

KTA 2201.4

Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen; Teil 4: Anlagenteile

Vorbemerkung

Der Kerntechnische Ausschuss (KTA) beabsichtigt, die zurzeit in der Fassung 1990-06 vorliegende Regel KTA 2201.4 zu ändern. Der Entwurf dieser Änderung wird hiermit der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt, damit er erforderlichenfalls verbessert werden kann. Es wird darauf hingewiesen, dass die endgültige Fassung von dem vorliegenden Entwurf abweichen kann.

**Änderungsvorschläge sind innerhalb einer Frist von drei Monaten,
beginnend am 1. Januar 2012,**

bei der Geschäftsstelle des Kerntechnischen Ausschusses beim Bundesamt für Strahlenschutz, Postfach 10 01 49, 38201 Salzgitter, einzureichen.

Frühere Fassung der Regel: 1990-06 (Banz. Nr. 20a vom 30.01.91, Berichtigung 115 vom 25.06.96)

Änderungsentwurf

Inhalt

	Seite
Grundlagen	2
1 Anwendungsbereich	2
2 Begriffe	2
3 Allgemeine Anforderungen	3
3.1 Übersicht	3
3.2 Nachweisschritte.....	3
3.3 Nachweismethoden	3
4 Rechnerische Nachweise	4
4.1 Übersicht	4
4.2 Anregung am Aufstellort oder Einbauort.....	4
4.3 Modellbildung	6
4.4 Analyse des mechanischen Verhaltens und Ermittlung der Beanspruchung.....	7
4.5 Nachweis der Grenzzustände.....	9
5 Experimentelle Nachweise	11
5.1 Nachweisziel.....	11
5.2 Anforderungen an den Prüfling	12
5.3 Anforderungen an die Anregung.....	12
5.4 Systemeigenschaften und Kennwerte	13
5.5 Analyse des mechanischen Verhaltens und Ermittlung der Beanspruchung.....	13
5.6 Nachweis der Grenzzustände.....	16
5.7 Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte.....	16
5.8 Dokumentation	17
6 Analogienachweise.....	17
6.1 Allgemeines	17
6.2 Übertragbarkeit von Referenzergebnissen	17
7 Plausibilitätsnachweise.....	17
Anhang Bestimmungen auf die in dieser Regel verwiesen wird	19
Dokumentationsunterlage zur Regeländerung.....	20

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 Absatz 2 Nr. 3 Atomgesetz - AtG), um die im AtG und in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegten sowie in den „Sicherheitskriterien“ und den „Störfall-Leitlinien“ weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen.

(2) Nach den „Sicherheitskriterien“ Kriterium 2.6 sind Schutzmaßnahmen, soweit sie in Betracht zu ziehen sind, gegen Einwirkungen von Erdbeben vorzusehen. Nach Tabelle I der „Störfall-Leitlinien“ gehören Erdbeben zu der Störfallgruppe, gegen die anlagentechnische Schadensvorsorge getroffen werden muss und die bezüglich ihrer radiologischen Auswirkungen auf die Umgebung relevant ist. Die Grundsätze dieser Vorsorge sind in der Regelreihe KTA 2201 festgelegt.

(3) Die Regel KTA 2201.4 der Reihe KTA 2201 "Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen" behandelt die Anlagenteile. Zur Regelreihe KTA 2201 gehören außerdem:

KTA 2201.1:	Grundsätze
KTA 2201.2:	Baugrund
KTA 2201.3:	Bauliche Anlagen
KTA 2201.5:	Seismische Instrumentierung
KTA 2201.6:	Maßnahmen nach Erdbeben

(4) In KTA 2201.4 werden die erforderlichen Nachweise für die maschinen- und elektrotechnischen Anlagenteile einschließlich ihrer Stützkonstruktionen (Tragkonstruktionen) in einzelne Schritte aufgegliedert:

- Ermittlung der Anregung am Aufstellort oder Einbauort
- Modellbildung und Kennwertermittlung
- Analyse des mechanischen Verhaltens
- Nachweis der Grenzzustände

(5) Diese Schritte werden in jedem der vier möglichen Verfahren behandelt:

- Rechnerische Nachweise
- Experimentelle Nachweise
- Analogienachweise
- Plausibilitätsnachweise

Der Nachweis der Erdbebensicherheit für ein Anlagenteil darf durch ein einziges Nachweisverfahren oder durch eine Kombination von Nachweisverfahren geführt werden.

(6) Zum Nachweis der standortspezifischen Erdbebensicherheit von Anlagenteilen stellt die KTA 2201.4 die Basis zur Erfüllung der Anforderungen dar. Für die Analyse des mechanischen Verhaltens der einzelnen Anlagenteile sowie zum Nachweis der Erfüllung ihrer sicherheitstechnischen Aufgaben sind zusätzlich die einschlägigen komponentenspezifischen KTA-Regeln heranzuziehen.

1 Anwendungsbereich

(1) Diese Regel ist auf Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren anzuwenden. Sie gilt der Auslegung gegen Erdbebeneinwirkungen von Anlagenteilen, deren Sicherheitsfunktionen zur Einhaltung der den Sicherheitskriterien zugrunde liegenden Schutzziele

- Kontrolle der Reaktivität,
- Kühlung der Brennelemente,
- Einschluss der radioaktiven Stoffe und
- zur Begrenzung der Strahlenexposition

erforderlich sind.

(2) In dieser Regel werden Anforderungen an den Nachweis der Erdbebensicherheit für Anlagenteile gestellt. Die für jedes Anlagenteil gesondert festzulegenden einsatzspezifischen sicherheitstechnischen Aufgaben Tragfähigkeit (Standssicherheit), Integrität und Funktionsfähigkeit (siehe 3.1) 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, soweit sie nicht nach KTA 2201.3 als bauliche Anlagen behandelt werden. Nicht zu den Anlagenteilen zählen z. B. Liner, Kranbahnen, Bühnen und Gerüste.

(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) verstanden.

2 Begriffe

Hinweise:

- Übergeordnete Begriffe der Reihe KTA 2201 sind in KTA 2201.1 definiert.
- Die Begriffe Einwirkungen (ständig, veränderlich, außergewöhnlich), Einwirkungsarten, Einwirkungskombinationen, Bemessungssituationen, Teilsicherheitsbeiwert, Grenzzustand der Tragfähigkeit, Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden entsprechend den Definitionen in DIN EN 1990 verwendet.
- Die Begriffe Primär-, Sekundär- und Spitzenspannung sowie die Beanspruchungsstufen sind in KTA 3204 definiert.
- Die Anforderungskategorien werden in KTA-GS-78 definiert.

(1) Anforderungsantwortspektrum

Ein Anforderungsantwortspektrum ist ein Antwortspektrum, das durch Multiplikation mit Sicherheitsfaktoren und prüfsignalspezifischen Erhöhungsfaktoren aus dem Bemessungsantwortspektrum gebildet wird. Anforderungsantwortspektren können auch durch Einhüllung über Antwortspektren mehrerer Aufstellorte entstehen.

(2) Anregung, einfrequente

Eine einfrequente Anregung ist ein Zeitverlauf, in dem zu jedem Zeitpunkt nur eine einzige Anregungsfrequenz enthalten ist (z. B. Gleitsinus, Festfrequenz).

(3) Bemessungsspektrum

Ein Bemessungsspektrum ist ein eingehülltes, verbreitertes und geglättetes Antwortspektrum, das der Erdbebenauslegung zugrunde gelegt wird. Dabei wird unterschieden zwischen Bodenantwortspektrum (Primärspektrum), Bauwerkantwortspektrum (Sekundärspektrum) und Komponentenantwortspektrum (Tertiärspektrum).

(4) Dämpfung, modale

Die modale Dämpfung für mechanische Systeme ist der Dämpfungsgrad der jeweiligen Eigenschwingung.

(5) Duktilität

Duktilität ist der Quotient aus maximaler elasto-plastischer Verschiebung und rein elastischer Verschiebung (Verschiebungsduktilität).

(6) Grenzfrequenz, untere

Die untere Grenzfrequenz für mechanische Systeme ist die Frequenz, unterhalb derer keine signifikante Erdbebenantwort mehr auftritt.

Hinweis:

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

(7) Hauptsystem

Das Hauptsystem ist eine schwere Struktur, die ein oder mehrere leichte Untersysteme (siehe (11)) trägt.

(8) Nichtlinearität, geometrische, physikalische

Geometrische Nichtlinearität ist der sich durch Gleichgewichts- und kinematische Betrachtungen am verformten System ergebende nichtlineare Zusammenhang zwischen Kraft- und Weggrößen.

Physikalische Nichtlinearität ist der durch ein nichtlineares Werkstoffgesetz bedingte nichtlineare Zusammenhang zwischen Spannungen und Verzerrungen.

(9) Prüfantwortspektrum

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

(10) Schwerpunkt, dynamischer

Der dynamische Schwerpunkt ist derjenige Punkt einer näherungsweise auf einen Freiheitsgrad abgebildeten Struktur, an dem die Beschleunigung mit dem Spektrwert übereinstimmt.

(11) Untersystem

Ein Untersystem ist ein leichtes Teilsystem, das von einem schweren Hauptsystem (siehe (7)) getragen wird.

(12) Verhaltensbeiwert

Der Verhaltensbeiwert q ist der Beiwert zur Reduzierung der durch lineare Berechnung ermittelten Kräfte aus Erdbebenwirkung. Dadurch werden dissipative Effekte abhängig von dem verwendeten Baustoff, dem Tragsystem und der konstruktiven Ausbildung berücksichtigt.

3 Allgemeine Anforderungen

3.1 Übersicht

(1) Die allgemeinen Auslegungsanforderungen an die Anlagenteile sind in KTA 2201.1, 4.1 festgelegt. Sie umfassen die Klassifizierung der Anlagenteile, d. h. deren Einteilung in die Klassen I, IIa und IIb sowie grundsätzliche Anforderungen an die Nachweise der Erdbebensicherheit.

(2) Für alle Anlagenteile der Klasse I ist die Erfüllung ihrer sicherheitstechnischen Aufgaben bei Erdbebeneinwirkung nachzuweisen. Diese sind für jedes Anlagenteil festzulegen. Sicherheitstechnische Aufgaben sind:

a) Tragfähigkeit (Standicherheit)

Die Tragfähigkeit ist die Fähigkeit von Anlagenteilen, den zugrunde gelegten Einwirkungen durch Festigkeit, Stabilität und Lagesicherheit (z. B. Sicherheit gegen Umstürzen, Abstürzen, unzulässiges Verrutschen) standzuhalten.

Die Tragfähigkeit ist für das Anlagenteil und dessen Abstützung nachzuweisen. Die Bauanschlusslasten sind auszuweisen.

b) Integrität

Integrität ist die Fähigkeit eines Anlagenteils, über die Tragfähigkeit hinaus den Anforderungen nach Dichtheit oder Verformungsbeschränkungen zu genügen.

Die Anforderungen an den Nachweis der Integrität sind den komponentenspezifischen Regelwerken zu entnehmen.

c) Funktionsfähigkeit

Funktionsfähigkeit ist die Fähigkeit eines Systems oder einer Komponente, über die Tragfähigkeit und Integrität hinaus, die vorgesehenen Aufgaben durch entsprechende mechanische oder elektrische Funktion zu erfüllen.

Es ist zu unterscheiden, ob die Funktionsfähigkeit

- nach dem Erdbeben oder

- während des Erdbebens und nach dem Erdbeben gegeben sein muss.

Es ist ferner zu unterscheiden zwischen aktiver und passiver Funktionsfähigkeit.

Aktive Funktionsfähigkeit der Komponente stellt sicher, dass die spezifizierten Bewegungen (relative Bewegungen zwischen Teilen) ausgeführt werden können (Schließen von Spielen, Entstehung oder Änderungen von Reibkräften) sowie die elektrischen Funktionen gewährleistet sind.

Passive Funktionsfähigkeit der Komponente bedeutet, dass zulässige Verformungen und Bewegungen nicht überschritten werden.

(3) Für Anlagenteile der Klasse IIa ist nachzuweisen, dass Anlagenteile und bauliche Anlagen der Klasse I bei Erdbeben nicht so beeinträchtigt werden, dass diese ihre sicherheitstechnischen Aufgaben nicht mehr erfüllen. Hierfür genügt im Allgemeinen ein Tragfähigkeitsnachweis. Erforderlichenfalls ist die Einhaltung von Grenzerformungen nachzuweisen, oder es ist ein Nachweis der Integrität (Überflutungsgefahr) zu führen.

(4) Alterungseffekte, die Einfluss auf das Nachweisziel haben, sind zu berücksichtigen.

Hinweis:

Einzelheiten zu Alterungseffekten enthält KTA 1403.

3.2 Nachweisschritte

(1) Die erforderlichen Schritte sind in **Bild 3-1** dargestellt.

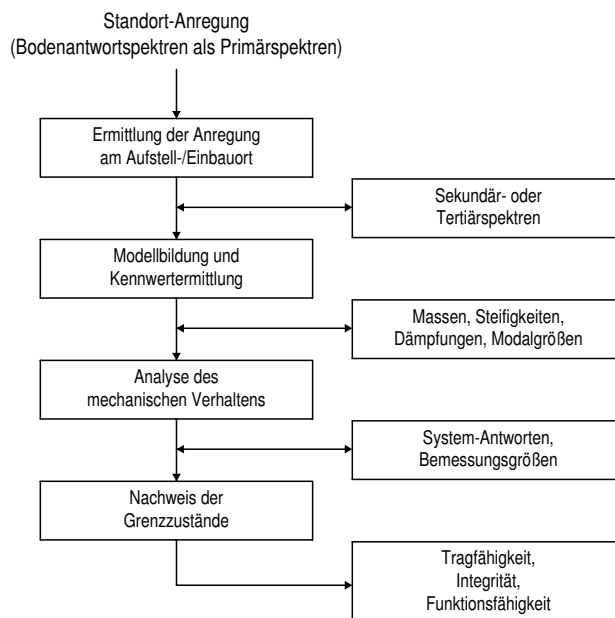


Bild 3-1: Übersicht über die Nachweisführung

(2) Einzelne Nachweisschritte dürfen je nach Nachweisziel zusammengefasst werden, soweit die Detaillierung des Modells dies erlaubt. Die Ermittlung von Zwischenergebnissen ist nicht erforderlich.

(3) Als Standortanregung sind die ingenieurseismologischen Kenngrößen des Bemessungserdbebens – Bodenantwort-

spektralen, Bezugshorizont, Richtungskomponenten, Starkbewegungsdauer – nach KTA 2201.1, 3.5 anzusetzen.

(4) Grundsätze der Modellbildung sind in KTA 2201.1, 4.3.2 festgelegt. Weitergehende Angaben enthalten – abhängig von der gewählten Nachweismethode – die folgenden Abschnitte 4 bis 7.

(5) Die Analyse des mechanischen Verhaltens darf bei linearem Systemverhalten getrennt für Erdbebeneinwirkungen und die übrigen ständigen und nichtständigen Einwirkungen durchgeführt werden. Die Bemessungsgrößen sind danach durch Superposition zu ermitteln.

(6) Wenn das Systemverhalten nichtlinear erfasst wird, ist das gesamte Einwirkungskollektiv mit Sicherheits- und Kombinationsfaktoren gleichzeitig anzusetzen.

(7) Beim Nachweis der Grenzzustände sind die ermittelten Bemessungsgrößen der Beanspruchungen den entsprechenden Beanspruchbarkeiten gegenüberzustellen.

3.3 Nachweismethoden

(1) Als Nachweismethoden sind einzeln oder kombiniert zulässig:

- Rechnerische Nachweise (Abschnitt 4)
- Experimentelle Nachweise (Abschnitt 5)
- Analogienachweise (Abschnitt 6)
- Plausibilitätsnachweise (Abschnitt 7)

(2) Die anzuwendenden Nachweismethoden sind für die Anlagenteile einsatzspezifisch festzulegen.

Hinweis:

Für Funktionsfähigkeitsnachweise elektrotechnischer Betriebsmittel (z. B. Schütze, Relais, Leistungsschalter) sind vorzugsweise experimentelle Nachweismethoden zu verwenden.

4 Rechnerische Nachweise

4.1 Übersicht

(1) Grundsätze zu den rechnerischen Nachweisen sind in KTA 2201.1, 4.3 festgelegt. Dies betrifft die Kombination der Erregungsrichtungen, die Modellbildung, die Ermittlung und Verwendung der Beschleunigungszeitverläufe sowie übergeordnete Aspekte der Rechenverfahren.

(2) Für den rechnerischen Nachweis sind die in 4.4.1 angegebenen dynamischen Rechenverfahren anzuwenden. Die Anwendung vereinfachter Verfahren ist zu begründen. Bei Rohrleitungen dürfen ersatzweise Verlegerichtlinien verwendet werden, wenn deren fachliche Grundlage Erdbeben einschließt.

4.2 Anregung am Aufstellort oder Einbauort

4.2.1 Allgemeines

(1) Die Anregung am Aufstellort oder Einbauort ist wie folgt zu ermitteln:

- Als Antwortzeitverläufe des Bauwerks oder Bauwerkantwortspektralen (Sekundärantworten nach KTA 2201.3).
- Als Antwortzeitverläufe oder Antwortspektren des Anlagenteils (Tertiärantworten nach 4.2.3.1).
- Als künstliche Zeitverläufe, die nach KTA 2201.1, 4.3.3 kompatibel zu den Antwortspektren des Bauwerks oder des Anlagenteils sind.
- Als Antwortspektren für Tertiärantworten mit dem Ersatzverfahren nach 4.2.3.2.

