

Grundlagen und Anwendungsbereiche der Normen der Serien DIN ISO 10816 und DIN ISO 7919 - Beurteilungskriterien für Lager- und Wellenschwingungen - begleitende VDI Richtlinien

Dr.-Ing. Th. Schwirzer, Berlin

Zusammenfassung

Nach einer Übersicht über das Konzept der in den sechziger und siebziger Jahren entstandenen Richtlinien bzw. Normen zur Beurteilung der Schwingungen von rotierenden Maschinen werden die im letzten Jahrzehnt erarbeiteten neuen Standards der Serien DIN ISO 10816 und DIN ISO 7919 vorgestellt. Diese geben erstmals auch Hinweise zur Interpretation von Beurteilungsaussagen, zur Bewertung von Änderungen der Schwingungswerte und zur Einstellung von Grenzwerten für eine Schwingungsüberwachung.

Im Bericht werden weiterhin die begleitende Richtlinie VDI 3841 "Schwingungsüberwachung von Maschinen mit rotierenden Massen - Erforderliche Messungen" und die Richtlinienreihe VDI 3839 "Hinweise zur Messung und Interpretation der Schwingungen von Maschinen" vorgestellt und erläutert.

1. Erste Richtlinien und Normen zur Schwingungsbeurteilung

Als vor mehr als 40 Jahren ein Kreis von Schwingungsfachleuten in der Fachgruppe Schwingungstechnik des Vereins Deutscher Ingenieure begann, eine Richtlinie zur Messung und Beurteilung der Schwingungen von rotierenden Maschinen zu erarbeiten, gab es viele Probleme. Es fehlte an Datenmaterial über die Zulässigkeit oder Unzulässigkeit bestimmter Schwingungsbeanspruchungen. Auch waren die angedachten Messverfahren noch wenig erprobt und die notwendigen Meßgeräte noch in Entwicklung. Die Arbeiten gingen aber trotz dieser Probleme sehr zügig voran und führten im Jahre 1960 zur Herausgabe der Richtlinie VDI 2056 "Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen". Diese fand große Zustimmung und war bald die Grundlage für Lieferverträge und Abnahmen. Die ersten Erfahrungen ließen aber schon nach kurzer Zeit den Wunsch nach einer Überarbeitung aufkommen, die 1963 begonnen wurde und zur Herausgabe einer 2. Ausgabe mit dem Erscheinungsdatum Oktober 1964 führte.

Mit der Richtlinie VDI 2056 sind weltweit erstmals verbindliche Messvorschriften, Beurteilungsverfahren und Beurteilungsmaßstäbe für die Schwingungen von rotierenden Maschinen festgelegt worden. Das internationale Interesse an der Richtlinie VDI 2056 war so groß, dass vom 1963 neu gegründeten internationalen Normenkomitees ISO / TC 108 "Mechanical Vibration and Shock" beschlossen wurde, umgehend entsprechende ISO Standards zu erarbeiten. Es entstanden zunächst die weitgehend identischen Standards ISO 2372 und ISO 3945, sowie die Publication IEC 34-14 speziell für elektrische Maschinen.

Alle bisher genannten Dokumente beschäftigen sich ausschließlich mit den Schwingungen an stationären Teilen von rotierenden Maschinen, d.h. zum Beispiel an Lagern und Gehäusen. Nachdem im Lauf der 70ziger Jahren zuverlässige Verfahren und Geräte zum Messen der relativen Wellenschwingungen entwickelt wurden, wuchs das Interesse, auch für diese Messgrößen Beurteilungskriterien zu finden und zusammen zustellen. Das Ergebnis der Arbeiten in einem neuen VDI-Gremium waren die Richtlinien der Serie VDI 2059 mit Einzelblättern für alle wesentlichen Maschinenarten.

