiert dann, wenn zylindrische Schäfte (z. B. Weldon oder Whistle Notch) durch Schrauben radial gespannt werden, und alle Spannschrauben in Reihe ausgerichtet sind.

Der Fall R zeigt ein gut ausgerichtetes Werkzeugsystem mit einer radialen Verlagerung des Grundadapters relativ zur Maschinenspindel. Dies bedeutet, dass alle Komponenten um den gleichen Betrag $e_{S,1}$ radial versetzt sind. Da dies in der Praxis durchaus häufig vorkommen kann, wird die zulässige Restunwucht von Werkzeugsystemkomponenten wie bei Einzelwerkzeugen durch Subtrahieren von $U_{ECC,i} = m_i \times e_{S,i}$ in Gleichung (37) berücksichtigt. $U_{ECC,i}$ ist Bestandteil von U_{MIN} [siehe Gleichung (10)].

Die größtmögliche Unwucht einer Komponente $U_{ECC,i,MAX}$ innerhalb des zusammengebauten Systems hängt von ihrer maximal möglichen radialen Verlagerung ab wie in Gleichung (38) dargestellt

$$e_{k,SYS,MAX} = \sum_{i=1}^k e_{S,i} \quad (38)$$

und kann mit Gleichung (39) berechnet werden

$$U_{ECC,k,MAX} = e_{k,SYS,MAX} \times m_k \quad (39)$$

Gleichung (39) liefert einen Hinweis darauf, dass Komponentenunwuchten innerhalb eines Werkzeugsystems aufgrund von Ungenauigkeiten beim Einspannen noch größer sein können als die zulässige Unwucht nach Gleichung (8). Es ist also offensichtlich, dass Unwuchten aufgrund radialer Verlagerungen grundsätzlich nicht vorab durch „besseres Auswuchten“ kompensiert werden können. Als Konsequenz sollten zusammengebaute Werkzeugsysteme abschließend nochmals hinsichtlich Rundlaufungenauigkeiten und Unwucht geprüft werden.

Während für die gebräuchlichsten Schäfte wie HSK und 7/24-Kegel (siehe Tabelle 2) Höchstwerte für rein radiale Verlagerungen (siehe Bild 17, Fall L) bekannt sind, können tatsächliche Radial- und Winkelfehler nicht angegeben werden, da deren Beträge und Ausrichtungen zufällig auftreten (siehe Beispielfälle M bis O in Bild 17).

In Bezug auf radialen und axialen Winkelversatz ermöglichen einstellbare Adapter die Minimierung beider Rundlauffehlerarten bei sorgfältiger Montage.

ANMERKUNG Nicht einstellbare Rundlauffehler können auch zwischen den beiden Seiten ein und desselben Zwischenadapters auftreten, z. B. aufgrund von Fertigungstoleranzen.

5.5 Integration von nach ISO 1940-1 ausgewuchteten Werkzeugsystemkomponenten

Werkzeugsystemkomponenten, die nach ISO 1940-1 ausgewuchtet wurden, können auch in Werkzeugsystemen nach diesem Dokument verwendet zu werden.

Die Auswuchtparameter nach ISO 1940-1 sind die Auswuchtgüte $G(x)$, z. B. G 6,3, die Drehzahl n und die Masse m einer Komponente.

$$U_{G(x),PER} = \frac{G(x) \times m \times 60}{2\pi \times n} \quad (40)$$

Diese zulässige Unwucht $U_{G(x),PER}$ ist dann mit der zulässigen Unwucht einer Komponente $U_{STAT,i,SYS,PER}$ nach Gleichung (37) zu vergleichen.

