

# Dokumentationsunterlage zur Regelerstellung

## KTA 2201.4

### Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen

#### Teil 4: Anforderungen an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für

#### Maschinen- und elektrotechnische Anlagenteile

(Fassung 6/90)

#### Inhalt

- 1 Auftrag des KTA
- 2 Beteiligte an der Regelerstellung
- 3 Erarbeitung des Regelentwurfs
- 4 Ausführungen zum Regeltext

#### 1 Auftrag des KTA

Der Kerntechnische Ausschuss (KTA) hat auf seiner 14. Sitzung am 1. März 1977 die Kraftwerk Union AG mit der Erstellung des Regelentwurfsvorschlags.

Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen,  
Teil 4: Auslegung der maschinen- und elektrotechnischen Anlagen

beauftragt.

#### 2 Beteiligte an der Regelerstellung

##### 2.1 Arbeitsgremium

Dem Arbeitsgremium KTA 2201.4 gehörten bis zur Fertigstellung des Regelentwurfsvorschlags mit Dokumentationsunterlage beim Stand vom 20.01.1982 folgende Herren als Mitglieder an:

- aus Datenschutzgründen in dieser Datei gelöscht.

##### 2.2 KTA-Unterausschuss

Dem KTA-Unterausschuss ANLAGEN- UND BAUTECHNIK (UA-AB) gehören an:

- aus Datenschutzgründen in dieser Datei gelöscht.

### 2.3 KTA-Geschäftsstelle

Dipl.-Ing. K. Neu (bis 6/89)	Geschäftsstelle des Kerntechnischen Ausschusses bei der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln
Dipl.-Geophys. M. Bork	Geschäftsstelle des Kerntechnischen Ausschusses bei der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln

## 3 Erarbeitung des Regelentwurfs

### 3.1 Erarbeitung des Regelentwurfsvorschlags

Die 1. Sitzung des Arbeitsgremiums KTA 2201.4 fand am 14. Juli 1977 statt. Zur Erarbeitung des Regelentwurfsvorschlags benötigte das Arbeitsgremium insgesamt 20 Sitzungen. Ferner fanden von den Mitgliedern des Arbeitsgremiums in folgenden Arbeitskreisen zahlreiche Sitzungen zur intensiven Behandlung von Einzelthemen statt:

Arbeitskreis	-	Elektrotechnik
Arbeitskreis	-	Experimentelle Verfahren
Arbeitskreis	-	Konstruktive Maßnahmen
Arbeitskreis	-	Redaktion
Arbeitskreis	-	Entkopplung.

### 3.2 Erarbeitung der Regelentwurfsvorlage

Auf seiner 43. Sitzung am 21. April 1982 beschloss der KTA-Unterausschuss "ANLAGEN- UND BAUTECHNIK" (UA-AB) nach eingehender Prüfung, die Regelentwurfsvorlage (KTA Dok.-Nr. 2201.4/82/1) den Fraktionen des KTA zur ersten Stellungnahme vorzulegen.

Änderungsvorschläge gingen ein seitens: Vereinigung der Technischen Überwachungs-Vereine e.V., Brown, Boveri und Cie-Konzern (BBC, BBR, HRB), Kraftwerk Union AG, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Horst Wölfel, Institut für Bautechnik, Gg. Noell GmbH, Badenwerk Aktiengesellschaft, Interatom GmbH und Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung Baden-Württemberg.

Das Arbeitsgremium behandelte die Änderungsvorschläge am 21./22.07 1982 im Einzelnen und nahm zu jedem Punkt Stellung. Der KTA-Unterausschuss "ANLAGEN- UND BAUTECHNIK" (UA-AB) bearbeitete auf der Basis dieser Stellungnahmen die Regelentwurfsvorlage auf seiner 44. Sitzung am 15.09.1982. Er beschloss mit einer Stimmenthaltung, die erarbeitete Regelentwurfsvorlage (KTA-Dok.-Nr. 2201.4/82/2) dem KTA mit der Empfehlung vorzulegen, sie als Regelentwurf zu veröffentlichen.

### 3.3 Verabschiedung als Regelentwurf

Bereits zur 31. KTA-Sitzung am 30. November 1982 lag dem KTA ein Beschlussvorschlag des Unterausschusses ANLAGEN- UND BAUTECHNIK zur Verabschiedung des Regelentwurfs KTA 2201.4 vor. Dieser Tagesordnungspunkt wurde von der Tagesordnung der 31. KTA-Sitzung abgesetzt, da eine Stellungnahme der RSK noch nicht vorlag. Die Beschlussvorlage wurde auch von der Tagesordnung der 32. KTA-Sitzung am 14.06.1983 abgesetzt, nachdem die RSK es für erforderlich gehalten hatte, dass ihren Bedenken gegen die Kapitel 6 (Analogiebetrachtung), 7 (Plausibilitätsbetrachtung) und 8 (Konstruktive Maßnahmen) vor der Verabschiedung der Regelentwurfsvorlage Rechnung getragen wird.

Der Unterausschuss ANLAGEN- UND BAUTECHNIK hat auf seiner 50. Sitzung am 11.10.1983 die RSK-Einwände behandelt und die Kapitel 6 - 8 entsprechend geändert. Er beschloss einstimmig, beim KTA die Verabschiedung der Regelentwurfsvorlage, KTA-Dok.-Nr. 2201.4/82/2 mit den in KTA-Dok.-Nr. 2201.4/83/1 zusammengestellten Änderungen als Regelentwurf KTA 2201.4 Fassung 11/83 zu beantragen.

Der KTA behandelte die Regelentwurfsvorlage auf seiner 33. Sitzung am 29. November 1983 und stimmte dem Antrag des Unterausschusses ANLAGEN- UND BAUTECHNIK (UA-AB) einstimmig zu. Die Bekanntmachung des BMI erfolgte im Bundesanzeiger Nr. 230 am 9. Dezember 1983.

### 3.4 Erarbeitung der Regelvorlage

Die Frist zur Einreichung von Änderungsvorschlägen begann am 10. Dezember 1983 und endete am 10. März 1984. Es sind von folgenden Institutionen Änderungsvorschläge eingegangen.

- Internationale Atomreaktorbau GmbH
- Gg. Noell
- Kraftwerk Union AG
- Vereinigung der Technischen Überwachungs-Vereine e.V.

- KTA-GS, Prüfstelle
- Reaktor-Sicherheitskommission

Das Arbeitsgremium behandelte auf seiner Sitzung am 24./25.09.1984 die Einsprüche und erarbeitete Vorschläge zu ihrer Berücksichtigung. In einer gesonderten Sitzung am 15.11.1984 wurde vom Arbeitsgremium ein Vorschlag zur Behandlung der Dämpfungswerte für Rohrleitungen erarbeitet.

Der Unterausschuss ANLAGEN- UND BAUTECHNIK verabschiedete die Regelvorlage auf seiner 53. Sitzung am 16.01.1985 zur Weitergabe an den KTA.

Auf der 37. Sitzung des KTA am 04.06.1985 wurde die Regelvorlage aufgrund der auf der Sitzung vorgetragenen RSK-Einwände mit der Maßgabe an den UA-AB zurückverwiesen, dass die Regelvorlage nach Berücksichtigung der RSK-Einwände erneut vorgelegt werden soll.

Das Arbeitsgremium hat auf seiner 24. Sitzung am 25.09.1985 und der UA-AB auf seiner 55. Sitzung am 01.10.1985 die RSK-Einwände behandelt und entsprechende Regeltextänderungen vorgenommen (KTA-Dok.-Nr. 2201.4/85/3). Als Ergebnis seiner Beratungen beschloss der UA-AB, dem KTA zu seiner 38. Sitzung am 03.12.1985 die überarbeitete Regelvorlage erneut zur Beschlussfassung vorzulegen. Auf Veranlassung des RSK-A-EE wurden in diese Vorlage auch redaktionelle Verbesserungen, abgestimmt mit den Obleuten des Arbeitsgremiums und des UA-AB, mit aufgenommen (KTA-Dok.-Nr. 2201.4/85/4 und 5).

Der KTA beriet auf seiner 38. Sitzung am 03.12.1985 über die Regelvorlage und fasste den Beschluss:

"Der Unterausschuss ANLAGEN- UND BAUTECHNIK wird gebeten, die vorgebrachten Einwände, insbesondere der RSK, zu behandeln und eine neue Beschlussvorlage zum Regelvorhaben KTA 2201.4 zu erarbeiten. Hierbei sind die Unterausschüsse STARKSTROM sowie INSTRUMENTIERUNG UND REAKTORSCHUTZ zu beteiligen."

Der UA-SS gelangte auf seiner 46. Sitzung am 25./26.02.1986 zu der Ansicht, dass - nach Änderung des Titels und Ergänzungen im Anwendungsbereich sowie im Abschnitt "Nachweismethoden" - die Regelvorlage KTA 2201.4 zusammen mit den komponentenspezifischen Regeln der 37'er Reihe die notwendigen Festlegungen für den Nachweis der seismischen Auslegung der starkstromtechnischen Anlagen enthält.

Der UA-IR beschloss auf seiner 47. Sitzung am 06./07.03.1986, die Regelvorlage von einem Ad-hoc-Arbeitskreis sachlich und formal durchsehen zu lassen. Diese Arbeitskreissitzung fand am 04.06.1986 statt. Das Ergebnis dieser Sitzung wurde auf der Sitzung des UA-IR am 18./19.09.1986 verabschiedet.

Auf seiner 59. Sitzung am 14.10.1986 beriet der UA-AB über das Ergebnis der Unterausschüsse STARKSTROM und INSTRUMENTIERUNG UND REAKTORSCHUTZ (Regelvorlage September 86). Er beschloss, die Weiterbearbeitung des Regelvorhabens bis zum Vorliegen von Ergebnissen aus dem Regeländerungsverfahren zu KTA 2201, Teil 1: Grundsätze, vorläufig ruhen zu lassen.