(2) Aus den Anregungen am Aufstellort oder Einbauort sind je Richtung geeignete auszuwählen, deren Antwortspektren die Sekundärbemessungsantwortspektralen im maßgebenden Frequenzbereich des Anlagenteils oder der Anlagenteil-Unterstruktur abdecken. Die Auswahl ist zu begründen.

(3) Aus den ausgewählten Zeitverläufen oder den künstlichen Zeitverläufen sind unter Beachtung der Richtungszuordnung geeignete Belastungssituationen zu bilden, mit denen das Anlagenteil (oder Bauwerk mit Anlagenteil) anzuregen ist. Die Bildung der Belastungssituationen ist zu begründen.

Hinweis:

Für eine lineare Berechnung des Anlagenteils genügen 3 Belastungssituationen, für eine nichtlineare Berechnung ist als Orientierung von 5 Belastungssituationen bei registrierten Zeitverläufen oder 7 Belastungssituationen bei künstlichen Zeitverläufen auszugehen.

(4) Alternativ dürfen Anlagenteile in das Modell des Bauwerks integriert und so am Gesamtmodell berechnet werden.

(5) Andere mathematische Verfahren zur Ermittlung der Anregung am Aufstellort oder Einbauort als das Zeitverlaufverfahren und das Ersatzverfahren dürfen verwendet werden, wenn sie gleichwertige Ergebnisse liefern.

4.2.2 Sekundärantworten

(1) Die Antworten des Bauwerks – (Sekundär-) Antwortzeitverläufe und (Sekundär-) Antwortspektren – sind im Rahmen der Bauwerksberechnung nach KTA 2201.3 zu ermitteln.

(2) Das für das Bauwerk nach KTA 2201.3 vorliegende mathematisch-mechanische Modell ist um das Anlagenteil nach 4.3 zu erweitern, wenn dessen Antworten direkt als Sekundärantworten und nicht als Tertiärantworten ermittelt werden sollen.

(3) Die ermittelten Antwortzeitverläufe sind digital und die Bemessungsspektren grafisch und digital bereit zu stellen.

4.2.3 Tertiärantworten

4.2.3.1 Zeitverlaufverfahren

(1) Die Anregungen für die Anlagenteil-Unterstrukturen sind als Antworten des Anlagenteils nach 4.2.2 zu verwenden.

(2) Die Anlagenteile sind nach 4.3 durch geeignete mathematisch-mechanische Modelle abzubilden.

(3) Die ermittelten Antwortzeitverläufe und die daraus gebildeten Belastungssituationen sind digital bereit zu stellen. Antwortspektren sind nach 4.2.4 in Bemessungsspektren zu überführen.

4.2.3.2 Ersatzverfahren

(1) Für hinreichend homogene Hauptssysteme, ohne signifikante Unterschinger, darf zur Ermittlung von Antwortspektren (Bemessungsspektren) am Aufstellort oder Einbauort des Untersystems das nachfolgend angegebene Ersatzverfahren verwendet werden.

Hinweise:

(1) Das Hauptsystem ist das Anlagenteil oder das Gebäude mit Anlagenteil und das Untersystem ist das Einbauteil des Anlagenteils.

(2) Ein Unterschinger ist ein Untersystem, das auf eine dominante Eigenfrequenz des Hauptsystems abgestimmt ist und daher in diesem Frequenzbereich zu resonanzartigen Schwingungsantworten neigt.

(2) Die Form des Spektrums ist nach **Bild 4-1**, der Spektralen-Überhöhungsfaktor gegenüber der Beschleunigung des Hauptsystems am Aufstellort oder Einbauort des Untersystems

tems (hier: Beschleunigung des Anlagenteils) nach **Bild 4-2** zu ermitteln.

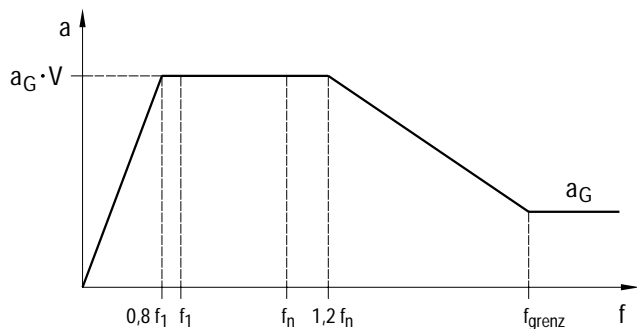


Bild 4-1: Ermittlung der Form des Antwortspektrums

Erläuterungen:

f Frequenz

f_1 tiefste maßgebende Eigenfrequenz des Hauptsystems beim unteren Grenzwert im Variationsbereich der Systemparameter

f_n höchste maßgebende Eigenfrequenz des Hauptsystems beim oberen Grenzwert im Variationsbereich der Systemparameter

f_{grenz} obere Grenzfrequenz des Antwortspektrums des Hauptsystems

a Beschleunigung

a_G Beschleunigung des Hauptsystems (Anlagenteil) am Aufstellort des Untersystems (Einbauteil)

V Resonanzüberhöhungsfaktor nach **Bild 4-2**

(3) Die Beschleunigung des Hauptsystems (Anlagenteil) ist nach 4.4 zu ermitteln.

(4) Als Dämpfungsgrad D_1 des Hauptsystems darf dessen modale Dämpfung in der dominanten Eigenschwingung angesetzt werden, wobei der Dämpfungsgrad des Anlagenteils im Rahmen der Energiewichtung nach **Tabelle 4-1**, Spalte A einzusetzen ist. Auf der sicheren Seite liegend dürfen diese Werte anstatt der modalen Dämpfung verwendet werden.

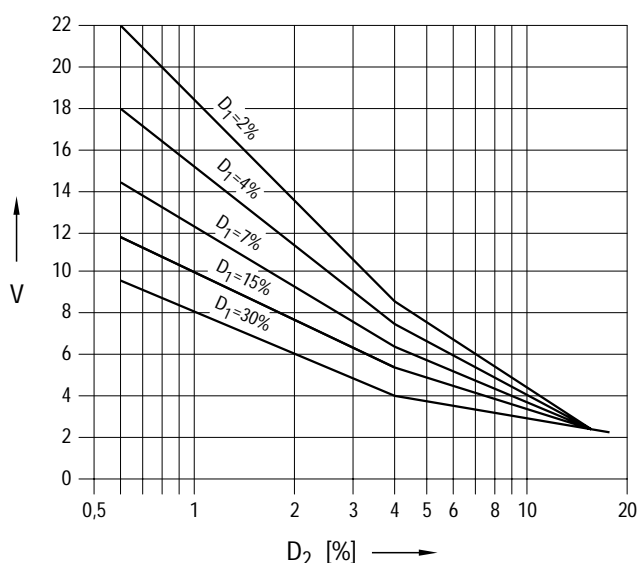


Bild 4-2: Ermittlung des Spektrums-Überhöhungsfaktors

Erläuterungen:

D_1 Dämpfungsgrad des Hauptsystems in Prozent der kritischen Dämpfung

D_2 Dämpfungsgrad des Untersystems in Prozent der kritischen Dämpfung

(5) Der Dämpfungsgrad D_2 des Untersystems (Einbauteil) ist nach **Tabelle 4-1**, Spalte A einzusetzen.

(6) Eine Übertragung des Verfahrens auf inhomogene Systeme ist im Einzelfall zu begründen.

Hinweis:

Das Ersatzverfahren stellt eine gute Näherung dar, wenn die Antworten des Hauptsystems durch eine Eigenschwingung dominiert werden. Tragen mehrere Eigenschwingungen signifikant bei, liegt das Verfahren zunehmend auf der sicheren Seite.

4.2.4 Bemessungsspektren

(1) Rechnerisch ermittelte tertiäre Antwortspektren am jeweiligen Einbauort oder Aufstellort der Anlagenteile sind je Richtung in (geglättete) Bemessungsspektren zu überführen, die eine robuste, d. h. gegen Auswirkungen von Parameterunschärfen unempfindliche Auslegung der Anlagenteile sicherstellen.

(2) Die Bildung von Bemessungsspektren ausgehend von berechneten Antwortspektren muss folgende Schritte umfassen:

a) Bewertung der Modellunschärfen der Unterstruktur. Erforderlichenfalls Berücksichtigung dieser Modellunschärfen im Rahmen von d)

b) Mittelung der Ergebnisse verschiedener Zeitverläufe

c) Kappung von Spektrenspitzen, die nicht breiter als 15 % der jeweiligen Mittenfrequenz sind

d) Glättung der erzielten Antwortspektren mit angemessener Vereinfachung durch geeignete Polygonzüge, die die robuste Auslegung der Anlagenteile sicherstellen

Hinweis:

Die obige Bedingung ist in der Regel erfüllt, wenn Spektrentäler einer Basisbreite von weniger als 20 % ihrer Mittenfrequenz durch ein von der niedrigeren Spitze ausgehendes Plateau geschlossen werden.

e) Darstellung der Antwortspektren in graphischer Form zur Kontrolle (Qualitätssicherung) und Bereitstellung in digitaler Form zur Weiterverarbeitung

(3) Das Ersatzverfahren liefert unmittelbar Bemessungsspektren.

4.2.5 Nichtlineare Spektren für Klasse IIa - Anlagenteile

(1) Soweit nach 4.4.6 Klasse IIa Anlagenteile vereinfacht nichtlinear berechnet werden, dürfen nichtlineare Spektren verwendet werden. Diese ergeben sich aus den Bemessungsspektren mit Hilfe eines Verhaltensbeiwerts q , für den in 4.4.6 nähere Angaben gemacht werden. Dies ist in **Bild 4-3** veranschaulicht.

(2) Die Amplituden der Bemessungsspektren sind durch den in 4.4.6 angegebenen Verhaltensbeiwert q zu dividieren. Ab der oberen Grenzfrequenz ist der Verhaltensbeiwert gleich 1. Ab der rechten Eckfrequenz des letzten Plateaus ist der Verhaltensbeiwert bis zur oberen Grenzfrequenz linear auf 1 zu reduzieren.

4.2.6 Anregungsrichtungen

Die Überlagerung gleichgerichteter Antworten mehrerer Erregungsrichtungen ist nach KTA 2201.1, 4.3.1 vorzunehmen.

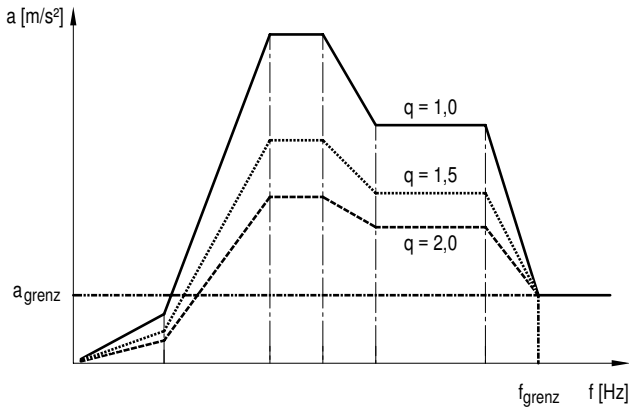


Bild 4-3: Bildung nichtlinearer Spektren für Klasse IIa Anlagenteile

4.3 Modellbildung

4.3.1 Systemeigenschaften

(1) Zur Analyse des mechanischen Verhaltens ist das Anlagenteil auf ein geeignetes mathematisch-mechanisches Modell abzubilden. Dieses muss in der Lage sein, die maßgebenden Eigenschwingungen der Struktur bis zur oberen Grenzfrequenz der Anregungsspektren zu beschreiben.

Hinweis:

Die Ergebnisse komplexer Modelle sollten durch globale Betrachtungen oder vereinfachte Berechnungen überprüft werden.

(2) Für die Ermittlung der Steifigkeiten sollte bevorzugt linear elastisches Werkstoffverhalten angenommen werden. Alternativ darf in begründeten Fällen nichtlineares Werkstoffverhalten ausgenutzt werden.

(3) Beim Systemverhalten ist eine durch die Geometrie oder Konstruktion bedingte Nichtlinearität zu berücksichtigen.

(4) Nichtlinearitäten dürfen in begründeten Fällen linearisiert werden.

(5) Es sind die Massen der Anlagenteile während des zu betrachtenden Betriebszustandes anzusetzen. Massen, die aus betrieblichen Gründen nur kurzzeitig oder selten vorhanden sind, sind entsprechend KTA 2201.1, 4.3.2 nicht anzusetzen.

(6) Die Dämpfungsgrade – angegeben in Prozent der kritischen Dämpfung – dürfen für Tragfähigkeits- und Integritätsnachweise sowie zur Ermittlung von Tertiärspektren **Tabelle 4-1**, Spalte A entnommen werden. Für mechanisch aktive Komponenten, bei denen der Funktionsfähigkeitsnachweis über einen Verformungsnachweis erfolgt, sind die Dämpfungsgrade **Tabelle 4-1**, Spalte B zu entnehmen.

(7) Höhere Dämpfungsgrade als die der **Tabelle 4-1** dürfen angesetzt werden, wenn diese nachgewiesen werden.

(8) Bei nichtlinearen Berechnungen mit Hysterese sind die viskosen Dämpfungsgrade ebenfalls nach **Tabelle 4-1**, Spalte B anzusetzen.

(9) Einflüsse der Modellierung des Anlagenteils auf die Berechnungsergebnisse sind zu bewerten.

Hinweis:

In der Regel sind die Einflüsse der Modellierung des Anlagenteils durch die Variation der Erregung und die dahinter stehende Erfassung der Einflüsse der Modellierung der Primärstrukturen (Bauwerk, Baugrund) abgedeckt.

Komponenten	Dämpfungsgrade	
	A	B
Rohrleitungen	4	2
Stahl mit geschweißten Anschlüssen und geschweißte Anlagenteile (z. B. Behälter, Armaturen, Pumpen, Motoren, Ventilatoren) ¹⁾	4	2
Stahl mit geschraubten Anschlüssen mit SL- oder SLP-Verbindungen	7	4
Stahl mit geschraubten Anschlüssen mit SLV(P)- oder GV(P)-Verbindungen	4	2
Kabeltragkonstruktionen	10 ²⁾	7
Flüssigkeiten	0,5	0,5

¹⁾ Sind aufgrund der Konstruktion Verformungen nur in kleinen Bereichen der Struktur möglich (geringe Strukturdämpfung), sind die Werte zu halbieren (Sonderfälle).
²⁾ In begründeten Fällen darf die Dämpfung auf 15 % angehoben werden.

Tabelle 4-1: Dämpfungsgrade für mechanische Systeme (in Prozent der kritischen Dämpfung)
 Spalte A: nicht abgeminderte Werte
 Spalte B: abgeminderte Werte

4.3.2 Unterteilung von Strukturen

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

- a) Die am unterteilten System berechneten relevanten Bemessungsgrößen unterschreiten die entsprechenden Größen bei Nichtunterteilung um höchstens 10 %. Größere Unterschreitungen sind zulässig, wenn spezielle Gründe vorliegen (z. B. geringe Ausnutzung).
- b) Die am unterteilten System ermittelten signifikanten Eigenfrequenzen weichen von den entsprechenden Eigenfrequenzen des nicht unterteilten Systems um höchstens 10 % ab. Größere Abweichungen sind zulässig, wenn spezielle Gründe vorliegen (z. B. geringe Ausnutzung).

Hinweis:

Liegen die (entkoppelten) Eigenfrequenzen von Haupt- und Untersystem um weniger als 15 % auseinander (Resonanzabstimmung), so führt eine Entkopplung bei einem Massenverhältnis Untersystem zu Hauptsystem größer 0,01 zu einem nicht realistischen konservativen Ergebnis. In diesem Fall sind realistische Ergebnisse nur bei gekoppelter Berechnung zu erzielen.

(2) Ist eine Entkopplung zulässig, so sind im Falle einer Tiefabstimmung des Untersystems dessen mitschwingende Massen im Modell des Hauptsystems in erster Näherung wegzulassen, im Falle einer Hochabstimmung dem Hauptsystem in erster Näherung zuzuschlagen.

(3) Bei Rohrleitungen darf zur Unterteilung das Überlappungsverfahren verwendet werden. Der Überlappungsbereich muss dabei mindestens einen Axialstopp und je zwei Radiallager in die beiden orthogonalen Richtungen umfassen.

Hinweis:

Das Überlappungsverfahren ist ein Modellierungsverfahren für Rohrleitungen, bei dem die abzukoppelnden Teilsysteme soweit im Modell des zu berechnenden Systems mitgenommen werden, dass ihre Rückwirkung auf das zu berechnende System hinreichend erfasst ist.

- (4) Bei Rohrleitungssystemen dürfen Nebensysteme abgekoppelt werden, wenn gilt:

$$\frac{I_N}{I_H} \leq 0,01 \quad (4-1)$$

Hierbei bedeuten:

I_N Flächenträgheitsmoment der abzukoppelnden Nebenleitung

I_H Flächenträgheitsmoment der zu berechnenden Hauptleitung

4.3.3 Flüssigkeitsfüllung in Komponenten

- (1) Bei Komponenten mit veränderlichem Füllstand ist der ungünstigste Füllstand zugrunde zu legen, der über mehr als 30 Tage pro Jahr ansteht.