5.6 Berechnung der zulässigen Drehzahl in Abhängigkeit einer tatsächlichen Unwucht

Der tatsächliche (z. B. gemessene) Wert einer statischen Unwucht $U_{STAT,ACT}$ kann auch zur Berechnung der höchstzulässigen Drehzahl $n_{MAX,PER}$ mithilfe von Gleichung (41) verwendet werden.

$$n_{MAX,PER} \leq \sqrt{\frac{f_{BAL} \times 9,12 \times 10^5 \times C_{DYN}}{U_{STAT,ACT} \times \left(\frac{L_B + a_M + L_{CG}}{L_B} \right)}} \quad (41)$$

ANMERKUNG Die Unwucht einer radialen Verlagerung ist Teil der gemessenen Unwucht $U_{\text{STAT,ACT}}$. Ist $U_{\text{STAT,ACT}}$ größer als $U_{\text{STAT,PER}}$, dann ist nach Gleichung (41) eine Verringerung der zulässigen Drehzahl die Folge. Belassen der Drehzahl bei $n_{\text{MAX,PER}}$ würde zu einer entsprechenden Erhöhung der Spindellast führen (z. B. führt ein doppelter Unwuchtwert $U_{\text{STAT,ACT}} = 2 \times U_{\text{STAT,PER}}$ zu einer Verdopplung der Spindellagerlast [2 % C_{DYN}]). Es obliegt dem Anwender, zu entscheiden, ob eine höhere Spindellast für einen bestimmten Bearbeitungszeitraum ausnahmsweise akzeptiert werden kann.

5.7 Bestimmung und Berechnung der axialen Lage eines Massenschwerpunkts

5.7.1 Experimentelle Bestimmung des Schwerpunkts

Die Bestimmung der Lage des Massenschwerpunkts CG ist grundsätzlich erforderlich, um die zulässigen Restunwuchten von Werkzeugen, Komponenten und Werkzeugsystemen nach diesem Dokument zu berechnen. Am zweckmäßigsten ist es, den Schwerpunkt bereits in der Zeichnung anzugeben, da dreidimensionale Konstruktionssysteme heutzutage weitverbreitet sind.

Ist diese Information jedoch nicht verfügbar, kann sie vor dem Auswuchten auf einfache Weise ermittelt werden, indem das Gleichgewicht und damit der Schwerpunkt in einem Versuch bestimmt wird (siehe Bild 19).

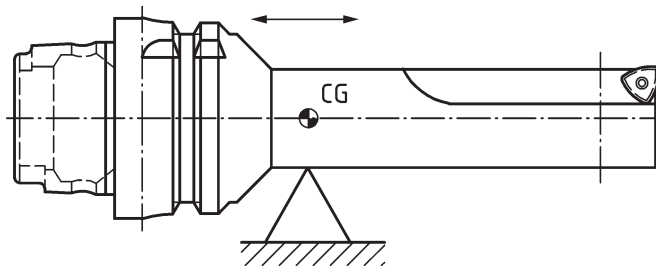


Bild 19 — Das Gleichgewicht bestimmt den Schwerpunkt einer Komponente bzw. eines Werkzeugsystems

Diese empirische Methode funktioniert bei Werkzeugen, Komponenten und zusammengebauten Werkzeugsystemen.

5.7.2 zeigt die Alternative zur Berechnung der Lage des Schwerpunkts eines Werkzeugsystems aus den einzelnen Schwerpunkten seiner Komponenten.

5.7.2 Berechnung des Schwerpunkts eines modularen Werkzeugsystems

Die Berechnung der zulässigen statischen Unwucht eines zusammengebauten Werkzeugsystems erfordert die Lage seines Schwerpunkts $L_{\text{CG,SYS,k}}$. Bild 16 zeigt die relevanten Parameter eines Standardwerkzeugsystems aus drei Komponenten.

Die zwei Gleichungen für das Gleichgewicht der CG-Momente [Gleichung (42)]:

$$m_1 \times L_{\text{CG},1} + m_2 \times (L_1 + L_{\text{CG},2}) + m_3 \times (L_1 + L_2 + L_{\text{CG},3}) = m_{\text{SYS}} \times L_{\text{CG,SYS},3} \quad (42)$$

und der Masse des Werkzeugsystems [Gleichung (43)]:

$$m_{\text{SYS}} = m_1 + m_2 + m_3 \quad (43)$$

ergeben die Lage des Systemschwerpunkts $L_{\text{CG,SYS},3}$, wie in Gleichung (44) angegeben:

$$L_{\text{CG,SYS},3} = \frac{m_1 \times L_{\text{CG},1} + m_2 \times (L_1 + L_{\text{CG},2}) + m_3 \times (L_1 + L_2 + L_{\text{CG},3})}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (44)$$