### 3.5 Erarbeitung des 2. Regelentwurfs

Der Unterausschuss ANLAGEN- UND BAUTECHNIK hat auf seiner 64. Sitzung am 19.01.1988 mit der Auswertung von Forschungs- und Untersuchungsergebnissen zum Thema "Erdbebenauslegung" begonnen und hierbei beschlossen, erst dann Regeltextänderungen zur Serie KTA 2201 vorzubereiten, wenn Grundsatzentscheidungen von Seiten der RSK vorliegen.

Die RSK-Beratungen über den Einfluss des Auslegungserdbebens auf Kernkraftwerksbauteile führten im Mai 1988 zu einer Bestätigung für das neue Auslegungskonzept auf der Basis eines einzigen, die sicherheitstechnischen Anforderungen abdeckenden Erdbebens, des Sicherheitserdbebens. Der UA-AB hat daraufhin auf seiner 65. Sitzung am 30. Juni 1988 beschlossen, dass

- die UA-Beratungsunterlage zu Teil 3 (bauliche Anlagen) und in diesem Zusammenhang - da nur teilweise in Vorgriff auf noch ausstehende Bewertungen zu den maschinen- und elektrotechnischen Anlagenteilen - auch der Teil 1 (Grundsätze) auf der Basis Fassung 6/75 sowie die UA-Beratungsunterlage zu Teil 6 (Maßnahmen nach Erdbeben), im Pkt. Auslegungserdbeben/Inspektionserdbeben formal angepasst werden sollten,
- der UA auf der Grundlage dieser von der KTA-GS fertig erstellten Überarbeitungen prüfen wird, inwieweit einzelne externe Fachleute oder ein Arbeitsgremium hinzugezogen werden sollen,
- bei einer Anpassung der Regelvorlage KTA 2201.4 (maschinen- oder elektrotechnische Anlagenteile) zusätzlich zur Bewertung des AEB-Einflusses noch die Festlegung des Dämpfungswerts bei Rohrleitungen erforderlich ist.

Der UA-AB hat sich auf seiner Sitzung am 23.11.88 der RSK-Empfehlung, das Auslegungserdbeben nicht mehr als besonderen Lastfall zu berücksichtigen, angeschlossen. Die Begriffe "Auslegungserdbeben" und "Sicherheitserdbeben" wurden zum Begriff "Bemessungserdbeben" (Bemessungserdbeben ist das Sicherheitserdbeben) zusammengefasst und als neues Inspektionsniveau das 0,4-fache der Bemessungsgrößen dieses Bemessungserdbebens eingeführt. Darüber hinaus war der UA der Ansicht, in der vorliegenden Revisionsphase zu KTA 2201 wenn, dann nur sachlich engbegrenzte zusätzliche Regeltextänderungen vorzunehmen, bei denen allgemeine Zustimmung erwartet werden kann.

Die Ergebnisse der Beratungen zur Regeländerung von KTA 2201.1 (6/75) wurden bei der Überarbeitung der in Fassung 12/86 vorliegenden Regelvorlage von KTA 2201.4 zugrunde gelegt. Der Unterausschuss ANLAGEN- UND BAUTECHNIK beschloss auf seiner 67. Sitzung am 20.01.1989 die Regelentwurfsvorlage (KTA-Dok.-Nr. 2201.4/89/1) den Fraktionen des KTA zur Stellungnahme vorzulegen (Fraktionsdurchgang).

Gegenüber der Fassung, KTA-Dok.-Nr. 2201.4/85/4, die dem KTA zur Verabschiedung als Regel vorgelegen hatte (s.o.), weicht die Fassung 1/89 bei der Angabe der Dämpfungswerte für Rohrleitungen in Tabelle 4-2 ab. Während die dem KTA vorgelegte Fassung 2201.4/85/4 für Rohrleitungen einheitlich einen Dämpfungswert von 4 % vorsah, waren in der Entwurfsfassung zum

Fraktionsdurchgang - da von Seiten des BMU gefordert - wieder die niedrigeren Werte des Reg. Guide 1.61 enthalten, wie sie im veröffentlichten Regelentwurf 11/83 für das Sicherheitserdbeben enthalten waren.

Während des Fraktionsdurchgangs (Ende der Einreichungsfrist: 03.04.1989) wurden der KTA-GS Stellungnahmen eingereicht seitens: Vereinigung der Technischen Überwachungs-Vereine e. V., Siemens AG, INTERATOM GmbH, Technischer Überwachungs-Verein Baden e.V., Prüfstelle der KTA-GS.

Der UA-AB hat auf seiner 68. Sitzung am 10./11. April 1989 die Stellungnahmen geprüft und beschlossen, die fertig gestellte Vorlage zum Regelentwurf (KTA-Dok.-Nr 2201.4/89/2) dem KTA zur Verabschiedung vorzulegen.

Der KTA hat auf seiner 43. Sitzung am 27.06.1989 den Regelentwurf verabschiedet mit der Maßgabe, dass in Abschnitt 4.3.1.3 Punkt c) der Hinweis gestrichen, in Tabellen 4-2 die Dämpfungswerte für Rohrleitungen in Spalte A von 3 bzw. 2 in 4 geändert und die Fußnote xx) gestrichen wird. Dem KTA ist ein Bericht über die Begründung für die Wahl der Dämpfungswerte vorzulegen.

Die Bekanntmachung des BMU erfolgte im Bundesanzeiger Nr. 124 am 7. Juli 1989.

## **4 Ausführungen zum Regeltext**

### **4.1 Konzept der Regel**

Die Regel KTA 2201.4 stellt im Rahmen des Regelwerkes KTA 2201 "Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen" Anforderungen an maschinen- und elektrotechnische Anlagenteile. Entsprechend KTA 2201.1 (Regeländerungsentwurf in Vorbereitung) wird in der vorliegenden KTA 2201.4 ein einziges, die sicherheitstechnischen Anforderungen abdeckendes Erdbeben, das Bemessungserdbeben, berücksichtigt.

In KTA 2201.4 basierend auf KTA 2201.1, werden die erforderlichen Nachweise für die maschinen- und elektrotechnischen Anlagenteile aufgliedert in einzelne Nachweisschritte:

1. Ermittlung der Anregung am Aufstellort
  
2. Mechanische Systemanalyse
  - a) Kennwertermittlung
  - b) Modellabbildung
  - c) Belastungsermittlung
  
3. Beanspruchungsanalyse
  - a) Beanspruchungsermittlung
  - b) Zulässigkeitsnachweis.

Diese Nachweisschritte werden in jedem der drei möglichen Nachweisverfahren

1. Rechnerische Nachweise
2. Experimentelle Nachweise
3. Nachweise durch Analogiebetrachtung

behandelt, so dass es dem Anwender der Regel möglich gemacht wird, den Gesamtnachweis für eine Komponente durch ein Nachweisverfahren allein oder aber durch eine zweckmäßige Kombination von Nachweisverfahren zu führen. Die Auffindung der Anforderungen für die Einzelschritte wurde durch eine übersichtliche Gliederung erleichtert.

Gemäß den Grundsätzen in KTA 2201.1 werden Anforderungen für zwei Klassen von Anlagenteilen aufgestellt:

1. Klasse I-Anlagenteile
2. Klasse II-Anlagenteile, die Klasse I-Anlagenteile gefährden können.

Für die Klasse I-Anlagenteile wird ein Nachweis der Standsicherheit, Integrität und Funktionsfähigkeit gefordert; für die Klasse II-Anlagenteile, die Klasse I-Anlagenteile gefährden können, beschränkt sich der Nachweis auf Standsicherheit und Integrität.

Bezüglich der Spannungsabsicherung wurde soweit möglich Bezug genommen auf bereits bestehende oder sich in Vorbereitung befindliche KTA-Regeln wie z.B.

KTA 3211.2 Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises,  
Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung

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

KTA 3204 Reaktordruckbehälter-Einbauten

KTA 3205.1 Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen,  
Teil 1: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für Primärkreiskomponenten

Bezüglich des Stahlsicherheitsbehälters ergibt sich eine enge Nahtstelle zu KTA 2201.3. Das AG 2201.3 war der Meinung, dass der Stahlsicherheitsbehälter in KTA 2201.3 behandelt werden sollte. Es hatte jedoch Bedenken, hier detaillierte Festlegungen zu treffen, da Widersprüche zu KTA 3401.2 befürchtet wurden. Dort wird die Auslegung, Konstruktion und Berechnung des Stahlsicherheitsbehälters im Wesentlichen nach den Grundsätzen des Maschinen- und Behälterbaus festgelegt. Auf die Schnittgrößenermittlung wurde jedoch KTA 2201.3 für anwendbar gehalten. Um die Lücke in der Bemessung zu schließen, gilt für die Spannungsabsicherung dieser Komponenten:

- a) Das Bemessungserdbeben ist als Störfall zu klassifizieren und mit der Beanspruchungsstufe 3 gemäß KTA 3401.2 abzusichern.
- b) Die Spannungsabsicherung ist gemäß KTA 3401.2 durchzuführen.

Diese Festlegungen sollen in die Regel KTA 2201.3 aufgenommen werden.

Die Diskussionen im AG 2201.3 und AG 2201.4 zeigten, dass sich die Stütz- und Befestigungskonstruktionen nicht eindeutig der Bauseite oder der Maschinentechnik zuordnen lassen. Aus diesem Grunde wird sowohl in KTA 2201.3 als auch in KTA 2201.4 eine im Einzelfall zu vereinbarende Zuordnung gefordert.

## 4.2 Begründungen zu fachlichen Aussagen

### Zu 1 Anwendungsbereich

Bezüglich der Anwendbarkeit von KTA 2201.4 auf Hochtemperaturreaktoren und Schnelle Brüter können sich die vorliegenden Festlegungen vollständig nur auf diejenigen Anlagenteile beziehen, die vergleichbar sind mit den Anlagenteilen der Leichtwasserreaktoren. Auf die Primärkreise von HTR und Schnelle Brüter ist die vorliegende Regel nur zur Ermittlung der Belastungen anzuwenden.