In der VDI 2056 und den darauf basierenden ISO-Standards ist das maßgebende Beurteilungskriterium der momentane Zustand einer Maschine im Hinblick auf die Schwingungsbeanspruchungen der Maschine bzw. ihrer Teile und die Schwingungsemission in die Umgebung. Hinweise zur Interpretation der Beurteilung im Hinblick auf notwendige Maßnahmen sowie Empfehlungen für die diagnostische Überwachung finden sich in keinem dieser Dokumente. Das zeigt sich sehr deutlich in den Benennungen für die Beurteilungsbereiche, wie "gut", "brauchbar", "noch zulässig" und "unzulässig". Man hatte diese aus älteren Veröffentlichungen übernommen. Diese Benennungen sind aber nur subjektiv interpretierbar und geben keinen Hinweis, ob und welche Maßnahmen ergriffen werden müssen, wenn die Schwingstärke zum Beispiel im Bereich "noch zulässig" liegt.

Dieser Mangel wurde bald erkannt und führte beim Erarbeiten der Richtlinienserie VDI 2059 zum Verzicht auf diese Benennungen. Anstelle dessen wurden die Grenzen der Beurteilungsbereiche mit A, B und C bezeichnet und die Bedeutung dieser Grenzen im Hinblick auf die Gefährdung erläutert. In den verschiedenen Blättern von VDI 2059 finden sich erstmals auch Hinweise zur Deutung von Messergebnissen, zur Schwingungsüberwachung und zur Bewertung von Schwingungsveränderungen

2. Neue ISO-Standards

Alle diese Änderungen und zusätzlichen Hinweise fanden Eingang in zwei Serien von neuen ISO Standards, welche in der Working Group 1 des ISO/TC 108/SC 2 erarbeitet wurden. Die Mehrzahl dieser ISO Standards sind übersetzt und als entsprechende DIN ISO Normen veröffentlicht worden.

Die Serie DIN ISO 10816 "Mechanische Schwingungen - Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen" ersetzt die oben genannten älteren, auf der VDI 2056 basierenden Normen für die Lagerschwingungen. Die Serie besteht zur Zeit aus folgenden Teilen:

Teil 1, 1997	Allgemeine Anleitungen
Teil 2, 2002	Große stationäre Dampfturbinen-Generatorsätze mit Leistungen über 50 MW
Teil 3, 1998	Industrielle Maschinen mit Nennleistungen über 15 kW und Nenndrehzahlen zwischen 120 min^{-1} und 15000 min^{-1} bei Messungen am Aufstellungsort
Teil 4, 1998	Maschinensätze mit Antrieb durch Gasturbinen mit Ausnahme von Flug-Triebwerken
Teil 6, 1997	Hubkolbenmaschinen mit Leistungen über 100 kW

Es fehlt in der Liste noch der Teil 5 mit den Kriterien für die Beurteilung der Lagerschwingungen von hydraulischen Maschinensätzen. Die Übersetzungen wurde zurückgestellt, da ISO 10816-5 zur Zeit überarbeitet wird.

In allen Teilen von DIN ISO 10816 ist der breitbandig gemessene Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich von 10 Hz bis 1000 Hz die maßgebende Mess- und Beurteilungsgröße. In den Teil 3 ist als zusätzliche Messgröße der Effektivwert des Schwingweges und in den Teil 6 zusätzlich noch der Effektivwert der Schwingbeschleunigung aufgenommen worden, da bei den jeweiligen Maschinenarten wesentliche Anteile des Schwingungsspektrums im Bereich tiefer oder hoher Frequenzen liegen können. Für die Beurteilung der Schwingstärke dieser Maschinenarten sind dann beide oder sogar alle drei Messgrößen maßgebend.

Die Serie ISO 7919 "Mechanische Schwingungen von Maschinen mit Ausnahme von Kolbenmaschinen - Messung und Bewertung von Wellenschwingungen", entspricht im Aufbau weitgehend unserer Serie VDI 2059:

Teil 1, 1997	Allgemeine Anleitungen
Teil 2, 2002	Große stationäre Dampfturbinen-Generatorsätze
Teil 3, 1997	Gekuppelte industrielle Maschinen
Teil 4, 1997	Gasturbinensätze

Auch hier fehlt aus dem oben genannten Grund noch der Teil 5 für die hydraulischen Maschinensätze.

Die Normen beurteilen die relativen Wellenschwingungen, gemessen mit zwei rechtwinklig zueinander stehenden, an oder sogar in den Lagern montierten Wellenschwingungsaufnehmern. Die Beurteilungsgröße ist in allen Teilen der größere Wert der Schwingungsbreite (Spitze-Tal-Wert, S_{p-p}) in einer der beiden Messrichtungen.