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

- (3) Bei teilgefüllten Komponenten darf wie folgt vorgegangen werden:

- Berechnung unter Annahme einer starren mit der Komponente schwingenden Flüssigkeitsmasse für die Tragfähigkeit. Die Auswirkung der schwappenden Flüssigkeit auf Bauteile und Einbauteile der Komponente ist gesondert zu beurteilen.
- Berücksichtigung der Flüssigkeitsschwingungen relativ zur Komponente (Schwappen) für die horizontale Schwingungsrichtung durch das Verfahren der Ersatzmassen. Dabei darf die Flüssigkeitsmasse aufgeteilt werden in eine mit der Komponente starr gekoppelte „Ruhmasse“ und eine relativ zur Komponente schwingende „Schwappmasse“. Der Dämpfungsgrad für die Flüssigkeitsschwingungen ist **Tabelle 4-1** zu entnehmen.
- Komponenten für deren Geometrie keine einfachen Lösungen vorhanden sind, dürfen auf gleichwertige Ersatzgeometrien zurückgeführt werden. Für den quer schwingenden zylindrischen Behälter darf die Flüssigkeitsmasse als starre Pendelmasse aufgefasst werden.

(4) Für die vertikale Schwingungsrichtung darf die Flüssigkeitsmasse stets als starr mit der Komponente schwingende Masse angenommen werden.

(5) Alternativ zu den Näherungsverfahren (2) bis (4) darf nach DIN EN 1998-4 Anhang A vorgegangen werden, oder es dürfen detailliertere Verfahren der Fluidodynamik und zur Erfassung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung (z. B. nach der Methode der finiten Elemente) verwendet werden.

4.4 Analyse des mechanischen Verhaltens und Ermittlung der Beanspruchung

4.4.1 Rechenverfahren

(1) Die Analyse des mechanischen Verhaltens darf bei linearer Berechnung nach einem der folgenden Verfahren durchgeführt werden:

- Antwortspektren-Verfahren nach 4.4.2,
- Zeitverlauf-Verfahren nach 4.4.3 oder
- Quasistatisches Verfahren nach 4.4.4

(2) Andere Verfahren dürfen verwendet werden, wenn sie gleichwertige Ergebnisse liefern.

(3) Bei nichtlinearem Systemverhalten (siehe 4.4.5) sind nichtlineare Berechnungen nach dem Zeitverlauf-Verfahren durchzuführen, sofern nicht eine adäquate und genügend genaue Linearisierung begründet wird.

(4) Alternativ zu nichtlinearen Berechnungen nach dem Zeitverlauf-Verfahren dürfen nichtlineare statische Verfahren angewendet werden. Das Vorgehen ist zu begründen.

Hinweis:

Bei derartigen Berechnungen werden z. B. nichtlinear statisch ermittelte Kapazitätskurven den Anforderungsspektren gegenübergestellt und hinsichtlich verfügbarer Duktilität bewertet (Kapazitätsspektrummethode).

(5) Bei Anlagenteilen der Klasse IIa darf eine quasi-nichtlineare Auslegung unter Ansatz eines Verhaltensbeiwertes q nach 4.4.6 durchgeführt werden.

(6) Gleichgerichtete Antworten verschiedener Modellvarianten sind stets einzuhüllen, gleichgerichtete Antworten aus verschiedenen Belastungssituationen dürfen bei linearen Berechnungen des Anlagenteils gemittelt werden, bei nichtlinearen Berechnungen des Anlagenteils sind sie einzuhüllen.

4.4.2 Antwortspektren-Verfahren

(1) Bei Anlagenteilen, die sich auf ein System mit einem Freiheitsgrad zurückführen lassen, liefert das Antwortspektrum direkt die maximalen Antwortgrößen.

(2) Bei Anlagenteilen, die auf ein System mit mehreren Freiheitsgraden abgebildet werden, sind die maximalen Antwortgrößen (z. B. Schnittgrößen, Beschleunigungen, Verformungen) der einzelnen Eigenschwingungen zu überlagern. Dabei ist das Verfahren der vollständigen quadratischen Kombination (Complete Quadratic Combination, CQC) nach Gleichung (4-2) anzuwenden:

$$E = \sqrt{\sum_{L=1, K=1}^M E_L \cdot E_K \cdot \rho_{LK}} \quad (4-2)$$

Für konstante Werte von D gilt:

$$\rho_{LK} = \frac{8 \cdot D^2 \cdot (1 + r_{LK}) \cdot r_{LK}^{1.5}}{(1 - r_{LK}^2)^2 + 4 \cdot D^2 \cdot r_{LK} \cdot (1 + r_{LK})^2} \quad (4-3)$$

mit

$$r_{LK} = \frac{f_L}{f_K} \quad (4-4)$$

Hierbei bedeuten:

- D Dämpfungsgrad
- E Resultierende Erdbeben-Antwortgröße als Summe aller modalen Beiträge in die jeweilige Richtung
- E_L, E_K Modaler Beitrag der L-ten oder K-ten Eigenschwingung in die jeweilige Richtung zur gesuchten Erdbeben-Antwortgröße
- ρ_{LK} Wechselwirkungsfaktor der Eigenschwingungen als Funktion der modalen Dämpfungsgrade und des Frequenzabstandes (Frequenzverhältnis r_{LK}) der einzelnen Eigenfrequenzen f_L, f_K
- M Anzahl der Eigenschwingungen bis zur oberen Grenzfrequenz
- f_L, f_K Eigenfrequenzen der L-ten oder K-ten Eigenschwingung

Hinweis:

Für unterschiedliche Dämpfungsgrade $D_L \neq D_K$ ist Gleichung (4-3) zu erweitern.

(3) Wenn alle Eigenfrequenzen ausreichend gespreizt sind (r_{LK} kleiner 0,80 oder r_{LK} größer 1,20), dürfen die modalen Beiträge als Wurzel aus der Quadratsumme nach Gleichung (4-5) überlagert werden. Andere Überlagerungsarten sind zu begründen.

$$E = \sqrt{\sum_{L=1}^M E_L^2} \quad (4-5)$$

Hinweis:

Mit zunehmender Frequenzspreizung ($r_{LK} \ll 1$ oder $r_{LK} \gg 1$) geht Gleichung (4-2) identisch in Gleichung (4-5) über.

(4) Die Beiträge der oberhalb der Grenzfrequenz liegenden Eigenschwingungen müssen hinreichend erfasst werden. Dies ist bei homogenen Systemen erfüllt, wenn die Summe der modalen Massen aller berücksichtigten Eigenschwingungen mindestens 90 % der Gesamtmasse des Anlagenteils in jede der 3 Richtungen beträgt. Ist die Summe der modalen Massen geringer als 90 % der Gesamtmasse oder ist das System signifikant inhomogen, so ist die Summe der modalen Anteile nach Gleichung (4-2) oder (4-5) noch um den Starrkörperanteil zu erweitern. Gleichung (4-6) zeigt die Erweiterung von Gleichung (4-2) um den Starrkörperanteil.

$$E = \sqrt{\sum_{L=1, K=1}^M E_L \cdot E_K \cdot \rho_{LK} + \left(E_{St}^0 - \sum_{L=1}^M E_L^0 \right)^2} \quad (4-6)$$

Hierbei bedeuten, ergänzend zu den Erläuterungen zu Gleichung (4-2):

E_L^0 Modaler Beitrag der L-ten Eigenschwingung, multipliziert mit der Starrkörperbeschleunigung zur gesuchten Erdbeben-Antwortgröße. Die Beiträge werden hier arithmetisch addiert

E_{St}^0 Antwort eines statischen Lastfalls unter Ansatz der Starrkörperbeschleunigung in die jeweilige Richtung

(5) Auf der sicheren Seite liegend darf der Starrkörperanteil nach Gleichung (4-7) oder (4-8) als Erweiterung von Gleichungen (4-2) oder (4-5) berücksichtigt werden

$$E = \sqrt{\sum_{L=1, K=1}^M E_L \cdot E_K \cdot \rho_{LK} + \left(E_{St}^0 \right)^2} \quad (4-7)$$

$$E = \sqrt{\sum_{L=1}^M E_L^2 + \left(E_{St}^0 \right)^2} \quad (4-8)$$

mit den Bezeichnungen wie oben.

(6) Sind verschiedene Anregungsstellen mit unterschiedlichen Antwortspektren vorhanden, so darf das Verfahren der Mehrfach-Anregung (Multi-Support-Excitation) verwendet werden, bei dem die einzelnen Spektren mittels Einflussfunktionen gewichtet werden. Für den Starrkörperanteil gelten (4) oder (5).

(7) Für die Überlagerung der Antworten verschiedener Erregungsrichtungen gilt 4.2.6, für einen eventuellen Beitrag aus Relativverschiebungen 4.4.7.

4.4.3 Zeitverlauf-Verfahren

(1) Die Berechnung nach dem Zeitverlauf-Verfahren darf mittels des modalen Zeitverlauf-Verfahrens oder mittels direk-

ter Integration erfolgen. Der Starrkörperanteil ist analog zum Antwortspektren-Verfahren zu berücksichtigen.

(2) Als Erregung dürfen nach KTA 2201.1, 4.3.3 (6), Antwort-Zeitverläufe der Beschleunigung aus der Bauwerksberechnung angesetzt werden, die in ihrer Gesamtheit das Bemessungsspektrum am Aufstellort oder Einbauort des Anlagenteils abdecken. Alternativ dürfen künstliche Zeitverläufe verwendet werden, die mit den Bemessungsspektren analog zu KTA 2201.1, 4.3.3 kompatibel sind.

(3) Die Zeitschrittweite der Berechnung darf höchstens das 0,1-fache der Schwingungsdauer bei der oberen Grenzfrequenz des zugehörigen Antwortspektrums betragen.

(4) Für die Überlagerung der Antworten verschiedener Erregungsrichtungen gilt 4.2.6, für einen eventuellen Beitrag aus Relativverschiebungen 4.4.7.

(5) Bei nichtlinearen Berechnungen ist 4.4.5 zu beachten.

4.4.4 Quasistatisches Verfahren

(1) Das quasistatische Verfahren darf für Systeme mit hinreichend homogener Steifigkeits- und Massenverteilung angewendet werden.

(2) Bei Untersystemen sind für das unterstützende System Sekundärspektren anzusetzen. Das Untersystem (unterstütztes System) ist dann mittels Tertiärspektren auszulegen.

(3) Die Berechnung der Systemantworten (Beanspruchungsgrößen) darf statisch erfolgen. Dazu werden Ersatz-Beschleunigungen definiert, aus denen sich quasistatische Einwirkungen proportional zur Massenverteilung ergeben. Die Ersatzbeschleunigungen sind wie folgt zu berechnen:

$$a_{E,i} = e_i \cdot S_{a,i} \quad (4-9)$$

Hierbei bedeuten:

$a_{E,i}$ Ersatzbeschleunigung für die Richtung i

e_i Faktor zur Erfassung der Beiträge höherer Eigenschwingungen für die Richtung i, siehe (6), (7), (8)

$S_{a,i}$ Ablesewert aus dem Antwortspektrum für die Richtung i, siehe (4), (5)

(4) Für $S_{a,i}$ ist der größte Wert des Antwortspektrums für Eigenfrequenzen größer oder gleich der ersten signifikanten Eigenfrequenz des Anlagenteils anzusetzen. Ist die Eigenfrequenz nicht bekannt, so ist für $S_{a,i}$ der Maximalwert des Antwortspektrums anzusetzen. Es sind jeweils die Dämpfung und die Richtung zu berücksichtigen.

(5) Bei räumlich gekoppelten Systemen sind – sofern keine genaueren Untersuchungen durchgeführt werden – alle drei $S_{a,i}$ gleich dem größten der drei ermittelten Werte zu setzen.

(6) Die Werte für e_i sind **Tabelle 4-2** zu entnehmen. Dabei ist zu begründen, dass das Anlagenteil nach **Tabelle 4-2** idealisiert werden kann. Andernfalls sind die angesetzten Werte zu belegen. Auch niedrigere Werte dürfen verwendet werden, wenn deren Zulässigkeit nachgewiesen wird.

(7) Für dynamisch starre Anlagenteile (Grundfrequenz größer oder gleich der oberen Grenzfrequenz) gilt e_i gleich 1,0.

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

(9) Einflüsse der Modellierung des Anlagenteils auf die Berechnungsergebnisse sind zu bewerten.

Hinweis:

In der Regel sind die Einflüsse der Modellierung des Anlagenteils durch die Variation der Erregung und die dahinter stehende Er-

fassung der Einflüsse der Modellierung der Primärstrukturen (Bauwerk, Baugrund) abgedeckt.

Modellabbildung	e_i
Durchlaufträger gleicher Feldweite	1,0
Kragträger	1,0
Gerader Balken beliebiger Lagerung	1,0 ^{*)}
Ebene Systeme (z. B. Rahmentragwerke, Trägerroste, ebene Rohrleitungssysteme)	1,2
Systeme mit räumlichen Schwingungsverhalten	1,5
*) Die größten Schnittgrößen (Kräfte, Momente) sind an jedem Querschnitt anzusetzen	

Tabelle 4-2: Werte des Faktors e_i für Gleichung (4-9)

4.4.5 Nichtlineare Berechnungen

(1) Alternativ zu den linearen Verfahren nach 4.4.2 bis 4.4.4 dürfen Anlagenteile mittels nichtlinearer Zeitverlaufsberechnungen (direkte Integration der Bewegungsgleichungen) nachgewiesen werden. Begründete Näherungsverfahren sind zulässig.

(2) Werkstoffgesetze dürfen durch polygonale, im einfachsten Fall durch bilineare Kennlinien angenähert werden. Die Kennlinien sind jeweils durch die verfügbaren Grenzduktilitäten zu begrenzen.

(3) Die Parameter des nichtlinearen Berechnungsmodells sind nach KTA 2201.1, 4.3.4 (4) bezüglich ihres Unschärfebereichs und der daraus resultierenden Unschärfe der Ergebnisse zu bewerten. Erforderlichenfalls sind Sensitivitätsstudien durchzuführen.

(4) Die nichtlinearen Berechnungen der Anlagenteile sind mit den nach 4.2.1 ausgewählten Belastungssituationen durchzuführen.

(5) Die Zeitverläufe der verschiedenen Erregungsrichtungen sind jeweils gleichzeitig und zusammen mit allen gleichzeitig vorhandenen anderen Einwirkungen anzusetzen.

(6) Werden die Dämpfungsgrade der Spalte B von **Tabelle 4-1** durch Proportionaldämpfung (Rayleigh-Dämpfung) approximiert, so ist bei der Wahl der Stützstellen darauf zu achten, dass keine zu hohe, auf der unsicheren Seite liegende Dämpfungswirkung entsteht.

4.4.6 Quasi-nichtlineare Auslegung von Anlagenteilen der Klasse IIa

(1) Die Tragfähigkeit von Anlagenteilen der Klasse IIa, bei denen bleibende Verformungen mit den Schutzzielen verträglich sind, darf – sofern keine genaueren nichtlinearen Berechnungen nach 4.4.5 durchgeführt werden – mittels nichtlinearer Spektren nach 4.2.5 nachgewiesen werden.

(2) Die Berechnung darf mit den über den Verhaltensbeiwert q reduzierten Spektren linear nach dem Antwortspektren-Verfahren nach 4.4.2 durchgeführt werden.

(3) Der Verhaltensbeiwert zur Bildung der nichtlinearen Spektren darf zum Nachweis der Strukturen ohne weiteren Nachweis mit q gleich 1,5 angenommen werden. Höhere Werte sind zu begründen.

Hinweis:

Hierzu sind weitere Angaben z. B. in DIN EN 1998-1 enthalten.

(4) Die auf Basis von (2) bis (3) berechneten Verformungen sind um den angesetzten Verhaltensbeiwert q zu vergrößern.

(5) Die Verankerung der Anlagenteile einschließlich der Verankerungsmittel ist mit q gleich 1,0 nachzuweisen, um ein Versagen der Verankerung vor Ausbildung der Duktilität in der Konstruktion auszuschließen. Auch die Bauanschlusslasten sind mit q gleich 1,0 anzugeben.

4.4.7 Relativverschiebungen

(1) Neben den beschleunigungsinduzierten Beanspruchungen der Anlagenteile, die z. B. über Antwortspektren oder Beschleunigungs-Zeitverläufe ermittelt werden, sind auch Beanspruchungen aus erdbebenbedingten Relativverschiebungen an den Ankopplungsstellen zu berücksichtigen, sofern diese mehr als 10 % zu den Beanspruchungen aus Beschleunigungen beitragen, (z. B. Rohrleitungsbeanspruchungen infolge Verformungen langer, schlanker Behälter oder infolge von Relativverschiebungen zwischen zwei Bauwerksteilen).

(2) Die sich aus den Relativverschiebungen ergebenden Bewegungs- oder Beanspruchungsgrößen dürfen zu denen aus Beschleunigungen nach Gleichung (4-10) als Wurzel aus der Quadratsumme überlagert werden.

$$E = \sqrt{E_a^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^6 (E_{vik})^2} \quad (4-10)$$

Hierbei bedeuten:

E Resultierende Antwortgröße aus Beschleunigungen und Relativverschiebungen

E_a Resultierende Antwortgröße infolge aller Beschleunigungseinwirkungen

E_{vik} Antwortgröße infolge der i -ten statisch aufzubringenden, erdbebeninduzierten Verschiebungskomponente (bis zu 6 Komponenten je Anschlusspunkt) am k -ten Anschlusspunkt (meist ein oder zwei, allgemein n Anschlusspunkte)

n Zahl der Anschlusspunkte

4.5 Nachweis der Grenzzustände

4.5.1 Allgemeines

(1) Die im Rahmen von 4.4 ermittelten Beanspruchungen (z. B. Schnittgrößen, Spannungen, Verformungen, Beschleunigungen) aus Erdbebeneinwirkungen zusammen mit anderen Einwirkungen sind den jeweiligen Beanspruchbarkeiten gegenüber zu stellen. Diese ergeben sich aus den Grenzzuständen der

- Tragfähigkeit,
- Integrität und
- Funktionsfähigkeit.