### Zu 3.4 Überlagerung

Die im Regeltext getroffene Festlegung der Überlagerung mit Belastungen des stationären Volllastbetriebes bzw. mit anderen Zuständen des Normalbetriebes entspricht dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik. Hierdurch werden alle relevanten Fälle des Normalbetriebes abgedeckt. Eine Überlagerung von Erdbebenlasten mit instationären Belastungen des Normalbetriebes ist sicherheitstechnisch nicht erforderlich.

Belastungen des instationären Normalbetriebes werden unabhängig von Erdbebenbetrachtungen im Rahmen der Auslegung betrachtet, um den Ermüdungseinfluss auf die Komponenten zu ermitteln.

Der Ermüdungseinfluss des Erdbebens ist mit großer Konservativität kleiner 10 % des Zulässigen, d.h. dadurch auch kleiner 0,5 % der Versagensgrenze und deshalb vernachlässigbar. Deswegen brauchen beim Erdbeben die instationären Betriebszustände nicht betrachtet zu werden, und es bleiben somit nur die stationären Betriebszustände übrig, d.h. die Zustände der Anlage, bei denen eine konstante Reaktorleistung und dadurch konstante elektrische Stromerzeugung vorliegt.

Aus diesem Spektrum von Zuständen des stationären Normalbetriebes darf der Zustand stationärer Volllastbetrieb (100 % Leistung) als repräsentativer und einziger Zustand zur Überlagerung herangezogen werden, falls die anderen Zustände kleinere oder zumindest nicht mehr als 10 % größere Beanspruchung ergeben.

Die 10 % wurden deshalb gewählt, weil dies eine Zahl ist, die im Behälterbau geläufig ist (z.B. Drucküberschreitungen von kleiner 10 % gegenüber Normalbetrieb bzw. Auslegungsdruck sind ohne weitere Nachweise zulässig).

Eine Wahrscheinlichkeitsbetrachtung führt zum stationären Volllastbetrieb als wahrscheinlicher Zustand bei Eintritt der Erdbebeneinwirkung.

Zu dem Punkt "Überlagerung Erdbeben / Notstromfall" wird vom UA-IR angemerkt, dass

- dieses Thema bisher noch nicht geregelt ist. Dies soll abhängig vom Anlagenkonzept angegangen werden. Insbesondere fehlen allgemeingültige Kriterien zur Bestimmung der elektrotechnischen Anlagenteile, deren Funktion bei - oder nach - einem Erdbeben sicherzustellen ist.
- die Funktionssicherheit der Diesel-Notstromerzeugungsanlagen bei einem Erdbeben nicht gefordert wird. Nach dem Erdbeben müssen die Diesel-Notstromerzeugungsanlagen voll funktionstüchtig sein.
- die Integrität des gesamten Notstromsystems erdbebenfest ausgelegt sein muss.

### Zu 3.8 Beanspruchungsanalyse

Die sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen lassen sich bei Berücksichtigung der bisherigen Praxis in 3 Gruppen einteilen.

Bei der Standsicherheit wird ein Nachweis der Abstützung sowie der Verankerung der Abstützung im Gebäude und der Übergang Abstützung/Komponente geführt. Die Integrität der druckführenden Wandlung wird durch einen Spannungsnachweis sichergestellt. Für die Funktionsfähigkeit werden im Einzelfall die Verformungen begrenzt.

Der Nachweis der Standsicherheit beinhaltet auch einen Nachweis, dass die Kräfte und Momente im Übergangsbereich Schale/Abstützung sicher aufgenommen oder weitergeleitet werden können.

Alle Anlagenteile werden gemäß KTA 2201.1 in zwei Klassen unterteilt. Klasse I und Klasse II. Für die Anlagenteile der Klasse II ist ein Nachweis gemäß dieser Regel nicht erforderlich. Es ist jedoch nachzuweisen, dass durch die an ihnen möglicherweise entstehenden Wirkungen und Schäden keine zur Klasse I gehörenden Teile in ihrer sicherheitstechnischen Funktion beeinträchtigt werden können. Für die Klasse II-Anlagenteile, die die Klasse I-Anlagenteile beeinträchtigen können, ist ein Nachweis erforderlich. Dieser Nachweis muss für das Bemessungserdbeben durchgeführt werden. Da bei diesen Komponenten die Vermeidung einer unzulässigen Beschädigung von Klasse I-Anlagenteilen gefordert ist, genügt es generell, die Standsicherheit nachzuweisen, und falls Klasse I-Komponenten im Einflussbereich von Bruchstücken oder Strahlkräften von versagenden Klasse II-Anlagenteilen liegen, zusätzlich die Integrität nachzuweisen. Hierbei sind kleinere Ereignisse durch das größere Ereignis (Bemessungserdbeben) abgedeckt. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit ist nicht erforderlich, da durch mangelnde Funktionsfähigkeit keine Klasse I-Anlagenteile beschädigt werden können.

#### Zu 4 Rechnerische Nachweise

##### Zu 4.1 Allgemeines

Verlege- und Planungsrichtlinien für Rohrleitungen.

Für die Auslegung von Rohrleitungssystemen ohne eigene statische und dynamische Berechnungen kann zur Abdeckung von

- betrieblichen Belastungen wie:

- Innendruck
- Eigengewicht
- behinderte Wärmedehnung
- Vorverschiebungen

und

- dynamischen Belastungen wie z.B. Erdbeben

Der Weg von "Verlegerichtlinie" für Rohrleitungen  $\leq$  DN 50 und "Planungs- und Abnahmerichtlinie" für Rohrleitungen  $50 \leq$  DN  $\leq$  400 gewählt werden.

Hierbei wird über Arbeitsblätter und Konstruktionshinweise das

- Halterungskonzept

festgelegt und mit Hilfe einfacher Beziehungen die

- Halterungslasten sowie Komponentenschnittlasten

angegeben, wobei Probleme, die während der Inbetriebsetzung (IBS) auftreten wie

- Betriebsschwingungen

ebenfalls Rechnung getragen wird.

Die Absicherung dieser Vorgehensweise kann durch ergänzende Untersuchungen wie z.B.

- linear-elastische Berechnungen
- elasto-plastische Berechnungen
- Versuche an Rohrleitungssystemen
- Versuchsnachrechnungen
- Erdbebenbeobachtungen

so geschehen, dass das sicherheitstechnische Schutzziel voll erfüllt wird.

##### Zu 4.2.2.1 Verfahren

Zu den hier behandelten Ersatzverfahren ist folgendes zu sagen:

Nach dem im Abschnitt 4.2.2.1 vorgeschlagenen Ersatzverfahren können Gebäude-Antwortspektren näherungsweise nach Bild (4-1) gebildet werden, wobei die Überhöhung im Resonanzbereich nach Bild (4-2) ermittelt werden kann.

Bild (4-2) zeigt eine empirisch ermittelte Kurvenschar, die die Resonanzüberhöhung im Antwortspektrum eines Schwingers mit einem Freiheitsgrad angibt, abhängig von der Dämpfung  $D_1$  dieses Schwingers (unterstützende Struktur) und der Dämpfung  $D_2$  des Antwortschwingers (Komponente) sie tritt an die Stelle der bis dahin verwendeten Formel (1), die in Bild 1 ausgewertet ist.

$$\text{Formel (1): } F = \frac{1}{2\sqrt{D_2(2D_1 + D_2)}}$$

mit  $D_1$  = modale Dämpfung der unterstützenden Struktur

$D_2$  = Dämpfung der Komponente

Die Überhöhungsfaktoren liegen innerhalb des bisherigen Erfahrungsbereichs.

Grundsätzlich muss Bild (4-2) zusammen mit Bild (4-1) betrachtet werden, wenn die Frage der Konservativität der Auslegung von Komponenten nach dem Ersatzverfahren diskutiert wird; im Folgenden wird jedoch zunächst ausschließlich auf Bild (4-2) selbst eingegangen:

Um die Brauchbarkeit von Bild (4-2) beurteilen zu können, sind systematische Vergleichsrechnungen an Schwingern mit einem Freiheitsgrad verschiedener Frequenzen  $f$  und verschiedener Dämpfungen  $D_1$  erforderlich. Dabei sind zunächst die maximalen Überhöhungen im Antwortspektrum dieser Schwinger für verschiedene Dämpfungen  $D_2$  aufgrund verschiedener Beschleunigungs-Zeitfunktionen als Fußpunkterregung zu ermitteln.

Solche Berechnungen zeigen, dass die Überhöhungsfaktoren im Antwortspektrum außer von den Dämpfungen  $D_1$  und  $D_2$  noch von anderen Parametern abhängen:

- der Frequenz der unterstützenden Struktur
- der Form des Antwortspektrums zum Erregungs-Zeitverlauf
- der Frequenz- und Phasendichte des Erregungs-Zeitverlaufs,

wobei die Abhängigkeit im Einzelfall erheblich sein kann.

Bild 2 zeigt als Beispiel für einen mit einem künstlichen, an das USNRC-Spektrum angepassten Beschleunigungs-Zeitverlauf erregten Schwinger der Dämpfung  $D_1 = 0,15$  die Überhöhung im Antwortspektrum, aufgetragen über der Frequenz dieses Schwingers und für drei Dämpfungen  $D_2 = 0,01; 0,04; 0,15$  der Komponente.

