

## KTA 2201.4

### **Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen; Teil 4: Anforderungen an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für maschinen- und elektrotechnische Anlagenteile**

Die Regel wurde im BAnz. Nr. 20a vom 30. Januar 1991 veröffentlicht. Die im BAnz. Nr. 115 vom 25. Juni 1986 veröffentlichte Berichtigung wurde eingearbeitet.

#### Inhalt

	Seite
Grundlagen .....	2
1 Anwendungsbereich .....	2
2 Begriffe .....	2
3 Grundsätzliche Anforderungen .....	3
3.1 Auslegung .....	3
3.2 Nachweisverfahren .....	3
3.3 Nachweismethoden .....	3
3.4 Überlagerung .....	3
3.5 Erdbebenanregung am Standort .....	4
3.6 Ermittlung der Anregung am Aufstellort .....	4
3.7 Mechanische Systemanalyse .....	4
3.8 Beanspruchungsanalyse .....	4
3.9 Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte .....	5
3.10 Relativverschiebungen .....	5
4 Rechnerische Nachweise .....	5
4.1 Allgemeines .....	5
4.2 Ermittlung der Anregung am Aufstellort .....	5
4.3 Mechanische Systemanalyse .....	5
4.4 Beanspruchungsanalyse .....	9
4.5 Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte .....	11
5 Experimentelle Nachweise .....	11
5.1 Nachweisziel .....	11
5.2 Anforderungen an den Prüfling .....	11
5.3 Anforderungen an die Anregung .....	11
5.4 Mechanische Systemanalyse .....	12
5.5 Experimentelle Beanspruchungsanalyse .....	16
5.6 Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte .....	16
5.7 Dokumentation .....	16
6 Alternative Nachweismöglichkeiten .....	17
6.1 Allgemeines .....	17
6.2 Nachweise durch Analogiebetrachtung .....	17
6.3 Plausibilitätsbetrachtung .....	17
Anhang A: Krane und deren Stahltragwerke .....	18
Anhang B: Zusammenstellung der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen .....	19
Anhang C: Bestimmungen auf die in dieser Regel verwiesen wird .....	20
Stichwortverzeichnis .....	21

## Grundlagen

(1) Die Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) haben die Aufgabe, sicherheitstechnische Anforderungen anzugeben, bei deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist (§ 7 Abs. 2 Nr. 3 Atomgesetz), um die im Atomgesetz und in der Strahlenschutzverordnung festgelegten sowie in den "Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke" und den "Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren gegen Störfälle im Sinne des § 28 Abs. 3 der Strahlenschutzverordnung (Störfall-Leitlinien)" weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen.

(2) Zur Erreichung dieser Ziele stellt die Regel KTA 2201.4 im Rahmen von KTA 2201 "Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen" Anforderungen an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für maschinen- und elektrotechnische Anlagenteile. Zur Regel KTA 2201 gehören als weitere Teile:

- KTA 2201.1: Grundsätze
- KTA 2201.2: Baugrund
- KTA 2201.3: Auslegung der baulichen Anlagen
- KTA 2201.5: Seismische Instrumentierung
- KTA 2201.6: Maßnahmen nach Erdbeben

(3) In KTA 2201.4 werden die erforderlichen Nachweise für die maschinen- und elektrotechnischen Anlagenteile in einzelne Nachweisschritte aufgliedert:

- a) Ermittlung der Anregung am Aufstellort
- b) Mechanische Systemanalyse
  - ba) Kennwertermittlung
  - bb) Modellabbildung
  - bc) Belastungsermittlung
- c) Beanspruchungsanalyse
  - ca) Beanspruchungsermittlung
  - cb) Zulässigkeitsnachweis

Diese Nachweisschritte werden in jedem der drei möglichen Nachweisverfahren

- a) Rechnerische Nachweise
- b) Experimentelle Nachweise
- c) Alternative Nachweismöglichkeiten (Analogiebetachtung, Plausibilitätsbetachtung)

behandelt. Der Nachweis der Erdbebensicherheit für eine Komponente kann durch ein Nachweisverfahren oder aber durch eine Kombination von Nachweisverfahren geführt werden.

(4) Gemäß KTA 2201.1 werden Anforderungen an Nachweisverfahren für folgende Anlagenteile gestellt:

- a) Klasse I-Anlagenteile
- b) Klasse II-Anlagenteile, die Klasse I-Anlagenteile gefährden können.

(5) Die sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen umfassen für

- a) Klasse I-Anlagenteile: Standsicherheit, Integrität und Funktionsfähigkeit,
- b) Klasse II-Anlagenteile, die Klasse I-Anlagenteile gefährden können: Standsicherheit und Integrität.

(6) Für die mechanische Spannungsabsicherung wird auf die folgenden KTA-Regeln verwiesen:

- KTA 3201.2 Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung

KTA 3204 Reaktordruckbehälter-Einbauten

KTA 3205.1 Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen,  
Teil 1: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für Primärkreis-komponenten.

## 1 Anwendungsbereich

(1) Diese Regel ist auf maschinen- und elektrotechnische Anlagenteile von Kernkraftwerken anzuwenden. Für Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren gilt diese Regel vollinhaltlich. Für Kernkraftwerke mit anderen Reaktortypen ist diese Regel auf die nichtreaktortypspezifischen maschinen- und elektrotechnischen Anlagenteile vollständig, auf die reaktortypspezifischen Anlagenteile nur zur Ermittlung der Belastungen anzuwenden.

(2) In dieser Regel werden Anforderungen an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für maschinen- und elektrotechnische Anlagenteile gestellt. Die für jede Komponente gesondert festzulegenden einsatzspezifischen sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen Standsicherheit, Integrität und Funktionsfähigkeit (siehe Abschnitt 3.8) sind nicht Gegenstand dieser Regel.

(3) Unter maschinentechnischen Anlagenteilen werden in dieser Regel Komponenten, wie z.B. Behälter, Wärmetauscher, Pumpen, Armaturen, Hebezeuge und Rohrleitungen, sowie deren Stützkonstruktionen verstanden; nicht dazu zählen Kranbahnen, Bühnen und Gerüste. Inwieweit Stütz- und Befestigungskonstruktionen nach dieser Regel oder nach KTA 2201.3 (z. Zt. in Vorbereitung) zu behandeln sind, ist im Einzelfall zu vereinbaren.

(4) Unter elektrotechnischen Anlagenteilen wird in dieser Regel die Zusammenfassung von elektrotechnischen Geräten einschließlich aller elektrischer Verbindungen und deren Tragkonstruktionen (z.B. Schränke, Gestelle, Konsolen, Auflagerungen, Aufhängungen oder Unterstützungen) verstanden.

(5) Diese Regel ist nicht auf Liner (Stahlauskleidung auf Beton zur Erzielung einer bestimmten Dichtheit, deren Beanspruchung maßgeblich durch die Verformungen des Betons bestimmt wird.) anzuwenden.

## 2 Begriffe

(1) Antwortspektrum, für mechanische Systeme

Ein Antwortspektrum für mechanische Systeme ist die Darstellung der maximalen Amplituden (Abbildung von Maximalwerten von Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung) als Funktion der Eigenfrequenzen von Schwingern mit einem Freiheitsgrad und konstanter Dämpfung, mit dem diese auf die Fußpunktanregung durch einen Zeitverlauf antworten.

### H i n w e i s:

Man unterscheidet zwischen Freifeld-Antwortspektren (Primärspektren), Etagen-Antwortspektren (Sekundärspektren) und Komponenten-Antwortspektren (Tertiärspektren). In geglätteter Form werden sie als Bemessungsspektren verwendet.

(2) Anforderungsantwortspektrum, für mechanische Systeme

Ein Anforderungsantwortspektrum für mechanische Systeme ist ein Antwortspektrum, das dem Nachweis der Erdbebensicherheit des Anlagenteils als zu erfüllende Anforderung zugrundegelegt wird.

(3) Dämpfung, kritische, für mechanische Systeme

Die kritische Dämpfung für mechanische Systeme ist derjenige Wert der (geschwindigkeitsproportionalen) Dämpfung, bei dem die Bewegung des Schwingers den aperiodischen Grenzfall darstellt.

(4) Dämpfung, modale, für mechanische Systeme

Die modale Dämpfung für mechanische Systeme ist die Dämpfung in der jeweiligen Eigenform.

(5) Dämpfungsverhältnis, für mechanische Systeme

Das Dämpfungsverhältnis für mechanische Systeme ist das Verhältnis der vorhandenen zur kritischen Dämpfung in einem Schwingungssystem mit einem Freiheitsgrad.

(6) Frequenzen, charakteristische, für mechanische Systeme

Die charakteristischen Frequenzen des Prüflings für mechanische Systeme sind seine Eigenfrequenzen sowie Frequenzen, bei denen besondere Effekte auftreten.

**Hinweis:**

Zu den besonderen Effekten zählen z. B. Geräusche.

(7) Funktionsfähigkeit

Die Funktionsfähigkeit ist die Eignung eines Systems oder eines Systembestandteils (z.B. Komponente, Teilsystem, Strang) einschließlich erforderlicher Hilfs-, Versorgungs- und Energiesysteme, die vorgesehenen Aufgaben zu erfüllen.

**Hinweis:**

Unter Funktionsfähigkeit im Sinne dieser Regel wird die über die Standsicherheit und Integrität hinausgehende Fähigkeit zur Erfüllung der geforderten Aufgaben bei Erdbeben verstanden.

(8) Grenzfrequenz, obere, für mechanische Systeme

Die obere Grenzfrequenz für mechanische Systeme ist die Frequenz, oberhalb der keine signifikante Vergrößerung der Erdbebenantwort auftritt (Starrkörperverhalten).

**Hinweis:**

Als obere Grenzfrequenz gilt die Frequenz, ab der die Beschleunigung im Antwortspektrum das 1,1-fache der Nullperiodenbeschleunigung mit steigender Frequenz unterschreitet oder ab der die Relativverschiebungen nicht mehr versagensrelevant sind.

(9) Grenzfrequenz, untere, für mechanische Systeme

Die untere Grenzfrequenz für mechanische Systeme ist die Frequenz, unterhalb der keine signifikante Erdbebenantwort auftritt

**Hinweis:**

Die untere Grenzfrequenz beträgt die Hälfte der niedrigsten Eigenfrequenz der Komponente.

(10) Nullperiodenbeschleunigung (synonym: Starrkörperbeschleunigung), für mechanische Systeme

Die Nullperiodenbeschleunigung für mechanische Systeme ist der über die Zeit ermittelte Maximalwert der Anregungsbeschleunigung am jeweiligen Aufstellort der Komponente.

(11) Prüfantwortspektrum, für mechanische Systeme

Ein Prüfantwortspektrum für mechanische Systeme ist ein Antwortspektrum, das aus der tatsächlichen Bewegung des Schwingungstisches ermittelt wird.

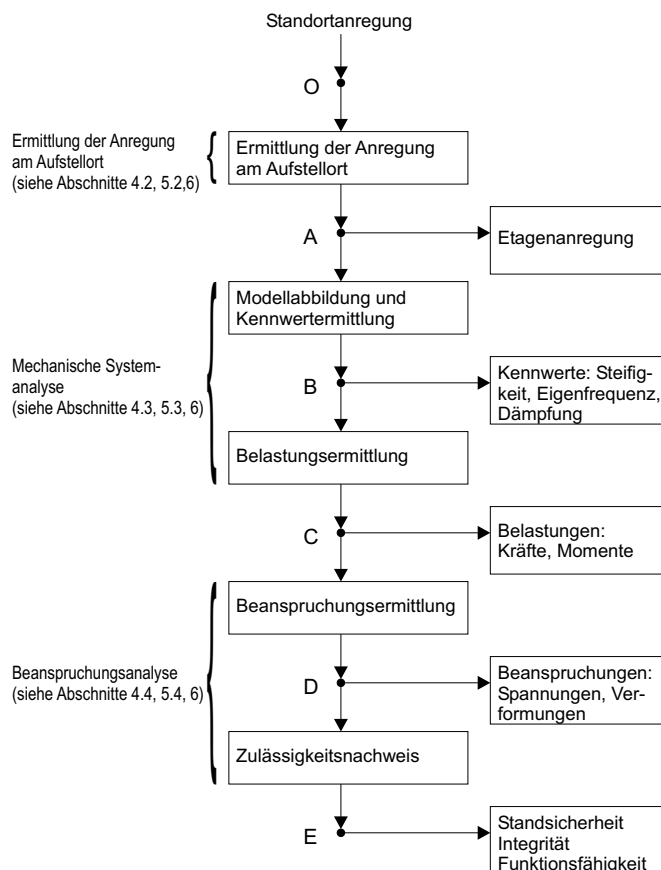
### 3 Grundsätzliche Anforderungen

#### 3.1 Auslegung

(1) Die Auslegung der maschinen- und elektrotechnischen Anlagenteile gegen Erdbebenbelastung muß so erfolgen, daß

- die Abschaltung des Reaktors und die langfristige Aufrechterhaltung der Unterkritikalität sichergestellt wird,
- die Nachwärmeabfuhr aus dem Reaktorkern und dem Brennelementlagerbecken sichergestellt wird,
- eine unzulässige radiologische Belastung der Umgebung verhindert wird.

(2) Alle Anlagenteile der Klasse I nach KTA 2201.1 sind so auszulegen, daß beim Bemessungserdbeben ihre sicherheitstechnische Funktion (siehe Abschnitt 3.8) erhalten bleibt.



**Bild 3-1:** Verfahrensschema zum Nachweis der Erdbebensicherheit der maschinen- und elektrotechnischen Anlagenteile

#### 3.2 Nachweisverfahren

Es ist ein Nachweisverfahren zu verwenden, das in Nachweis-schritte gemäß **Bild 3-1** zu unterteilen ist.

#### 3.3 Nachweismethoden

(1) Folgende Nachweismethoden sind einzeln oder kombiniert zulässig:

- Berechnung (gemäß Abschnitt 4),
- Experimentelle Verfahren (gemäß Abschnitt 5),
- Alternative Nachweismöglichkeiten (gemäß Abschnitt 6).

(2) Die anzuwendenden Nachweismethoden sind komponentenspezifisch und einsatzspezifisch festzulegen. Für elektrotechnische Geräte (z.B. Schütze, Leistungsschalter) sind vorzugsweise experimentelle Nachweismethoden einzusetzen.

#### 3.4 Überlagerung

Die Lasten infolge Bemessungserdbeben sind grundsätzlich mit den Belastungen des stationären Vollastbetriebes der Gesamtanlage und zusätzlich mit den erdbebenbedingten Störfallfolgenlasten unter Beachtung der zeitlichen Zuordnung zu überlagern. Treten bei anderen stationären Zuständen des Normalbetriebes in einzelnen Anlagenteilen um mehr als 10 % höhere Belastungen auf als beim stationären Vollastbetrieb, so sind diese Belastungen zugrunde zu legen. Dies gilt sowohl für die Anlagenteile der Klasse I als auch für diejenigen Anlagenteile der Klasse II, die bei Versagen Anlagenteile der Klasse I gefährden können.

### 3.5 Erdbebenanregung am Standort

(1) Die Erdbebenanregung am Standort darf durch Freifeld-Antwortspektren oder durch Freifeld-Zeitverläufe vorgegeben werden.