In beiden Serien sind anstelle der Grenzen der Bewertungsbereiche, die Bereiche selbst als sogenannte Zonen mit den Buchstaben A, B, C und D gekennzeichnet worden. Für diese Zonen hat man Beurteilungen festgelegt, die gleichlautend in alle Teile übernommen worden sind. Sie lauten in Übersetzung:

- Zone A: Die Schwingungen neu in Betrieb gesetzter Maschinen liegen gewöhnlich in dieser Zone.
- Zone B: Maschinen, deren Schwingungen in dieser Zone liegen, werden üblicherweise als geeignet angesehen, ohne Einschränkungen im Dauerbetrieb zu laufen.
- Zone C: Maschinen, deren Schwingungen in dieser Zone liegen, werden üblicherweise als nicht geeignet angesehen, ständig im Dauerbetrieb zu laufen. Im allgemeinen darf die Maschine aber für eine begrenzte Zeit in diesem Zustand betrieben werden, bis sich eine günstige Gelegenheit für Abhilfemaßnahmen ergibt.
- Zone D: Schwingungswerte innerhalb dieser Zone werden üblicherweise als ausreichend gefährlich angesehen, Schäden an der Maschine zu erzeugen.

Die Schwingungsgrenzwerte für die vier Zonen werden entweder als Zahlenwerte genannt, wie Bild 1 aus DIN ISO 10816-3 zeigt, oder in Diagrammform dargestellt. Bild 2 ist das Bewertungsdiagramm aus DIN ISO 7919-3.

Diese neue Art der Beurteilung erlaubt eine Diagnose des Schwingungszustandes einer Maschine und gibt klare Hinweise auf eventuell notwendige Maßnahmen. Wie in allen Normen angegeben wird, sind die den Grenzen der Zonen zugeordneten Zahlenwerte nicht dafür bestimmt, als Abnahmewerte zu dienen. Solche müssen zwischen dem Maschinenhersteller und dem Abnehmer vereinbart werden. Sie geben jedoch Hinweise, um grobe Fehler oder unrealistische Anforderungen auszuschließen.

Ergänzend werden in allen Teilen von DIN ISO 10816 und DIN ISO 7919 Hinweise zur Beurteilung von Veränderungen im Schwingungszustand gegeben. Man macht die Veränderungen abhängig vom Basisniveau der Schwingungen an der jeweiligen Messstelle, d.h. von der Schwingungsgröße für einen definierten stationären Betriebszustand. Die Bewertung von Veränderungen erfolgt nach den Kriterien der Zonendefinitionen. Zum Beispiel wird angegeben, dass ein Anstieg oder Abfall der Schwingungsgröße um 25 % der oberen Grenze der Zone B als wesentlich anzusehen ist und eingehende Untersuchungen notwendigen werden, um die Ursache der Veränderungen zu ermitteln und zu entscheiden, ob und welche weiteren Maßnahmen getroffen werden müssen.

Wesentlich ist, dass erstmals auch Hinweise zur Überwachung des Schwingungszustandes und Empfehlungen zur Festlegung von Alarm- und Abschaltgrenzen gegeben werden. Die Grenzen selbst sind wie folgt definiert und werden ebenfalls auf die Kriterien der Zonendefinitionen bezogen:

ALARM ist die Warnung, dass ein festgelegter Schwingungsgrenzwert erreicht oder eine deutliche Änderung eingetreten ist und Abhilfemaßnahmen notwendig werden. Wenn eine ALARM-Situation eintritt, darf der Betrieb im allgemeinen solange fortgesetzt werden, bis die Gründe für die Änderung des Schwingungszustandes gefunden und Abhilfemaßnahmen festgelegt sind.

ABSCHALTUNG ist der Schwingungsgrenzwert, oberhalb dessen ein Weiterbetrieb der Maschine Schäden verursachen kann. Wenn der ABSCHALT-Grenzwert überschritten wird, sollten sofort Maßnahmen zur Minderung der Schwingungen ergriffen werden oder die Maschine sollte abgeschaltet werden.