Naturgemäß kann Bild (4-2) die tatsächlichen Verhältnisse nur näherungsweise im Sinne einer Mittelwertaussage erfassen. Solche Mittelwertaussagen bezüglich der Frequenz sind z.B. die drei im Bild 2 eingezeichneten Geraden, die sich im Bild 1 als drei Punkte (dick eingezeichnet) darstellen. (Eine systematische Auswertung auf statistischer Basis (Überschreitungswahrscheinlichkeit, Fraktile), in die evtl. auch andere, bisher nicht erfasste Abhängigkeiten einbezogen werden könnten, wäre sicher wünschenswert, ist jedoch bis jetzt noch nicht erfolgt und auch noch nicht auf ihre prinzipielle Eignung hin überprüft.) Die auf der Basis des derzeitigen Kenntnisstandes festlegbaren "Mittelwerte" werden offenbar durch Bild (4-2) brauchbar angenähert, wobei festzuhalten ist:

- Die zum Vergleich dienenden "Mittelwerte" strenger Berechnungen enthalten einen gewissen Ermessensspielraum.
- Die Werte nach Bild (4-2) können - nur im Sinne von Überhöhungsfaktoren gesehen - sowohl größer als auch kleiner sein; Bild (4-2) stellt hier jedoch gegenüber der obigen Formel (1) eine Verbesserung dar; bei der die Abweichungen minimiert sind.

Tatsächlich jedoch geht es nicht nur um die Frage der Genauigkeit, mit der die Überhöhung im Antwortspektrum des Schwingers mit einem Freiheitsgrad angenähert wird, denn Bild (4-2) legt zusammen mit Bild (4-1) eine - wenn auch grobe - Näherung des Antwortspektrums einer realen Struktur fest.

Dabei ist zu beachten:

- Das ermittelte Antwortspektrum ist ein Breitbandspektrum; im Grenzfall (eine signifikante Gebäudeeigenschwingung) mit dem 1,5-fachen Eigenfrequenzwert als Breite der Spektrenspitze, i.d.R. (mehrere signifikante Eigenschwingungen des Gebäudes) mit einer extrem breiten Spektrenspitze.
- Die Beiträge mehrerer Eigenschwingungen können explizit nur in der Breite des Resonanzbereiches, nicht in dessen Höhe erfasst werden. Ungewöhnliche Gebäudetypen mit ungewöhnlicher Verteilung der Gewichtsfaktoren in den einzelnen Eigenschwingungen werden daher weniger gut erfasst. Da die Überhöhung nach Bild (4-2) jedoch nach Bild (4-1) auf die Gebäudebeschleunigung anzuwenden ist, wird bei mehreren signifikanten Eigenschwingungen die Spektrenhöhe i.d.R. erheblich überschätzt.
- Die "modale Dämpfung  $D_1$  der unterstützenden Struktur" ist nicht eindeutig, da diese unterschiedlich ist für die einzelnen signifikanten Eigenschwingungen der Struktur. Im Sinne einer Mittelwertaussage wäre eine mittlere Dämpfung  $D$  einzusetzen; sicher erhält man konservativere Ergebnisse, wenn man die niedrigste modale Dämpfung aller signifikanten Eigenschwingungen der Struktur verwendet.

Insgesamt ist somit festzustellen, dass nach Abschnitt 4.2.2.1 ermittelte Gebäude-Antwortspektren eine brauchbare globale Näherung darstellen. Sie liegen in aller Regel - insbesondere bei vorsichtig angesetzter Dämpfung  $D_1$  - bereits bezüglich der Höhe auf der sicheren Seite, erst recht bezüglich der Breite des Resonanzbereichs, so dass insgesamt mit diesen (grob) genäherten Spektren eine sichere Auslegung von Komponenten erwartet werden kann.

Das in Abschnitt 4.2.2.1 vorgeschlagene Ersatzverfahren ist erheblich einfacher und leichter zu handhaben als andere bekannte Näherungsverfahren, wie z.B. das Biggs'sche Verfahren. Dieses kann jedoch bereits fast als strenges Verfahren angesprochen werden, da die Beiträge mehrerer Eigenschwingungen der Struktur nach Eigenform, Gewichtsfaktor und modaler Dämpfung im Rahmen der Antwortspektren-Methode (RSMA) und der quadratischen Mittelwertbildung exakt erfasst werden. Lediglich über Form und Höhe der Überhöhungsfunktionen (normierte Antwortspektren) des Schwingers mit einem Freiheitsgrad fließen

Näherungen ein, da diese Überhöhungsfunktionen als Mittelwerte aus einer begrenzten Anzahl von Vergleichsrechnungen mit speziellen Erregungszeitverläufen gewonnen wurden.

Der besondere Vorteil des hier vorgeschlagenen und bewusst einfach gehaltenen Verfahrens liegt in der schnellen Abschätzung von Komponentenbelastungen, z. B: im Rahmen von Voruntersuchungen oder wenn nur wenige Komponenten innerhalb eines Gebäudes auszulegen sind; wenn also genaue Spektren nicht vorhanden sind oder ihre Ermittlung nicht angemessen ist.

Eine andere Überprüfungsmöglichkeit für das Ersatzverfahren nach Abschnitt 4.2.2.1 als Ganzes bestände in einer statistischen Auswertung einer ausreichend großen Zahl von bisher durchgeführten praktischen Spektrenberechnungen. Wird dabei die Vielfalt der möglichen Gebäudetypen abgedeckt und werden genügend unterschiedliche Erregungszeitverläufe betrachtet, so kann hier eine durchgreifende Überprüfung erhalten werden. Eine solche Überprüfung, die bezüglich der Auswahl der Referenzprojekte nicht unproblematisch ist, liegt derzeit noch nicht vor.

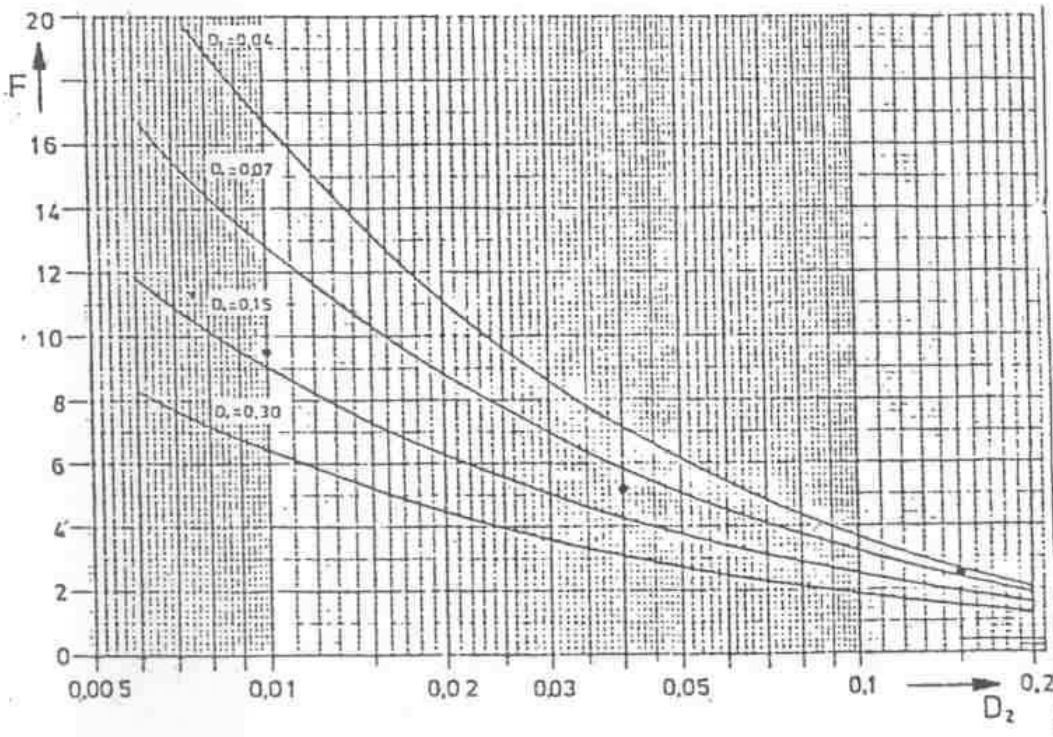


Bild 1: Resonanzhöhung  $F$ , nach der früheren Formel (1)

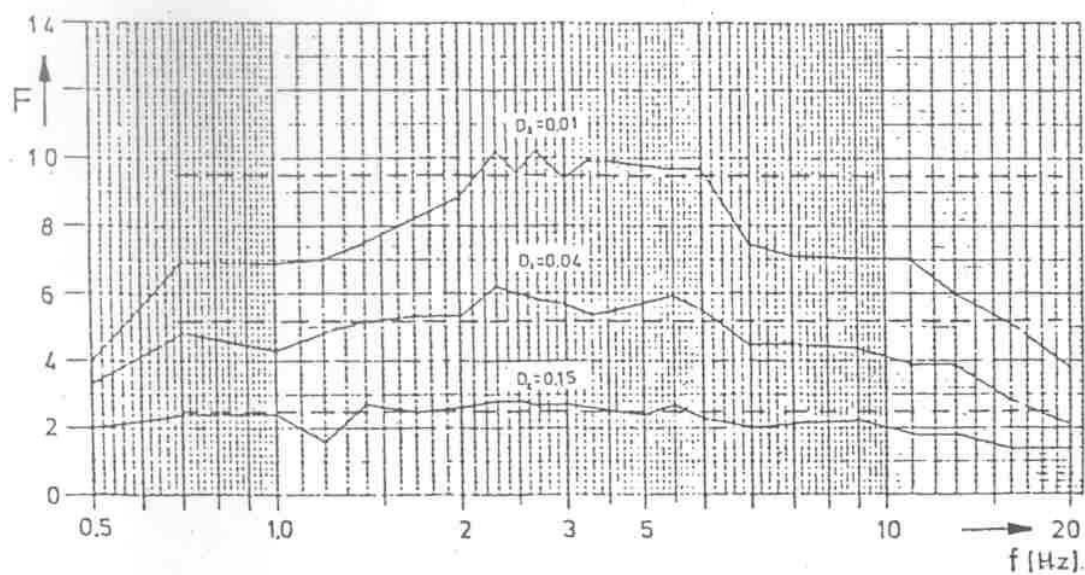


Bild 2: Resonanzüberhöhung  $F$ , für  $D_1 = 0,15$  USNRC, generierter Zeitverlauf

#### Zu 4.3.1 Modellabbildung zur Erfassung der Systemeigenschaften

Das mathematische Modell für Baugrund und Bauwerk kann, wenn es den gestellten Anforderungen entspricht mit dem für die bautechnische Gebäudeauslegung verwendeten Modell übereinstimmen.