(2) Die Anregung ist jeweils in eine Resultierende der horizontalen Richtung und in die vertikale Richtung wirkend anzusetzen. Es darf auch eine Überlagerung der Anregung in drei orthogonalen Richtungen erfolgen. Die horizontale Anregung darf dabei in zwei orthogonale Richtungen zerlegt werden.

(3) Werden Freifeld-Zeitverläufe verwendet, so dürfen diese auch spektrumkompatible künstliche Zeitverläufe sein. Ein künstlicher Zeitverlauf gilt als spektrumkompatibel, wenn das von ihm erzeugte Spektrum das vorgegebene Antwortspektrum bei einer hinreichenden Zahl von Frequenzen einhüllt. Dieser Nachweis ist wie folgt zu führen:

a) Die Zahl der Kontrollpunkte ist ausreichend, wenn die Kontrollfrequenz-Schrittweite nicht größer ist als 10 % der jeweils vorhergehenden Frequenz. Die tiefste Kontrollfrequenz darf nicht höher als 0,4 Hz sein, die höchste Kontrollfrequenz muß mindestens gleich der oberen Grenzfrequenz sein.

b) Das erzeugte Spektrum darf das vorgegebene Spektrum nur an 10 % der genannten Kontrollfrequenzen um höchstens 10 % unterschreiten. Diese Forderung sollte für die Dämpfung  $D = 0,01$  und  $D = 0,1$  nachgewiesen werden.

(4) Als Zeitdauer der Anregung ist die standortspezifische Anregungsdauer zugrunde zu legen.

### 3.6 Ermittlung der Anregung am Aufstellort

(1) Zur Ermittlung der Anregung am Aufstellort ist von der Erdbebenanregung am Standort gemäß Abschnitt 3.5 auszugehen.

(2) Wird die Anregung am Aufstellort rechnerisch ermittelt, so ist gemäß Abschnitt 4.2 vorzugehen.

(3) Wird die Anregung am Aufstellort experimentell ermittelt, so ist gemäß Abschnitt 5.3 vorzugehen.

(4) Wird die Anregung am Aufstellort durch Analogiebeobachtung oder Plausibilitätsbetrachtung ermittelt, so ist gemäß Abschnitt 6 vorzugehen.

### 3.7 Mechanische Systemanalyse

(1) Aus der Anregung am Aufstellort sind mit Hilfe der mechanischen Systemanalyse die Belastungen (Schnittgrößen) zu ermitteln.

(2) Die mechanische Systemanalyse kann in zwei Teilschritte unterteilt werden:

a) Modellabbildung und Ermittlung der Kennwerte (z.B. Steifigkeit, Dämpfung, Eigenfrequenz)

b) Ermittlung der Belastungen (z.B. Kräfte, Momente).

(3) Wird die mechanische Systemanalyse rechnerisch durchgeführt, so ist gemäß Abschnitt 4.3 vorzugehen.

(4) Wird die mechanische Systemanalyse experimentell durchgeführt, so ist gemäß Abschnitt 5.4 vorzugehen.

(5) Wird die mechanische Systemanalyse durch Analogiebeobachtung oder Plausibilitätsbetrachtung durchgeführt, so ist gemäß Abschnitt 6 vorzugehen.

### 3.8 Beanspruchungsanalyse

(1) In der Beanspruchungsanalyse sind aus den ermittelten Belastungen (Schnittgrößen) die Beanspruchungen (z.B. Spannungen, Verformungen) zu bestimmen und deren Zuläs-

sigkeit (Nachweis der Erfüllung der jeweiligen sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen) nachzuweisen. Damit wird der systemtechnischen Forderung nach Erhaltung der sicherheitstechnischen Funktion (s. Abschnitt 3.1 Absatz 2) komponentenspezifisch Rechnung getragen.

(2) Sicherheitstechnische Aufgabenstellungen sind:

a) Standsicherheit

aa) Zum Nachweis der Standsicherheit im Sinne dieser Regel ist die Sicherheit gegen unzulässige Veränderungen der Lage und des Aufstellortes (z.B. Umstürzen, Abstürzen, unzulässiges Verrutschen) nachzuweisen.

ab) Die Standsicherheit maschinen- und elektrotechnischer Anlagenteile wird vorwiegend durch die Festigkeitsanalyse der Abstützung nachgewiesen. Hierbei ist der Anschluß der Abstützung an die Komponente und die Verankerung (Abstützung, Komponente) zu beachten.

b) Integrität

ba) Zum Nachweis der Integrität im Sinne dieser Regel ist nachzuweisen, daß die druckbelasteten Wandungen allen spezifizierten Druck- und sonstigen mechanischen Belastungen im Rahmen der spezifizierten Eintrittshäufigkeiten und der Lebensdauer in zulässiger Weise standhalten.

bb) Die Integrität wird durch die Festigkeitsanalyse für die druckbelastete Wandung nach den entsprechenden Regelwerken (z. B. KTA 3201.2) nachgewiesen.

c) Funktionsfähigkeit

ca) Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit im Sinne dieser Regel ist die über die Standsicherheit und Integrität hinausgehende Fähigkeit zur Erfüllung der geforderten Aufgabe bei Erdbeben nachzuweisen. Hierzu können Verformungsbeschränkungen notwendig werden.

cb) Bei der Funktionsfähigkeit wird unterschieden, ob diese während oder nach dem Erdbeben oder während und nach dem Erdbeben gegeben sein muß. Dabei wird unterschieden zwischen aktiver und passiver Funktionsfähigkeit.

Aktive Funktionsfähigkeit: Aktive Funktionsfähigkeit stellt sicher, daß die spezifizierten mechanischen Bewegungen (relative Bewegungen zwischen Teilen) ausgeführt werden können (Beachtung z.B. der Möglichkeit des Schließens von Spielen, der Entstehung oder Änderung von Reibkräften).

Passive Funktionsfähigkeit: Passive Funktionsfähigkeit bedeutet, daß zulässige Verformungen und Bewegungen nicht überschritten werden und Fehlschaltungen nicht auftreten.

cc) Aktive Komponenten im Sinne dieser Regel sind solche, für die zur Erfüllung der sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen mechanische Bewegungen spezifiziert sind, z.B. Pumpen, Armaturen, Relais, Schütze. Alle anderen Komponenten sind passive Komponenten, z.B. Behälter, Rohrleitungen, Kabelpritschen.

(3) Für jede Komponente sind die einsatzspezifischen sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen gesondert festzulegen.

(4) Für Klasse II-Anlagenteile, die Klasse I-Anlagenteile gefährden können, sind nur Standsicherheit (z. B. bei Hebezeugen) und, falls erforderlich, Integrität nachzuweisen.

(5) Wird die Beanspruchungsanalyse rechnerisch durchgeführt, so ist gemäß Abschnitt 4.4 vorzugehen.

(6) Wird die Beanspruchungsanalyse experimentell durchgeführt, so ist gemäß Abschnitt 5.5 vorzugehen.

(7) Wird die Beanspruchungsanalyse mit Hilfe einer Analogiebeobachtung oder Plausibilitätsbetrachtung durchgeführt, so ist gemäß Abschnitt 6 vorzugehen.

(8) Alterungseffekte, die Einfluß auf das Erreichen der Nachweisziele haben, sind zu berücksichtigen.

### 3.9 Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte

Die Nachweisschritte gemäß **Bild 3-1** dürfen je nach Nachweisziel auch zusammengefaßt werden. Die Ermittlung von Zwischenergebnissen gemäß den Festlegungen in den Abschnitten 4.5, 5.6 und 6 darf entfallen.

### 3.10 Relativverschiebungen

(1) Neben den beschleunigungsinduzierten Beanspruchungen der Komponenten, die z. B. mit Etagen-Antwortspektren ermittelt werden, sind bei Anwendung des Verfahrens der gewichteten Spektren auch Beanspruchungen aus Relativverschiebungen an den Ankopplungsstellen der zu untersuchenden Struktur zu berücksichtigen, sofern aus diesen Relativverschiebungen unzulässige Beanspruchungen resultieren können (z. B. Rohrleitungsbeanspruchungen infolge von Verschiebungen bei langen, schlanken Behältern oder infolge von Relativverschiebungen zwischen zwei Gebäuden, Beanspruchungen bei elektrischen Anschlüssen)

(2) Bei Anwendung des Verfahrens der Einhüllenden einzelnen Spektren auf die verschiedenen Anregungsstellen der zu untersuchenden Struktur brauchen grundsätzlich keine Relativverschiebungen berücksichtigt zu werden. Dies gilt nicht für steife Systeme, bei denen unzulässige Verschiebungen auftreten können. In diesen Fällen ist der Einfluß der Relativverschiebungen gesondert zu prüfen.

(3) Die sich aus den Relativverschiebungen ergebenden Bewegungs- oder Schnittgrößen dürfen wie die Beiträge aus einer zusätzlichen Eigenform gemäß **Gleichung 3-1** nach der Quadratwurzelmethode überlagert werden.

$$S = \left[ \sum_{i=1}^e S_i^2 + S_v^2 \right]^{1/2} \quad (3-1)$$

Hierbei bedeuten :

- S maximale resultierende Größe für eine Anregungsrichtung
- $S_i$  maximale Größe der i-ten Eigenform für eine Anregungsrichtung
- $S_v$  maximale Bewegungs- oder Schnittgröße aus den Relativverschiebungen für eine Anregungsrichtung
- e Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenformen

## 4 Rechnerische Nachweise

### 4.1 Allgemeines

Für den rechnerischen Nachweis sind grundsätzlich die im folgenden angegebenen dynamischen Verfahren anzuwenden. Abweichend davon darf in begründeten Fällen (z. B. Verlegerichtlinien für Rohrleitungen) auf einen rechnerischen Nachweis verzichtet werden, s. Abschnitt 5 und 6.

### 4.2 Ermittlung der Anregung am Aufstellort

#### 4.2.1 Allgemeines

Die Anregungen an den Aufstellorten (Anregestellen) ist entweder durch Zeitverläufe oder Spektren vorzugeben.

#### 4.2.2 Dynamische Rechenverfahren

##### 4.2.2.1 Verfahren

(1) Um die Nachweisziele zu erfüllen, dürfen folgende Verfahren angewendet werden:

- a) Berechnung mit Hilfe von Erdbebenzeitverläufen,
- b) Berechnung mit Hilfe von direkter Transformation, ausgehend von Freifeld-Antwortspektren,
- c) Berechnung mit Hilfe von Ersatzverfahren zur Ermittlung von Antwortspektren,
- d) Berechnung mit Hilfe von spektraler Dichte der Freifeldanregung als Eingangsgröße anstelle des Antwortspektrums der Freifeldanregung.

(2) Bei der Anwendung der Verfahren gemäß Absatz 1 sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- a) Alle Verfahren müssen die Eigenschaften der tragenden Struktur und die Boden-Bauwerk-Wechselwirkung erfassen. Dabei muß dem Schwankungsbereich der Annahmen bezüglich Steifigkeiten, Lagerungsbedingungen und Schwingungsmodell Rechnung getragen werden.
- b) Werden Spektrenwerte berechnet, so muß der Abstand zwischen den Frequenzen hinreichend klein sein. Dies ist erfüllt, wenn die Frequenzschrittweite nicht größer ist als 10 % der jeweils vorhergehenden Frequenz. Es ist zulässig, die Spitzen zu kappen, die durch das verwendete Verfahren zur Ermittlung spektrumkompatibler Zeitfunktionen erzeugt werden.

(3) Für Systeme, die als homogen betrachtet werden können, darf zur Ermittlung von Antwortspektren das nachfolgend angegebene Ersatzverfahren angewendet werden:

- a) Die Form des Etagen-Antwortspektrums ist nach **Bild 4-1**, der Resonanzüberhöhungsfaktor nach **Bild 4-2** zu ermitteln.
- b) Als Dämpfung  $D_1$  der unterstützenden Struktur ist, falls genauere Werte nicht ermittelt oder begründet werden können, der Dämpfungswert des Gebäudes nach **Tabelle 4-1** einzusetzen.
- c) Die Dämpfung  $D_2$  der Komponente in Prozent der kritischen Dämpfung ist nach Abschnitt 4.3.1.3 c einzusetzen. Eine Erweiterung auf Antwortspektren inhomogener Systeme ist im Einzelfall zu begründen.

#### 4.2.2.2 Berücksichtigung der Anregungsrichtungen

Für die drei orthogonalen Richtungen (x, y, z) am Aufstellort des Anlagenteils sind die in **Bild 4-3** und **Bild 4-4** aufgeführten Kombinationen der Anregung zulässig. Dabei darf die Aufteilung in zwei Lastfälle A und B durch Überlagerung aller drei Richtungen auf einen Lastfall reduziert werden. Wird hiervon kein Gebrauch gemacht, ergeben sich zwei Lastfälle A und B (**Bild 4-3** und **Bild 4-4**), von denen für die Auslegung der ungünstigere zugrunde zu legen ist. Im Fall 2 nach **Bild 4-4** müssen horizontaler und vertikaler Zeitverlauf statistisch unabhängig sein.

#### 4.2.2.3 Bemessungsspektren

Für die Bemessung sind entweder Spektren zu verwenden, die Einhüllende von Einzelspektren sind, die den Schwankungsbereich der Parameter abdecken, oder es sind mehrere (maximal fünf) Einzelspektren zu verwenden, die den Schwankungsbereich insgesamt abdecken.

## 4.3 Mechanische Systemanalyse

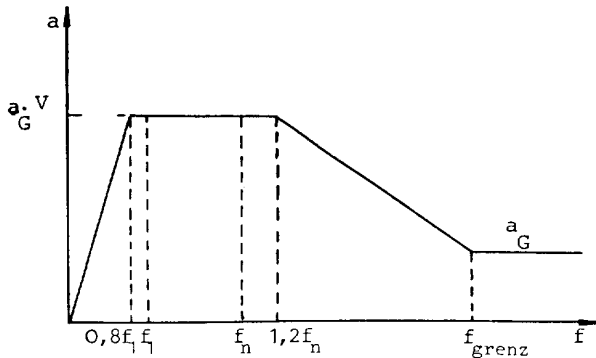
### 4.3.1 Modellabbildung zur Erfassung der Systemeigenschaften

#### 4.3.1.1 Grundsätzliche Anforderung

Das Modell muß im Hinblick auf die Aufgabenstellung konzipiert werden.