Einem Betreiber werden Informationen über Verfahren zur Ermittlung der individuellen Einstellwerte für ALARM und Abschaltung geliefert, wobei die spezifischen dynamischen Eigenschaften der Maschine und der Messstellen zu berücksichtigen sind.

Die in beiden DIN ISO Serien genannten Grenzwerte für die Bewertungszonen weichen zum Teil deutlich von denen in den Richtlinien VDI 2056 und VDI 2059 ab. Aufgrund dieser Unterschiede war der Fachbereich Schwingungstechnik im NALS und VDI gezwungen, die Richtlinien VDI 2056 und den Teil 2 der VDI 2059 zurückzuziehen. Damit war ausgeschlossen, dass für gleichartige Maschinen unterschiedliche Beurteilungen möglich sind.

Bei allen bis 1998 veröffentlichten Normen oder Richtlinien gelten die Grenzwerte ausschließlich für den stationären Betrieb der Maschinen unter definierten Bedingungen hinsichtlich Leistung, Drehzahl und Aufstellungsart. Es zeigt sich aber ein wachsendes Interesse, auch für die häufig auftretenden transienten Betriebszustände Grenzwerte festzulegen, z.B. für das Anfahren bzw. Abstellen oder für Laständerungen. Erstmals sind solche transienten Betriebszustände in den 2002 erschienen Neufassungen der Normen

DIN ISO 10816-2 und DIN ISO 7919-2 für große stationäre Dampfturbinen-Generatorsätze mit Leistungen über 50 MW berücksichtigt worden.

3. Normung auf dem Gebiet der Schwingungsüberwachung

Nachdem die schwingungstechnische Überwachung großer Maschinensätze in den letzten 20 Jahren zur Selbstverständlichkeit geworden ist, wächst das Interesse, auch für mittlere und kleine Anlagen Überwachungsverfahren einzusetzen. Das ist nicht zuletzt eine Folge der Entwicklung geeigneter, leistungsfähiger Mess- und Auswertegeräte in einem Preisniveau, welches den Einsatz in diesem Segment wirtschaftlich macht. Der Fachbereich Schwingungstechnik in der VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb nahm das zum Anlaß, im Jahre 1989 mit den Arbeiten an einer Richtlinie

VDI 3841 "Schwingungsüberwachung von Maschinen mit rotierenden Massen - Erforderliche Messungen"

zu beginnen. Die 1. Ausgabe der Richtlinie ist 1995 erschienen.

Die VDI 3841 gibt eine Übersicht über die gebräuchlichen Messverfahren und -größen, die verwendeten Schwingungsaufnehmer mit ihren Einsatzbereichen und -grenzen sowie über die üblichen Auswerteverfahren. Es werden Kriterien angegeben, unter welchen Bedingungen und bei welchen Maschinen eine permanente Überwachung notwendig ist oder wann man mit intermittierenden Messungen eine ausreichende Überwachungssicherheit erreichen kann. Die Kriterien sind:

Das Gefährdungspotential: Wenn die von einer Maschine ausgehende Gefahr als Folge eines Maschinenschadens oder plötzlichen Ausfalls durch die Installation einer Überwachungsanlage mit hoher Wahrscheinlichkeit zu verhindern ist und nicht durch andere einfachere Maßnahmen ein gleichwertiger Schutz erzielt werden kann.

Der Maschinenwert: Wenn mit hoher Wahrscheinlichkeit durch eine Schwingungsüberwachung ein Maschinenschaden mit unverhältnismäßig hohen Sachkosten verhindert werden kann.

Die Schadensfolgekosten: Wenn durch eine Schwingungsüberwachung mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Maschinenschaden zu vermeiden ist, der wegen besonderer Bedeutung für den Betrieb der Maschine hohe Anlagenstillstandskosten (z.B. Produktionsausfallkosten) verursachen würde. Dabei sind andere Abhilfemöglichkeiten wie Redundanz oder Ersatzaggregat in Betracht zu ziehen.

Eine Überwachung des Betriebszustandes in besonderen Fällen: Wenn Schwingungsmessgrößen zur Steuerung oder Regelung der Maschinenfahrweise erforderlich sind. Das kann zum Beispiel notwendig sein bei Zentrifugen und Schwingfördereinrichtungen oder als Kavitationsschutz bei Pumpen.