- Entwurf -

Gleichung (45) gibt den Schwerpunkt eines Werkzeugsystems aus k Komponenten an

$$L_{CG,SYS,k} = \frac{m_1 \times L_{CG,1} + m_2 \times (L_1 + L_{CG,2}) + \dots + m_{k-1} \times (L_1 + L_2 + \dots + L_{k-2} + L_{CG,k-1}) + m_k \times (L_1 + L_2 + \dots + L_{k-1} + L_{CG,k})}{m_1 + m_2 + \dots + m_{k-1} + m_k} \quad (45)$$

5.8 Auswuchten von Werkzeugen und Komponenten mit alternativen Schnittstellen

Zwischenkomponenten von Werkzeugsystemen haben manchmal andere Schnittstellen als in Tabelle 2 aufgeführt. Beispiele sind in Bild 1 und Bild 15 dargestellt. Relativ häufig verwendete Schnittstellen sind radial oder radial und winkelbezogen einstellbare Flanschverbindungen, mit denen beide Arten von Rundlauf Fehlern minimiert werden können. Dies ist besonders für lange Bauteile von Bedeutung.

Diese nicht aufgeführten Schäfte können in einer Norm nicht einzeln behandelt werden. Für diese Fälle enthält Tabelle 2 die beiden Parameter m_{MIN} und m_{MAX} , die als Referenzmassen dienen sollen, um auch solche Komponenten in geeignete Spindelgrößen klassifizieren zu können. Die Massenangaben angrenzender Spindelgrößen überschneiden sich. Im Zweifelsfall empfiehlt es sich, vorsichtshalber die Parameter der jeweils kleineren Spindelgröße zu wählen.

Es ist außerdem möglich, eine Werkzeugkomponente individuell für eine bestimmte Spindelgröße auszuwuchten, die nicht unbedingt den aufgelisteten Referenzmassen oder anderen Parametern entsprechen muss.

5.9 HSK-Adapter mit rotationssymmetrischen Werkzeugen

Bild 20 zeigt zwei einfache modulare HSK-Werkzeugsysteme gleicher Gesamtlänge, die unterschiedliche Voraussetzungen für die möglichen Auswuchtarten bieten. Die beiden unterschiedlich langen HSK-A 63-Adapter mit Spannzangen aufnahmen (oder anderen wie Schrumpfaufnahmen und Hydrodehnspannfutter) nehmen die gleichen rotationssymmetrischen Werkzeuge (z. B. Hartmetallbohrer oder Fräser) auf. Die Gesamtlänge ist bei beiden Werkzeugsystemen gleich.

Der kürzere, 90 mm lange Adapter „S“ hat ein $L_{\text{BL}}/D_{\text{S}}$ -Verhältnis von $70/63 = 1,11 < 2,2$ mit der Folge, dass statisches Auswuchten ausreicht. Die 180 mm lange Version „T“ weist $R_{\text{L/D}} = L_{\text{BL}}/D_{\text{S}} = 160/63 = 2,5 > 2,2$ auf und erfüllt damit theoretisch die Anforderungen für das dynamische Auswuchten. In der Praxis werden beide Beispiele jedoch am HSK-Bund entsprechend den Bestimmungen der ISO 12164-1 statisch ausgewuchtet. Ihre dynamischen Unwuchten sind absolut gleich, was ausschließlich auf das statische Auswuchten des HSK zurückzuführen ist (siehe auch Tabelle 3). Somit kann ein längerer Adapter zwar dynamisches Auswuchten ermöglichen, es ist jedoch nicht zwingend erforderlich und/oder sinnvoll.