### 4.3.1.2 Unterteilung von Strukturen

Strukturen dürfen unterteilt werden, falls die Wechselwirkung zwischen den Teilstrukturen berücksichtigt wird oder das Schwingungsverhalten nicht unzulässig verändert wird. Dies ist grundsätzlich der Fall, wenn eine der folgenden Bedingungen eingehalten wird:



Erläuterungen :

- f = Frequenz
- f<sub>1</sub> = tiefste maßgebende Gebäudefrequenz beim unteren Grenzwert im Variationsbereich der Baugrundsteifigkeit
- f<sub>n</sub> = höchste maßgebende Gebäudefrequenz beim oberen Grenzwert im Variationsbereich der Baugrundsteifigkeit
- f<sub>grenz</sub> = obere Grenzfrequenz des Bodenantwortspektrums
- a = Beschleunigung
- a<sub>G</sub> = Gebäudebeschleunigung am Aufstellort der Komponente ( Nullperiodenbeschleunigung )
- V = Resonanzüberhöhungsfaktor nach Bild 4-2

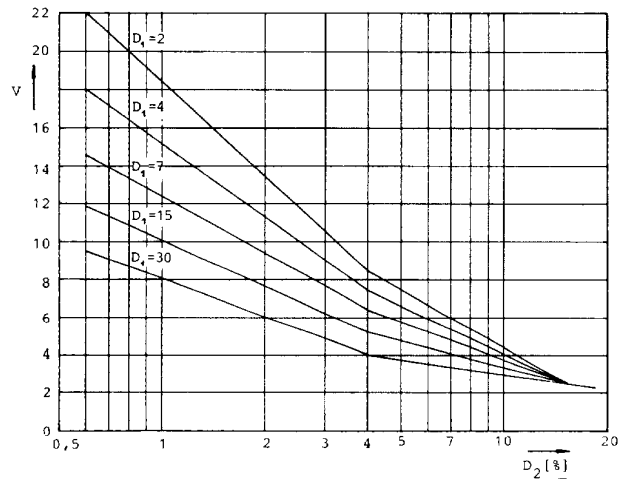
**Bild 4-1:** Ermittlung der Form des Etagen-Antwortspektrums

- a) Die am unterteilten System berechneten relevanten Beanspruchungen (z.B. Spannungen oder Verformungen) unterschreiten die zugehörigen Größen bei Nichtunterteilung höchstens um 10 %.
- b) Die am unterteilten System berechneten signifikanten Eigenfrequenzen weichen von den zugehörigen Eigenfrequenzen des nichtunterteilten Systems um höchstens 15 % ab. Dabei ist für die Hauptstruktur die beteiligte Masse aus dem Nebensystem zu berücksichtigen.

Abweichend davon dürfen höhere Werte verwendet werden, wenn spezielle Kriterien (z. B. sehr geringe Betriebsausnutzung) zutreffen.

Bauteile aus	Dämpfungswerte
Stahlbeton	7
Spannbeton	5
Stahl mit geschweißten Anschlüssen	4
Stahl mit geschraubten Anschlüssen	7
Stahlverbund	7
Mauerwerk	7

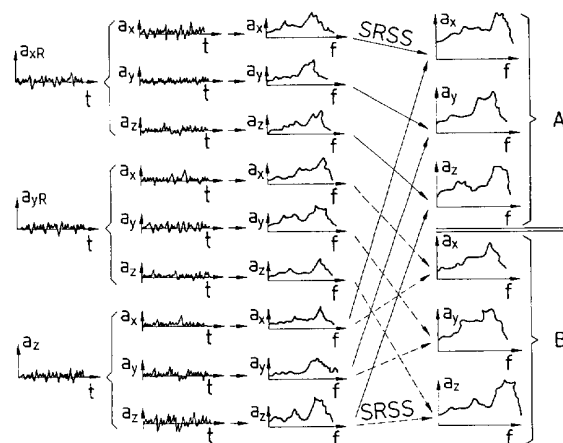
**Tabelle 4-1:** Dämpfungswerte (in Prozent der kritischen Dämpfung) für Gebäude



Erläuterungen:

- D<sub>1</sub> = Dämpfung der unterstützenden Struktur in Prozent der kritischen Dämpfung
- D<sub>2</sub> = Dämpfung der Komponente in Prozent der kritischen Dämpfung

**Bild 4-2:** Ermittlung des Resonanzüberhöhungsfaktors V



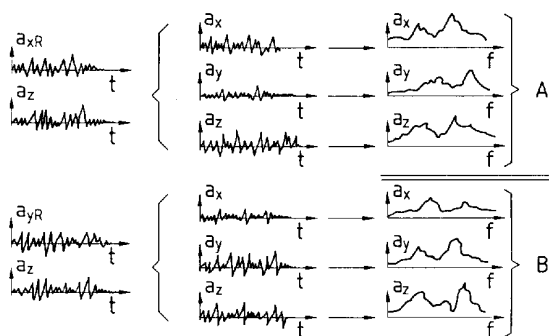
Erläuterungen :

- Index R - Resultierende
- a<sub>x</sub>, a<sub>xR</sub> - horizontale Beschleunigung
- a<sub>y</sub>, a<sub>yR</sub> - horizontale Beschleunigung
- a<sub>z</sub> - vertikale Beschleunigung
- SRSS - Quadratwurzelmethode
- A - Lastfall A
- B - Lastfall B

Der maximale Wert von a<sub>yR</sub> und a<sub>xR</sub> ist gleich der resultierenden maximalen Bodenbeschleunigung.

Ferner gilt: a<sub>yR,max</sub> = a<sub>xR,max</sub>

**Bild 4-3:** Kombinationen der Anregung für 3 orthogonale Richtungen am Aufstellort der Komponente zur Ermittlung der Etagen-Antwortspektren. Fall 1: Separate Eingaben horizontal, separate Eingabe vertikal.



Erläuterungen :

IndexR - Resultierende

$a_x, a_{xR}$

$a_y, a_{yR}$  - horizontale Beschleunigung

$a_z$  - vertikale Beschleunigung

A - Lastfall A

B - Lastfall B

Der maximale Wert von  $a_{yR}$  und  $a_{xR}$  ist gleich der resultierenden maximalen Bodenbeschleunigung.

Ferner gilt:  $a_{yR,max} = a_{xR,max}$

**Bild 4-4:** Kombinationen der Anregung für 3 orthogonale Richtungen am Aufstellort der Komponente zur Ermittlung der Etagen-Antwortpektren. Fall 2: jeweils gleichzeitige Eingabe horizontal und vertikal.

#### 4.3.1.3 Systemeigenschaften

Die folgenden Systemeigenschaften sind auf der Grundlage des stationären Vollastbetriebs der Gesamtanlage zu ermitteln.

##### a) Steifigkeiten

Für die Ermittlung der Steifigkeiten darf linear elastisches Werkstoffverhalten angenommen werden. Nichtlineares Werkstoffverhalten darf ausgenutzt werden.

##### b) Massen

Es sind die Massen von Anlagenteilen während des zu betrachtenden Betriebszustandes anzusetzen. Massen, die aus betrieblichen Gründen nur kurzzeitig und selten (z. B. etwa 2 % der jährlichen Betriebszeit) vorhanden sind, brauchen nicht erfasst zu werden.

##### c) Dämpfungswerte

Es dürfen grundsätzlich die Dämpfungswerte (in Prozent der kritischen Dämpfung) in **Tabelle 4-2** Spalte A verwendet werden. Für mechanisch aktive Komponenten, bei denen der Funktionsfähigkeitsnachweis mittels reduzierter Spannungsgrenzen oder über einen Verformungsnachweis erfolgt, gilt folgendes:

Ist die Gesamtspannung aus betrieblichen und Erdbeben-Belastungen erheblich niedriger als die Streckgrenze, so sind

ca) die Dämpfungswerte in **Tabelle 4-2** Spalte B zu verwenden, oder

cb) die berechneten Verformungen mit einem Faktor zu multiplizieren, der sich ergibt aus dem Verhältnis des Antwortspektrenwertes für die Dämpfung nach **Tabelle 4-2** Spalte B zu dem Antwortspektrenwert für die Dämpfung aus Spalte A.

Höhere Dämpfungswerte als die in **Tabelle 4-2** angegebenen dürfen benutzt werden, falls sie nachgewiesen werden.

Komponenten	Dämpfungswerte	
	A	B
Rohrleitungen	4	-
geschweißte Stahlstrukturen (z.B. Behälter, Ventile) <sup>1)</sup>	4	2
geschraubte Stahlstrukturen	7	4
geschraubte Stahlstrukturen mit GV-Verbindungen	4	2
Kabeltragkonstruktionen	10	-

<sup>1)</sup>Sind aufgrund der Konstruktion Verformungen nur in kleinen Bereichen der Struktur möglich (geringe Strukturdämpfung), sind die Werte zu halbieren (Sonderfälle)

**Tabelle 4-2:** Dämpfungswerte (in Prozent der kritischen Dämpfung) für mechanische Systeme.

Spalte A: nicht abgeminderte Werte

Spalte B: abgeminderte Werte für mechanisch aktive Komponenten gemäß Abschnitt 4.3.1.3 c

#### 4.3.1.4 Flüssigkeitsfüllung in Komponenten

(1) Bei Komponenten mit im Normalbetrieb veränderlichem Füllstand ist der ungünstigste Füllstand bei stationärem Vollastbetrieb der Gesamtanlage zugrunde zu legen.

(2) Die Flüssigkeit in vollständig oder nahezu vollständig gefüllten Komponenten darf als starre, mit der Komponente schwingende Masse angenommen werden.

(3) Bei teilweise gefüllten Komponenten darf folgendermassen vorgegangen werden:

a) Berechnung unter der Annahme einer starren, mit der Komponente schwingenden Flüssigkeitsmasse.

b) Berücksichtigung der Schwingung der Flüssigkeit relativ zum Behälter (Schwappen) für die horizontale Schwingungsrichtung durch Erfassung als fluid-dynamische Problemstellung oder durch das Verfahren mit Ersatzmassen. Dabei darf eine Dämpfung von 0,5 % für die Flüssigkeitsschwingung angenommen werden. Bei dem Verfahren mit Ersatzmassen darf die Flüssigkeitsmasse aufgespalten werden in eine mit der Komponente starr gekoppelte sogenannte Ruhemasse und in eine relativ zur Komponente schwingende Schwappmasse. Die Wirkung von solchen Einbauten, die die Flüssigkeitsschwingung behindern, ist zu beachten.

Hinweis:

Für translatorische Bewegungen von rechteckigen und stehenden zylindrischen Behältern sind Kennwerte z. B. in Newmark, N.M. and Rosenblüth, E.: "Fundamentals of Earthquake Engineering", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J. 1971 angegeben.

Komponenten, für deren Geometrie keine einfachen Lösungen vorhanden sind, dürfen auf gleichwertige Ersatzgeometrien zurückgeführt werden. Für den Sonderfall des querschwingenden liegenden zylindrischen Behälters darf die Flüssigkeitsmasse als starre Pendelmasse aufgefaßt werden. Für die vertikale Schwingungsrichtung darf die Flüssigkeit als starr mit der Komponente schwingende Masse angenommen werden.

#### 4.3.2 Ermittlung der Belastungen

##### 4.3.2.1 Verfahren

Die Ermittlung der Belastungen darf nach einem der folgenden Verfahren durchgeführt werden:

a) Antwortspektren-Methode gemäß Abschnitt 4.3.2.2

b) Zeitverlauf-Methode gemäß Abschnitt 4.3.2.3

c) Ersatzverfahren gemäß Abschnitt 4.3.2.4.

**4.3.2.2** Antwortspektren-Methode

**4.3.2.2.1** Überlagerung der Anteile aus den einzelnen Eigenformen (für eine Anregungsrichtung)

(1) Bei Anwendung der Antwortspektren-Methode auf Anlagenteile mit mehreren Freiheitsgraden sind die maximalen Größen (z.B. Schnittgrößen, Beschleunigungen, Beanspruchungen) aus den einzelnen Eigenformen grundsätzlich gemäß **Gleichung 4-1** zu überlagern. Es sind alle Eigenformen bis zur oberen Grenzfrequenz zu erfassen. Liegen signifikante Eigenfrequenzen oberhalb der oberen Grenzfrequenz, so gilt Absatz 4.

$$S = \left[ \sum_{i=1}^m S_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-1)$$

Hierbei bedeuten :

- S maximale resultierende Größe für eine Anregungsrichtung
- S<sub>i</sub> maximale Größe der i-ten Eigenform für eine Anregungsrichtung
- m Anzahl der Frequenzen bis zur oberen Grenzfrequenz

(2) Sind mehrfache Anregungsstellen vorhanden, so ist eines der folgenden Verfahren anzuwenden:

- a) Verfahren der gewichteten Spektren,
- b) Verfahren der Einhüllenden von Einzelspektren, getrennt nach den Anregungsrichtungen.

(3) Falls Beanspruchungen aus Relativverschiebungen zu erfassen sind, ist gemäß Abschnitt 3.10 vorzugehen.

**H i n w e i s :**

Unter Anregungsstelle wird die Anschlussstelle zwischen der tragenden Struktur (z.B. Gebäude, Komponente) und der gestützten, zu untersuchenden Struktur verstanden.

(4) Liegen signifikante Eigenfrequenzen oberhalb der oberen Grenzfrequenz, so sind diese zu erfassen (Starrkörperanteil). Dazu darf eines der nachfolgend aufgeführten Verfahren angewendet werden:

a) Überlagerung gemäß **Gleichung (4-2)**

$$S = \left[ \sum_{i=1}^m S_i^2 + \left( \sum_{i=m+1}^n S_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-2)$$

Hierbei bedeuten :

- S maximale resultierende Größe für eine Anregungsrichtung
- S<sub>i</sub> maximale Größe der i-ten Eigenform für eine Anregungsrichtung
- m Anzahl der Frequenzen bis zur oberen Grenzfrequenz
- n Gesamtzahl der Frequenzen

b) Überlagerung gemäß **Gleichung (4-3)**

$$S = \left[ \sum_{i=1}^{m+k} S_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} ; (m + k \leq n) \quad (4-3)$$

Hierbei bedeuten:

- S maximale resultierende Größe für eine Anregungsrichtung
- S<sub>i</sub> maximale Größe der i-ten Eigenform für eine Anregungsrichtung
- m Anzahl der Frequenzen bis zur oberen Grenzfrequenz
- k Anzahl der signifikanten Frequenzen oberhalb der oberen Grenzfrequenz

n Gesamtzahl der Frequenzen

c) Berücksichtigung als statische Belastung gemäß **Gleichung (4-4)**

$$S = \left[ \left( \sum_{i=1}^m S_i^2 \right) + S_{St}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-4)$$

Hierbei bedeuten :

- S maximale resultierende Größe für eine Anregungsrichtung
- S<sub>i</sub> maximale Größe der i-ten Eigenform für eine Anregungsrichtung
- m Anzahl der Frequenzen bis zur oberen Grenzfrequenz
- S<sub>ST</sub> Bewegungs- oder Schnittgröße aus dem statischen Lastfall mit der Starrkörperbeschleunigung in der jeweiligen Anregungsrichtung. Grenzfall: S<sub>ST</sub> = 0 für n = m

**4.3.2.2.2** Überlagerung der Anteile der verschiedenen Anregungsrichtungen

Es sind die Erdbebenlasten gemäß Abschnitt 4.2.2.2 zu untersuchen. Dabei darf die Überlagerung gleichgerichteter Bewegungs- oder Schnittgrößen aus den einzelnen Anregungsrichtungen jedes Lastfalles nach der Methode der Wurzel aus der Summe der Quadrate vorgenommen werden.

**4.3.2.3** Zeitverlauf-Methode

(1) Die Zeitverlauf-Methode soll in jenen Sonderfällen angewendet werden, in denen die Kenntnis der zeitlichen Zuordnung oder des Einflusses der Phasenlage erforderlich ist.