Ein sehr wesentlicher Bestandteil dieser Richtlinie sind Empfehlungen für die Ausrüstung von Maschinensätzen aller Art in Abhängigkeit von deren Leistung und Drehzahl. Hierzu gehören:

Kraftwerksturbosätze
Industrieturbosätze
Verdichteranlagen

Elektrische Maschinen
Druckmaschinen
Ventilatoren

Wasserkraftanlagen
Kreislumpen
Zentrifugen und Getriebe.

Das Thema Schwingungsüberwachung wurde nach dem Erscheinen der VDI 3841 auch vom Subcommittee 2 des ISO / TC 108 aufgegriffen. Dort entstand in den letzten Jahren ein Standard, der jetzt übersetzt vorliegt als:

DIN ISO 13373-1 "Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen - Schwingungs-Zustandsüberwachung Teil 1. Allgemeine Anleitungen".

Da nach Ansicht unserer Fachleute in der Norm so wie auch im Standard die für viele Leser wichtigen Empfehlungen für die Ausrüstung fehlen, wurde beschlossen die DIN ISO 13373-1 durch eine überarbeitete Richtlinie VDI 3841 zu ergänzen. Sie wird noch in diesem Jahr erscheinen.

4. Richtlinien der Serie VDI 3839 "Hinweise zur Messung und Interpretation der Schwingungen von Maschinen"

Im Fachbereich Schwingungstechnik der VDI Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb wird zur Zeit eine Serien von Richtlinien bearbeitet, die Hilfestellung bei der Durchführung und Interpretation von Schwingungsmessungen an Maschinen geben sollen. Diese Richtlinien sind nicht als Ersatz für Fachbücher der Schwingungslehre gedacht. Sie sollen eine leicht verständliche, praxisnahe Einführung in die heute bekannten Verfahren zur Ausführung und Interpretation von Schwingungsmessungen sein und Hilfestellung bei der Deutung und Behebung von Stör- oder Schadensfällen geben. Die Richtlinien setzen kein Fachwissen voraus und enthalten nur so viel Theorie, wie notwendig.

Die Richtlinienreihe VDI 3839 soll aus folgenden Blättern bestehen, die alle in Deutsch - Englisch herausgegeben werden, um sie auch im Ausland einsetzen zu können:

Blatt 1: Allgemeine Grundlagen - erschienen im März 2001

Darin wird eine Übersicht über die im allgemeinen interessierenden Messgrößen und die häufig auftretenden Messaufgaben gegeben, sowie eine Beschreibung der heute zur Messung dieser Größen verwendeten Geräte bzw. Einrichtungen, ihre Einsatzbereiche und Grenzen. Weiterhin werden die heute häufig eingesetzten Analyse- und Auswerteverfahren beschrieben. Welche Gerätetypen sind empfehlenswert oder notwendig, um bestimmte Informationen zu erhalten, z.B. Zeitverläufe, Spektren, Komponenten nach Betrag und Phase.

In den Folgeblättern wird auf die typischen schwingungstechnischen Probleme und die speziellen Messaufgaben bei allen wesentlichen Arten von Anlagen, Maschine und Geräten eingegangen. Was können für Schwingungen auftreten, wie äußern sie sich, welche Mess- und Analyseverfahren sind zu empfehlen um Schwingungsursachen zu identifizieren, was gibt es als Abhilfemaßnahmen. Anhand von charakteristischen Beispielen wird das methodische Vorgehen zur Ermittlung der Ursache störender Schwingungserscheinungen erläutert. Die jeweiligen Blätter sollen dem Leser auch helfen zu entscheiden, wann es notwendig wird, Fachleute einzuschalten.

Jedes Folgeblatt enthält eine Übersicht über die für eine Beurteilung des Schwingungszustandes wichtigen Normen und Richtlinien und erläutert diese, wenn notwendig.