Die Modellidealisation für Rohrleitungssysteme sollte durch Balkenelemente vorgenommen werden, die äquivalente Rohrsteifigkeit besitzen. Bei der Bestimmung der Lage der Massenpunkte ist zu beachten, dass die Punktmassen so zu verteilen sind, dass der signifikante Erdbebenfrequenzbereich erfasst werden kann.

Weiter ist darauf zu achten, dass an den Anschlussstellen - geradliniges Rohr - die Steifigkeitsverminderung aufgrund der Biegung des krummen Rohres berücksichtigt wird, um die Spannungskonzentrationen überprüfen zu können.

Abzweigrohre können als Teile des Systems aufgefasst bzw. durch eine äquivalente Feder und Masse eingesetzt werden. Hat ein Abzweigrohr im Vergleich zum Hauptrohr einen verhältnismäßig kleinen Durchmesser (Entkopplungsmöglichkeit), dann kann das Zusammenwirken beider Rohre vernachlässigt werden; die Berechnung des Abzweigrohres kann erforderlichenfalls an einem gesonderten Teilmodell durchgeführt werden.

Die Belastungsfunktion der Anschlussstelle wird in diesem Fall durch das Hauptrohrsystem bestimmt.

#### Zu 4.3.1.3 Systemeigenschaften, c) Dämpfungswerte

Für Lüftungskanäle werden je nach Konstruktion (geschraubt oder geschweißt) die entsprechenden Dämpfungswerte aus Tabelle 4-2 für geschweißte oder geschraubte Stahlstrukturen angesetzt.

#### Dämpfungswerte für Rohrleitungen

Während die dem KTA vorgelegte Fassung 2201.4/85/4 für Rohrleitungen einheitlich einen Dämpfungswert von 4 % vorsah, waren in der vom UA-AB vorgelegten Fassung 4/89 wieder die niedrigeren Werte des Reg. Guide 1.61 enthalten, wie sie im veröffentlichten Regelentwurf 11/83 für das Sicherheitserdbeben enthalten waren.

Die Verwendung der Dämpfungswerte von 4 % für Rohrleitungen wurde damals wie folgt begründet:

Diese Änderung entspricht der Änderung der amerikanischen Praxis, die in

"Technical Position on Damping Values for Piping Interim Summary Report, vom Dezember 1983 from Pressure Vessel Research Committee"

veröffentlicht wurde.

Aus diesem Bericht geht hervor, dass die Fülle vorliegender Dämpfungswertmessungen sowie die praktischen Erfahrungen im Zusammenhang mit erdbebenbeanspruchten Rohrleitungen die Überarbeitung der bisherigen Dämpfungswerte initiiert haben. Wesentlichen Impuls zur Erhöhung der Dämpfungswerte lieferte jedoch die Erkenntnis, dass die sich aufgrund bisheriger Dämpfungswerte zwangsläufig ergebenden konstruktiven Maßnahmen zu sicherheitstechnisch nicht optimal ausgelegten Rohrleitungssystemen geführt haben. So erwiesen sich z.B. die für das äußerst seltene oder unwahrscheinliche Ereignis Erdbeben ausgelegten Rohrleitungssysteme für die Betriebsbelastungen als nicht optimal konzipiert. Das heißt, dass damit dem höher zu bewertenden Aspekt der Betriebssicherheit eine geringere Beachtung eingeräumt wurde, obwohl die umfangreichen experimentellen Ergebnisse sowie die Erfahrungen mit realen Erdbeben und die damit verbundenen Schäden an Industrieanlagen ergeben haben, dass eine flexibel verlegte Rohrleitung durch seismische Erschütterungen noch nie beschädigt wurde.

Die umfangreichen Arbeiten im In- und Ausland im Zusammenhang mit der Auswertung von Dämpfungswertmessungen ergaben, dass sich ein einheitlicher, allein auf physikalischer Basis abgeleiteter Dämpfungswert nicht angeben lässt. Die Fülle der im einzelnen nicht systematisch erfassten - aber auch zum Teil nicht erfassbaren - Einflussgrößen, wie z.B. die Höhe der Anregung, der Einfluss der geometrischen Nichtlinearitäten, Abstützungs- und Isolierungseinflüsse lassen es nur zu, dass ein einheitlicher Dämpfungswert für reale Rohrleitungssysteme als physikalisch statistischer Mittelwert angegeben werden kann.

Als Ergebnis einer Regressionsanalyse schlugen die amerikanischen Fachleute vor, für Rohrleitungen einen Dämpfungswert von 5 % / 2 % frequenzabhängig vorzunehmen. Die Diskussionen im Arbeitsgremium zu KTA 2201.4 zur amerikanischen Vorgehensweise führten dazu, dass dem etwas konservativeren Vorgehen, nämlich einen einheitlichen Dämpfungswert von 4 % frequenzunabhängig festzulegen, der Vorzug gegeben wurde. Entscheidend für diese Festlegung war im Wesentlichen der Gesichtspunkt der höheren Praktikabilität, der gegenüber der amerikanischen Vorgehensweise im maßgebenden Frequenzbereich von < 13 Hz zu höheren rechnerischen Beschleunigungen führt (siehe Bild 1).

Zur Überprüfung der amerikanischen Vorgehensweise und zur Absicherung des Vorschlages für die Regel wurden vom Arbeitsgremium folgende Arbeiten veranlasst und deren Ergebnisse diskutiert:

#### 1. Zusammenstellung und Sichtung der Datenbasis

Die vorhandene amerikanische Messwertbasis wurde durch bei KWU und BBR vorhandene Dämpfungsmessergebnisse erweitert und eine Mittelwertbildung durchgeführt.

#### 2. Durchführung einer selektiven Bewertung

Hierbei wurden nur jene Versuche berücksichtigt, die für den Erdbebenlastfall bezüglich Anregung und Rohrleitungsausführung als wirklichkeitsnah angesehen wurden. Bild 2 zeigt diese Ergebnisse im Vergleich mit KTA und PVRC-Vorschlag.

Die Versuche an Rohrleitungssystemen zeigen, dass eine Vielzahl von Einflussparametern das Dämpfungsverhalten beeinflusst, wie z.B.

- Art, Anzahl und Lage der Aufhängung
- Toleranzen in den Unterstützungen und Aufhängungen
- Durchmesser der Rohrleitung
- Füllungsgrad der Rohrleitung
- Isolierung (Art der Ausführung)
- Werkstoff (Austenit, Ferrit)
- Betriebszustand (warm, kalt)
- Beanspruchungsniveau (insbesondere Anteil der Biegespannung)
- Art der Anregung
- Eigenform der Schwingung.

Die Gesamteinflüsse werden unter dem Begriff einer Systemdämpfung erfasst. Die umfangreichen neueren Auswertungen von Dämpfungsmessungen lassen eine Festlegung des Dämpfungswertes eher als physikalisch-statistische Mittelwertgröße zu, als eine auf rein physikalischer Basis Zustände gekommene. Die Versuchsergebnisse lassen sowohl eine frequenzabhängige (US-NRC-Konzept: 5 % bis 10 Hz, 2 % ab 20 bis 33 Hz, dazwischen linear abfallend) als auch eine frequenzunabhängige (KTA 2201.4: 4 % bis 33 Hz) Festlegung zu. Für typische Rohrleitungssysteme von Kernkraftwerken lässt sich zeigen, dass bei 95 % der maßgeblichen Rohrleitungssysteme die ersten Eigenfrequenzen im Bereich  $< 15$  Hz liegen. Außerdem zeigen die Anreagewortspektren (Etagenspektren) einen Verlauf, der dadurch gekennzeichnet ist, dass sie bei 15 - 20 Hz in den Starrkörperbereich (Nullperiodenbeschleunigung) heruntergehen, in dem der Einfluss der Dämpfung gering ist. Für den im Wesentlichen zu betrachtenden Frequenzbereich von 0 - ca. 15 Hz lässt sich aus den Versuchen der Wert von 4 % als physikalisch-statistischer mittlerer Systemdämpfungswert definieren. Eine frequenzabhängige Festlegung ist daher nicht erforderlich. Für bestimmte Rohrleitungssysteme, z.B. mit großem Durchmesser, Kassettenisolierung, Spannung  $> 0,5 \times R_{p0,2}$  mehrfach unterstützt, wären auch höhere Werte im Einzelnen begründbar.

Um eine Vielzahl von Einzelfestlegungen zu vermeiden (die beim frequenzabhängigen USNRC-Konzept notwendig sind, z.B. Auslegungsspektren mit unterschiedlichen Dämpfungsparametern) und damit die Regel praktikabel zu halten, wurde ein Wert von 4 % für das AEB und SEB (und damit belastungsunabhängig) als mittlerer Systemdämpfungswert festgelegt. Da die Systemdämpfung durch viele Einflussgrößen bestimmt wird, ist eine belastungsunabhängige Festlegung gerechtfertigt. Im amerikanischen Vorschlag wird ebenfalls beim Dämpfungswert zwischen AEB und SEB nicht unterschieden. Für das Konzept einer physikalisch-statistischen Mittelwertbildung der Dämpfung sprechen folgende Gesichtspunkte:

Der Dämpfungswert muss für alle Anlagen gelten, die in EB-Zone 0-3 errichtet werden, und er muss dem maßgeblichen Durchschnitt aller ausgeführten Rohrleitungssysteme in KKW bezüglich der dominanten Dämpfungseinflussparameter entsprechen.