(2) Werden die Zeitverlaufberechnungen für jede Anregungsrichtung getrennt durchgeführt, so darf die Überlagerung der Maxima gleichgerichteter Bewegungs- oder Schnittgrößen aus den einzelnen Anregungsrichtungen jedes Lastfalles nach der Methode der Wurzel aus der Summe der Quadrate vorgenommen werden.

**4.3.2.4** Ersatzverfahren

**4.3.2.4.1** Allgemeines

(1) Ersatzverfahren zur Ermittlung von Belastungen dürfen für Systeme mit hinreichend homogener Massenverteilung angewendet werden.

(2) Bei Systemen mit mehreren Teilsystemen dürfen sie für das unterstützende System angewendet werden. Für das unterstützte System ist als Anregung das Antwortspektrum des unterstützten Systems zu verwenden. Dieses darf nach Abschnitt 4.2.2.1 ermittelt werden.

(3) Die Berechnung der Bewegungs- und Schnittgrößen darf mittels statischer Ersatzlasten erfolgen. Diese sind dabei als Punktlasten oder verteilte Lasten anzusetzen. Die in der i-ten Richtung anzusetzende Ersatzbeschleunigung a<sub>E,i</sub>, mit der die konzentrierten oder die kontinuierlichen Massen multipliziert werden müssen, ist wie folgt zu berechnen:

$$a_{E,i} = e_i \cdot a_{r,i} \quad (4-5)$$

Hierbei bedeuten :

- a<sub>E,i</sub> Ersatzbeschleunigung für die Richtung i
- a<sub>r,i</sub> Beschleunigungswert aus dem Etagen-Antwortspektrum für die Richtung i (siehe Abschnitt 4.3.2.4.2)
- e<sub>i</sub> Faktor zur Erfassung der Beiträge mehrerer Eigenschwingungen (siehe Abschnitt 4.3.2.4.3) für die Richtung i
- i Index für Anregungsrichtung

#### 4.3.2.4.2 Ermittlung des Beschleunigungswertes $a_{f,i}$

(1) Für  $a_{f,i}$  ist der größte Wert des Etagen-Antwortspektrums in der Richtung  $i$  bei der jeweiligen Dämpfung für Eigenfrequenzen größer oder gleich der ersten Eigenfrequenz der Komponente einzusetzen. Ist die erste signifikante Eigenfrequenz der Komponente nicht bekannt, so ist der Maximalwert des Etagen-Antwortspektrums zu verwenden.

(2) Bei räumlich gekoppelten Systemen sind - sofern keine genaueren Untersuchungen durchgeführt werden - alle (drei)  $a_{f,i}$  gleich dem größten der drei ermittelten Werte zu setzen.

#### 4.3.2.4.3 Faktor $e_i$ zur Erfassung der Beiträge mehrerer Eigenschwingungen

(1) Die  $e_i$ -Werte sind **Tabelle 4-3** zu entnehmen. Niedrigere  $e_i$ -Werte als die in **Tabelle 4-3** angegebenen dürfen verwendet werden, falls die Zulässigkeit nachgewiesen wird. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob bezüglich der betrachteten Richtung  $i$  das Anlagenteil gemäß **Tabelle 4-3** idealisiert werden kann. Ist dies nicht der Fall, so ist der gewählte Wert zu belegen.

(2) Für starre Komponenten (Grundfrequenz der Komponente größer oder gleich der oberen Grenzfrequenz) ist  $e_i = 1,0$  anzusetzen.

(3) Für die Ermittlung der Auflagerreaktionen darf unabhängig von der Art des Systems  $e_i = 1,0$  angesetzt werden.

Modellabbildung	$e_i$
Durchlaufträger gleicher Feldweite	1,0
Kragträger	1,0
Gerader Balken beliebiger Lagerung	1,0 <sup>*</sup> )
Ebene Systeme (z. B. Rahmentragwerke, Trägerroste, ebene Rohrleitungssysteme)	1,2
Räumliche Systeme komplizierter Topologie	1,5
*) Die größten Schnittgrößen (Kräfte, Momente) sind an jedem Querschnitt anzusetzen	

**Tabelle 4-3:**  $e_i$ -Werte für Gleichung (4-5)

#### 4.3.2.4.4 Überlagerung der Anteile aus den verschiedenen Richtungen

Die Überlagerung gleichgerichteter Bewegungs- oder Schnittgrößen aus den verschiedenen Richtungen darf nach der Methode der Wurzel aus der Summe der Quadrate vorgenommen werden.

### 4.4 Beanspruchungsanalyse

#### 4.4.1 Beanspruchungsermittlung

Zur Beanspruchungsermittlung sind die Spannungen oder Verformungen je nach Nachweisziel zu ermitteln und gemäß Abschnitt 4.4.2 abzusichern.

#### 4.4.2 Zulässigkeitsnachweis

##### 4.4.2.1 Spannungsnachweis

###### 4.4.2.1.1 Allgemeines

(1) Die Erdbebenlasten sind mit den Lasten gemäß Abschnitt 3.4 zu überlagern. Für diese Gesamtlasten sind die zugehörigen Spannungen zu ermitteln und die in den Abschnitten 4.4.2.1.2 oder 4.4.2.1.3 aufgeführten Spannungs-

grenzen einzuhalten. Diese gelten für die Bemessung mittels linearelastischer Analysen.

(2) Eine Bemessung auf nichtlinearer Basis ist zulässig. Die zulässigen Spannungsgrenzen hierfür sind im Einzelfall festzulegen.

(3) Alternativ zum Spannungsnachweis darf der Zulässigkeitsnachweis über einen Dehnungsnachweis erfolgen.

(4) Falls aus Relativverschiebungen nach Abschnitt 3.10 Primärspannungen resultieren, sind diese abzusichern.

#### 4.4.2.1.2 Anlagenteile der Klasse I

(1) Für Komponenten des Primärkreislaufs einschließlich Einbauten gilt:

- Dem Bemessungserdbeben ist grundsätzlich die Beanspruchungsstufe D gemäß KTA 3201.2 zuzuordnen. Dabei brauchen nur Primärspannungen nachgewiesen und gemäß KTA 3201.2 abgesichert zu werden. Das Bemessungserdbeben ist jedoch abweichend von der Beanspruchungsstufe D gemäß Abschnitt 4.4.2.4 Absatz 3 abzusichern, wenn die Funktionsfähigkeit während oder nach dem Erdbeben gefordert wird und keine Verformungsanalyse durchgeführt wird.
- Für Einbauten der Klasse I gelten obige Festlegungen bezüglich der Einstufung, bezüglich der Spannungsgrenzen sind die entsprechenden KTA-Regeln anzuwenden (z. B. KTA 3204 für die Reaktordruckbehälter-Einbauten)
- Für Stützkonstruktionen des Primärkreislaufs gemäß KTA 3205.1 ist dem Bemessungserdbeben der Lastfall HS zugrunde zu legen. Der Spannungsnachweis und die Spannungsabsicherung ist gemäß KTA 3205.1 durchzuführen.

(2) Für druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises gilt:

- Dem Bemessungserdbeben ist grundsätzlich die Beanspruchungsstufe D zuzuordnen. Dabei brauchen nur Primärspannungen nachgewiesen und abgesichert zu werden. Dem Bemessungserdbeben ist jedoch die Beanspruchungsstufe C zuzuordnen, falls eine ausreichende Verformungsfähigkeit des Bauteils nicht gegeben ist (z.B. Kehlnähte, nicht durchgeschweißte Nähte).
- Das Bemessungserdbeben ist jedoch abweichend von der Beanspruchungsstufe D gemäß Abschnitt 4.4.2.4 Absatz 3 abzusichern, wenn die Funktionsfähigkeit während oder nach dem Erdbeben gefordert wird und keine Verformungsanalyse durchgeführt wird.

##### Hinweis:

Festlegungen zu den Beanspruchungsstufen sowie die Spannungsabsicherung werden in KTA 3211.2 "Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung" (in Vorbereitung) geregelt.

- Für Stützkonstruktionen ist dem Bemessungserdbeben der Lastfall HS zuzuordnen. Der Spannungsnachweis und die Spannungsabsicherung ist gemäß KTA 3205.2 durchzuführen.

(3) Der Erdbebennachweis des Reaktorsicherheitsbehälters aus Stahl ist festzulegen.

##### Hinweis:

Der Erdbebennachweis des Reaktorsicherheitsbehälters aus Stahl wird in KTA 2201.3 (z. Zt. in Vorbereitung) und KTA 3401 H behandelt.

(4) Für sonstige Anlagenteile einschließlich elektrotechnischer Anlagenteile gilt:

- Unter sonstige Anlagenteile sind alle Anlagenteile zu erfassen, die nicht unter den Absätzen 1 bis 3 geregelt sind. Eingeschlossen sind die mechanischen Strukturen von elektrotechnischen Anlagenteilen, z. B. Tragkonstruktionen.

b) Die Einstufung und Spannungsbegrenzung für das Bemessungserdbeben ist je nach Art der Komponente und der durchzuführenden Nachweise gemäß Spalte 1, 2 oder 3 nach **Tabelle 4-4** durchzuführen.

ba) Spalte 1 in **Tabelle 4-4** ist anzuwenden bei Komponenten, die gemäß Regelwerken ausgelegt werden, die auf dem Konzept der Beanspruchungsstufen basieren.

	Begrenzung der Primärspannungen			
	1	2	3	
			$P_m$	$P_m+P_b$ oder $P_1+P_b$
(1)	D	HS	$0,7 R_m$	$\alpha \cdot 0,7 R_m$
(2)	C	HS	$R_{p0,2}$	$\alpha \cdot R_{p0,2}$
Erläuterungen : (1) grundsätzliche Einstufung (2) strengere Einstufung $\alpha$ Formfaktor ( vom Querschnitt abhängig, exakt oder konservativ zu ermitteln ), z. B. $\alpha = 1,5$ für Rechteckquerschnitte C, Beanspruchungsstufen ( Definition siehe z.B. KTA D 3201.2 ) H,S Lastfall ( Grenze aus den einschlägigen Regeln der Technik, HS = Haupt- und Sonderlasten ) $R_{p0,2}$ Steckgrenze oder 0,2 Dehngrenze $R_m$ Zugfestigkeit $P_1$ örtliche primäre Membranspannung $P_m$ allgemeine primäre Membranspannung $P_b$ primäre Biegespannung				

**Tabelle 4-4:** Einstufung und Begrenzung der Primärspannungen

bb) Spalte 2 in **Tabelle 4-4** ist anzuwenden bei Komponenten, die nach dem Konzept der Haupt-, Zusatz- und Sonderlasten ausgelegt werden.

bc) Spalte 3 in **Tabelle 4-4** ist für jene Komponenten anzuwenden, für die keine Vorschriften existieren, die für Erdbeben anzuwenden sind.

c) Eine strengere Einstufung gemäß Ziffer (2) in **Tabelle 4-4** hat für das Bemessungserdbeben zu erfolgen, wenn eine nicht ausreichende Verformungsfähigkeit des Bauteils gegeben ist.

d) Für Komponenten aus nichtverformungsfähigen Werkstoffen (z.B. Grauguß, Keramik) sind neben den Primärspannungen auch die Gesamtspannungen zu berücksichtigen. Sekundärspannungen und Spannungsspitzen sind entweder im Rahmen der Gesamtspannungen wie Primärspannungen zu behandeln oder zusätzlich zu den Primärspannungen gegen die entsprechende Versagensart abzusichern.

**4.4.2.1.3** Anlagenteile der Klasse II, die infolge Erdbeben Klasse I-Anlagenteile gefährden können

(1) Für Anlagenteile der Klasse II, die infolge Erdbeben Klasse I-Anlagenteile gefährden können, und für die Standsicherheit gefordert ist (das Versagen der Abstützung muß vermieden werden), ist ein Spannungsnachweis für die Abstützung erforderlich.

(2) Der Nachweis für Krane und deren Stahltragwerke ist gemäß Anhang A zu führen.

(3) Für druckführende Anlagenteile der Klasse II, die infolge Erdbeben Klasse I-Anlagenteile gefährden können, und für die zusätzlich Integrität gefordert wird, ist ein Spannungsnachweis für die druckführende Wandung erforderlich.

(4) Beim Nachweis der Standsicherheit oder Integrität ist für verformungsfähige Werkstoffe die Einhaltung einer der folgenden Grenzen a), b) oder c) sicherzustellen:

a) Begrenzung wie für Anlagenteile der Klasse I,

b)  $P_m \leq 0,7 R_m$  und  $P_m + P_b \leq \alpha \cdot 0,7 R_m$ ,

c) Begrenzung der einachsigen Dehnungen auf 50 % der Gleichmaßdehnung oder bei mehrachsiger Spannungsverteilung Begrenzung des Maximal-Wertes der Vergleichsdehnung auf 50 % der zur Spannungsverteilung zugehörigen Versagensdehnung. Diese ist im allgemeinen experimentell zu ermitteln.

(5) Der Nachweis für nichtverformungsfähige Werkstoffe ist gemäß Abschnitt 4.4.2.1.2 Absatz 4 Aufzählung d) durchzuführen.

**4.4.2.2** Stabilitätsnachweis

(1) Falls mechanische Instabilitäten auftreten können, ist ein Stabilitätsnachweis zu führen. Dabei sind unter anderem die folgenden Verfahren zulässig:

a) Sicherheit gegen Erreichen der kritischen Last,

b) Erfassung als nichtlineares Spannungsproblem (z. B. Traglastverfahren).

(2) Die Sicherheiten gegen Instabilitäten sind im Einzelfall festzulegen.

**H i n w e i s:**

Festlegungen für Stabilitätsnachweise befinden sich zum Beispiel in KTA 3205.1 und KTA 2201.3 (z.Zt. in Vorbereitung). Sicherheitsfaktoren befinden sich z.B. in DIN 4114, DIN 18 800, ASME Section III sowie DAST-Richtlinien.

**4.4.2.3** Standsicherheitsnachweis

**4.4.2.3.1** Komponenten mit Verankerung

Die Standsicherheit ist durch den Festigkeitsnachweis der Abstützung unter Beachtung des Anschlusses an die Komponente und der Verankerung nachzuweisen (siehe Abschnitt 4.4.2.1).

**4.4.2.3.2** Komponenten ohne Verankerung

Für Komponenten, die nicht verankert sind, ist zusätzlich zum Festigkeitsnachweis der Abstützung die Sicherheit gegen unzulässiges Kippen oder Gleiten nachzuweisen. Für die Sicherheit gegen Kippen sind die stabilisierenden Belastungen mit einem Faktor von 1,0 und die destabilisierenden Belastungen mit einem Faktor von 1,1 anzusetzen. Die Sicherheit gegen unzulässiges Gleiten muß durch Ansatz eines Sicherheitsfaktors von 1,1 nachgewiesen werden.

**4.4.2.4** Funktionsfähigkeitsnachweis

(1) Der rechnerische Nachweis der aktiven und passiven Funktionsfähigkeit darf entweder durch einen Verformungsnachweis oder durch einen Spannungsnachweis vorgenommen werden.

(2) Verformungsnachweis: Es sind die Verformungen zu ermitteln und deren Zulässigkeit bezüglich der geforderten Funktion nachzuweisen. Dabei sind als Fälle zu unterscheiden:

a) Falls die Funktionsfähigkeit nach dem Erdbeben gefordert wird, sind die resultierenden bleibenden Verformungen zugrunde zu legen.

b) Falls die Funktionsfähigkeit auch während des Erdbebens gefordert wird, sind die resultierenden Gesamtverformungen (elastische und bleibende Verformungen) zugrunde zu legen.