(2) Grenzzustände dürfen auf linearer oder auf nichtlinearer Basis, über Beanspruchungsgrößen oder über Weggrößen definiert werden.

(3) Bei den Nachweisen für die Einwirkungskombination mit Bemessungserdbeben ist – soweit nachfolgend keine abweichenden Angaben gemacht werden – die Anforderungskategorie A3 nach dem KTA-Sachstandsbericht KTA-GS-78 zugrunde zu legen.

(4) Eine Zuordnung der Anforderungskategorien nach KTA-GS-78 zu den Lastfallkategorien des Stahlbaus, den Bemessungssituationen des Bauwesens und insbesondere den Beanspruchungsstufen des Anlagenbaus gibt **Tabelle 4-3**. Einzelfallbezogen darf auch eine schärfere Einstufung festgelegt sein.

(5) Die Nachweise dürfen nach dem Teilsicherheitskonzept nach 4.5.2 oder nach dem globalen Sicherheitskonzept nach 4.5.3 (Beanspruchungsanalyse) geführt werden. Bei Stabilitätsproblemen sind die Nachweise nach 4.5.2 durchzuführen.

Benennung: Quelle	Einteilung			
Beanspruchungsstufen Anlagenbau: KTA 3201.2 KTA 3211.2	A	B	C	D
Lastfallkategorien: KTA 3205.1 KTA 3205.2	H	HZ	HS1	HS2/3
Bemessungssituationen: DIN EN 1990 DIN EN 1993	Ständig und vorübergehend		außergewöhnlich	
Anforderungskategorien: KTA-GS-78	A1		A2	A3

Tabelle 4-3: Zuordnung der Anforderungskategorien

(6) Bei den Nachweisen ist zu unterscheiden zwischen

- Stabkonstruktionen (z. B. Unterstützungsstrukturen von Anlagenteilen) und
- Schalenstrukturen von Anlagenteilen, mit oder ohne Druckbeaufschlagung (z. B. Behälterwandungen, Standzargen, Rohrleitungen, Formstücke).

(7) Nachweise der Einwirkungskombinationen mit Bemessungserdbeben sind, soweit keine anderen Angaben gemacht werden, nur für Primärspannungen zu führen.

Hinweis:

Sekundär- und Spitzenspannungen werden im Rahmen des komponentenspezifischen Regelwerks verfolgt.

(8) Für Anlagenteile aus spröden Werkstoffen (z. B. Grauguss, Keramik) oder mit ungünstigen Konstruktionen (z. B. Kehlnaht) sind neben den Primärspannungen auch die Gesamtspannungen zu berücksichtigen. Dabei sind Sekundärspannungen und Spitzenspannungen entweder wie Primärspannungen zu behandeln oder zusätzlich zu den Primärspannungen entsprechend der jeweiligen Versagensart zu bewerten.

(9) Wenn die konstruktive Durchbildung keine ausreichende Verformungsfähigkeit (Duktilität) des Anlagenteils oder seiner Stützkonstruktion sicherstellt, ist das Bemessungserdbeben in die Anforderungskategorie A2 einzustufen.

(10) Anlagenteile der Klasse IIa sind hinsichtlich Tragfähigkeit (bei Überflutungsgefahr auch hinsichtlich Integrität) in gleicher Weise wie die der Klasse I nachzuweisen, wenn die Beanspruchungen aus Erdbebeneinwirkung nach 4.4.6 (quasi-nichtlineare Auslegung) ermittelt wurden. Die dortigen Absätze 3 bis 5 sind zu beachten.

(11) Der rechnerische Nachweis der aktiven und passiven Funktionsfähigkeit muss durch einen Nachweis der Verformung nach (12) oder durch einen Spannungsnachweis nach (13) geführt werden.

(12) Für den Nachweis der Verformung ist zu zeigen, dass die ermittelten Verformungen die geforderte Funktion nicht beeinträchtigen. Dabei sind zu unterscheiden:

- Funktionsfähigkeit nach dem Erdbeben. Hier sind die resultierenden, bleibenden Verformungen zugrunde zu legen.
- Funktionsfähigkeit auch während des Erdbebens. Hier sind die resultierenden Gesamtverformungen (elastische plus bleibende Verformungen) zugrunde zu legen.

(13) Wird ein Spannungsnachweis gewählt, so sind diesem verschärfte Grenzwerte zugrunde zu legen:

- Falls aktive Funktionsfähigkeit nur nach dem Erdbeben oder nur passive Funktionsfähigkeit gefordert ist, genügt es, für das Bemessungserdbeben Beanspruchungsstufe C anzusetzen.
- Falls aktive Funktionsfähigkeit auch während des Erdbebens gefordert ist, ist für das Bemessungserdbeben Beanspruchungsstufe B anzusetzen.
- Zur Sicherstellung des Durchflusses in passiven Anlagenteilen (z. B. Rohrleitungen, Wärmetauscher) genügt Beanspruchungsstufe D, sofern die Analyse des Anlagenteils auf elastischer Basis erfolgt.

Hinweis:

Details legen die komponentenspezifischen Regeln fest. Funktionsfähigkeitsnachweise mittels Beanspruchungsnachweisen nach (13) decken für die betrachteten Bereiche die Tragfähigkeitsnachweise ab.

4.5.2 Nachweis nach dem Teilsicherheitskonzept

(1) Nach DIN EN 1990 sind folgende Einwirkungen zu berücksichtigen:

- Ständige Einwirkungen G_k (charakteristischer Wert)
- Veränderliche Einwirkungen Q_k (charakteristischer Wert)
- Einwirkungen aus Bemessungserdbeben A_{Ed} nach KTA 2201.1

(2) Ständige Einwirkungen und veränderliche Einwirkungen sind als charakteristische Werte anzusetzen.

Hinweis:

Einwirkungen aus Erdbeben sind Bemessungswerte und enthalten damit implizit einen Teilsicherheitsbeiwert von γ_F gleich 1,0. Für das Bemessungserdbeben nach KTA 2201.1 sind der Wichtungsfaktor γ_1 und der Bedeutungsfaktor γ nach DIN EN 1990 im Bemessungswert A_{Ed} enthalten.

(3) Als Bemessungswert für die Erdbebenbeanspruchung ist für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit die Einwirkungskombination nach Gleichung (4-11) anzusetzen:

$$E_d = E\{G_k \oplus A_{Ed} \oplus \sum_{i \geq 1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i})\} \quad (4-11)$$

Dabei ist

\oplus "zu kombinieren mit",

\sum "die kombinierte Wirkung von".

(4) Für die veränderlichen Einwirkungen sind die Kombinationsbeiwerte ψ_2 so festzulegen, dass das Produkt aus ψ_2 und Q_k den quasi-ständigen Wert einer veränderlichen Einwirkung beschreibt. Dementsprechend sind die Kombinationsbeiwerte ψ_2 für quasi-ständige Nutzlasten sowie Zwang aus Vorverformungen mit 1,0 anzusetzen.

Hinweis:

Die Kombinationsbeiwerte ψ_2 sind in DIN EN 1990 definiert. Anhaltswerte für ψ_2 sind in KTA 2201.3 angegeben.

(5) Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist nachzuweisen, dass

$$E_d \leq R_d \quad (4-12)$$

Hierbei ist

$$R_d = R \{ f_k / \gamma_M \} \quad (4-13)$$

der werkstoffabhängige Bemessungswert des Tragwiderstands, der durch den charakteristischen Wert der Werkstofffestigkeit f_k und den zugehörigen Teilsicherheitsbeiwert γ_M bestimmt wird. Für den Teilsicherheitsbeiwert γ_M des Baustahls wird unterschieden in

- γ_{M0} : Festigkeitsnachweise des Querschnitts
- γ_{M1} : Stabilitätsnachweise von Bauteilen auf Biegeknicken und Biegedrillknicken
- γ_{M2} : Zugfestigkeitsnachweis im Nettoquerschnitt

(6) Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{M0} und γ_{M1} sind mit 1,0 anzunehmen. Für Beanspruchbarkeiten, die von der Zugfestigkeit abhängen, ist γ_{M2} gleich 1,15.

(7) Soweit die komponentenspezifischen KTA-Regeln keine genaueren Angaben machen, darf der Grenzzustand der Tragfähigkeit auch nach Gleichung (4-14) angesetzt werden:

$$R_d = \sigma_{zul} \quad (4-14)$$

Darin ist σ_{zul} die zulässige Spannung des komponentenspezifischen Regelwerks in der entsprechenden Anforderungskategorie.

(8) Stabförmige Elemente von Anlagenteilen außerhalb des Anwendungsbereichs von komponentenspezifischen kerntechnischen Regeln dürfen nach DIN EN 1993-1-1 nachgewiesen werden.

(9) Schalenförmige Elemente von Anlagenteilen außerhalb des Anwendungsbereichs von komponentenspezifischen kerntechnischen Regeln dürfen nach Gleichung (4-14) in Verbindung mit 4.5.3 (4) nachgewiesen werden.

(10) Bei unverankerten Anlagenteilen sind beim Bemessungserdbeben beim Nachweis der Lagesicherheit (Kippen, Gleiten) stabilisierenden Einwirkungen mit einem Sicherheitsfaktor von 0,95 und destabilisierende Einwirkungen mit 1,0 anzusetzen.

(11) Im Grenzzustand der Funktionsfähigkeit oder Integrität ist nachzuweisen, dass

$$E_d \leq C_d \quad (4-15)$$

mit dem Bemessungswert der Beanspruchung E_d (z. B. Spannung oder Verformung) nach Gleichung (4-11) und dem Bemessungswert C_d der Funktionsfähigkeit oder Integrität (z. B. zulässige Spannung oder Verformung). Dieser ist komponentenspezifisch und einzelfallbezogen festzulegen.

4.5.3 Nachweis nach dem globalen Sicherheitskonzept

(1) Es sind die Einwirkungskombinationen entsprechend den komponentenspezifischen Regelwerken zugrunde zu legen.

(2) Es sind die Beanspruchbarkeiten (zulässige Spannungen, Verformungen etc.) des komponentenspezifischen Regelwerks zu verwenden.

(3) Im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Integrität ist ein Spannungsnachweis zu führen:

$$\sigma_{vorh} \leq \sigma_{zul} \quad (4-16)$$

Hierbei ist σ_{vorh} die mit der maßgebenden Einwirkungskombination gemäß (1) ermittelte Beanspruchung und σ_{zul} die gemäß (2) maßgebende Beanspruchbarkeit. Der Nachweis des Grenzzustandes der Funktionsfähigkeit ist nach Abschnitt 5 oder 4.5.1 (11) zu führen.

Hinweis:

Gleichung (4-16) gilt sinngemäß für jede Art von Beanspruchung (Spannung, Verformung, Verzerrung, etc.)

(4) Schalenförmige Elemente von Anlagenteilen außerhalb des Anwendungsbereichs von komponentenspezifischen kerntechnischen Regeln dürfen hinsichtlich Tragfähigkeit oder Integrität mit Primärspannungen gemäß **Tabelle 4-4** nachgewiesen werden. Eine Beschränkung auf den Primärspannungsnachweis ist nur dann zulässig, wenn Konstruktion und Werkstoffe den Anforderungen der Regelreihe KTA 3211 entsprechen.

Anforderungskategorie oder Beanspruchungsstufe	P_m	$P_m + P_b$ oder $P_i + P_b$
A3 oder D	$0,7 \cdot R_m$	$\alpha \cdot 0,7 \cdot R_m$
A2 oder C	$1,0 \cdot R_{p0,2}$	$\alpha \cdot 1,0 \cdot R_{p0,2}$

Tabelle 4-4: Grenzzustände der Primärspannungen sonstiger Anlagenteile

Darin sind:

- P_m Allgemeine Membranspannung aus Bemessungswert der Beanspruchung in der Erdbebensituation
- P_i Lokale Membranspannung aus Bemessungswert der Beanspruchung in der Erdbebensituation
- P_b Primäre Biegespannung aus Bemessungswert der Beanspruchung in der Erdbebensituation
- R_m Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Werkstoffs
- $R_{p0,2}$ Charakteristischer Wert der Streckgrenze oder 0,2 % Dehngrenze des Werkstoffs
- α Formfaktor, abhängig vom Querschnitt (z. B. $\alpha = 1,5$ für Rechteckquerschnitt)

(5) Bei unverankerten Anlagenteilen sind beim Bemessungserdbeben beim Nachweis der Lagesicherheit (Kippen, Gleiten) stabilisierenden Einwirkungen mit einem Sicherheitsfaktor von 0,95 und destabilisierende Einwirkungen mit 1,0 anzusetzen.

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 Original-Anlagenteile oder vorzugsweise dazu baugleiche Anlagenteile zu verwenden. Ersatz-Anlagenteile dürfen verwendet werden, wenn sie die Eigenschaften der Original-Anlagenteile entsprechend dem jeweiligen Nachweisziel repräsentieren.

(3) Wird für mehrere Teilprüfungen derselbe Prüfling verwendet, so ist sicherzustellen, dass die für die jeweilige Prüfung wesentlichen Eigenschaften des Original-Anlagenteils 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 Einwirkungsgrößen erfolgen.

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

(7) Soweit erforderlich, sind Verbindungen zu benachbarten Anlagenteilen zu berücksichtigen.

(8) Die bei Eintreten eines Erdbebens zu unterstellenden Betriebsbedingungen für den Prüfling sind, sofern es für das Nachweisziel erforderlich ist, zu erfassen (z. B. Druck, Temperatur, elektrische Spannung, elektrische Stromstärke, einzuhalten 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 Allgemeines

(1) Die Anregung für den experimentellen Nachweis wird unter Berücksichtigung der Anregungsart nach 4.2 und 5.5 ermittelt.

(2) Die für die Prüfung maßgebende Einwirkung ist entsprechend den Vorgaben (z. B. statische Ersatzlasten, Antwortspektrum, Zeitverlauf) und dem gewählten Prüfsignal für die Anregungsrichtungen am Aufstell- oder Einbauort festzulegen.

(3) Der Prüfling ist an seinen Befestigungspunkten so anzuregen, dass mindestens die vorgegebenen Einwirkungen erfüllt werden. Abweichungen sind zu begründen.

(4) Die jeweils gewählte Anregung muss grundsätzlich der maßgebenden Erdbebeneinwirkung gleichwertig sein. Bei der Anregung mit erzwungenen Schwingungen nach 5.3.6 (1) c) ist der Nachweis der Gleichwertigkeit bevorzugt durch einen Antwortspektrenvergleich zu erbringen. Andere Nachweismethoden, z. B. über die spektrale Leistungsdichte, sind zulässig.

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

5.3.2 Einwirkungsvergleich

(1) Ein Einwirkungsvergleich muss durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Prüfung die Einwirkungsvorgabe erfüllt.

(2) Bevorzugt ist der Einwirkungsvergleich durch einen Antwortspektrenvergleich durchzuführen. Die Dämpfung des Antwortspektrums muss bei der Auswertung größer als oder gleich wie der Wert bei der Vorgabe sein.

a) Bei unbekanntem Schwingungsverhalten des Prüflings ist sicherzustellen, dass die vorgegebenen Anforderungsantwortspektren durch die Gesamtheit der aufgetragenen Prüfanregungen erreicht werden.

b) Sind die charakteristischen Frequenzen des Prüflings bekannt, so ist es ausreichend, wenn durch die Prüfsignale die vorgegebenen Anforderungsantwortspektren 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 Dämpfungsgrade oder für den jeweils anzusetzenden Dämpfungsgrad aus **Tabelle 4-1**, Spalte A zu erbringen.

(3) Bei der Berechnung des Prüfantwortspektrums ist der Abstand der Stützstellen dem dazugehörigen Dämpfungsgrad anzupassen, um mögliche Unterschreitungen des Prüfantwortspektrums im Vergleich mit dem Anforderungsantwortspektrum zu erfassen.

(4) Bei Dämpfungsgraden von 1 % bis 5 % ist eine Berechnungsschrittweite von höchstens 1/12 Oktave und bis 10 % von 1/6 Oktave erforderlich. Bei höheren Dämpfungsgraden darf die Berechnungsschrittweite auf bis zu 1/3 Oktaven reduziert werden.

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

a) das Nachweisziel eine Überlagerung der entsprechenden Reaktionen des Prüflings gestattet oder

b) gezeigt wird, dass das Prüflingverhalten (Eigenfrequenzen, Steifigkeiten) oder die Anforderungsantwortspektren (Frequenzbereiche mit großen Überhöhungen) in den einzelnen Achsen unabhängig voneinander sind oder

c) die Prüfanregungen die Mehrachsigkeit der Erdbebenanregung durch entsprechend höhere Anregung berücksichtigen (siehe 5.5.2).

(3) Bei mehrachsiger Prüfanregung mit fester Phasenzuordnung sollen gleichphasige und um 180° phasenverschobene Anregungssignale kombiniert werden.