Ein weiterer Grund kann aus der probabilistischen Sicht abgeleitet werden: In die Beanspruchung einer Rohrleitung gehen alle in der Übertragungskette streuenden Parameter ein. Der Mittelwert der Beanspruchung ergibt sich aus dem Mittelwert der Erregung über eine Berechnung mit den Mittelwerten sämtlicher Parameter.

Die Streuung der Beanspruchung beim Lastfall Erdbeben ist im Allgemeinen von der sehr großen Streuung des Erdbebens selbst (Variationskoeffizient der Größenordnung 0,6) bestimmt.

Die errechnete erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeit einer Rohrleitung hängt deshalb in erster Linie von den Mittelwerten der einzelnen Parameter (also auch der Dämpfung) und nur in untergeordnetem Maße von deren Streuung ab. Dies ist ein Grund dafür, den festzulegenden Dämpfungswert am Mittelwert zu orientieren. Die Anwendung der unteren Fraktile des Dämpfungswertes bei einem seltenen Ereignis wie Erdbeben führte zu versteiften, d.h. nicht optimal für Betriebsbelastungen konzipierten Rohrleitungssystemen. Durch Einführung des Mittelwertkonzeptes für die Dämpfung wird die Gesamtsicherheit eines Rohrleitungssystems nicht beeinträchtigt.

Bei den anderen Komponenten wird eine Änderung der Dämpfungswerte nicht diskutiert, da

- eine entsprechende Datenbasis nicht vorhanden ist
- eine Vielzahl von Einflussgrößen, die bei Rohrleitungssystemen die Systemdämpfung hochtreiben (z.B. Isolierung, Spiele, Anzahl der Reibstellen, Einfluss der unterschiedlichen Arten von Hängern, Stoßbremsen, usw.) hier nicht bzw. nicht in diesem Maße vorhanden sind
- der (dynamische) Spannungsbiegeanteil in der Vergleichsspannung bei Komponenten im Allgemeinen niedriger ist als bei Rohrleitungen, was sich in der Tendenz dämpfungsmindernd auswirkt
- ein Interessenskonflikt zwischen betrieblich erforderlicher Flexibilität und starrer Verankerung für seltene Störereignisse, wie Erdbeben, nicht besteht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass ein 4 %iger frequenzunabhängiger Dämpfungswert, nach dem jetzigen Kenntnisstand, einen ingenieurmäßig vernünftigen Mittelwert darstellt, d.h. dieses Konzept gewährleistet die Sicherheit und besitzt eine hohe Praktikabilität in der Anwendung.

#### Zu 4.3.1.4 Flüssigkeitsfüllung in Komponenten

Die Schwappfrequenzen der Flüssigkeitsfüllung (in der Regel wesentlich kleiner als 1 Hz) liegen im Vergleich zu den Behältereigenfrequenzen im Antwortspektrum so weit unterhalb des Bereiches der Spitzenbeschleunigung, dass keine signifikanten dynamischen Erdbebenbelastungen bewirkt werden. Wird die Flüssigkeitsmasse als mit dem Behälter gekoppelte starre Masse angenommen, gelangt man im Antwortspektrum zu höheren Beschleunigungswerten und deshalb zu höheren dynamischen Erdbebenbelastungen.

#### Zu 4.3.2.2.1 Überlagerung der Anteile aus den einzelnen Eigenformen (für eine Anrichtungsrichtung), Gleichung 4-1

Im Arbeitsgremium wurde nach längerer Fachdiskussion das folgende Ergebnis für die Überlagerung der Anteile aus dicht benachbarten Eigenformen erarbeitet:

Physikalisch richtig wäre die vorzeichengerechte Überlagerung benachbarter Eigenformen. Die die Nachbarschaftseigenschaften bestimmenden Parameter sind neben der Eigenfrequenz auch die modale Dämpfung und Dauer und Frequenzinhalt der Anregungsfunktion. Diese Parameter sind jedoch nur unzureichend bekannt. Daher können bei dieser Vorgehensweise wesentliche Belastungsanteile bei falscher Einschätzung der Parameter unterschätzt werden.

Weiterhin diskutiert wurde die absolute Überlagerung dicht benachbarter Eigenformen, wie sie z.B. gemäß Regulatory Guide 1.92 durchgeführt wird. Diese Überlagerung ist jedoch mit dem Nachteil verbunden, dass die Belastungen zum großen Teil erheblich überschätzt werden können. Außerdem setzt sie eine Ermittlung der Eigenfrequenz mit einem Fehler deutlich unter 10 % voraus, damit nicht die "falschen" Eigenformen überlagert werden und eine große Genauigkeit nur vorgetäuscht wird. Nach den augenblicklich üblichen Berechnungsannahmen kann die genannte Genauigkeit bei der Eigenfrequenzermittlung nicht erfüllt werden.

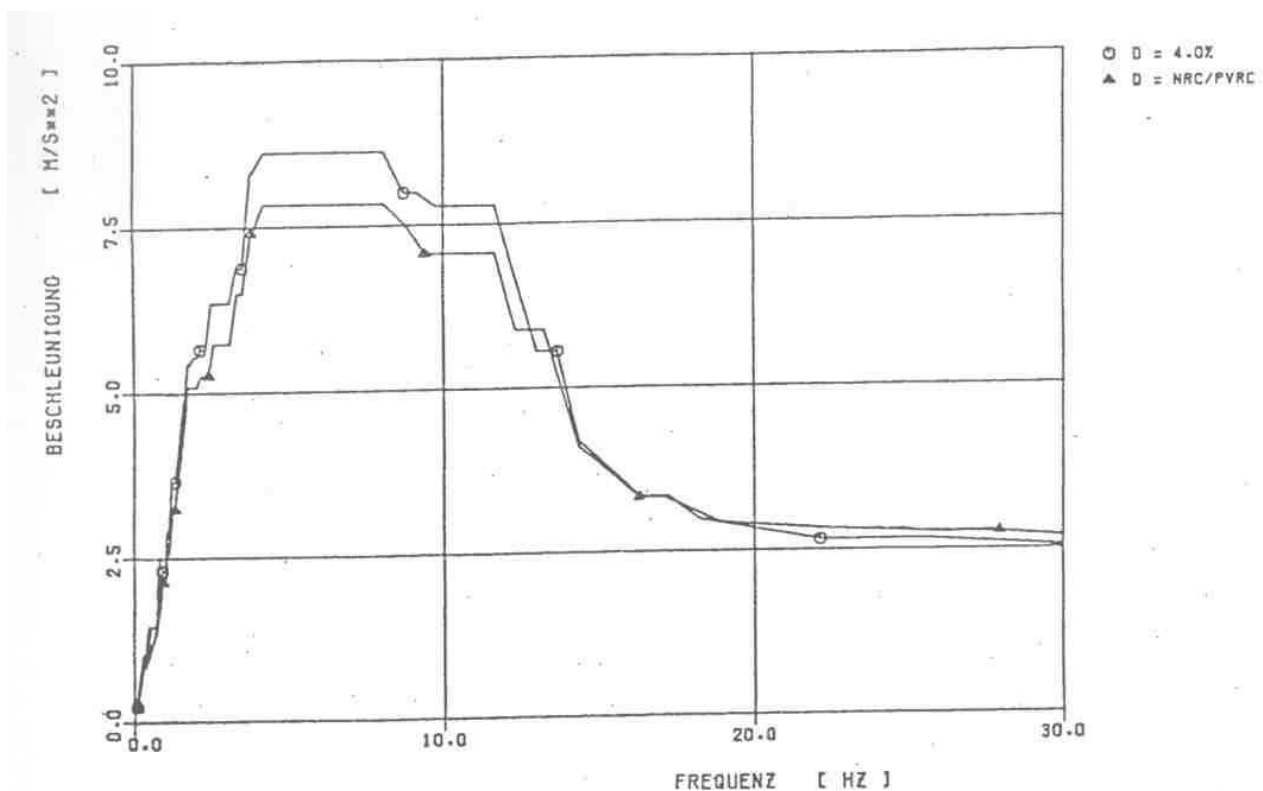


Bild 1: Vergleich zwischen frequenzabhängiger (NRC/PVRC) und frequenzunabhängiger Dämpfung