Für den Nachweis der passiven Funktionsfähigkeit dürfen für vorgespannte Schraubenverbindungen Verspannungsschaubilder, z. B. nach Bild 8 DIN 2505, angewendet werden.

(3) Spannungsnachweis: Es ist ein Spannungsnachweis zu führen mit gegenüber dem Festigkeitsnachweis für die Integrität verschärften Grenzen. Dabei ist zu unterscheiden:

- a) Falls die aktive Funktionsfähigkeit nach dem Erdbeben oder die passive Funktionsfähigkeit gefordert wird, ist für das Bemessungserdbeben die Stufe C anzusetzen. Für die aktive Funktionsfähigkeit ist bei der Konstruktion darauf zu achten, daß nur solche bleibenden Verformungen zu erwarten sind, die die Funktionsfähigkeit der Komponente unbeeinträchtigt lassen. Ebenso kann durch Verwendung der Primärspannungsgrenzen der Beanspruchungsstufe B oder des anomalen Betriebs die Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden.
- b) Falls die aktive Funktionsfähigkeit auch während des Erdbebens gefordert wird, sind für die Primärspannungen die Spannungsgrenzen der Beanspruchungsstufe B zu wählen oder die Spannungsgrenzen des anomalen Betriebs. Bei der Konstruktion ist darauf zu achten, daß nur solche Gesamtverformungen (elastische und bleibende) zu erwarten sind, bei denen die Funktionsfähigkeit der Komponente erhalten bleibt.
- c) Zur Sicherstellung des Durchflusses in passiven Komponenten (z.B. Rohrleitungen, Wärmetauscher) genügt die Beanspruchungsstufe D, wenn die Komponentenanalyse auf elastischer Basis erfolgt.

#### Hinweis:

Dieser Spannungsnachweis deckt für die betrachteten Bereiche gleichzeitig den Spannungsnachweis gemäß Abschnitt 4.4.2.1 ab.

## 4.5 Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte

Die Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte ist zulässig. Zum Beispiel darf

- a) von der Anregung am Standort ausgegangen werden, ohne die Ermittlung der Anregung am Aufstellort vorzunehmen, wenn in der Modellabbildung zur Erfassung der Systemeigenschaften zusätzlich das Gebäude und der Baugrund miteingebildet werden (Schritt 0-C in **Bild 3-1**), oder
- b) die Ermittlung der Belastungen entfallen, wenn die Modellabbildung zur Erfassung der Systemeigenschaften soweit verfeinert wird, daß die sich aus diesem Modell ergebenden Beanspruchungen unmittelbar für den Zulässigkeitsnachweis verwendet werden können (Schritt A-D in **Bild 3-1**).

## 5 Experimentelle Nachweise

### 5.1 Nachweisziel

(1) Das Nachweisziel der Prüfung ist aus den sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen abzuleiten.

(2) Für die aus dem Nachweisziel abzuleitenden Anforderungen an einzuhaltende Grenzwerte ist festzulegen, ob diese während der Prüfung festzustellen sind.

### 5.2 Anforderungen an den Prüfling

(1) Experimentelle Nachweise zur Erdbebensicherheit dürfen für Anlagenteile, Komponenten oder Einzelgeräte - nachfolgend allgemein als Prüflinge bezeichnet - im Prüffeld oder im eingebauten Zustand im Kernkraftwerk durchgeführt werden.

(2) Es sind vorzugsweise Originalkomponenten zu verwenden. Ersatzkomponenten dürfen verwendet werden, wenn sie die Eigenschaften der Originalkomponente entsprechend dem jeweiligen Nachweisziel repräsentieren.

#### Hinweis:

Unter Originalkomponenten werden die tatsächlich im Kernkraftwerk zum Einsatz kommenden Komponenten oder baugleiche Komponenten verstanden.

(3) Wird für mehrere Teilprüfungen derselbe Prüfling verwendet, so ist sicherzustellen, daß die für die jeweilige Prüfung wesentlichen Eigenschaften der Originalkomponente noch vorhanden sind.

(4) Wird die Prüfung im Prüffeld durchgeführt, so ist die Befestigung des Prüflings so auszuführen, daß sie die Originalrandbedingungen im Hinblick auf das Nachweisziel repräsentiert.

(5) Der Einfluß vorhandener Schwingungsisolierungen ist zu berücksichtigen. Dies darf entweder bei der Befestigung des Prüflings oder bei der Ermittlung der Belastungsgrößen erfolgen.

(6) Wird bei der Prüfung von der Gebrauchslage des Prüflings abgewichen, so ist der geänderte Einfluß der Schwerkraft zu berücksichtigen.

(7) Soweit erforderlich, sind Verbindungen zu Nachbarkomponenten zu berücksichtigen.

(8) Die bei Eintreten eines Erdbebens zu unterstellenden Betriebsbedingungen für den Prüfling, die aus den Festlegungen in Abschnitt 3.4 abzuleiten sind, sind, sofern es für das Nachweisziel erforderlich ist, zu erfassen (z.B. Druck, Temperatur, elektrische Spannung, elektrische Stromstärke, einzuhaltende Grenzwerte). Werden die Betriebsbedingungen nicht oder nur teilweise bei der Prüfung berücksichtigt, so sind deren Auswirkungen auf andere Weise (z. B. durch Berechnung) zu erfassen.

## 5.3 Anforderungen an die Anregung

### 5.3.1 Belastung

(1) Zur experimentellen Ermittlung der Anregung am Aufstellort sind die Festlegungen gemäß den Abschnitten 4.2, 5.2 und 5.4 zu beachten.

(2) Die für die Prüfung maßgebende Belastung ist entsprechend den vorgegebenen Lastannahmen (z.B. statische Ersatzlasten, Antwortspektrum, Zeitverläufe) für die Anregungsrichtungen am Aufstell- oder Einbauort festzulegen.

(3) Bei der Prüfung ist der Prüfling so anzuregen, daß mindestens die vorgegebenen Lastannahmen erfüllt werden.

(4) Die jeweils gewählte Anregung muß grundsätzlich der maßgebenden Erdbebenbelastung gleichwertig sein. Bei der Anregung mit erzwungenen Schwingungen gemäß Abschnitt 5.3.6 c ist der Nachweis der Gleichwertigkeit bevorzugt durch einen Spektrenvergleich zu erbringen. Andere Nachweismethoden, z. B. über die spektrale Leistungsdichte, sind zulässig.

(5) Von der Forderung nach Gleichwertigkeit der Belastung darf abgewichen werden, wenn die Erfüllung des Nachweiszieles durch Extrapolation möglich ist (z. B. bei Beanspruchungen im linearen Bereich).

### 5.3.2 Spektrenvergleich

Zur Sicherstellung der Gleichwertigkeit von Antwortspektren sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

- a) Bei unbekanntem Schwingverhalten des Prüflings ist sicherzustellen, daß die vorgegebenen Spektren durch die Gesamtheit der aufgetragenen Prüfanregungen erreicht werden. Dies ist erfüllt, wenn die Kontrollfrequenz-Schrittweite nicht größer ist als 10 % der jeweils vorhergehenden Frequenz. Die tiefste Kontrollfrequenz darf nicht höher als 0,4 Hz sein, die höchste

Kontrollfrequenz muß mindestens gleich der oberen Grenzfrequenz sein. Das erzeugte Spektrum darf das vorgegebene Spektrum nur an 10 % der genannten Kontrollfrequenzen um höchstens 10 % unterschreiten. Dieser Nachweis ist für den jeweils anzusetzenden Dämpfungswert aus **Tabelle 4-2** zu erbringen.

- b) Sind die charakteristischen Frequenzen des Prüflings bekannt, so ist es ausreichend, wenn durch die Testsignale die vorgegebenen Spektren bereichsweise eingehüllt werden. Der Nachweis ist dabei bei den charakteristischen Frequenzen und zusätzlich bei den um  $\pm 10\%$  davon entfernten Frequenzen zu führen. Der Nachweis der Gleichwertigkeit ist für zuverlässig ermittelte Dämpfungswerte oder für den jeweils anzusetzenden Dämpfungswert aus **Tabelle 4-2** zu erbringen.

### 5.3.3 Achsen der Anregung

- (1) Grundsätzlich sind die Anregungen bei der Prüfung gleichzeitig in allen drei Raumachsen aufzubringen.
- (2) Eine getrennte Aufeinanderfolge der richtungsbezogenen Einzelbelastungen ist zulässig, wenn
- das Nachweisziel eine Überlagerung der entsprechenden Reaktionen des Prüflings gestattet, oder
  - gezeigt wird, daß das Prüflingsverhalten (Eigenfrequenzen, Steifigkeiten) oder die Anforderungsspektren (Frequenzbereiche mit großen Überhöhungen) in den einzelnen Achsen unabhängig voneinander sind, oder
  - die Prüfanregungen die Mehrachsigkeit der Erdbebenanregung durch entsprechend höhere Anregung berücksichtigen.

#### H i n w e i s:

Beispiel für die Überlagerung von Belastungen: Im Falle geforderter dreiachsiger, jedoch nur simultan zweiachsig (vertikal mit horizontal) durchgeführter translatorischer Anregung erfolgt die Prüfung nacheinander in zwei um  $90^\circ$  versetzten horizontalen Achsen jeweils mit der vertikalen Anregung kombiniert; als Horizontalamplitude wird dabei jeweils der Betrag der Resultierenden aus den in den beiden Horizontalachsen vorliegenden Belastungen aufgebracht.

- (3) Bei mehrachsiger Prüfanregung mit fester Phasenzuordnung sollen gleichphasige und um  $180^\circ$  phasenverschobene Anregungssignale so kombiniert werden, daß sich insgesamt vier verschiedene Prüfläufe ergeben.

Die Anregung zur Ermittlung der Kennwerte soll vorzugsweise einachsige erfolgen.

### 5.3.4 Querbewegungen

- (1) Querbewegungen orthogonal zur jeweiligen Anregungsrichtung oder -ebene sind zu erfassen.
- (2) Die Amplituden dieser Querbewegungen sollen nicht mehr als 25 % der Sollwerte in der jeweiligen Anregungsrichtung oder -ebene betragen. Wird dieser Wert überschritten, so ist zu begründen, daß keine unzulässige Verminderung der Beanspruchung eintritt.

### 5.3.5 Anforderungen an einzelfrequente Prüfanregungen

- (1) Zur Kontrolle der Anregung darf bei einzelfrequenter Anregung der gemessene Amplitudenwert  $a_{\text{sub-n}}$  der anregenden Frequenz in der vorgeschriebenen Anregungsrichtung höchstens um minus 10 % vom entsprechenden Sollwert abweichen.
- (2) Der Störschwingungsanteil soll bis zum Fünffachen der höchsten Prüffrequenz den Wert von  $d = 100\%$  nicht überschreiten.

$$d = \frac{1}{a_n} \sqrt{a_{\text{ges}}^2 - a_n^2} \cdot 100 \text{ in Prozent} \quad (5-1)$$

Hierbei bedeuten :

- $d$  Störschwingungsanteil in Prozent  
 $a_{\text{ges}}$  Effektivwert der Beschleunigungsamplitude innerhalb des zu überwachenden Frequenzbereiches  
 $a_n$  Effektivwert der vorgegebenen Beschleunigungsamplitude bei der anregenden Frequenz

Ein höherer Störschwingungsanteil wirkt bei Beanspruchungsprüfungen prüfverschärfend und darf, sofern mit dem Nachweisziel vereinbar, zugelassen werden.

### 5.3.6 Experimentelle Verfahren für die Prüfanregung

Die folgenden Verfahren für die Prüfanregung sind mit den Einschränkungen gemäß der Abschnitte 5.4 bis 5.6 zulässig:

- a) statische Verfahren  
 Hierunter sind die Verfahren zu verstehen, bei denen sich die für das Nachweisziel maßgebenden Größen während der Versuchsdauer nicht oder nur so ändern, daß dynamische Einflüsse vernachlässigbar sind (z. B. statische Auslenkversuche).
- b) Verfahren der freien Schwingungen  
 Hierunter sind die Verfahren zu verstehen, bei denen das System nach einer anfangs aufgebrachten Belastung schwingungstechnisch sich selbst überlassen bleibt (z.B. Ausschwingversuche, Rückschnellversuche).
- c) Verfahren der erzwungenen Schwingungen  
 Hierunter sind die Verfahren zu verstehen, bei denen über die gesamte Versuchsdauer eine zeitabhängige Anregung vorhanden ist. Die Anregung kann dabei einzelfrequent oder mehrfrequent erfolgen.

Als Prüfanregung dürfen z.B. Sinus, Gleitsinus, Sinusschwebung verwendet werden.

Als mehrfrequente Prüfanregungen dürfen z.B. Rauschen, spektrumkompatible Zeitverläufe, Überlagerung mehrerer Einzelfrequenzen verwendet werden.

## 5.4 Mechanische Systemanalyse

### 5.4.1 Ermittlung von Systemeigenschaften und Kennwerten (Nachweisschritt A-B gemäß Bild 3-1)

- (1) Die Anregung zur Ermittlung der Kennwerte soll vorzugsweise einachsige erfolgen.
- (2) Die Ermittlung der statischen Kennwerte (lokale und globale Steifigkeiten) darf dann bei geringeren Werten als bei der maßgebenden Erdbebenbelastung erfolgen, wenn die Extrapolierbarkeit der Ergebnisse gegeben ist (z. B. bei Beanspruchungen im linearen Bereich). Die statischen Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 a sollen hierbei vorzugsweise angewendet werden. Die übrigen Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 dürfen angewendet werden.
- (3) Die Ermittlung von Dämpfungswerten darf grundsätzlich nur mit den Verfahren gemäß der Abschnitte 5.3.6 b und 5.3.6 c erfolgen. Eine konservative Abschätzung darf mit dem Verfahren nach Abschnitt 5.3.6 a durchgeführt werden (Messung der statischen Hysterese). Hierbei gelten die folgenden Einschränkungen:
- Für die Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 b ist bei Ermittlung der Dämpfung durch Ausschwingversuche zu beachten, daß die Ausschwingzeit neben der Systemdämpfung auch durch die Energieableitung in angrenzende Systeme beeinflusst werden kann.
  - Für die Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 c

- ba) ist bei Einzelfrequenzanregung (Sinusanregung) mit fester oder gleitender Frequenz darauf zu achten, daß die Anregung genügend lange ansteht, oder daß die Frequenzänderungsgeschwindigkeit genügend gering ist, damit der eingeschwingene Zustand näherungsweise realisiert wird,
- bb) soll bei der Gleitsinusanregung grundsätzlich eine Frequenzänderungsgeschwindigkeit von maximal einer Oktave/min angewendet werden. Höhere Frequenzänderungsgeschwindigkeiten müssen im Einzelfall begründet werden,
- bc) darf die Dämpfung aus der Schwingungsüberhöhung an geeigneten Punkten des Prüflings ermittelt werden (z.B. aus Resonanzüberhöhung, Halbwertsbreite oder Übertragungsfunktion),
- bd) darf eine untere Schranke für die bezogene Dämpfung  $D$  des Prüflings gemäß **Gleichung (5-2)** ermittelt werden.

$$D = \frac{1}{2 \cdot Q} \cdot 100 \text{ in Prozent} \quad (5-2)$$

Hierbei bedeuten :

- $D$  Dämpfung des Prüflings in Prozente der kritischen Dämpfung
- $Q$  maximale Überhöhung des Amplitudenfrequenzganges

(4) Die Ermittlung der übrigen dynamischen Kennwerte (z.B. Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen) ist mit dem Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 b oder mit einem der Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 c durchzuführen.