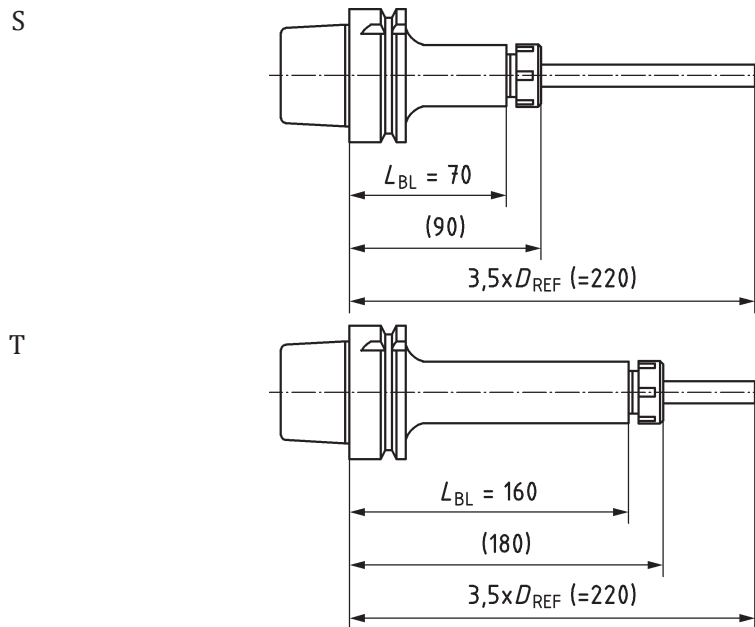


Bild 20 — HSK-A 63-Spannzangenaufnahme mit unterschiedlichen Auswuchtlängen L_{BL}

5.10 Hinweise zum Aufbau und Auswuchten von Werkzeugsystemen

- Die Konstruktion und/oder Größe vieler Einzelkomponenten erlaubt oft nur statisches Auswuchten. Der Zusammenbau eines modularen Werkzeugsystems führt dann zu Vektoradditionen sowohl statischer als auch dynamischer Komponentenunwuchten. Dies verändert sowohl den statischen als auch dynamischen Unwuchtzustand durch Kompensation oder Verstärkung. Infolgedessen bleibt in der Regel eine gewisse dynamische Restunwucht bestehen.
- Radiale und/oder winkelbezogene Spannfehler aufgrund nicht einstellbarer Schnittstellen führen zu zusätzlichen statischen und dynamischen Unwuchten. Dies kann nur durch einstellbare Aufnahmen, wie z. B. Flanschverbindungen, vermieden werden. In allen anderen Fällen (HSK, 7/24-Kegel usw.) treten diese Spannfehler zufällig auf.
- Die tatsächlich resultierenden Verlagerungen von Komponenten mit nicht einstellbaren Schnittstellen sind nicht vorhersehbar. Eine Kompensation der größtmöglichen radialen Einspannverlagerung (siehe Tabelle 2) wird bei der Berechnung der zulässigen statischen Restunwucht berücksichtigt, indem jeweils U_{ECC} subtrahiert wird [siehe Gleichung (8) und Gleichung (10)].
- Insbesondere bei größeren Verlagerungen und/oder höheren Komponentenmassen kann die Unwucht $U_{ECC,MAX}$ die Unwucht $U_{STAT,1\%}$ leicht überschreiten. Dies führt dann sogar zu negativen zulässigen Unwuchten $U_{STAT,PER}$, insbesondere bei Gleichung (37). U_{MIN} bleibt jedoch der kleinstmögliche Wert.
- Radiale Einspannverlagerungen $e_{S,i}$ von Komponenten können sich in Richtung des vorderen Werkzeugendes aufsummieren (siehe Bild 18, Fall Q), wodurch die Unwuchten sowohl der montierten Komponenten, als auch des Werkzeugsystems erhöht werden. Die Unwucht eines Werkzeugsystems aus feingewuchteten Komponenten erfüllt in der Regel die Anforderungen des Standardwuchtens.
- Unwuchten aufgrund montagebedingter radialer Verlagerungen sollten jedoch nicht nur aus Sicht der Spindel-Lebensdauer, sondern auch wegen der möglichen negativen Einflüsse auf die Bearbeitung bzw. die Werkstückqualität vermieden werden.