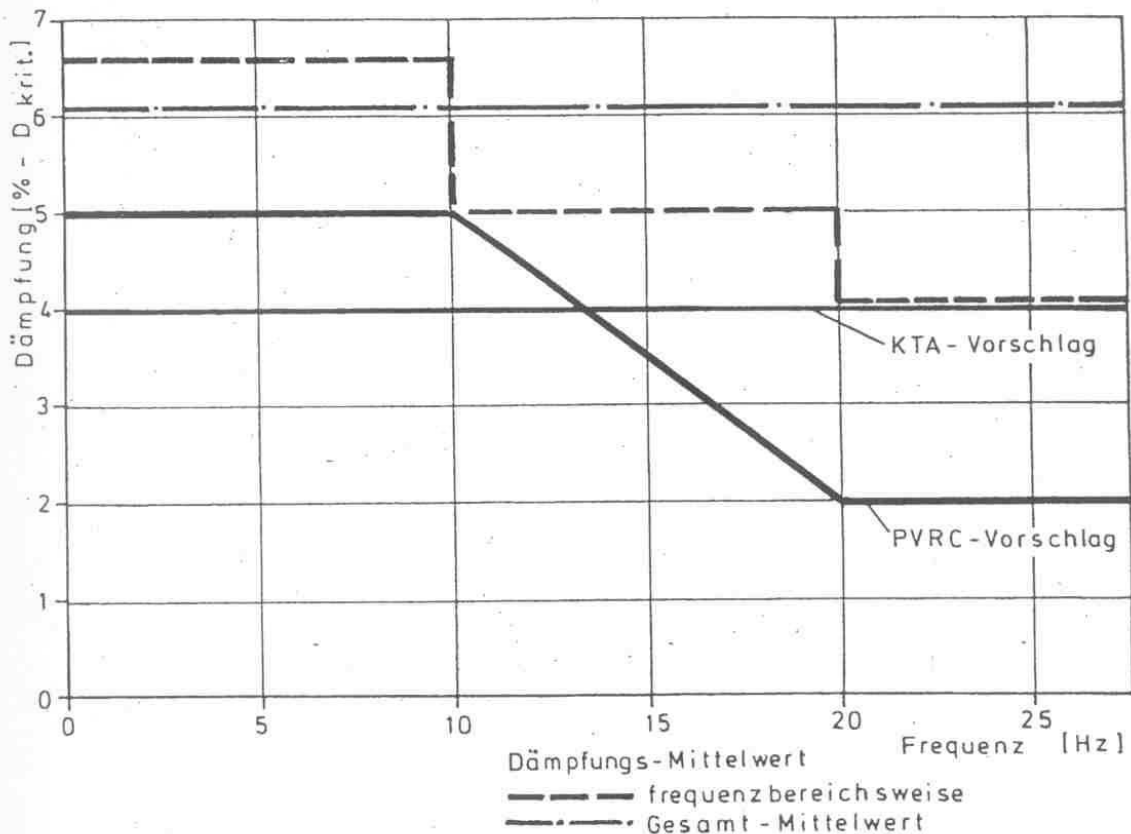


Bild 2: Ergebnisse der selektiven Bewertung

Das Arbeitsgremium entschied sich letztlich für eine quadratische Überlagerung aller Eigenformen. Mit dieser Vorgehensweise ist einerseits sichergestellt, dass keine wesentlichen Belastungsanteile vernachlässigt werden und andererseits diese auch nicht unnötig überschätzt werden.

#### Zu 4.3.2.4 Ersatzverfahren

##### Exakte Verfahren

Bei diesen werden die Beanspruchungen aus einer geeigneten Überlagerung aller maßgeblichen Schwingungsformen ermittelt. Allerdings immer der Hauptanteil aus der 1. Eigenschwingungsform. Deshalb ist es auch häufig möglich, Komponenten oder Systeme als Einmassenschwinger zu betrachten. Dies stellt dann die "exakte" Lösung dar. Vereinfachte dynamische Verfahren, wie z.B. quasidynamisches Verfahren oder teildynamisches Verfahren mit Lastfaktor gehen von der, Response-Spektral-Methode aus.

##### Teildynamisches Verfahren mit Lastfaktor

Für viele Fälle bietet sich das teildynamische Verfahren an. Dabei wird das System geeignet modelliert und daraus die Grundswingungsform und deren Frequenz ermittelt. Das weitere Vorgehen erfolgt nun so, als ob nur diese Eigenschwingungsform maßgebend sei. Erst am Ende werden die Ergebnisse mit einem Faktor multipliziert, der in konservativer Weise die unberücksichtigten Oberschwingungen berücksichtigt.

Zusätzlich ist es dabei u. U. auch möglich, die Grundfrequenz durch ein Einmassenschwingermodell zu ermitteln und die Belastungen in der Grundswingungsform durch einen Korrekturfaktor zu erhalten. Aber auch die Annäherung dieser Grundswingungsform durch das folgende Verfahren ist möglich:

##### Quasidynamisches Verfahren

Dieses Verfahren ist - zumindest ohne weitere Korrekturfaktoren - nur dann anwendbar, wenn der wesentliche Belastungsanteil aus der Grundswingung herrührt. Es beruht auf der Tatsache, dass bei den meisten realen Systemen die Verformung durch eine konstante Streckenlast (wie z.B. Eigengewicht) annähernd der Verformung in der Grundswingung gleicht bzw. geometrisch ähnlich ist, falls die Streckenlast bzw. Anregung in gleicher Richtung erfolgt.

Wählt man die Größe dieser Streckenlast so, dass sie gleich ist der Rohrleitungsmasse multipliziert mit der maximalen Bodenbeschleunigung aus dem Frequenzspektrum, so erhält man Verformungen, Momente und Spannungen, die im Normalfall größer sind als die nach dem Antwortspektrumverfahren ermittelten.

Das Verfahren lässt sich verfeinern, wenn die Grundschrwingungen des Rohrleitungssystems wenigstens näherungsweise bekannt sind. In diesem Fall wird nicht die Maximalbeschleunigung des Frequenzspektrums verwendet, sondern die zur Grundfrequenz gehörige Beschleunigung aus dem Frequenzspektrum. Durch einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor kann dabei ggf: der Einfluss der Oberschwingungen berücksichtigt werden. Das Verfahren wird auch in Fällen angewendet, in denen kein Frequenzspektrum vorliegt, sondern nur ein bestimmter Beschleunigungsfaktor.

Mit diesem Verfahren lassen sich durchaus brauchbare Aussagen über die innere Beanspruchung eines Systems aus dynamischer Erregung herleiten. Es lässt sich z.B. auch dann als Ersatz für voll-dynamische Verfahren anwenden, wenn mehrere ähnliche Systeme dynamisch untersucht werden sollen. Sind an einem dieser Systeme die Abweichungen einer quasistatischen von einer voll-dynamischen Untersuchung bekannt, so genügt bei den anderen Systemen eine quasistatische Analyse mit entsprechender Korrektur.

Wertung

Hieraus lässt sich ableiten, dass diese Verfahren - innerhalb der zulässigen Grenze angewandt - sehr wohl als Ersatz für die voll-dynamischen Verfahren angesehen werden können. Die Unterschiede zu einer exakten voll-dynamischen Rechnung sind dabei unwesentlich oder zum Teil sogar erfassbar.

Allerdings liefern sie manchmal so konservative Werte, dass ihre Anwendung deshalb u. U. ausscheidet.

In der Praxis werden diese Verfahren sinnvoll speziell für einzelne Komponenten bzw. Rohrleitungssysteme angewandt. Für komplexe Systeme aus mehreren Komponenten und Rohrleitungen sind sie im Allgemeinen weniger geeignet.

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

Starrkörperkomponenten können als Einmassenschwinger idealisiert werden. Dazu zählen z.B.

- dickwandige kurze Behälter
- Pumpen und Ventilgehäuse
- sehr steife und kompakte Komponenten.

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

Aus /1/ ist zu ersehen, dass für die drei verschieden gelagerten Träger

- Kragträger (einseitig eingespannter Balken)
- beidseitig gelenkig gelagerter Balken
- einseitig eingespannt, gelenkig gelagerter Balken

das Verhältnis zwischen dynamisch und statisch ermittelten Auflagerreaktionen kleiner als 1,0 ist (0,89). Die Aussage kann mit Ausnahme des beidseitig gelenkig gelagerten Balkens auch auf die Schnittgrößen übertragen werden.

Für den beidseitig gelenkig gelagerten Balken ergibt sich für das maximale Moment in Trägermitte ein Faktor von 1,033.

Aus /2/ ist zu ersehen, dass für 4 typische Rohrleitungsabschnitte

- ein Krümmer
- zwei Krümmer in der Ebene
- zwei Krümmer aus der Ebene heraus
- U-Rohr (2 Krümmer)

der Faktor für das Einspannmoment mit 0,98 unter 1,0 liegt. Dabei wurden zunächst die Abmessungen untersucht, die die größten statischen Einspannmomente liefern.

In /3/ wurden die Faktoren für

- zwei-
- drei-
- fünffach gelagerte Durchlaufträger mit gleicher Feldweite

untersucht, um die Ergebnisse aus /4/ nachzuvollziehen.

Mit Ausnahme des zweifach gelenkig gelagerten Trägers sind die Faktoren kleiner als 1,0.

Die Ergebnisse in /4/ halten einer kritischen Überprüfung nicht stand:

- die angegebene Belastung ist mit 10 lbs/in definiert. Dass die Dimension Kraft/Längeneinheit ist, wird durch die statischen Ergebnisse in Tabelle 3 bestätigt.

Berechnet man daraus die Massenverteilung und die Eigenfrequenzen, liegen diese wesentlich über jenen in Tabelle 1 aus /4/.

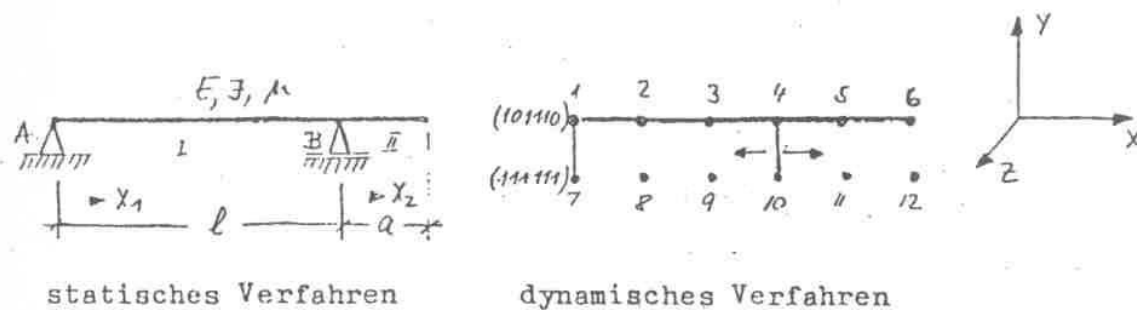
- Sind die Massenverteilung und Querschnittswerte für alle Modelle gleich, so müssten die untersten Eigenfrequenzen für die Modelle (b), (d) und (e) gleich sein, da die Auflagerbedingungen und Feldlängen gleich sind. Auch hier fällt die deutliche Diskrepanz in Tabelle 1 zwischen den Fällen 2, 4 und 5, die den o.g. Modellen entsprechend, auf.
- Zum Vergleich in Tabelle 4 wurden Ergebnisse aus unterschiedlichen Modellen gegenübergestellt:  
 Statik:     - 1 konzentrierte Masse in der Mitte eines Feldes  
           - gleichmäßige Massenverteilung  
 Dynamik:  - 5 Massenpunkte pro Feld  
 Ein solcher Vergleich ist nicht korrekt.