#### 5.4.2 Ermittlung der Belastungen (Nachweisschritt B-C gemäß Bild 3-1)

##### 5.4.2.1 Verfahren

Die im folgenden angegebenen Verfahren sind zur Ermittlung der Kräfte und Momente am Prüfling anzuwenden:

##### a) Statische Verfahren

Falls als Belastungsgröße eine Auslenkkraft, die aus der Ersatzbeschleunigung  $a_{E,i}$  nach **Gleichung 4-5** ermittelt wurde, angesetzt wird, sollen die statischen Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 a nur für Systeme mit hinreichend homogener Massenverteilung angewendet werden. Voraussetzung für die Ermittlung von  $a_{E,i}$  ist dabei die Kenntnis oder eine konservative Abschätzung der Dämpfung des Prüflings (z. B. Werte aus **Tabelle 4-2**).

##### b) Verfahren der freien Schwingungen

Es ist sicherzustellen, daß wenigstens bei einem Zyklus der freien Schwingungen die geforderte Beschleunigung  $a_{E,i}$  nach **Gleichung 4-5** aufgebracht wird. Das Verfahren ist insbesondere für Komponenten mit hinreichend homogener Massenverteilung geeignet. Voraussetzung für die Ermittlung von  $a_{E,i}$  siehe Abschnitt 5.4.2.1 a.

##### c) Verfahren der erzwungenen Schwingungen

Für die Ermittlung der Belastungen dürfen die Verfahren der erzwungenen Schwingungen (Abschnitt 5.3.6 c) angewendet werden.

#### 5.4.2.2 Fußpunktanregung

##### 5.4.2.2.1 Allgemeine Anforderung

Die Anregung des Prüflings ist grundsätzlich an der Prüflingsbefestigung zu erfassen. Davon darf abgewichen werden, wenn sichergestellt wird, daß die Schwingungen von Meß- und Befestigungspunkt in Phase und Betrag übereinstimmen.

##### 5.4.2.2.2 Einzelfrequenzanregung

(1) Bei der Anregung mit nur einer Einzelfrequenz und unbekanntem Eigenfrequenzen des Prüflings muß die Erregung so hoch gewählt werden, daß das Prüf-Antwort-spektrum das Anforderungs-Antwortspektrum gemäß Abschnitt 5.3.2 einhüllt.

(2) Bei der Anregung mit mehreren Einzelfrequenzen bei unbekanntem Eigenfrequenzen des Prüflings sind die Prüffrequenzen so zu wählen, daß die Einhüllende aller Prüf-Antwortspektren das Anforderungs-Antwortspektrum gemäß Abschnitt 5.3.2 einhüllt.

(3) Sind die Eigenfrequenzen des Prüflings bekannt und liegen sie innerhalb des Prüffrequenzbereiches, so reicht es aus, bei diesen Eigenfrequenzen zu prüfen. Dabei muß das jeweilige Prüf-Antwortspektrum an diesen Stellen das Anforderungs-Antwortspektrum erreichen oder überschreiten.

(4) Bei Prüflingen mit Starrkörperverhalten ist eine Prüfung mit dem Starrkörperbeschleunigungswert ausreichend. Diese darf statisch oder dynamisch bei beliebigen Frequenzen kleiner oder gleich der oberen Grenzfrequenz erfolgen.

(5) Für jede Prüflingsfrequenz im Prüffrequenzbereich ist in der Richtung  $i$  die folgende Anregungsamplitude  $A_i(f)$  zulässig.

$$a_i(f) = k_i \cdot \frac{a_i(f, D(f))}{\ddot{U}(f, D(f))} \leq k_i \cdot a_{oi} \quad (5-3)$$

Hierin bedeuten

- $i$  Index für Richtung  $x, y$  (horizontal),  $z$  (vertikal)
- $f$  Frequenz in Hz
- $D(f)$  Dämpfung bei der jeweiligen Frequenz  $f$
- $a_i(f)$  Anregungsamplitude in der Richtung  $i$  bei der Frequenz  $f$
- $a_{oi}$  Starrkörperbeschleunigung (Nullperiodenbeschleunigung) in der Richtung  $i$
- $a_i(f, D(f))$  Spektralwert der Beschleunigung in der Richtung  $i$
- $\ddot{U}(f, D(f))$  Anregungsspezifischer Überhöhungsfaktor, zu entnehmen aus **Bild 5-1** oder **Bild 5-2** (je nach Anregung)
- $k_i$  Faktor zur Erfassung der Beiträge mehrerer Eigenformen, falls jeweils nur eine Eigenform angeregt wird.  $k_i = 1$ , wenn mehrere Eigenformen gleichzeitig angeregt werden oder wenn nur eine Eigenform im Prüffrequenzbereich liegt.  
 $k_i = \sqrt{2}$ , wenn jeweils nur eine Eigenform angeregt wird und mehrere Eigenformen im Prüffrequenzbereich liegen.

(6) Je nach Art der Anregung am Aufstellort ist eines der Verfahren a) oder b) für die Ermittlung von  $a_i(f, D(f))$  auszuwählen:

a) Vorwiegend zweiachsige Anregung am Aufstellort (eine horizontale und die vertikale Richtung). Je nach Testanregung sind  $a_i(f, D(f))$  und  $a_{oi}$  folgendermassen zu ermitteln:

aa) Einachsige Testanregung:

$$a_i(f, D(f)) = \sqrt{a_x^2(f, D(f)) + a_z^2(f, D(f))} \quad (5-4)$$

$$a_{oi} = \sqrt{a_{ox}^2 + a_{oz}^2} \quad (5-5)$$

ab) Zweiachsige Testanregung oder einachsige Testanregung, wenn die Bedingungen nach Abschnitt 5.3.3 Absatz 2 b) (Entkoppelung der Achsen) erfüllt sind:

$$a_i(f, D(f)) = a_{x, y, z}(f, D(f)) \quad (5-6)$$

6)

$$a_{oi} = a_{ox, y, z} \quad (5-7)$$

7)

b) Dreiachsige Anregung am Aufstellort. Je nach Testanregung sind  $a_i(f, D(f))$  und  $a_{oi}$  folgendermaßen zu ermitteln:

ba) Einachsige Testanregung:

$$a_i(f, D(f)) = \sqrt{a_x^2(f, D(f)) + a_y^2(f, D(f)) + a_z^2(f, D(f))}$$

(5-8)

$$a_{oi} = \sqrt{a_{ox}^2 + a_{oy}^2 + a_{oz}^2}$$

(5-9)

bb) Zweiachsige Testanregung (horizontal und vertikal):  
vertikal:

$$a_i(f, D(f)) = a_z(f, D(f))$$

(5-10)

$$a_{oi} = a_{oz}$$

(5-11)

horizontal:

$$a_i(f, D(f)) = \sqrt{a_x^2(f, D(f)) + a_y^2(f, D(f))}$$

(5-12)

$$a_{oi} = \sqrt{a_{ox}^2 + a_{oy}^2}$$

(5-13)

bc) Dreiachsige Testanregung oder ein- oder zweiachsige Testanregung, wenn die Bedingungen nach Abschnitt 5.3.3 Absatz 2 b) (Entkoppelung der Achsen) erfüllt sind:

$$a_i(f, D(f)) = a_{x,y,z}(f, D(f))$$

(5-14)

$$a_{oi} = a_{ox,y,z}$$

(5-15)

(7) Grundsätzlich sollte die Dämpfung für ausgeprägte untere Eigenfrequenzen experimentell ermittelt werden. Es dürfen jedoch auch die Werte der **Tabelle 4-2** angewendet werden. Ihre Anwendbarkeit ist nach der Prüfung durch Auswertung der Prüfergebnisse zu belegen.

(8) Für höhere Eigenfrequenzen sind bevorzugt die Dämpfungswerte aus **Tabelle 4-2** anzusetzen, da die Dämpfungen experimentell (z. B. aus dem Übertragungsverhalten) hierfür gewöhnlich nicht genau bestimmbar sind.

(9) Wenn die Prüfbeschleunigung den Wert der Starrkörperbeschleunigung nicht erreicht, ist in einem weiteren Prüfschritt eine Beschleunigung gleich der Starrkörperbeschleunigung aufzubringen. Dies darf statisch oder dynamisch außer-

halb der Eigenfrequenzen bei beliebigen Frequenzen kleiner oder gleich der oberen Grenzfrequenz erfolgen.

#### 5.4.2.2.3 Mehrfrequenzanregung

##### Hinweis:

Bei gegebener Erdbebenanregung (durch vorgegebene Zeitverläufe, künstlichen Zeitverlauf, Spektren) ist es immer möglich, als Versuchseingabesignale künstliche Zeitverläufe, Rauschsignale oder mehrfrequente Signale zu generieren.

(1) Bei vorgegebenen Zeitverläufen als Erdbebenanregung dürfen diese auch als Versuchseingabe verwendet werden.

(2) Sind mehrere Zeitverläufe vorgegeben, so sind diese als Versuchseingabesignal zu verwenden. Bei mehr als drei Zeitverläufen dürfen drei repräsentative Zeitverläufe als Versuchseingabesignale ausgewählt werden.

(3) Erfolgt die Prüfung mit künstlichen Zeitverläufen, Rausch- oder Mehrfrequenzsignalen, so ist ein vollständiges Signal zu verwenden. Dabei genügt ein Prüfdurchlauf. Ein Signal gilt als vollständig, wenn es das Anforderungs-Antwortspektrum zwischen der oberen und unteren Grenzfrequenz voll einhüllt gemäß Abschnitt 5.3. Ein Signal gilt auch dann als vollständig, wenn es das Anforderungs-Antwortspektrum an den Resonanzfrequenzen des Prüflings abdeckt.

(4) Die künstlichen Zeitverläufe sind gemäß Abschnitt 3.5, jedoch auf der Grundlage der Antwortspektren am Einbauort des Prüflings zu generieren.

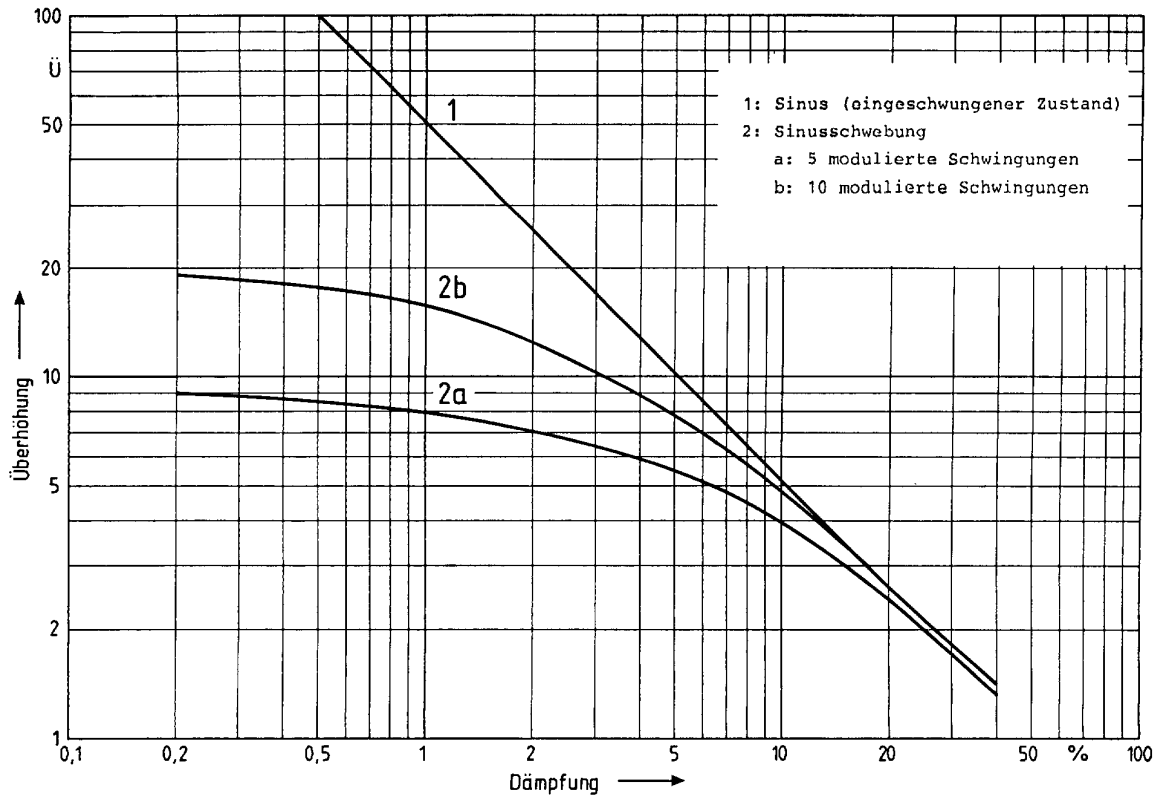
(5) Wenn die Prüfbeschleunigung den Wert der Starrkörperbeschleunigung nicht erreicht, ist in einem weiteren Prüfschritt eine Beschleunigung gleich der Starrkörperbeschleunigung aufzubringen. Dies darf statisch oder dynamisch außerhalb der Eigenfrequenzen bei beliebigen Frequenzen kleiner oder gleich der oberen Grenzfrequenz erfolgen.