5.3.4 Querbewegungen

(1) Bewegungen orthogonal zur jeweiligen Anregungsrichtung oder -ebene sind zu erfassen.

(2) Bei auftretenden Querbewegungen ist sicherzustellen, dass der Sollwert in der Anregungsrichtung eingehalten wird.

5.3.5 Einfrequente Prüfanregungen

(1) Bei einfrequenter Anregung darf die gemessene Amplitude der anregenden Frequenz in der vorgeschriebenen Anregungsrichtung den entsprechenden Sollwert um höchstens 10 % unterschreiten.

(2) Der Störschwingungsanteil sollte bis zum Fünffachen der höchsten Prüffrequenz den Wert von d gleich 100 % nicht überschreiten.

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

Hierbei bedeuten:

d Störschwingungsanteil in Prozent

a_{ges} Effektivwert der Beschleunigung innerhalb des zu überwachenden Frequenzbereiches

a_n Effektivwert der vorgegebenen Beschleunigung bei der anregenden Frequenz

Hinweis:

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

5.3.6 Verfahren für die Prüfanregung

(1) Die folgenden Verfahren für die Prüfanregung sind mit den Einschränkungen nach 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 aufgetragenen 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 einfrequenter oder mehrfrequenter erfolgen.

(2) Als einfrequente Prüfanregung dürfen z. B. Festsinus, Gleitsinus oder Sinusschwebung verwendet werden.

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

5.4 Systemeigenschaften und Kennwerte

5.4.1 Statische Kennwerte

Statische Kennwerte (lokale und globale Steifigkeiten) sollen bei dem maßgebenden Belastungsniveau ermittelt werden. Sie dürfen bei geringeren Belastungen ermittelt werden, wenn die Extrapolierbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Die statischen Verfahren nach 5.3.6 (1) a) sollen hierbei vorzugsweise angewendet werden. Die übrigen Verfahren nach 5.3.6 dürfen angewendet werden.

5.4.2 Dynamische Kennwerte

(1) Die Anregung zur Ermittlung der Kennwerte soll vorzugsweise einachsig erfolgen.

(2) Die dynamischen Kennwerte (z. B. Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen) sind mit dem Verfahren nach 5.3.6 (1) b) oder mit einem der Verfahren nach 5.3.6 (1) c) vor der Belastungsprüfung zu ermitteln.

Hinweis:

Unter Anwendung des Verfahrens nach 5.3.6 c) können dynamische Kennwerte mit einer einaxialen Gleitsinusanregung von 1 bis

2 m/s² und einer Durchlaufgeschwindigkeit von kleiner gleich 1 oct/min ermittelt werden.

(3) Die Untersuchung des dynamischen Verhaltens ist bis zur 1,2-fachen oberen Grenzfrequenz durchzuführen.

(4) Der Dämpfungsgrad ist mit den Verfahren nach 5.3.6 (1) b) und 5.3.6 (1) c) zu ermitteln. Eine konservative Abschätzung darf mit dem Verfahren nach 5.3.6 (1) a) durchgeführt werden (Messung der statischen Hysterese). Hierbei gelten die folgenden Einschränkungen:

a) Für die Verfahren nach 5.3.6 (1) b) ist bei Ermittlung des Dämpfungsgrades durch Ausschwingversuche zu beachten, dass das Ausschwingen neben der Systemdämpfung auch durch die Energieableitung in angrenzende Systeme beeinflusst werden kann.

b) Für die Verfahren nach 5.3.6 (1) c)

ba) ist bei einfrequenter Prüfanregung darauf zu achten, dass die Anregung genügend lange ansteht, damit der eingeschwingene Zustand näherungsweise realisiert wird.

bb) ist bei Gleitsinusanregung eine Frequenzänderungsgeschwindigkeit von maximal einer oct/min einzuhalten. Höhere Durchlaufgeschwindigkeiten sind zu begründen.

bc) darf der Dämpfungsgrad aus der Übertragungsfunktion an geeigneten Punkten des Prüflings ermittelt werden. Die Ermittlung darf aus der Halbwertsbreite oder aus der Resonanzüberhöhung nach bd) erfolgen.

bd) darf eine untere Schranke für den Dämpfungsgrad D des Prüflings nach Gleichung (5-2) ermittelt werden.

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

Darin ist D der Dämpfungsgrad in % und Q die Resonanzüberhöhung.

Hinweis:

Die Gleichung (5-2) gilt exakt nur für den Schwinger mit einem Freiheitsgrad.

5.5 Analyse des mechanischen Verhaltens und Ermittlung der Beanspruchung

5.5.1 Verfahren

Die im Folgenden angegebenen Verfahren sind zur Ermittlung der Beanspruchungen am Prüfling anzuwenden:

a) Statische Verfahren

Falls als Einwirkungsgröße eine Auslenkkraft angesetzt wird, die aus der Ersatzbeschleunigung $a_{E,i}$ nach Gleichung (4-9) ermittelt wurde, sollen die statischen Verfahren nach 5.3.6 (1) 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 des Dämpfungsgrades des Prüflings (z. B. Werte aus **Tabelle 4-1**, Spalte A).

b) Verfahren der freien Schwingungen

Es ist sicherzustellen, dass mindestens bei einem Zyklus der freien Schwingungen die geforderte Beschleunigung $a_{E,i}$ nach Gleichung (4-9) aufgebracht wird. Das Verfahren ist insbesondere für Komponenten mit hinreichend homogener Massenverteilung geeignet.

c) Verfahren der erzwungenen Schwingungen

Für die Ermittlung der Beanspruchung dürfen die Verfahren der erzwungenen Schwingungen nach 5.3.6 (1) c) angewendet werden.

5.5.2 Fußpunktanregung

5.5.2.1 Allgemeine Anforderung

(1) 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.

(2) Im Allgemeinen ist die Dämpfung für ausgeprägte untere Eigenfrequenzen experimentell zu ermitteln. Es dürfen jedoch auch die Werte der **Tabelle 4-1**, Spalte A angewendet werden.

(3) Für höhere Eigenfrequenzen sind die Dämpfungsgrade aus **Tabelle 4-1**, Spalte A anzusetzen, wenn die Dämpfungen experimentell (z. B. aus dem Übertragungsverhalten) hierfür nicht genau bestimmt werden können.

5.5.2.2 Einfrequente Anregung bei unbekanntem Eigenfrequenzen des Prüflings

(1) Bei einer einrequenten Anregung und unbekanntem Eigenfrequenzen des Prüflings muss die Anregung so gewählt werden, dass das Prüfantwortspektrum das Anforderungsspektrum nach 5.3.2 einhüllt.

(2) Die Beschleunigungsamplitude der einrequenten Anregung in die Richtung i ist wie folgt zu berechnen:

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

Hierin bedeuten:

- i Index für Richtung x , y (horizontal), z (vertikal)
- f Anregungsfrequenz in Hz
- D Dämpfungsgrad des Prüflings
- $a_i(f, D)$ Beschleunigung des Antwortspektrums in der Richtung i
- $\ddot{U}(f, D)$ Anregungsspezifischer Überhöhungsfaktor, zu entnehmen aus **Bild 5-1** oder **Bild 5-2** (je nach Anregung)
- k_i Faktor zur Erfassung der Beiträge mehrerer Eigenschwingungen, falls jeweils nur eine Eigenschwingung angeregt wird:
 - $k_i = 1$, wenn mehrere Eigenschwingungen gleichzeitig angeregt werden oder wenn nur eine Eigenschwingung im Prüffrequenzbereich liegt
 - $k_i = \sqrt{2}$, wenn jeweils nur eine Eigenschwingung angeregt wird und mehrere Eigenschwingungen im Prüffrequenzbereich liegen

Die Anregung erfolgt bis zur oberen Grenzfrequenz des Anforderungsspektrums.

Die zusätzliche Prüfung der Starrkörperbeschleunigung ist für mindestens eine Periode bei einer frei gewählten Anregungsfrequenz ungleich einer Eigenfrequenz und kleiner als die obere Grenzfrequenz zusätzlich aufzubringen.

$$A_i(f) = k_i \cdot a_{oi} \quad (5-4)$$

Hierin bedeutet:

- a_{oi} Starrkörperbeschleunigung (Nullperiodenbeschleunigung) in der Richtung i

(3) Falls Zeitverläufe der Anregung am Einbauort vorliegen, darf die Anregung auch nach Gleichung (5-5) berechnet werden.

$$A_i(f) = k_i \cdot r_{\text{eff}} \cdot a_{oi} \quad (5-5)$$

mit

$$r_{\text{eff}} = \frac{a_{\text{eff}}(\text{Zeitverlaufanregung})}{a_{\text{eff}}(\text{Einfrequenzanregung})} \leq 1 \quad (5-6)$$

Die Größe r_{eff} ist das Verhältnis der Effektivwerte, die bei einer Zeitverlaufanregung im Vergleich zu einer harmonischen Anregung auftreten.

Der Effektivwert a_{eff} wird wie folgt gebildet:

$$a_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} a^2(t) dt} \quad (5-7)$$

mit

- $a(t)$ zeitliche Anregungsfunktion der Beschleunigung
- T Periode
- t_0 Startzeit

5.5.2.3 Einfrequente Anregung bei bekannten Eigenfrequenzen des Prüflings

(1) 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 Prüfantwortspektrum an diesen Stellen das Anforderungsspektrum erreichen oder überschreiten.

(2) Bei Prüflingen mit Starrkörperverhalten ist eine Prüfung bei statischer Anregung mit der Starrkörperbeschleunigung ausreichend. Bei dynamischer Anregung darf mit der Starrkörperbeschleunigung nach Gleichung (5-4) geprüft werden. Die Anregung darf bei beliebigen Frequenzen kleiner als oder gleich der oberen Grenzfrequenz erfolgen und muss für mindestens eine ganze Periode der gewählten Anregungsfrequenz anstehen.

(3) Je nach Art der Anregung am Aufstellort ist eines der Verfahren (1) oder (2) für die Ermittlung von $a_i(f, D)$ auszuwählen.

5.5.2.4 Mehrfrequenzanregung

(1) Bei vorgegebenen Zeitverläufen als Erdbebenanregung dürfen diese auch als Versuchseingabe verwendet werden. Die Gültigkeit der Prüfzeitverläufe ist durch Vergleich ihrer Antwortspektren mit dem Antwortspektrum des vorgegebenen Zeitverlaufs nach 5.3.2 zu überprüfen.

(2) 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 Anforderungsspektrum zwischen der oberen und unteren Grenzfrequenz nach 5.3.2 einhüllt.

(4) Die künstlichen Zeitverläufe sind nach 5.3.2 auf 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.

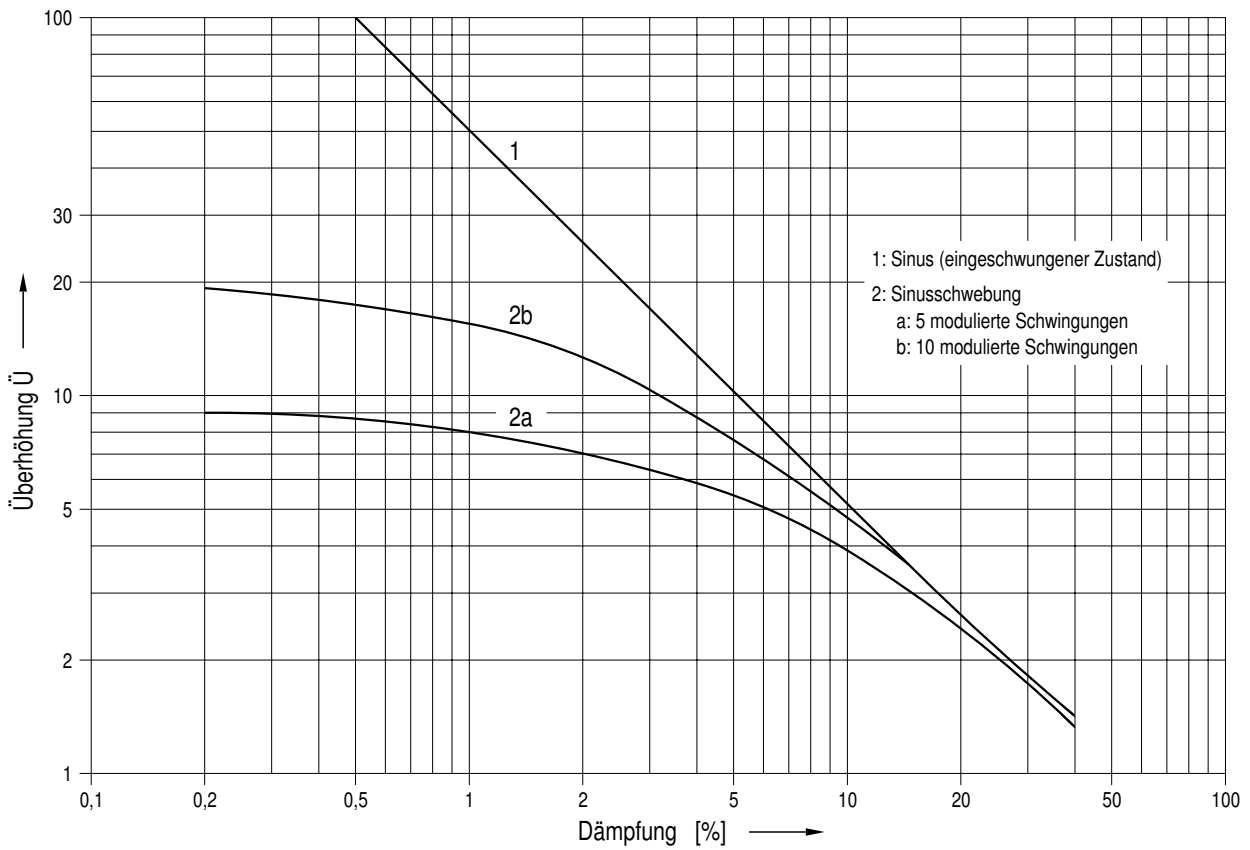


Bild 5-1: Überhöhungsfaktoren bei Sinusanregung und Anregung durch Sinusschwebung mit konstanter Frequenz

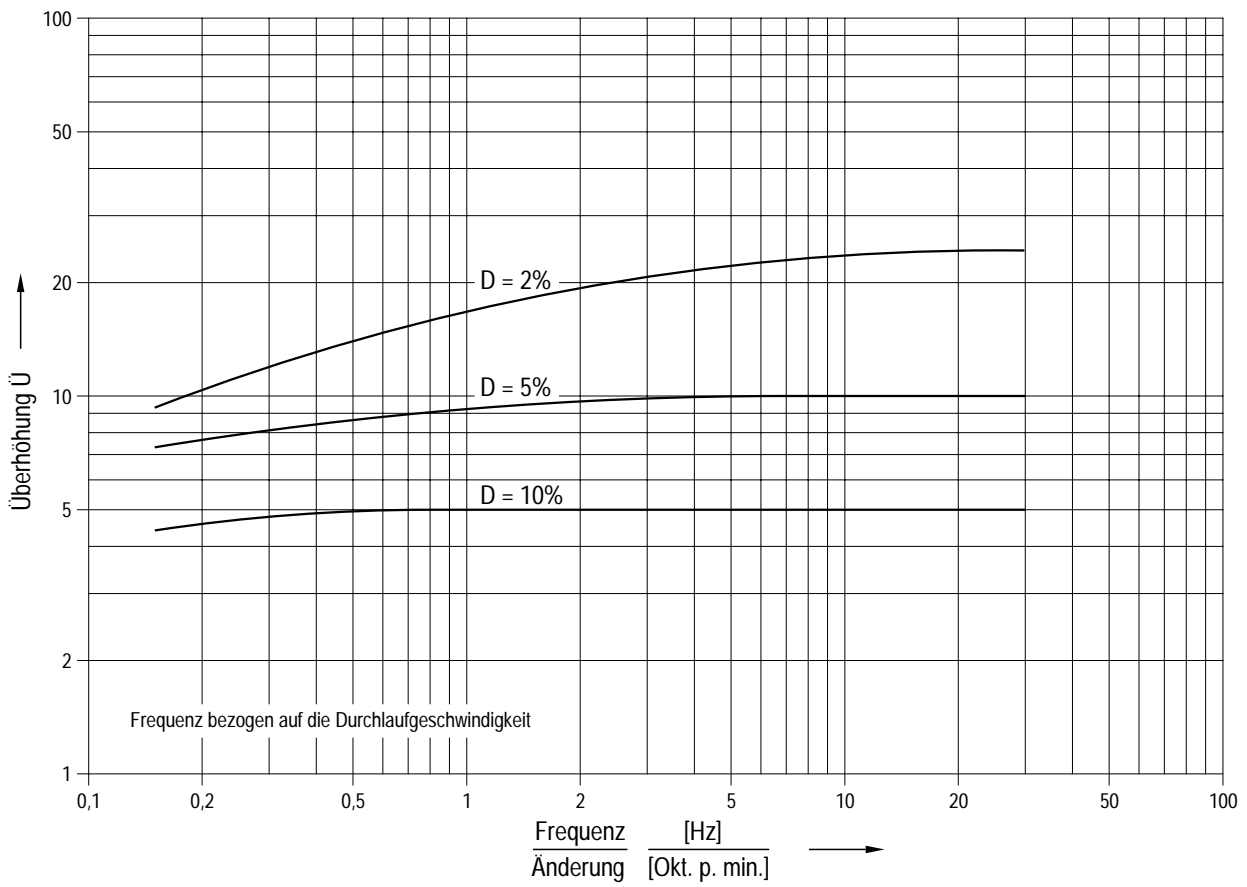


Bild 5-2: Überhöhungsfaktoren bei Gleitsinusanregung

5.5.2.5 Gleichzeitigkeit der Anregungsrichtungen

(1) Bei vorwiegend zweiachsiger Anregung am Aufstellort (eine horizontale (a_h) und die vertikale Richtung (a_v)) sind je nach Prüfanregung $a_i(f,D)$ und a_{oi} folgendermaßen zu ermitteln:

a) Einachsige Prüfanregung:

$$a_i(f,D) = \sqrt{a_h^2(f,D) + a_v^2(f,D)} \quad (5-8)$$

$$a_{oi} = \sqrt{a_{o,h}^2 + a_{o,v}^2} \quad (5-9)$$

b) Zweiachsige Prüfanregung oder einachsige Prüfanregung, wenn die Bedingungen nach 5.3.3 (2) b) (Entkoppelung der Achsen) erfüllt sind:

$$a_i(f,D) = a_{h,v}(f,D) \quad (5-10)$$

$$a_{oi} = a_{o,h,v} \quad (5-11)$$

(2) Bei dreiachsiger Anregung am Aufstellort sind je nach Prüfanregung $a_i(f,D)$ und a_{oi} folgendermaßen zu ermitteln:

a) Einachsige Prüfanregung:

$$a_i(f,D) = \sqrt{a_x^2(f,D) + a_y^2(f,D) + a_z^2(f,D)} \quad (5-12)$$

$$a_{oi} = \sqrt{a_{ox}^2 + a_{oy}^2 + a_{oz}^2} \quad (5-13)$$

b) Zweiachsige Prüfanregung (vertikal und horizontal):

vertikal:

$$a_i(f,D) = a_z(f,D) \quad (5-14)$$

$$a_{oi} = a_{oz} \quad (5-15)$$

horizontal:

$$a_i(f,D) = \sqrt{a_x^2(f,D) + a_y^2(f,D)} \quad (5-16)$$

$$a_{oi} = \sqrt{a_{ox}^2 + a_{oy}^2} \quad (5-17)$$

c) Dreiachsige Prüfanregung oder ein- oder zweiachsige Prüfanregung, wenn die Bedingungen nach 5.3.3 (2) b) (Entkoppelung der Achsen) erfüllt sind:

$$a_i(f,D) = a_{x,y,z}(f,D) \quad (5-18)$$

$$a_{oi} = a_{o,x,y,z} \quad (5-19)$$

5.5.3 Schwerpunktanregung

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

(2) Es ist sicherzustellen, dass die geforderte Beschleunigung a_E nach Gleichung (4-9) aufgebracht wird.

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

5.6 Nachweis der Grenzzustände

(1) In der experimentellen Beanspruchungsanalyse ist der Nachweis der Erfüllung der sicherheitstechnischen Aufgabenstellung nach 3.1 zu erbringen. Dazu sind die Beanspruchungen nach 5.5 zu ermitteln und der Zulässigkeitsnachweis nach 5.6 zu erbringen.

(2) Zum Nachweis der Zulässigkeit der Beanspruchungen dürfen die Verfahren nach 5.3.6 mit folgenden Festlegungen angewendet werden:

- Das Verfahren nach 5.3.6 (1) a) darf bezüglich der Funktionsfähigkeit nur bei verformungsbedingtem Versagen angewendet werden.
- Beim Nachweis der Funktionsfähigkeit während der Beanspruchung muss bei Anwendung des Verfahrens nach 5.3.6 (1) b) die Ausschwingzeit größer als die Funktionszeit für ein sicherheitstechnisch notwendiges Funktionsintervall sein. Hierbei ist zusätzlich die Amplitudenabnahme zu beachten.

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

- Zum Nachweis der Tragfähigkeit und der Integrität darf durch Spannungs- oder Dehnungsmessungen an signifikanten kraftübertragenden Bauteilen der Prüflinge gezeigt werden, dass die Grenzzustände nach 4.5 eingehalten werden.
- Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit darf durch Kontrolle der auftretenden Verformungen gezeigt werden, dass bei der Beanspruchung kein unzulässiger Zustand auftritt.
- Werden keine Spannungen oder Verformungen nachgewiesen, so ist die Belastung im Versuch um einen Sicherheitsfaktor γ_F zu erhöhen. Der Sicherheitsfaktor γ_F ist nach Gleichung (5-20) zu ermitteln:

$$\gamma_F = \gamma_{F1} \cdot \gamma_{F2} \quad (5-20)$$

Hierbei bedeuten:

γ_{F1} Faktor gegen Versagen γ_{F1} gleich 1,1

γ_{F2} Faktor bei einer Anzahl von Prüflingen zwischen 3 und 1 (Übertragungsfaktor):

$$1,0 \leq \gamma_{F2} \leq 1,4 \quad (5-21)$$

In begründeten Fällen darf der Sicherheitsfaktor γ_{F2} abgemindert werden. Wenn nachweislich der bezüglich des Nachweiszweckes ungünstigste Prüfling ausgewählt wurde, darf der Faktor γ_{F2} gleich 1,0 gewählt werden.

- Falls der Nachweis mit einem Sicherheitsfaktor γ_F nach (3) zu führen ist, gilt das Nachweisziel als erreicht, wenn
 - aus einer Grenzbeanspruchungsprüfung mindestens γ_F folgt, oder
 - eine Prüfung mit um γ_F erhöhten Belastungen durchgeführt wird und das Nachweisziel dabei eingehalten wird, oder
 - bei einer Prüfung mit γ_F gleich 1 eine Sicherheitsreserve in den Spannungen oder den Verformungen nachgewiesen wird, oder
 - durch Extrapolation von einem Prüfbeanspruchungszustand niedriger als der erforderliche Erdbebenbeanspruchungszustand die Einhaltung der Sicherheit nach (3) nachgewiesen werden kann.

(5) Wenn beim Tragfähigkeits-, Integritäts- oder Funktionsfähigkeitsnachweis keine Anforderungen an die Einhaltung bestimmter mechanischer Spannungs- oder Dehnungsgrenzen gestellt sind, gilt die bestandene Prüfung als Zulässigkeitsnachweis.

5.7 Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte

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 Nachweisziele erforderlich sind. Es braucht nur das jeweilige Prüfziel nachgewiesen werden.

5.8 Dokumentation

Die Dokumentation soll folgende Angaben umfassen:

- a) Zum Prüfling:
 - Prüflingskennzeichnung
 - Identifikation des Prüflings (z. B. Typ, Hersteller, Zeichnung)
 - Datenblatt (z. B. Materialdaten, Prüfzeugnisse)
 - Nachweisziel
- b) Zum Versuchsaufbau:
 - Beschreibung der Versuchs-, Mess- und Datenerfassungsanlage
 - Versuchsbedingungen
 - Messstellenplan
- c) Zur Versuchsdurchführung:
 - Datum der Versuchsdurchführung
 - Prüflabor, Prüfer
 - Art des Anregungssignals
 - Anregungsamplitude
 - Frequenzbereich
 - Anregungsrichtung
 - besondere Beobachtungen.

6 Analogienachweise

6.1 Allgemeines

(1) Beim Analogienachweis ist von Referenzergebnissen auszugehen:

- a) Ergebnisse rechnerischer oder experimenteller Nachweise nach den Abschnitten 4 oder 5, die für vergleichbare Anlagenteile durchgeführt wurden,
- b) Ergebnisse für das betreffende Anlagenteil hinsichtlich dessen Verhaltens bei anderen Einwirkungen, die quantitativ dokumentiert sind und einen Vergleich ermöglichen.

(2) Die vorliegenden Referenzergebnisse sind hinsichtlich Übertragbarkeit auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite zu bewerten, und es ist quantitativ zu begründen, dass dadurch die Erfüllung der sicherheitstechnischen Aufgabe des jeweiligen Anlagenteils nachgewiesen ist.

6.2 Übertragbarkeit von Referenzergebnissen

(1) Referenzergebnisse sind übertragbar, wenn bei 6.1 (1) a) die Systemeigenschaften und die zugehörigen Kennwerte der Anlagenteile hinreichend gleich sind und wenn bei 6.1 (1) b) zusätzlich die Referenzanregung vergleichbar der anzusetzenden Anregung ist.

(2) Die Referenzergebnisse sind auch übertragbar, wenn bzgl. Systemeigenschaften oder Anregungen Extrapolationen begründet werden können.

(3) Statische Systemeigenschaften (globale oder lokale Steifigkeiten) und Kennwerte (Materialkennwerte) dürfen als Referenz verwendet werden, wenn Konstruktion und Material gleichwertig sind. Das gilt auch für nichtlineares Verhalten,

das auf dem jeweiligen Beanspruchungsniveau vergleichbar sein muss.

(4) Dynamische Systemeigenschaften (Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen) dürfen als Referenz verwendet werden, wenn die statischen Systemeigenschaften nach (2) vergleichbar sind und Änderungen in der Massenbelegung bewertet werden.

(5) Statt der in Abschnitt 4 angegebenen Dämpfungswerte dürfen auch höhere Werte verwendet werden, wenn diese für den speziellen Anwendungsfall begründet werden.

(6) Wenn die Referenzanregung in begrenzten Frequenzbereichen kleiner als die anzusetzende Anregung ist, ist nachzuweisen, dass dies für das spezielle Anlagenteil ohne Bedeutung ist oder dass die höhere Anregung im Nachweis der Grenzzustände abgetragen werden kann.

7 Plausibilitätsnachweise

(1) Beim Plausibilitätsnachweis ist von Erfahrungstatsachen auszugehen:

- a) Praktische Erfahrungen über das Verhalten ähnlicher, typgleicher Anlagenteile kerntechnischer oder nicht kerntechnischer Anlagen bei tatsächlich aufgetretenen Erdbeben.
- b) Theoretische Erfahrungen aus den Erdbebennachweisen ähnlicher, typgleicher Anlagenteile, die eine Bewertung der Ausführungsplanung oder der konstruktiven Ausführung anderer Anlagenteile hinsichtlich der Erdbebensicherheit ermöglichen.

(2) Die Erfahrungstatsachen sind hinsichtlich der Übertragbarkeit auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite zu bewerten. Es ist schriftlich zu begründen, dass dadurch für das jeweilige Anlagenteil die Erfüllung der sicherheitstechnischen Aufgabe plausibel ist.

(3) Für die Gewinnung praktischer Erfahrung nach (1) a) sowie zur Bewertung der konstruktiven Ausführung nach (1) b) sind

- Ausführungsunterlagen zu sichten und
- Begehungen der Anlage durchzuführen.

Die dabei getroffenen Feststellungen sind schriftlich zu dokumentieren.

(4) Begehungen folgen dem in **Bild 7-1** dargestellten Ablaufschema.

Hinweis:

Anlagenbegehungen werden in der Regel in der realen Kraftwerksanlage durchgeführt, bei vorliegendem CAD-Modell können sie auch virtuell erfolgen. Voraussetzung hierfür ist, dass das CAD-Modell sowie alle für die Bewertung relevanten Daten aktuell und qualitätsgesichert vorliegen.

(5) Bewertungen und Verwendung der Begehungsergebnisse sind zu begründen. Die Kriterien hierfür müssen sich danach richten, welche Anforderungen - Tragfähigkeit, Integrität, Funktionsfähigkeit - zu erfüllen sind.

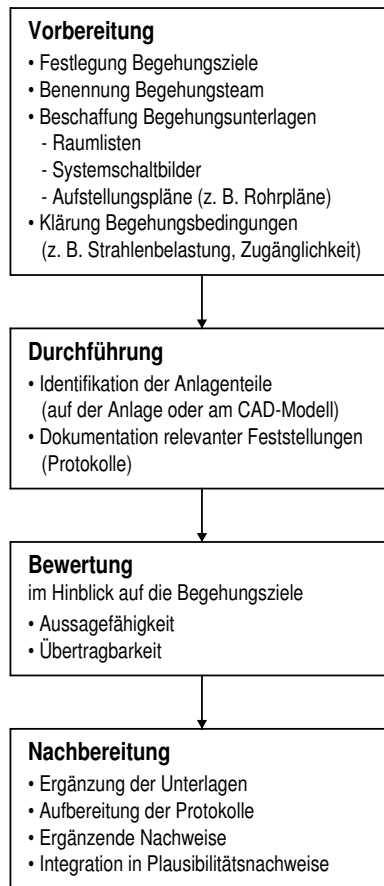


Bild 7-1: Ablaufschema Begehungen

Anhang:**Bestimmungen auf die in dieser Regel verwiesen wird**

(Die Verweise beziehen sich nur auf die in diesem Anhang angegebene Fassung. Darin enthaltene Zitate von Bestimmungen beziehen sich jeweils auf die Fassung, die vorlag, als die verweisende Bestimmung aufgestellt oder ausgegeben wurde.)

AtG		Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz – AtG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 31. Juli 2011 (BGBl. I S. 1704) geändert worden ist
StrlSchV		Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Oktober 2011 (BGBl. I S. 2000) geändert worden ist
Sicherheitskriterien	(1977-10)	Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke vom 21. Oktober 1977 (BAnz. Nr. 206 vom 3. November 1977)
Störfall-Leitlinien	(1983-10)	Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren gegen Störfälle im Sinne des § 28 Abs. 3 StrlSchV (Störfall-Leitlinien) vom 18. Oktober 1983 (Beilage zum BAnz. Nr. 245 vom 31. Dezember 1983)
KTA 1403	(2010-11)	Alterungsmanagement in Kernkraftwerken
KTA 2201.1	(2011-11)	Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen; Teil 1: Grundsätze
KTA 2201.3	(E 2011-09)	Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen; Teil 3: Bauliche Anlagen - Regelentwurfsvorlage
KTA 3201.2	(ÄE 2010-11)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung - Regeländerungsentwurf
KTA 3204	(2008-11)	Reaktordruckbehälter-Einbauten
KTA 3205.1	(2002-06)	Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen; Teil 1: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für Primärkreis-komponenten in Leichtwasserreaktoren
KTA 3205.2	(1990-06)	Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen: Teil 2: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für druck- und aktivitätsführende Komponenten in Systemen außerhalb des Primärkreises
KTA 3211.1	(2000-06)	Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises; Teil 1: Werkstoffe
KTA 3211.2	(ÄE 2010-11)	Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung - Regeländerungsentwurf
KTA-GS-78	(2005-11)	KTA-Sachstandsbericht „Empfehlungen zur Berücksichtigung aktueller bautechnischer Normen bei Anwendung der KTA-Regeln“
DIN EN 1990	(2010-12)	Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 +A1:2005 + A1:2005/AC:2010
DIN EN 1990/NA	(2010-12)	Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
DIN EN 1993-1-1	(2010-12)	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009
DIN EN 1993-1-1/NA	(2010-12)	Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
DIN EN 1998-1	(2010-12)	Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009
DIN EN 1998-1/NA	(2011-01)	Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau
DIN EN 1998-4	(2007-01)	Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 4: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen; Deutsche Fassung EN 1998-4:2006

Vertreter der Betreiber von Atomanlagen:

Dipl.-Ing. K. Borowski	RWE Power AG, Essen (Stellvertreter: Dr. G. Roth, EnBW Kraftwerke AG, Philippsburg)
Dr. S. Mörschardt	Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH, Hamburg (Stellvertreter: Dr. B. Neundorf, Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH, Hamburg)
Dr.-Ing. F. Sommer	E.ON Kernkraft GmbH, Hannover (Stellvertreter: Dr.-Ing. R. Meiswinkel, E.ON Kernkraft GmbH, Hannover)

Vertreter des Bundes und der Länder:

NN (für: BMU)	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn (Stellvertreter: WDir Dr. J. Wolf, BMU, Bonn)
MinR Dr.-Ing. G. Scheuermann	Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart (Stellvertreter: BDir Dr.-Ing. H. Schneider, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart)
H.-J. Fieselmann	Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover (Stellvertreter: GOR F. Gregorzewski, Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover)

Vertreter der Gutachter und Beratungsorganisationen:

Dipl.-Ing. R. Hero	TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München (Stellvertreter: Dipl.-Ing. S. Kirchner, TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München)
Dr. R. Stück (ab November 2010)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln
Dipl.-Ing. H. Liemersdorf (bis November 2010)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln
Dipl.-Ing. Gerding (für RSK)	TÜV NORD Ensys Hannover

Vertreter sonst. Behörden, Organisationen und Stellen:

Dr.-Ing. Meyer (für: DIN)	HOCHTIEF Construction AG, Frankfurt (Stellvertreter: Dr.-Ing. Sadegh-Azar (für: DIN), HOCHTIEF Construction AG, Frankfurt)
F. Hennig (für: DGB)	E.ON Kernkraft GmbH, Kernkraftwerk Stade (Stellvertreter: W. Pecher (für: DGB), E.ON Kernkraft GmbH, Kernkraftwerk Würgassen)

2.3 Zuständige Mitarbeiter der KTA-Geschäftsstelle:

Dr.-Ing. R. Gersinska	KTA-GS beim BfS, Salzgitter (ab November 2009)
Dipl.-Ing. M. Pradhan	KTA-GS beim BfS, Salzgitter (bis November 2009)

3 Erarbeitung der Regeländerung**3.1 Erarbeitung des Regeländerungsentwurfsvorschlages**

(1) Der Kerntechnische Ausschuss (KTA) hat auf seiner 59. Sitzung am 22. November 2005 beschlossen, die Regel KTA 2201.4 zu ändern und den KTA-Unterausschuss ANLAGEN- und BAUTECHNIK (UA-AB) beauftragt, einen Entwurf zur Änderung dieser Regel mit Dokumentationsunterlage durch ein Arbeitsgremium erarbeiten zu lassen.