Zur Zeit sind folgende Blätter in Bearbeitung:

- Blatt 2: Schwingungsbilder für Anregungen aus Unwuchten, Montagefehlern, Lagerungsstörungen und Schäden an rotierenden Bauteilen
Erscheint 2002
- Blatt 3: Typische Schwingungsbilder bei Dampfturbinen, Gasturbinen und Turboverdichtern
- Blatt 4: Typische Schwingungsbilder bei Ventilatoren und Gebläsen
- Blatt 5: Typische Schwingungsbilder bei elektrischen Maschinen
Erschienen im September 2001
- Blatt 6: Typische Schwingungsbilder bei Maschinensätzen in hydraulischen Kraftwerken
- Blatt 7: Typische Schwingungsbilder bei Pumpen
- Blatt 8: Typische Schwingungsbilder bei Kolbenmaschinen
Wird 2002 als Entwurf erscheinen

Falls der Leser an detaillierteren Information oder sogar an einer Mitarbeit in dem für die Richtlinienserie VDI 3839 zuständigen Ausschuß VDI / NALS C 19 interessiert ist, möchte er sich an die Geschäftsstelle des Fachbereichs Schwingungstechnik in der VDI / EKV wenden.

Tabelle A.1: Unterteilung der Schwingstärkezonen für Maschinen der Gruppe 1:
Große Maschinen mit Nennleistungen über 300 kW und nicht mehr als 50 MW;
Elektrische Maschinen mit Achshöhen $H \geq 315$ mm

Unterbaugruppe	Zonengrenze	Effektivwert des Schwingweges	Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit
		μm	mm/s
starr	A/B	29	2,3
	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
elastisch	A/B	45	3,5
	B/C	90	7,1
	C/D	140	11,0

Tabelle A.2: Unterteilung der Schwingstärkezonen für Maschinen der Gruppe 2:
Mittelgroße Maschinen mit einer Nennleistung über 15 kW bis 300 kW;
Elektrische Maschinen mit Achshöhen $160 \text{ mm} \leq H < 315$ mm

Unterbaugruppe	Zonengrenze	Effektivwert des Schwingweges	Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit
		μm	mm/s
starr	A/B	22	1,4
	B/C	45	2,8
	C/D	71	4,5
elastisch	A/B	37	2,3
	B/C	71	4,5
	C/D	113	7,1

Bild 1 Beispiel für die Grenzen der Bewertungszonen in DIN ISO 10816 - 3. Gezeigt sind die Tabellen für die Maschinen der Gruppen 1 und 2. Die Norm nennt in den Tabellen A.3 und A.4 auch die Grenzwerte für Pumpensätze mit getrennten bzw. integrierten Antrieben.

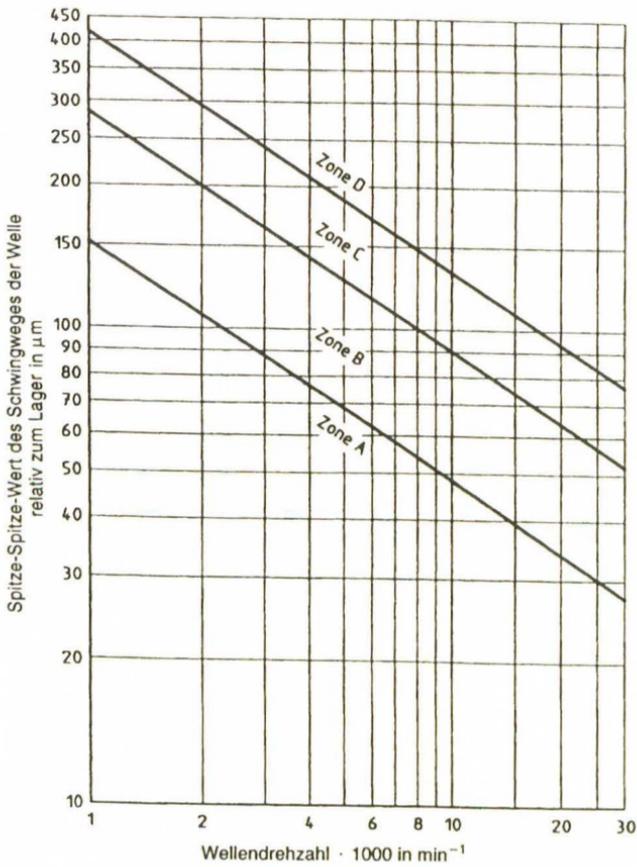


Bild 2. Beispiel für die Darstellung der Grenzen der Bewertungszonen in DIN ISO 7919 - 3.