#### 5.4.2.3 Schwerpunktanregung

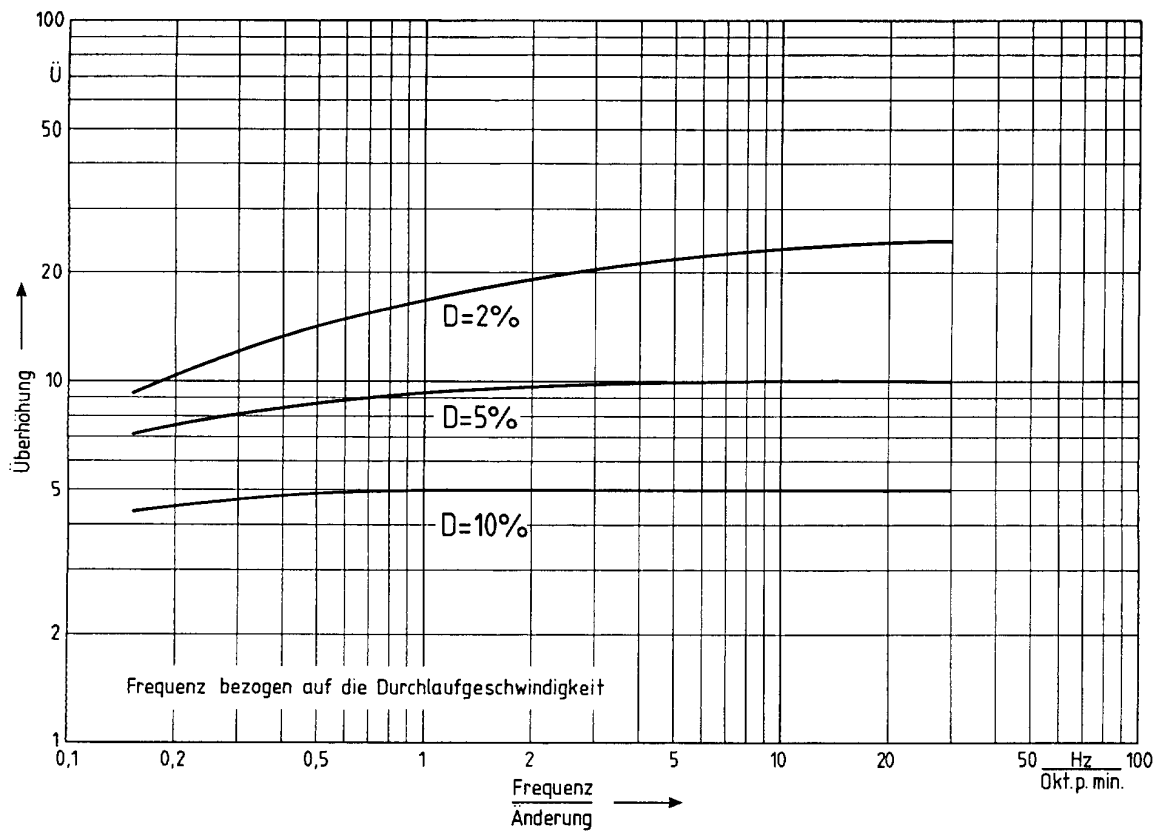
(1) Die Schwerpunktanregung (z. B. im eingebauten Zustand in der Anlage) darf nur bei Komponenten mit hinreichend homogener Massenverteilung angewendet werden.

(2) Es ist sicherzustellen, daß die geforderte Beschleunigung  $a_e$  nach Gleichung 4-5 aufgebracht wird.

(3) Bezüglich der Anforderungen an die Prüfanregung (z.B. Prüffrequenzen oder Prüffrequenzbereich) gelten die gleichen Anforderungen wie bei Fußpunktanregung.



**Bild 5-1:** Überhöhungsfaktoren bei Sinusanregung und Anregung durch Sinusschwabung mit konstanter Frequenz



**Bild 5-2:** Überhöhungsfaktoren bei Gleitsinusanregung

## 5.5 Experimentelle Beanspruchungsanalyse

### 5.5.1 Allgemeines

In der experimentellen Beanspruchungsanalyse ist der Nachweis der Erfüllung der sicherheitstechnischen Aufgabenstellung gemäß Abschnitt 3.8 zu erbringen. Dazu ist die Beanspruchungsermittlung gemäß Abschnitt 5.5.2 durchzuführen und der Zulässigkeitsnachweis gemäß Abschnitt 5.5.3 zu erbringen.

### 5.5.2 Beanspruchungsermittlung: (Nachweisschritt C-D gemäß Bild 3-1)

Zur experimentellen Beanspruchungsermittlung dürfen die Verfahren nach Abschnitt 5.3.6 verwendet werden.

### 5.5.3 Zulässigkeitsnachweis: Standsicherheit, Integrität Funktionsfähigkeit (Nachweisschritt D-E gemäß Bild 3-1)

(1) Zum Nachweis der Zulässigkeit der Beanspruchungen dürfen die Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 mit folgenden Festlegungen angewendet werden:

- a) Das Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 a darf bezüglich der Funktionsfähigkeit nur bei verformungsbedingtem Versagen angewendet werden.
- b) Beim Nachweis der Funktionsfähigkeit während der Beanspruchung muß bei Anwendung des Verfahrens gemäß Abschnitt 5.3.6 b die Ausschwingzeit größer als die Funktionszeit für ein sicherheitstechnisch notwendiges Funktionsintervall sein. Hierbei ist zusätzlich die Amplitudenabnahme zu beachten.

(2) Zum Nachweis der Sicherheit gegen Versagen sind unter anderem die folgenden Vorgehensweisen zulässig:

- a) Zum Nachweis der Standsicherheit und der Integrität kann durch Spannungs- oder Dehnungsmessungen an signifikanten kraftübertragenden Bauteilen der Prüflinge gezeigt werden, daß die zulässigen Spannungen gemäß Abschnitt 4.4.2.1 nicht überschritten werden.
- b) Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit kann durch Kontrolle der auftretenden Verformungen gezeigt werden, daß bei der Beanspruchung kein unzulässiger Zustand auftritt.
- c) Werden keine Spannungen oder Verformungen nachgewiesen, so ist es zulässig, die Belastung im Versuch um einen Sicherheitsfaktor  $S$  zu erhöhen. Der Sicherheitsfaktor  $S$  ist gemäß Gleichung (5-16) zu ermitteln:

$$S = S_1 \cdot S_2 \quad (5-16)$$

Hierbei bedeuten

$S_1$  Faktor gegen Versagen  $S_1 = 1,1$

$S_2$  Faktor bei einer reduzierten Anzahl von Prüflingen (Übertragungsfaktor)  $1,0 \leq S_2 \leq 1,4$

Wenn nachweislich der bezüglich des Nachweiszieses ungünstigste Prüfling ausgewählt wurde, darf der Faktor  $S_2 = 1,0$  gewählt werden.

(3) Falls ein Nachweiszies mit einer Sicherheit gemäß Absatz 2 nachgewiesen werden muß, gilt das Nachweiszies als erreicht, wenn

- a) aus einer Grenzbeanspruchungsprüfung bezüglich des geforderten Schutzzieses mindestens der Sicherheitsfaktor gemäß Absatz 2 folgt, oder
- b) eine Prüfung mit um den Sicherheitsfaktor gemäß Absatz 2 erhöhten Beanspruchungen durchgeführt wird und das Nachweiszies dabei eingehalten wird, oder
- c) bei einer Prüfung mit Nennbeanspruchung eine Sicherheitsreserve in den Spannungen oder den Verformungen nachgewiesen wird, oder

d) durch Extrapolation von einem Prüfbeanspruchungszustand niedriger als der erforderliche Erdbebenbeanspruchungszustand die Einhaltung der Sicherheit gemäß Absatz 2 nachgewiesen werden kann.

(4) Wenn beim Standsicherheits-, Integritäts oder Funktionsfähigkeitsnachweis keine Anforderungen an die Einhaltung bestimmter mechanischer Spannungs- oder Dehnungsgrenzen gestellt sind, gilt der Zulässigkeitsnachweis mit bestandener Prüfung als erbracht.

## 5.6 Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte

(1) Bei der Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte in einem Prüfschritt brauchen die Anforderungen für die enthaltenen Teilschritte nur insoweit beachtet zu werden, wie sie für die jeweiligen Nachweiszieses erforderlich sind. Es braucht nur das jeweilige Prüfzies nachgewiesen zu werden (Beispiel: Beim ausschließlichen Prüfzies Funktionsfähigkeit ist die Nachweisführung in einem einzigen Schritt ohne Ermittlung von Zwischenwerten zulässig).

(2) Nachfolgend sind Beispiele für die Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte aufgeführt:

- a) Belastungsversuche ohne Ermittlung der Kennwerte (Nachweisschritte A-C, A-D, A-E gemäß **Bild 3-1**):  
Eingangsgröße am Befestigungspunkt des Prüflings (Antwortspektren oder Zeitverläufe).  
Kenntnisse über das Schwingverhalten des Prüflings liegen nicht vor (Wird die Dämpfung abgeschätzt oder aus **Tabelle 4-2** entnommen, so gelten die nachfolgend unter b) genannten Voraussetzungen).  
Über die vorher bei den einzelnen Nachweisschritten angegebenen Randbedingungen hinaus gelten folgende Festlegungen:
  - aa) Die statischen Verfahren gemäß Abschnitt 5.3.6 a und die Verfahren mit freien Schwingungen gemäß Abschnitt 5.3.6 b dürfen nicht angewendet werden, da hierfür die Kenntnis der Prüflings-Dämpfung erforderlich wäre.
  - ab) Anwendung der Verfahren mit erzwungenen Schwingungen gemäß Abschnitt 5.3.6 c muß die Anregeamplitude mindestens der Nullperiodenbeschleunigung am Einbauort des Prüflings entsprechen. Bei einzel-frequenten Prüfanregungen gilt diese Forderung für alle Frequenzen im Überhöhungsbereich der Anforderungsantwortspektren. Bei spektrumkompatiblen mehrfrequenten Prüfanregungen muß die höchste Anregungsbeschleunigung mindestens den Wert der Nullperiodenbeschleunigung erreichen.
- b) Kombination der Belastungsermittlung mit anschließenden Nachweisschritten (Nachweisschritte B-D, B-E gemäß **Bild 3-1**): Es sind die bei den einzelnen Nachweisschritten genannten Festlegungen zu berücksichtigen.
- c) Beanspruchungsanalyse und Nachweis der Zulässigkeit der Beanspruchungen in einem Prüfschritt (Nachweisschritte C-E gemäß **Bild 3-1**): Es sind die bei den einzelnen Nachweisschritten genannten Festlegungen zu berücksichtigen.

## 5.7 Dokumentation

Die Dokumentation soll folgende Angaben umfassen:

- a) Zum Prüfling
  - aa) Prüflingskennzeichnung
  - ab) Identifikation des Prüflings
  - ac) Nachweiszies
- b) Zum Versuchsaufbau
  - ba) Beschreibung der Versuchs-, Meß- und Datenerfassungsanlage

- bb) Versuchsbedingungen
- bc) Meßstellenplan
- c) Zur Versuchsdurchführung
  - ca) Datum der Versuchsdurchführung
  - cb) Testinstitut
  - cc) Art des Anregungssignals
  - cd) Anregungsamplitude
  - ce) Frequenzbereich
  - cf) Anregungsrichtung
  - cg) besondere Beobachtungen.

## 6 Alternative Nachweismöglichkeiten

### 6.1 Allgemeines

Anstelle eines rechnerischen oder experimentellen Nachweises für ein maschinen- oder elektrotechnisches Anlagenteil darf alternativ die ausreichende Sicherheit im Lastfall Erdbeben auch durch Analogiebetrachtung oder durch Plausibilitätsbetrachtung nachgewiesen werden. Detailregelungen sind komponenten- und situationsspezifisch und deshalb im Einzelfall festzulegen, z. B. Verlegerichtlinien für Rohrleitungen.

### 6.2 Nachweise durch Analogiebetrachtung

Bei der Analogiebetrachtung ist von Referenzergebnissen rechnerischer oder experimenteller Nachweise gemäß der Abschnitte 4 oder 5 auszugehen. Hierbei sind folgende Grundsätze zu berücksichtigen:

#### a) Kennwerte und Systemeigenschaften

Die Referenzkennwerte dürfen als anzusetzende Kennwerte verwendet werden, falls folgende Bedingungen erfüllt sind:

- aa) Die statischen Referenzkennwerte dürfen als statische Kennwerte (lokale und globale Steifigkeiten) verwendet werden, wenn die Konstruktion und der Elastizitätsmodul des Werkstoffes annähernd gleich sind. Im nichtlinearen Bereich muß zusätzlich das Werkstoffverhalten bis zur behandelten Spannungshöhe annähernd gleich sein.
- ab) Neben den in Tabelle 4-2 angegebenen Dämpfungswerten dürfen auch experimentell ermittelte Dämpfungswerte verwendet werden, wenn diese repräsentativ für den jeweiligen Anwendungsfall sind.
- ac) Die dynamischen Referenzkennwerte dürfen als dynamische Kennwerte (z. B. Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen) verwendet werden, wenn annähernd gleiche statische Kennwerte und eine vergleichbare Konstruktion vorliegen.
- b) Die Referenzbelastungen dürfen für die anzusetzenden Belastungen zugrundegelegt werden, wenn die Kennwerte (Systemeigenschaften) annähernd gleich sind und die Referenzanregung am Aufstellort gleich oder größer ist als die anzusetzende Anregung oder wenn eine Extrapolation auf höhere Anregungen möglich ist.

### 6.3 Plausibilitätsbetrachtung

Anstelle eines rechnerischen oder experimentellen Nachweises der seismischen Auslegung von maschinen- oder elektrotechnischen Anlagenteilen darf eine Plausibilitätsbetrachtung auf der Basis der Auslegung des Anlagenteils für andere Lastfälle durchgeführt werden. Dabei ist nachzuweisen, daß aufgrund der Konstruktion oder nach konstruktiven Ertüchtigungen eine ausreichende Sicherheit gegen deren Versagen bei dem Lastfall Erdbeben als sichergestellt angesehen werden kann.

**Anhang A**

**Krane und deren Stahltragwerke**

**A 1 Allgemeines**

Wegen der geringen Wahrscheinlichkeit der Gleichzeitigkeit von Erdbeben und Kranbetrieb mit Last darf der Nachweis für die Krananlage ohne angehängte Last (gemäß KTA 3902 Abschnitt 4.5) in der vorgesehenen Parkposition des Kranes erfolgen.

**A 2 Lastüberlagerung**

Es sind zu überlagern:

- a) Eigenlasten (ohne Eigenlastbeiwert  $\phi$ )
- b) Lasten aus Bemessungserdbeben.

**A 3 Zulässige Spannungen in Bauteilen**

(1) Folgende zulässige Spannungen sind anzusetzen:

- a) Zug und Biegung      zul  $\sigma = 1,0 \cdot \sigma_S$
- b) Druck, wenn Knicken   zul  $\sigma = 1,0 \cdot \sigma_S$   
oder Beulen nicht maßgebend ist.
- c) Schub                zul  $\tau = \frac{\sigma_S}{\sqrt{3}}$
- d) Vergleichsspannung   zul  $\sigma_V = 1,0 \cdot \sigma_S$   
mit  $\sigma_S =$  Streckgrenze

(2) Sind Stabilitätsnachweise zu führen, so dürfen die in Tafel 7 von DIN 4114 Teil 1 für den Belastungsfall 2 (Lastfall HZ nach DIN 15 018 Teil 1) angegebenen Sicherheitsbeiwerte um den Faktor 0,75 abgemindert werden.

Festigkeitsklasse	4.6	5.6	6.6	10.9
Spannungen in N/mm <sup>2</sup>				
Steckgrenze $\sigma$ bzw. $\sigma$	240	300	360	900
Zugfestigkeit	400	500	600	1000
$\sigma_{gr}$ (Spannungsquerschnitt $A_S$ ) <sup>1)</sup>	192	240	288	640
$\tau_{gr}$ ( Schaftquerschnitt )	200	250	300	500
$\sigma_{vgr}$ ( Schaftquerschnitt )	216	270	324	720
<sup>1)</sup> Berechnung nach DIN 18800 Teil 1 Abschnitt 7.2.3.1				

**Tabelle A 5-1:** Rechnerische Grenzspannung für Schrauben bei Nachweisen in SL-, SLP- und Z-Verbindungen

**A 4 Zulässige Spannungen in Schweißnähten**

Es sind die 1,2-fachen Werte für den Lastfall HZ nach DIN 15 018 Teil 1 anzusetzen.