- g) Bei der Berechnung der Unwucht eines modularen Werkzeugsystems auf der Grundlage zulässiger Restunwuchten der Komponenten muss berücksichtigt werden, dass trotz sorgfältiger Montage gewisse Rundlauffehler (z. B. aufgrund nicht einstellbarer Schnittstellen) auftreten. Die tatsächlich verbleibenden statischen und dynamischen Unwuchten des Systems müssen abschließend mithilfe einer Auswuchtmaschine gemessen werden. Die Optimierung der Rundlaufsituation und das Nachwuchten des zusammengebauten Werkzeugsystems sind dann ggf. die einzig verbleibenden Verbesserungsmöglichkeiten.
- h) Die geplanten Betriebsparameter eines Werkzeugsystems beschreiben die Mindestanforderungen für die Auswahl seiner Komponenten. In den Dokumentationen (Katalog, Handbuch usw.) der Hersteller und Lieferanten von modularen Komponenten müssen alle Parameter aufgelistet werden, die erforderlich sind, um geeignete Komponenten entsprechend den Bestimmungen dieses Dokuments zu identifizieren (siehe Abschnitt 6).
- i) Modulare Werkzeugsysteme, welche die Anforderungen an das Feinwuchten ohne Nachwuchten erfüllen sollen, dürfen keine Spannfehler aufweisen und nur bis zur Drehzahl ihrer „schlechtesten“ Komponente eingesetzt werden.
- j) Eine berechnete Summe von Komponentenunwuchten legt einen idealen Aufbau eines Werkzeugsystems ohne sich aufsummierende Rundlauffehler zugrunde.
- k) Bei anspruchsvollen Betriebsparametern (z. B. hohen Drehzahlen für die Fertigbearbeitung) neigen bereits die berechneten, zulässigen Unwuchten der Komponenten und folglich auch die eines zugehörigen Werkzeugsystems dazu, U_{MIN} zu unterschreiten (siehe 4.2.3). Die Winkellagen von U_{MIN} hängen von willkürlich variierenden Einspannverlagerungen ab, was die damit verbundene Unwuchtsituation eines Werkzeugsystems unvorhersehbar macht. Es wird bei höchsten Anforderungen empfohlen, entweder monolithische Werkzeuge oder hochpräzise Werkzeugsysteme mit einstellbaren Schnittstellen zu verwenden.
- l) Der Zusammenbau ausgewuchteter Einzelkomponenten zu einem Werkzeugsystem kann aufgrund seiner Gesamtlänge auch ein dynamisches Auswuchten des zusammengebauten Werkzeugsystems erforderlich machen (siehe 4.2.4). Es ist dann häufig notwendig, dass bisherige, statische Auswuchtmaßnahmen teilweise kompensiert oder sogar rückgängig gemacht werden müssen. Es kann daher sinnvoll sein, nicht ausgewuchtete Einzelkomponenten zu verwenden und das zusammengebaute modulare Werkzeugsystem als „quasi-monolithisches“ Werkzeug dynamisch auszuwuchten.
- m) Derart dynamisch ausgewuchtete, zusammengebaute modulare Werkzeugsysteme sind als monolithische Werkzeuge zu betrachten. Komponenten, die durch dynamisches Auswuchten eines solchen Werkzeugsystems dabei modifiziert wurden, müssen erneut ausgewuchtet werden, wenn sie in einer neuen Konfiguration zusammengesetzt werden sollen.
- n) Einfache Werkzeugsysteme, bestehend aus statisch ausgewuchteten Werkzeugadaptern (z. B. „Katalogprodukten“ wie Schrumpf- oder Spannzangenaufnahmen) und nicht ausgewuchteten, hauptsächlich rotations-symmetrischen Einzelwerkzeugen (z. B. Bohrer oder Fräser), erfordern kein Nachwuchten. Gleiches gilt für die Kombination solcher Adapter mit statisch oder dynamisch ausgewuchteten Sonderwerkzeugen.

6 Datendarstellung und Datenaustausch

In der bisherigen Auswuchtpraxis wird die ISO 1940-1 seit Langem ohne entsprechende Angaben auf dem Werkzeuggrundkörper angewandt. Zur Vermeidung von Missverständnissen muss auf dem Grundkörper von Werkzeugsystemen, Werkzeugen oder Komponenten erkennbar sein, dass nach diesem Dokument ausgewuchtet wurde.

Die zulässigen Restunwuchten dieses Dokumentes hängen von zu vielen Parametern ab (Schaftform und -größe, Drehzahl, Hebelarm des Schwerpunkts, Einzelwerkzeug oder modulares Werkzeugsystem, dynamische Tragzahl der Spindellagerung usw.), als dass diese Informationen in ausreichendem Umfang auf Werkzeugkörpern dargestellt werden könnten.