(2) Der UA-AB hat auf seiner 97. Sitzung am 30. März 2006 zur Vorbereitung eines Entwurfs zur Änderung der oben genannten Regel ein Arbeitsgremium vorgeschlagen. In diesem Arbeitsgremium sollen alle Gruppen des KTA sowie weitere Fachleute aus dem Gebiet Erdbebenauslegung mitwirken. Die Obmannschaft des Arbeitsgremiums KTA 2201.4 wird an Henkel (Wölfel Beratende Ingenieure) übertragen. Bei der Überarbeitung der o. g. Regel sollen die Beratungsergebnisse der zurzeit in der Änderung befindlichen Erdbebenregel KTA 2201.1 (Grundsätze), insbesondere bezüglich der Schnittstellen zwischen den einzelnen Regeln, berücksichtigt werden. Das Arbeitsgremium KTA 2201.1 soll hierüber informiert werden.

(3) Die konstituierende Sitzung des Arbeitsgremiums KTA 2201.4 fand am 6. März 2007 in Höchberg statt. In dieser Sitzung wurde über das Thema „Handlungsbedarf zur Überarbeitung/Neufassung der Regel KTA 2201.4“ beraten. Es wurde festgestellt, dass sich die Regel in der Praxis bewährt hat und dass die Gliederung prinzipiell beibehalten werden kann. Bei der Überarbeitung der Regel sollen aber die Nachweisführung nach dem Teilsicherheitskonzept (nach dem KTA- Sachstandsbericht KTA-GS-78) sowie die nichtlinearen Verfahren berücksichtigt werden. Einige Ausführungen sollen, zwecks Vermeidung von Wiederholungen, nach KTA 2201.1 bzw. anderen KTA-Erdbebenregeln verschoben werden.

(4) Bis Januar 2011 haben folgende weitere Sitzungen stattgefunden:

2. Sitzung am 12. September 2007 bei Vattenfall in Hamburg,
3. Sitzung am 16. Januar 2008 bei Vattenfall in Hamburg,
4. Sitzung am 8. April 2008 bei E.ON Kernkraft in Hannover,
5. Sitzung am 5. Juni 2008 bei AREVA in Offenbach,
6. Sitzung am 29. Oktober 2008 bei Westinghouse in Mannheim,
7. Sitzung am 12. Februar 2009 bei E.ON Kernkraft in Hannover,
8. Sitzung am 16. Juni 2009 bei WBI in Höchberg,
9. Sitzung am 21./22. September 2009 bei AREVA NP in Erlangen,
10. Sitzung am 19./20. Januar 2010 bei WBI in Höchberg,
11. Sitzung am 22./23. April 2010 bei WBI in Höchberg
12. Sitzung am 5./6. Juli 2010 bei AREVA in Offenbach
13. Sitzung am 30. September und 1. Oktober 2010 bei VENE in Hamburg
14. Sitzung am 22./23. November 2010 bei TÜV SÜD in München
15. Sitzung am 26./27. Januar 2011 bei E.ON in Hannover

(5) In der 1. bis 4. Sitzung wurden die Abschnitte 1 bis 3 beraten. In der 5. Sitzung wurden Teile des Abschnitts 4 „Rechnerische Nachweise“ aktualisiert. Für die 6. Sitzung wurde ein Abgleich der Anforderungen bezüglich Nachweisführung, Berechnungsverfahren und Modellbildung, die in den derzeitigen Entwürfen zu KTA 2201.1, KTA 2201.3 und KTA 2201.4 enthalten sind, ausgearbeitet. In der 6. und 7. Sitzung wurde der Abschnitt 5 „Experimentelle Nachweise“ überarbeitet. In der 8. bis 10. Sitzung wurden die Beratungen zu den Abschnitten 4 und 7 fortgeführt. In der 11. bis 15. Sitzung wurde der Regeländerungsentwurfsvorschlag abschließend beraten. Während der Sitzungen des Arbeitsgremiums erfolgte ein kontinuierlicher Abgleich mit KTA 2201.3.

(6) Der UA-AB hat auf seiner 98. Sitzung am 30. Mai 2007, 99. Sitzung am 25. April 2008, 100. Sitzung am 9. April 2009, 101. Sitzung am 2. September 2009 und 102. Sitzung am 4. März 2010 jeweils den Stand der Beratungen im Arbeitsgremium KTA 2201.4 verfolgt.

(7) Der UA-AB hat auf seiner 104. Sitzung am 3. März 2011 den Regeländerungsentwurfsvorschlag geprüft und die Regeländerungsentwurfsvorlage KTA 2201.4 in der Fassung 2011-03 verabschiedet. Diese wurde für den Fraktionsumlauf freigegeben.

3.2 Erarbeitung des Regeländerungsentwurfs

(8) Im Rahmen des Fraktionsumlaufs, der vom 1. April bis 30 Juni 2011 erfolgte, wurden von folgenden vier Personen bzw. Institutionen insgesamt 36 Stellungnahmen eingereicht:

- VdTÜV
- Herr Dr. Zinn
- AREVA (Herr Ellinghaus, Herr Lang und Frau Liebig)
- BMU (Herr Dr. Fabian)

(9) Das AG beriet in seiner 16. Sitzung am 26. Juli 2011 die eingereichten Stellungnahmen und beschloss einstimmig die Verabschiedung des so erarbeiteten Regeländerungsentwurfsvorschlags zur Vorlage an den Unterausschuss ANLAGEN- UND BAUTECHNIK (UA-AB). Nach der 16. Sitzung erfolgten noch redaktionelle Überarbeitungen, die in die Fassung 2011-08 einfließen.

(10) Der UA-AB beriet auf seiner 105. Sitzung am 14. September 2011 über den neuen Regeländerungsentwurfsvorschlag und beschloss einstimmig dem KTA auf seiner 66. Sitzung am 15. November 2011 zu empfehlen, die in dieser Sitzung erarbeitete Regeländerungsentwurfsvorlage KTA-Dok.-Nr. 2201.4/11/2 (Fassung 2011-09) als Regeländerungsentwurf zu verabschieden.

(11) Der KTA hat diese Regeländerungsentwurfsvorlage auf seiner 66. Sitzung am 15. November 2011 einstimmig als Regeländerungsentwurf in der Fassung 2011-11 verabschiedet. Die Bekanntmachung des BMU erfolgte im Bundesanzeiger Nr. 188 am 14.12.2011.

3.3 Erarbeitung der Regeländerung

Wird nach dem Gründruck ergänzt!

4 Berücksichtigte Regeln und Unterlagen

4.1 Nationale Regeln und Unterlagen

- KTA 2201.1
- KTA 2201.3 (Regelentwurfsvorschlag in der jeweils neuesten Fassung)

4.2 Internationale Regeln und Unterlagen

- Der Kiureghian, A Response Spectrum Method for Random Vibrations, Report No. UCB/EERC-80/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1980.
- IBC International Building Code (2009)
- IEC 60980 - Ed. 1.0, Recommended Practices for Seismic Qualification of Electrical Equipment of the Safety System for Nuclear Generating Stations, 1989-06

5 Ausführungen zur Regeländerung

Allgemeines:

Entsprechend dem Auftrag des KTA hat das zuständige Arbeitsgremium den Umfang der änderungsbedürftigen Themen beraten. In den Beratungen wurden teilweise Änderungen zwecks Anpassung der Regel an den Stand von W & T vorgenommen, insbesondere wurde neben dem globalen Sicherheitskonzept auch das Teilsicherheitskonzept der bautechnischen Normen berücksichtigt. Die KTA 2201.4 musste die Anwendung beider Verfahren verbinden, um gleichermaßen das derzeitige komponentenspezifische Regelwerk und die eingeführten technischen Baubestimmungen zu berücksichtigen. Dabei wurde die Gliederung der Regel zwecks systematischer und detaillierter Erfassung der Anforderungen geändert. Die unten genannten Abschnitte bzw. Absätze beziehen sich auf die vorliegende Fassung der Regeländerung.

Im Folgenden sind die Ausführungen zu wesentlichen Änderungen in den jeweiligen Abschnitten/Absätzen angegeben:

Zu Titel der Regel:

Aufgrund des bestehenden Beschlusses des KTA-Unterausschusses Programm- und Grundsatzfragen (UA-PG) vom 7. Oktober 2004 bezüglich des Anwendungsbereiches der KTA-Regeln nur für die Kernkraftwerke wird der Übertitel beibehalten. Der Untertitel von Teil 4 wird jedoch verkürzt auf „Anlagenteile“, korrespondierend zu dem Untertitel von Teil 3 „Bauliche Anlagen“.

Zu Grundlagen:

Der Abschnitt Grundlagen wurde an den aktuellen Stand angepasst, und es wurde ein Verweis auf das BMI-Sicherheitskriterium 2.6 aufgenommen.

Zu Abschnitt 1: „Anwendungsbereich“:

Der Anwendungsbereich wurde an die KTA 2201.1, Fassung 2011-11, angepasst.

Zu Abschnitt 2: „Begriffe“

Die Liste der Begriffe wurde überarbeitet und erweitert. Es wurden jedoch nur Begriffe aufgenommen, die explizit in Teil 4 verwendet werden soweit sie nicht in KTA 2201.1 definiert sind. Nicht aufgenommen wurden Grundbegriffe der Mathematik, der Mechanik und der Schwingungstechnik, da deren Kenntnis bei den Nutzern dieser Regel vorausgesetzt wird. Weitere Angaben zu Quellen von Begriffen und Definitionen enthält ein entsprechender Hinweis.

Zu Abschnitt 3: „Allgemeine Anforderungen“

Der Abschnitt wurde neu geordnet und gestrafft, das Flussdiagramm mit den Nachweisschritten wurde an den aktuellen Stand der Nachweisführung angepasst. Teilthemen, die bereits in KTA 2201.1 enthalten sind (z. B. Erdbebenerregung am Standort), wurden gestrichen. Der Unterpunkt „Relativverschiebungen“ wurde nach Abschnitt 4 verschoben, da er mehr zur Berechnung gehört. Als Nachweismethoden werden Analogienachweise und Plausibilitätsnachweise als gleichberechtigt neben rechnerischen und experimentellen Nachweisen angesprochen (vgl. Abschnitte 6 und 7).

Zu Abschnitt 4: „Rechnerische Nachweise“

Der Abschnitt wurde überarbeitet, neu gegliedert sowie erweitert und dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik angepasst. Ferner wurden die Schnittstellen zu KTA 2201.1 berücksichtigt und zu KTA 2201.3 neu festgelegt.

Zu 4.2: „Anregung am Standort oder Einbauort“

Sekundärantworten des Bauwerks (Antwortzeitverläufe oder Antwortspektren) werden KTA 2201.3 zugewiesen, Tertiärantworten sind Gegenstand von KTA 2201.4. Bezüglich der Überlagerung von Anregungsrichtungen wird auf KTA 2201.1 verwiesen. Die diesbezüglichen früheren Abschnitte und Bilder entfallen.

Das Ersatzverfahren wurde beibehalten, da es sich bewährt hat. Der zugehörige Text wurde präzisiert und für Tertiärspektren umgeschrieben. (In redaktionell angepasster Form wurde dieser Abschnitt für Sekundärspektren in KTA 2201.3 integriert.)

Neu aufgenommen wurde der Abschnitt „Bemessungsspektren“, also die Ermittlung einhüllender, geglätteter Spektren, die eine robuste, d. h. gegen Auswirkungen von Parameterunschärfen unempfindliche Auslegung der Anlagenteile sicherstellen. Die Kriterien für Einhüllung, Verbreiterung und Glättung der berechneten Spektren sind angegeben.

Neu aufgenommen wurden „nichtlineare Spektren für Klasse IIa Anlagenteile“. Hier wird für die Klasse IIa Anlagenteile eine Methode aufgegriffen, die im nichtkerntechnischen Regelwerk (z. B. DIN EN 1998, IBC) international etabliert ist und eine Auslegung solcher Anlagenteile unter Nutzung ihres dissipativen Verhaltens ermöglicht.

Zu 4.2.3.1 „Zeitverlaufverfahren“

Die in KTA 2201.1 und KTA 2201.3 getroffenen Festlegungen bezüglich Anzahl der Zeitverläufe oder Zeitverlaufsätze (Belastungssituationen) werden in KTA 2201.4 fortgeschrieben. In der Tertiärebene wird die Anzahl der Zeitverläufe jedoch vervielfacht mit der Anzahl der Modellvarianten infolge Variation von Modellparametern wie Baugrund- und Struktursteifigkeiten aus der Sekundärebene.

Zur Anzahl der Zeitverläufe bzw. Belastungssituationen:

- Bei linearen Berechnungen ist eine Zahl von 3 Belastungssituationen, gebildet aus untereinander statistisch unabhängigen Zeitverläufen, die ggf. auf mehrere Modellvarianten anzusetzen sind, Stand von Wissenschaft und Technik; das Vorgehen hat sich bewährt.
- Bei nichtlinearen Berechnungen muss die Anzahl der Belastungssituationen höher sein, da die Ergebnisse stärker von der spektralen Phasenlage abhängen. Die Anzahl 7 (künstliche Zeitverläufe), die sich auch in KTA 2201.1 findet, entspricht der Forderung in DIN EN 1998 und sollte daher auch in KTA 2201.4 Orientierung sein. Die Zahl sollte aus Gründen der Praktikabilität nicht höher angesetzt werden, in ingenieurmäßig begründeten Fällen auch reduziert werden können. Deshalb sind die entsprechenden Forderungen in KTA 2201.4 nur qualitativ angegeben und die mögliche Anzahl nur in einem Hinweis genannt.

Zur Frage Mittelung oder Einhüllung:

- Bei linearen Berechnungen ist die Mittelung gleichgerichteter Antworten aus verschiedenen Belastungssituationen mathematisch begründet: Das Ergebnis hat in diesem Fall den gleichen Verteilungstyp wie die streuenden Eingangsgrößen (Phasenlage der spektralen Anteile, Materialkennwerte, Modellunschärfen). Weil hier mit Mittelwerten gerechnet wird, darf auch das Ergebnis gemittelt werden.
- Bei nichtlinearen Berechnungen ist dagegen über den Verteilungstyp der Ergebnisse nichts bekannt. Außerdem ist bei einigen Fragen (Lagesicherheit, Anschlagen, Absturz) schon eine einzige Überschreitung unzulässig. Schließlich zeigen Veröffentlichungen, dass bei nichtlinearen Berechnungen nur eine um eine Größenordnung höhere Anzahl von Fällen zu statistisch verwertbaren Ergebnissen führt (Monte Carlo). Bei 5 (registrierte Zeitverläufe) bis 7 (künstliche Zeitverläufe) Belastungssituationen schafft daher nur Einhüllen angemessene Sicherheit.

Zu 4.2.3.2 „Ersatzverfahren“

Das Ersatzverfahren hat sich als konservative Abschätzung von Sekundär- und Tertiärspektren bewährt und wurde redaktionell angepasst in die Neufassung übernommen. Es wird nachfolgend durch ein Beispiel veranschaulicht.

Gewählt wird ein Schaltschrank nach **Bild D-1**, der dynamisch mit dem Spektrum nach **Bild D-2** berechnet wurde und für den ein Tertiärspektrum zur Auslegung eines Betriebsmittels abzuleiten ist.

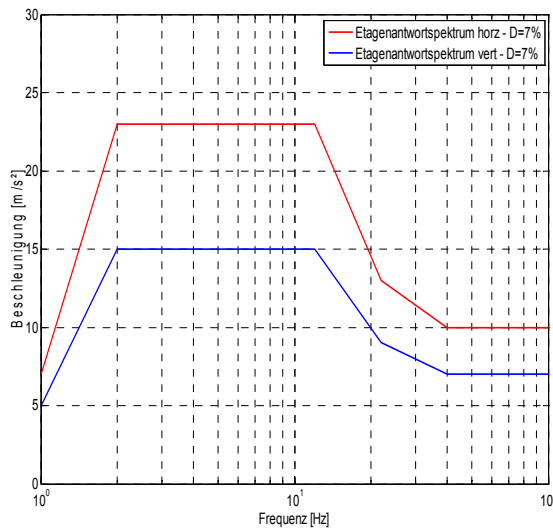
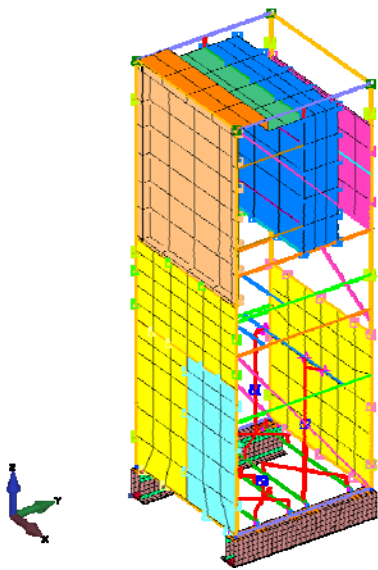


Bild D-1: Rechenmodell Schaltschrank

Bild D-2: Sekundärantwortspektrum

Die ermittelten modalen Parameter enthält **Tabelle D-1**; die signifikanten Eigenfrequenzen folgen aus den modalen Gewichten und sind gekennzeichnet.