Referenzen

- /1/ KWU R 14 - 11 - 79, Rev. a, Klasse 1  
Faktoren für statische Ersatzverfahren zur Berücksichtigung mehrerer Eigenfrequenzen (Fundamentreaktionen)
- /2/ KWU R 14 - 35 - 76  
Vereinfachter Erdbebensicherheitsnachweis für Rohrleitungen
- /3/ KWU R 14 - 103 - 76  
Anwendung des Analogiemodells auf eine mehrfach gelagerte Rohrleitung
- /4/ ASME-Publication 74-NE-9  
Amplification Factors to Be Used in Simplified Seismic Dynamic Analysis of Piping Systems  
I.D. Stevenson, W.S. Lapay

Träger auf 2 Stützen mit Überhang, Vergleich statischer mit dynamischer Rechenmethode

1. Model



$$\alpha = \frac{a}{1}; q = \mu \cdot g$$

$A = 1000 \text{ mm}^2$

$J = 1,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

$w = 1,62 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

$g = 9810 \text{ mm/s}^2$

## 2. Statisches Verfahren

## 2.1 Schnittgrößen

Biegelinie

$$(I) \quad y_1(x_1) = \frac{q}{24EJ} \{x_1^4 - 2 \cdot l(1 - \alpha^2)x_1^3 + l^3(1 - 2\alpha^2 - 1)x_1\} \quad (0 \leq x_1 \leq l)$$

$$(II) \quad y_2(x_2) = \frac{q}{24EJ} \{2x_2^4 - 8ax_2^3 + 12a^2x_2^2 + l^3(4\alpha^2 - 1)x_2\} \quad (0 \leq x_2 \leq a)$$

Momentenverläufe

$$(I) \quad M_1(x_1) = \frac{q}{2} \{x_1^2 - l(1 - \alpha^2)x_1\}$$

$$(II) \quad M_2(x_2) = \frac{q}{2} (a - x_2)^2$$

$$\max. M_1 = \frac{ql^2}{8} (1 - \alpha^2)^2 \quad \text{für } \alpha < 1$$

$$\max. M_2 = 0,5 qa^2$$

## 2.2 Auflagerreaktionen

$$A = q \frac{l}{2} (1 - \alpha^2)$$

$$B = q \cdot l(1 + \alpha) - A$$

## 3. Dynamisches Verfahren

Anwendung der FE-Methode, (Rechenprogramm SAP4) mit konstantem Spektrum.

## 4. Ergebnisse

## 4.1 Schnittgrößen

$\alpha$	stat. max. $M_1$	max. $M_2$	dyn max. $M_1$	max. $M_2$	$\frac{\max. M_{dyn}}{\max. M_{stat}}$
0	7.95'6		7.80'6	2.066'6	0.98
0.25	4.472'6	1.27'6	4.04'6	3.41'6	0.90
0.67	8.8'5	5.088'6	2.644'6	1.045'7	0.67
1.5		1.145'7		1.88'7	0.91
4		2.035'7		2.87'7	0.92
$\infty$		3.18'7		2.066'6	0.90

## 4.2 Auflagerreaktionen

$\alpha$	stat.		dyn.		$\frac{\max.(A, B)_{dyn}}{\max.(A, B)_{stat}}$
	A	B	A	B	
0	15900	15900	12070	12070	0.76
0.25	11925	19875	7263	8135	0.41
0.67	5300	26500	6210	12200	0.46
1.5	(-) 7959	39750	13510	25370	0.64
4	(-) 47700	79500	47210	63740	0.80
$\infty$	31800		20430		0.64

Bei Anwendung der Methode der statischen Ersatzlasten kann für Strukturen; die sich als Träger auf 2 Stützen mit Überhang idealisieren lassen, ein Faktor  $e_i = 1$  gewählt werden, wenn die maximalen Schnittgrößen über die Trägerlänge konstant und die maximale Reaktionskraft an beiden Auflagern angenommen wird.

Ermittlung der Auflagerreaktion

Für die Ermittlung der Auflagerreaktion darf unabhängig von der Art des Systems  $e_i = 1,0$  angesetzt werden, da die Praxis zeigt, dass die Auflagerreaktionen bei diesem Verfahren stets überschätzt werden.

## Zu 4.4.2.1 Spannungsnachweis

In KTA 2201.4 wurde konsequent von einer Trennung in Lastfallkategorie (Schadensfall) und Beanspruchungsstufen (C, D) ausgegangen, da diese Trennung im ASME-Code seit 1974 gehandhabt wird und auch zum Beispiel in die KTA-Regeln 3201 und 3401 Eingang gefunden hat. Dieses Konzept ermöglicht eine konsistente Zuordnung mit Berücksichtigung von Eintrittshäufigkeit, Spannungsgrenzen, Möglichkeit von Wiederkehrenden Prüfungen, Anforderung an die Funktionsfähigkeit. Basierend auf der Eintrittshäufigkeit wird das Bemessungserdbeben unter Schadensfall klassifiziert.

Bei der Einstufung in D werden die Primärspannungen so begrenzt; dass zwar Plastifizierungen zulässig sind, diese Plastifizierungen aber sowohl im ungestörten Bereich als auch an den Diskontinuitäten für einen Lastfall für verformungsfähige Werkstoffe auf zulässige Werte (z.B. 2 % für Ferrit und 3 % für Austenit) beschränkt sind. Sekundärspannungen und Spannungsspitzen brauchen nicht nachgewiesen zu werden, da sie bei verformungsfähigen Werkstoffen und einem Lastfall mit nur wenigen Zyklen kein Versagen bewirken können. Dabei wird bewusst in Kauf genommen, dass ein Weiterbetrieb (Bestimmungsgemäßer Betrieb) für die Komponente unter Umständen nicht mehr möglich ist wegen der hohen Werkstoffausnutzung.

Die Unterteilung der Anlagenteile in einzelne Gruppen wird vorgenommen, um folgende Aspekte berücksichtigen zu können:

- existierende Regelwerke
- Anforderungsstufen bzw. Sicherheitsklassen
- sicherheitstechnische Bedeutung
- notwendiger Nachweisumfang
- Gegebenheiten von Konstruktion und Werkstoff

## Zu 4.4.2.2 Stabilitätsnachweis

Bei Stabilitätsnachweisen gibt es zurzeit mehrere Verfahren und verschiedene anzuwendende Sicherheitsbeiwerte, die zum Teil vom Verfahren, Versagensmechanismus, von der Belastungskategorie und der Belastungsart abhängig sind.

Dem AG erschien es nicht möglich, hier eine Auswahl zu treffen und eindeutige Werte festzuschreiben. Deswegen wird eine Auslegung im Einzelfall anhand vorhandener Regeln und Literaturstellen vorzunehmen sein.

#### Zu 4.4.2.3 Standsicherheitsnachweis

Für die Standsicherheit ist ein Lasterhöhungsfaktor von 1,1 auf die destabilisierenden Belastungen zulässig (siehe DIN 18800, Abschnitt 5.4), da hier nur das Eigengewicht von Bedeutung ist, das für die maschinen- und elektrotechnischen Anlagenteile genau erfassbar ist.

#### Zu 4.4.2.4 Funktionsfähigkeitsnachweis

##### (3) Durch einen Spannungsnachweis

Bezüglich der Forderung der Funktionsfähigkeit nach dem Erdbeben ist der Schritt von D nach C gemeint oder eine analoge Verschärfung. Bei Stufe C werden im ungestörten Bereich die bleibenden Verformungen kleiner als 0,2 % sein und an Diskontinuitäten in der Größenordnung wie beim Bestimmungsgemäßen Betrieb liegen. Falls die Belastung beim Erdbeben deutlich größer als im Bestimmungsgemäßen Betrieb ist oder die Konstruktion sehr viele nicht symmetrisch belastete Diskontinuitäten aufweist, ist obige Aussage nicht zwingend gültig. Für diese Komponenten ist ein weiterer Nachweis notwendig oder eine Klassifizierung unter B.

Falls die Funktionsfähigkeit auch während des Erdbebens gefordert wird, sichert die Einhaltung der Primärspannungsgrenze der Stufe B, dass die Gesamtverformungen vergleichbar den Gesamtverformungen im Bestimmungsgemäßen Betrieb sind. Die Zulässigkeit dieser ist durch Inbetriebsetzung und Betriebs- oder Funktionsprüfungen im Betrieb gewährleistet. Die konstruktiven Gegebenheiten müssen die Gewähr dafür leisten, dass sich aufgrund der bleibenden Verzerrungen nur derart kleine bleibende Verformungen einstellen, die die Funktionsfähigkeit der Komponente unbeeinträchtigt lassen. Starre Konstruktionen besitzen auch bei hohen Spannungen nur kleine Verformungen, weiche Konstruktionen können auch bei elastischen Spannungen große Verformungen aufweisen und müssen deshalb in Stufe B eingeordnet werden. Hinreichend niedrige Belastungen ergeben hinreichend geringe Verformungen. Große Belastungen können bei ungünstigen Konstruktionen unzulässig große Verformungen bewirken. Nur wenn die Betriebsbelastungen deutlich geringer sind und die Struktur sehr flexibel ist, sind zusätzliche Nachweise nötig (lange dünne Konstruktionen mit geringen Betriebsbelastungen). Diese können in Form von Plausibilitätsbetrachtungen, zusätzlichen Verformungsanalysen oder Begrenzung auf solche Spannungen, die im Bestimmungsgemäßen Betrieb erreicht werden, durchgeführt werden.