**A 5 Zulässige Spannungen in Schrauben**

Es sind die in den **Tabellen A 5-1, A 5-2** und **A 5-3** angegebenen Werte anzusetzen.

	Verbindung	Grenz-zustand		Ge-brauchs-zustand	Hinweis
		gleit-fest			
1	GV	ja	$N_{GVgr} = \mu \cdot P_v$	-	$\mu =$ Reibbeiwert nach DIN 18 800 Teil 1
2		nein	wie SL-Verbindungen	zul $N_{GV} = \frac{P_v}{\mu}$	$P_v =$ Vorspannkraft in der Schraube nach DIN 18 800 Teil 7
3	GVP	ja	wie SL-Verbindungen	-	
4	ZV	ja	wie Z-Verbindungen	zul $Z = 0,6 \cdot P_v$	Gleitlast $N_{GVZgr}$ $Z > 0,6P_v: N_{GVZgr} = 0$ $Z = 0,6P_v: N_{GVZgr} = 0,2 N_{GVgr}$ $Z < 0,6P_v: \text{lineare Interpolation zwischen } 0,2 \text{ und } 1,0$
5		nein	wie Z-Verbindungen	zul $Z = 0,6 \cdot P_v$	Abscheren wie SL-Verbindungen

**Tabelle A 5-2:** Rechnerische Grenzlasten für GV-, GVP-, und ZV-Verbindungen mit hochfesten vorgespannten Schrauben

Spannungen (N/mm <sup>2</sup> )	nicht vorgespannte Verbindungen	vorgespannte Verbindungen
$\sigma_{Lgr}$	$2 \sigma_S$	$3 \sigma_S$
( $\sigma_S =$ Fließgrenze des Werkstoffes der Bauteile )		

**Tabelle A 5-3:** Rechnerische Grenzspannung bei Lochleibungsbeanspruchung

## Anhang B

## Zusammenstellung der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

$a$	= Beschleunigung		
$a_{E,i}$	= Ersatzbeschleunigung für die Richtung $i$	zul $N_{GV}$	= zulässige Last für GV-Verbindungen
$a_{f,i}$	= Beschleunigungswert aus dem Etagen-Antwortspektrum für die Richtung $i$	$N_{GVZgr}$	= rechnerische Grenzlasterlast für GV-Verbindungen bei gleichzeitiger Wirkung einer Zugkraft
$a_{ges}$	= Effektivwert der Beschleunigungsamplitude innerhalb des überwachenden Frequenzbereiches	$P_b$	= primäre Biegespannung
$a_G$	= Gebäudebeschleunigung am Aufstellort der Komponente (Nullperiodenbeschleunigung)	$P_1$	= örtliche primäre Membranspannung
$A_i(f)$	= Anregungsamplitude in der Richtung $i$ bei der Frequenz $f$	$P_m$	= allgemeine primäre Membranspannung
$a_i(f,D(f))$	= Spektralwert der Beschleunigung in der Richtung $i$	$P_v$	= Vorspannkraft
$a_n$	= Effektivwert der vorgegebenen Beschleunigungsamplitude bei der anregenden Frequenz	$Q$	= maximale Überhöhung des Amplitudenfrequenzganges
$a_{oi}$	= Starrkörperbeschleunigung (Nullperiodenbeschleunigung) in der Richtung $i$	$R$	= Resultierende (Index)
$A_S$	= Spannungsquerschnitt der Schrauben	$R_{Rm}$	= Zugfestigkeit
$a_x$	= horizontale Beschleunigung in x-Richtung	$R_{p0,2}$	= Streckgrenze oder 0,2%-Dehngrenze
$a_y$	= horizontale Beschleunigung in y-Richtung	$S$	= maximale resultierende Größe für eine Anregungsrichtung
$a_z$	= vertikale Beschleunigung	$S_i$	= maximale Größe der $i$ -ten eigenform für eine Anregungsrichtung
$C$	= Beanspruchungsstufe (Definition siehe z. B. KTA 3201.2)	SL-Verbindung	= Scher-/Lochleibungsverbindung mit Lochspiel $\leq 2$ mm
$d$	= Störschwingungsanteil in Prozent	SLP-Verbindung	= Scher-/Lochleibungsverbindung mit Lochspiel $\leq 0,3$ mm
$D$	= Beanspruchungsstufe (Definition siehe z. B. KTA 3201.2) oder Dämpfung des Prüflings in Prozent der kritischen Dämpfung	SRSS	= Quadratwurzelmethode
$D(f)$	= Dämpfung bei der jeweiligen Frequenz $f$	$S_{St}$	= Bewegungs- oder Schnittgröße aus dem statischen Lastfall mit der Starrkörperbeschleunigung in der jeweiligen Anregungsrichtung. Grenzfall: $S_{St} = 0$ für $n=m$
$D_1$	= Dämpfung der unterstützenden Struktur in Prozent der kritischen Dämpfung	$S_v$	= maximale Bewegungs- oder Schnittgröße aus den Relativverschiebungen für eine Anregungsrichtung
$D_2$	= Dämpfung der Komponente in Prozent der kritischen Dämpfung	$S_1$	= Faktor gegen Versagen
$e$	= Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenformen	$S_2$	= Faktor bei einer reduzierten Anzahl von Prüflingen (Übertragungsfaktor)
$e_i$	= Faktor zur Erfassung der Beiträge mehrerer Eigenschwingungen	$\ddot{U}(f,D(f))$	= Anregungsspezifischer Überhöhungsfaktor
$f$	= Frequenz in Hz	$V$	= Resonanzüberhöhungsfaktor nach Bild 4-2
$f_{grenz}$	= obere Grenzfrequenz des Bodenantwortspektrums	zul $Z$	= zulässige Zugkraft in der Schraube
$f_n$	= höchste maßgebende Gebäudefrequenz	ZV-Verbindung	= vorgespannte Verbindung mit Zugbeanspruchung
$f_1$	= tiefste maßgebende Gebäudefrequenz	$\alpha$	= Formfaktor nach Tabelle 4-4
GV-Verbindung	= Gleitfeste Verbindung	$\mu$	= Reibbeiwert
GVP-Verbindung	= Gleitfeste Verbindung mit Paßschrauben	$\sigma_{0,2}$	= 0,2%-Dehngrenze
HS	= Lastfall (HS = Haupt- und Sonderlasten)	$\sigma_{gr}$	= rechnerische Grenzzugspannung
$i$	= Anregungsrichtung (Index)	$\sigma_{Lgr}$	= rechnerische Grenzspannung bei Lochleibungsbeanspruchung
$k$	= Anzahl der signifikanten Frequenzen oberhalb der oberen Grenzfrequenz	$\sigma_S$	= Streckgrenze
$k_i$	= Faktor zur Erfassung der Beiträge mehrerer Eigenformen	$\sigma_v$	= Vergleichsspannung
$m$	= Anzahl der Frequenzen bis zur oberen Grenzfrequenz	$\sigma_{vgr}$	= rechnerische Grenzvergleichsspannung
$n$	= Gesamtzahl der Frequenzen	$\tau$	= Schub
$N_{GVgr}$	= rechnerische Grenzlasterlast für	$\tau_{gr}$	= rechnerische Grenzscherbeanspruchung
		$\varphi$	= Eigenlastbeiwert

## Anhang C

### Bestimmungen auf die in dieser Regel verwiesen wird

Verwiesene Bestimmungen gelten nur in der in diesem Anhang angegebenen Fassung. Darin enthaltene verwiesene Bestimmungen gelten nur in der Fassung, die vorlag, als die verweisende Bestimmung aufgestellt oder ausgegeben wurde.

KTA 2201.1	(6/90)	Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil 1: Grundsätze
KTA 3201.2	(3/84)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung
KTA 3204	(3/84)	Reaktordruckbehälter-Einbauten
KTA 3205.1	(6/82)	Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen Teil 1: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für Primärkreiskomponenten
KTA 3205.2	(6/90)	Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen Teil 2: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für druck- und aktivitätsführende Komponenten in Systemen außerhalb des Primärkreises
KTA 3902	(11/83)	Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken
DIN 2505	(10/64)	Berechnung von Flanschverbindungen
DIN 4114 Teil 1	(7/52)	Stahlbau; Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung) Berechnungsgrundlagen, Vorschriften
DIN 15 018 Teil 1	(11/84)	Krane; Grundsätze für Stahltragwerke, Berechnung
DIN 18 800 Teil 1	(3/81)	Stahlbauten; Bemessung und Konstruktion
DIN 18 800 Teil 7	(5/83)	Stahlbauten; Herstellen, Eignungsnachweise zum Schweißen

## Stichwortverzeichnis

- Alterungseffekte 3.8 (8)
- Analogiebetrachtung 3.6 (4); 3.7 (5); 3.8 (7); 6.1; 6.2
- Anforderungsantwortspektrum 2 (2); 5.3.3 (2) b); 5.4.2.2.2; 5.4.2.2.3 (3); 5.6 (2)
- Antwortspektrum 2 (1), (2), (8), (11); 3.5; 3.10 (I); 4.2.2.; Bild 4-1, 4-3, 4-4; 4.3.1.3c); 4.3.2.1; 4.3.2.4; 5.3.1 (2), (3); 5.3.2; 5.4.2.2.3 (4); 5.6 (2); 6.2 a)
- Aufstellort (der Komponente) 2 (10); 3.6; 3.7.1; 3.8 (2) a); 4.2; Bild 4-1, 4-4; 4.5 a); 5.3.1 (1), (2); 5.4.2.2.2 (6); 6.2 b)
- Auslegung 3 (1); 4.2.2.2; 6.3
- Beanspruchungsanalyse 3.8; 4.4  
-, experimentelle 3.8 (6); 5.5  
-, rechnerische 3.8 (5)
- Beanspruchungsstufe 4.4.2.1.2; 4.4.2.4 (3)
- Dämpfung, allgemein 3.5 (3) b); 3.7 (2) a); 4.2.2.1 (3); 4.3.1.4 (3) b); 5.4.2.1 a); 5.4.2.2.2 (7), (8); 5.6 (2)  
-, kritische 2 (3); 4.2.2.1 (3); Tabelle 4-1; 4.3.1.3 c)  
-, modale 2 (4)
- Dämpfungsverhältnis 2 (5)
- Dämpfungswerte 4.2.2.1 (3); Tabelle 4-1; 4.3.1.3 c); Tabelle 4-2; 5.3.2; 5.4.1 (3)
- Dokumentation 5.7
- Einhüllende (Spektren) 3.10 (2); 4.2.2.3; 4.3.2.2.1 (2) b)
- Eintrittshäufigkeit 3.8 (2) b)
- Ersatzlast (en), statische 4.3.2.4
- Ersatzverfahren 4.2.2.1 (1) c); 4.2.2.1 (3); 4.3.2.1; 4.3.2.4
- Flüssigkeit (en) (in Komponenten) 4.3.1.4
- Frequenz (en) 3.5 (3); 4.2.2.1 (2)b); 5.3.2b); 5.3.5 (1), (2); 5.4.2.2.2
- Frequenzen, charakteristische 2 (6); 5.3.2 b)
- Funktion, sicherheitstechnische 3.1 (2); 3.8 (1)
- Funktionsfähigkeit 2 (7); 3.8 (2) c); 4.3.1.3 c); 4.4.2.1.2 (2) b); 4.4.2.4; 5.5.3; 5.6 (1)
- Gleiten (Komponenten) 4.4.2.3.2
- Grenzfrequenz, obere 2 (8); 3.5 (3) a); 4.3.2. 1; 4.3.2.2.1 (4); 4.3.2.4; 5.3.2; 5.4.2.2.2 (4), (9); 5.4.2.2.3 (3), (5)  
-, untere 2 (9); 5.4.2.2.3 (3)
- Hebezeuge (s. a. Krane) 3.8 (4)
- Integrität 3.8 (2) b), c), (4); 4.4.2.1.3 (3), (4); 4.4.2.4 (3); 5.5.3
- Kippen (Komponenten) 4.4.2.3.2
- Klasse 1 3.1 (2); 3.4, 3.8 (4); 4.4.2.1.2; 4.4.2.1.3
- Klasse 11 3.4; 3.8 (4); 4.4.2.1.3
- Komponenten, aktive 3.8 (2) c); 4.3.1.3 c); Tabelle 4-2  
-, passive 3.8 (2) c); 4.4.2.4 (3) c)  
-, starre 4.3.2.4
- Kontrollfrequenz (en) 3.5 (3); 5.3.2
- Kontrollpunkt (e) 3.5 (3)
- Krane (s. a. Hebezeuge) 4.4.2.1.3 (2); Anhang A 1
- Lebensdauer 3.8 (2) b)
- Modellabbildung 4.3.1; 4.5
- Nachweise, experimentelle 5; 5.2 (1); 6.1; 6.2; 6.3  
-, rechnerische 4; 4.4.2.4 (1); 6.1; 6.2; 6.3
- Nachweismethoden 3.21; 5.3.1 (4)
- Nachweisschritte 3.2; 3.9; 5.6
- Nachweisverfahren 3.2
- Normalbetrieb 3.4; 4.3.1.4 (1)
- Nullperiodenbeschleunigung (s. a. Starrkörperbeschleunigung) 2 (8), (10), 5.6 (2)
- Plausibilitätsbetrachtung 3.6 (4); 3.7 (5); 3.8 (7); 6.1; 6.3
- Prüfanregung (en) 5.3.3; 5.3.4; 5.3.5; 5.3.6; 5.4.2.3 (3)
- Prüfantwortspektrum 2 (11); 5.4.2.2.2
- Prüfbeschleunigung 5.4.2.2.2 (9); 5.4.2.2.3 (5)
- Quadratwurzelmethode 3.10 (3); Bild 4-3; 4.3.2.2.2; 4.3.2.3; 4.3.2.4
- Reaktorsicherheitsbehälter 4.4.2.1.2 (3)
- Relativverschiebungen 3.10; 4.3.2.2.1 (3); 4.4.2.1.1
- Sicherheitsfaktor 4.4.2.3.2
- Standort 3.5; 3.6 (1); 4.5 a)
- Standicherheit 3.8 (2) a), c), (4); 4.4.2.1.3 (1), (4); 4.4.2.3; 5.5.3
- Starrkörperbeschleunigung 2 (10); 4.3.2.2.1 (4); 5.4.2.2.2 (4), (9); 5.4.2.2.3 (5)
- Störfallfolgelasten 3.4
- Stützkonstruktionen 4.4.2.1.2 (1) c), (2) c)
- Systemanalyse, mechanische 3.7; 4.3; 5.4
- Überlagerung (Lasten) 3.4; 3.5 (2); 4.2.2.2; 4.3.2.2.2; 4.3.2.3; 4.3.2.4; 4.4.2.1; 5.3.3 (2)
- Verformungsbeschränkung 3.8 (2) c); 4.4.2.1.2 (4) c), d); 4.4.2.1.3 (5)
- Vollastbetrieb 3.4; 4.3.1.3; 4.3.1.4 (1)
- Wechselwirkung 4.3.1.2
- Zeitverlauf (Zeitfunktion(en)) 2 (1); 3.5; 4.2.2; 4.3.2.1; 4.3.2.3; 5.3.1 (2); 5.3.6 c); 5.4.2.2.3; 5.6 (2)