MODAL EXTRACTION DATA							--- MODAL WEIGHTS ---		
MODE NO	EIGENVALUE (OMEGA**2)	NATURAL FREQUENCY	PERIOD	GENERALIZED WEIGHT	MAX TRANSLATION NODE-DOF VALUE	(GEN. WGT. * PARTICIPATION FACTORS**2)	X1	X2	X3
1	10733.2	16.489	0.0606	548.523	131-3 1.0000	4069.61922	41.35304	0.43079	
2	13400.2	18.424	0.0543	654.347	339-2 1.0000	110.63371	2692.12221	0.21528	
3	17551.3	21.085	0.0474	48.5370	69-1 1.0000	0.07732	7.55502	0.00612	
4	26157.7	25.741	0.0388	163.658	131-3 1.0000	492.69003	76.64136	0.00023	
5	29753.8	27.453	0.0364	40.9595	339-2 1.0000	14.42192	69.46919	0.00031	
6	30362.0	27.732	0.0361	39.5738	30-1 1.0000	39.42665	12.30079	0.00941	
7	39537.7	31.646	0.0316	53.1778	111-3 1.0000	1667.92682	0.18224	1.93476	
8	52925.1	36.614	0.0273	21.1168	111-3 1.0000	21.50063	0.76855	0.14052	
9	80150.7	45.058	0.0222	118.564	111-3 1.0000	101.92144	0.17244	239.34535	
10	87191.5	46.996	0.0213	66.6040	111-3 1.0000	155.97397	0.20777	202.36871	

Tabelle D-1: Modale Daten des Schaltschranks

Das Ergebnis des Antwortspektren-Verfahrens (mit CQC und Überlagerung gleichgerichteter Antworten aus den 3 Erregungsrichtungen nach der Wurzel aus der Quadratsumme) liefert die maximalen Antwortbeschleunigungen am oberen Ende des Schaltschrank (Einbaustelle des Betriebsmittels) in die beiden horizontalen Richtungen: $a_x = 24,5 \text{ m/s}^2$, $a_y = 27,5 \text{ m/s}^2$. Diese sind die a_G -Werte für die Anwendung des Ersatzverfahrens. Falls aus der Berechnung keine Beschleunigungsantworten folgen, müssen die Antwortgrößen in Beschleunigungsantworten umgerechnet werden.

Mit den Daten aus **Tabelle D-2** ergeben sich die in **Bild D-3** und **Bild D-4** eingezeichneten Tertiärspektren. Zum Vergleich eingetragen sind die durch dynamische Berechnung sich ergebenden Tertiärspektren; die Konservativität des Ersatzverfahrens ist evident.

Parameter	x-Richtung	y-Richtung
Beschleunigung des Hauptsystems a_G	24,5 m/s ²	27,5 m/s ²
Höchste maßgebende Eigenfrequenz f_n	31,6 Hz	18,4 Hz
Obere Grenzfrequenz $1,2 f_n$	37,9 Hz	22,1 Hz
Tiefste maßgebende Eigenfrequenz f_1	16,5 Hz	18,4 Hz
Untere Grenzfrequenz $0,8 f_1$	13,2 Hz	14,7 Hz
Dämpfung Schaltschrank (Hauptsystem) D_1	7 %	7 %
Dämpfung Betriebsmittel (Untersystem) D_2	4 %	4 %
Resonanzüberhöhungsfaktor nach Bild 4-2 V	6,5	6,5
Maximalbeschleunigung $a_G V$	159,3 m/s ²	178,8 m/s ²
Obere Grenzfrequenz nach Bild 2 f_{grenz}	40 Hz	40 Hz

Tabelle D-2: Daten zur Berechnung der Tertiärspektren

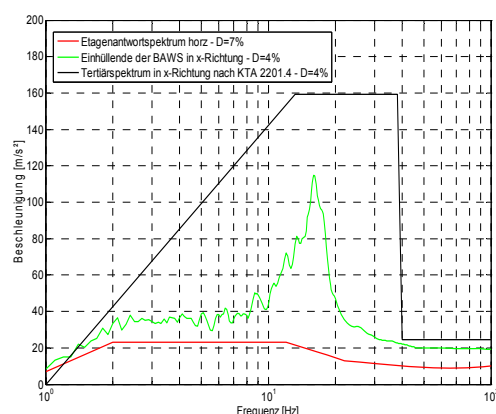


Bild D-3: Spektrenvergleich x-Richtung

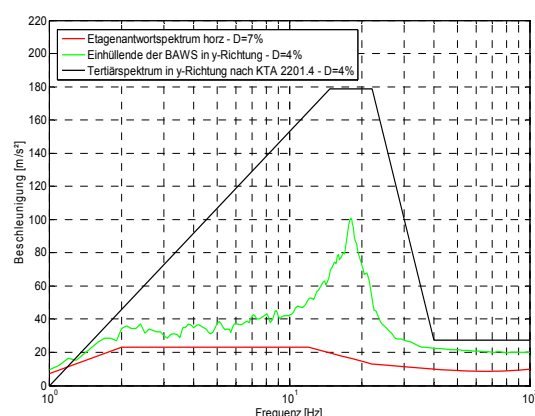


Bild D-4: Spektrenvergleich y-Richtung

Zu 4.2.4 (2) c): „Bemessungsspektren“

Bei der Bildung von Bemessungsspektren wird auch eine Kappung von Spektrenspitzen, die nicht breiter als 15 % der jeweiligen Mittenfrequenz sind, zugelassen. Bei diesen „Nadelspitzen“ handelt es sich um Recheneffekte, die bei linearer Berechnung mit dem Zeitverlaufverfahren entstehen. Dafür lassen sich verschiedene Ursachen angeben (1/):

- Bei der Entkopplung von Primär- und Sekundärsystem im Antwortspektrenverfahren fehlt der „Tilgereffekt“ des Sekundärsystems bei Resonanzabstimmung, also im Bereich der Spektrenspitze. In /2/ und /3/ werden entkoppelte (Antwortspektrenverfahren) und gekoppelte (mit Erfassung des Tilgereffekts) Berechnungen durchgeführt. Aus den Ergebnissen können folgende Schlüsse gezogen werden:
 - Die entkoppelt ermittelten Ergebnisse sind höher als die gekoppelt ermittelten.
 - Sind sowohl Primär- als auch Sekundärstruktur mit 5 % gedämpft, dann sind die Unterschiede zwischen den maximalen Beschleunigungsantworten der Sekundärstruktur aus entkoppelter und gekoppelter Berechnung klein, wenn das Massenverhältnis sehr klein ist ($m_s/m_p \leq 0,001$). Bei einem Massenverhältnis $m_s/m_p = 0,01$ wird im Resonanzfall (d. h. $T_p = T_s$ bzw. $f_p = f_s$) mit einer entkoppelten Berechnung die Beschleunigung um bis zu 50 % überschätzt.
 - Beträgt die Dämpfung der Primärstruktur 15 % und die der Sekundärstruktur 5 %, so ist die Abweichung aus gekoppelter und entkoppelter Berechnung auch für größere Massenverhältnisse weniger ausgeprägt.
- Der Ansatz gewichteter modaler Dämpfungen führt bei Resonanzabstimmung von Primär- und Sekundärsystem, wenn diese unterschiedliche Dämpfungsgrade besitzen, zu numerischen Ergebnissen, die mechanisch inkorrekt sind. Die Ursache liegt in nicht vernachlässigbaren Nebendiagonalgliedern der Dämpfungsmatrix (4/) Durch diesen Effekt entstehen

scheinbare Spektrenspitzen. Bei den untersuchten Beispielen liegen die modalen Spektrenspitzen um einen Faktor 1,6 bis 2,2 über dem exakten Ergebnis. In einer vergleichbaren Arbeit (/5/) erreichen die Unterschiede in den Federkräften etwa einen Faktor 2,5.

- Bei geringer, in der Realität immer vorhandener Nichtlinearität krümmt sich die Vergrößerungsfunktion, die Lösung wird zweideutig, die Resonanz kann nicht gehalten werden. Gleichzeitig reduziert sich die Überhöhung im Resonanzbereich. Die linear berechneten Überhöhungen sind damit stets zu groß.
- Eine Berücksichtigung statistischer Verteilungen der Material- und Modellparameter führt zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit der Spektrenspitzen und damit zu in den Spitzen deutlich niedrigeren Erwartungswerten. Deshalb findet sich in /6/ die Feststellung: „In lieu of performing a probabilistic evaluation, a 15 % reduction in peak amplitude of deterministic spectra is reasonable and conservative“. Diese Spektrenreduktion ist unabhängig von der Spitzenbreite und dadurch viel weitergehend als die hier festgelegte Kappung von Nadelspitzen bis zu einer Breite von 15 % der jeweiligen Frequenz. Sie wird nach dem Stand der Technik international angewandt.

Insgesamt lässt sich somit feststellen, dass die in KTA 2201.4, 4.2.4 (2) c) vorgesehene Kappung der Nadelspitzen eine angemessene Maßnahme ist, um unrealistische Überhöhungen zu reduzieren. Die Begrenzung durch die Frequenzbreite von 15 % stellt sicher, dass nur extreme Nadelspitzen geschnitten werden. Wenn durch die Mittelung über Ergebnisse aus mehreren statistisch unabhängigen Erregungszeitverläufen sich solche Spitzen bereits herausgemittelt haben, so greift die Kappung nicht.

Zu 4.3: „Modellbildung“

Dieser Abschnitt wurde neu zusammengestellt und systematisch gegliedert in „Systemeigenschaften“, „Unterteilung von Strukturen“ und „Flüssigkeitsfüllung in Komponenten“. Bei der Unterteilung wurde das Überlappungsverfahren bei Rohrleitungen neu aufgenommen. Der Abschnitt Flüssigkeitsfüllung enthält jetzt eine Öffnung zu genaueren Verfahren nach DIN EN 1998-4 und zur Methode der finiten Elemente für die Fluid-Struktur-Wechselwirkung.

Zu 4.4: „Analyse des mechanischen Verhaltens“

Dieser Abschnitt wurde überarbeitet, erweitert und fachlich auf den aktuellen Stand gebracht.

Unverändert sind die behandelten Rechenverfahren

- a) Antwortspektrenverfahren
- b) Zeitverlaufverfahren
- c) Quasistatisches Verfahren (früher Ersatzverfahren genannt)

Alternativ zu nichtlinearen Zeitverlaufverfahren werden aber auch nichtlineare statische Verfahren zugelassen. Ein Beispiel dafür ist die Kapazitätsspektrummethode, die im englischen Sprachraum als Pushover-Verfahren bezeichnet wird.

Der Abschnitt „Antwortspektrenverfahren“ wurde seiner praktischen Bedeutung entsprechend erweitert und auf den aktuellen fachlichen Stand gebracht. Insbesondere wurde zur modalen Überlagerung das CQC-Verfahren (Complete Quadratic Combination) als Standard eingeführt, so dass die einfache „Wurzel aus der Quadratsumme“ als Sonderfall für ausreichend gespreizte Eigenfrequenzen erscheint. Weiterhin wurde der in der Praxis ebenfalls wichtige „Starrkörperanteil“ aufgenommen und explizit behandelt.

Bei den „Zeitverlaufverfahren“ werden als Erregung Antwortzeitverläufe aus der Gebäudeberechnung, künstliche, zu den Antwortspektren des Gebäudes kompatible Zeitverläufe sowie entsprechend KTA 2201.1 registrierte Zeitverläufe im Rahmen eines Gesamtmodells zugelassen.

Das „Quasistatische Verfahren“ (fachlich korrekter als der frühere Begriff „Ersatzverfahren“) blieb praktisch unverändert; es hat sich in der vorliegenden Form bewährt.

Hinzugefügt wurden die Abschnitte

- Nichtlineare Berechnungen
- Quasi-nichtlineare Auslegung von Anlagenteilen der Klasse IIa
- Relativverschiebungen.

Durch die Aufnahme eines expliziten Abschnitts „Nichtlineare Berechnungen“ soll der Bedeutung dieser Verfahren für wirklickeitsnähere Berechnungen Rechnung getragen werden. Anforderungen und Restriktionen sind – teilweise unter Bezug auf KTA 2201.1 – genannt.

Der Abschnitt „Quasi-nichtlineare Auslegung von Anlagenteilen der Klasse IIa“ geht aus von den in 4.2 definierten „nichtlinearen Spektren für Klasse IIa Anlagenteile“ und nennt die entsprechenden Anforderungen und Restriktionen. Ein Verhaltensbeiwert $q = 1,5$ und damit die Annahme einer Mindestduktilität wird generell zugelassen; bezüglich höherer Werte wird auf DIN EN 1998-1 verwiesen.

Der Abschnitt „Relativverschiebungen“ aus dem ehemaligen Abschnitt 3 wurde am Ende von 4.4 eingefügt und dabei fachlich und redaktionell präzisiert.

Zu 4.4.2 (2) Hinweis:

Die im Hinweis angesprochene Erweiterung der Gleichung (4-3) ist in „Der Kiureghian“ (siehe 4.2 dieser Dokumentationsunterlage) beschrieben.

Zu 4.5 „Nachweis der Grenzzustände“

Dieser Abschnitt wurde vollkommen neu entwickelt und aufgebaut, da er weiterhin die Möglichkeit eines Nachweises nach dem globalen Sicherheitskonzept (Nachweis der Einhaltung zulässiger Spannungen) bieten muss, aber auch die Brücke schlagen muss zu dem aus dem Bauwesen stammenden Teilsicherheitskonzept (Nachweis der Einhaltung von Grenzzuständen unter γ_F

fachen Einwirkungen und $1/\gamma_M$ fachen Werkstofffestigkeiten). Beide Nachweisarten sind gleichberechtigt zugelassen, um alle komponentenspezifischen Regeln anwenden zu können, unabhängig davon, nach welchem Konzept diese aufgebaut sind.

Basis der Auslegung sind die Anforderungskategorien nach KTA-GS-78, wobei das Bemessungserdbeben – abgesehen von explizit benannten Ausnahmen – in Kategorie A3 einzuordnen ist. Tabelle 4-3 gibt die Zuordnung dieser Anforderungskategorien zu denen anderer Normen und Richtlinien wieder.

Zu 4.5.1 „Allgemeines“

Im Bauingenieurwesen wird der Begriff „Gebrauchstauglichkeit“ an Stelle von „Funktionsfähigkeit“ und „Integrität“ verwendet.

Zu 4.5.2 „Nachweis nach dem Teilsicherheitskonzept“

Die Teilsicherheitsbeiwerte für den Tragwiderstand wurden aus DIN EN 1993-1-1/NA entnommen.

Zu 4.5.3 „Nachweis nach dem globalen Sicherheitskonzept“

Für Stabilitätsnachweise nach dem globalen Sicherheitskonzept liegen keine gültigen DIN-Normen vor.

Zu Abschnitt 5: „Experimentelle Nachweise“

Der Inhalt des Abschnittes 5 hat sich in der Praxis bewährt. Der Text wurde deshalb grundsätzlich beibehalten und lediglich bereichsweise präzisiert und redaktionell überarbeitet. Die „Beispiele für die Zusammenfassung mehrerer Nachweisschritte“ im bisherigen 5.6 wurden gestrichen.

Zu Abschnitt 6: „Analogienachweise“ und Abschnitt 7: „Plausibilitätsnachweise“

Im Gegensatz zur bisherigen Fassung, in der Analogie- und Plausibilitätsbetrachtungen als „Alternative Nachweismöglichkeiten“ nur am Rande und in einem Abschnitt zusammen behandelt werden, sind jetzt beide Nachweisarten gleichberechtigt nebeneinander und gleichberechtigt neben die rechnerischen und experimentellen Nachweise gestellt worden.

Beide Nachweisarten sind fachlich grundsätzlich unterschiedlich. Deshalb werden sie jeweils zu Beginn definiert. Aus diesen Definitionen ergeben sich die Kriterien und Vorgehensweisen für die fachliche Anwendung. Bei den Analogienachweisen wurden die Kriterien für die Übertragbarkeit von Referenzergebnissen zugespitzt. Die Plausibilitätsnachweise wurden für die Integration von Anlagenbegehungen geöffnet, die über ein Ablaufschema veranschaulicht werden.

Zu Anhang A (alt): Krane und deren Stahltragwerke

Der Anhang A ist entfallen, da in KTA 3902 nur noch ein allgemeiner Bezug auf die KTA 2201.4 enthalten ist.

Literatur (Dokumentationsunterlage):

- /1/ Henkel, F.-O.: Broadening and Smoothing of Floor Response Spectra - How to deal with „Needle Peaks“, SMiRT 2011
- /2/ Furtmüller, T., Adam, C.: Erdbebenantwort von schwingungsfähigen Einbauten in elastoplastischen Tragwerken, D-A-C-H Tagung 2007
- /3/ Furtmüller, T., Adam, C.: Studie zur Erdbebenantwort von Sekundärstrukturen in hochgedämpften Primärstrukturen, interne Korrespondenz, 9. April 2008
- /4/ Röhner, J., Henkel, F.-O.: The Influence of Nonclassical Damping on Subsystem Response, SMiRT 2009
- /5/ Gupta, A.: Significance of Nonclassical Damping in Coupled System Analysis, SMiRT 1999
- /6/ ASCE 4-98