

**Zeitschrift:** IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht

**Band:** 12 (1984)

**Artikel:** Steifigkeits- und Dämpfungsänderungen in Stahlbetontragwerken bei Erdbeben

**Autor:** König, Gert / Ötes, Atilla

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-12119>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

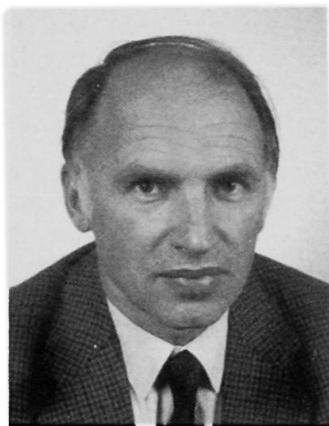
**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Steifigkeits- und Dämpfungsänderung in Stahlbetontragwerken bei Erdbeben

Stiffness and Damping Changes in Reinforced Concrete Structures during Earthquakes

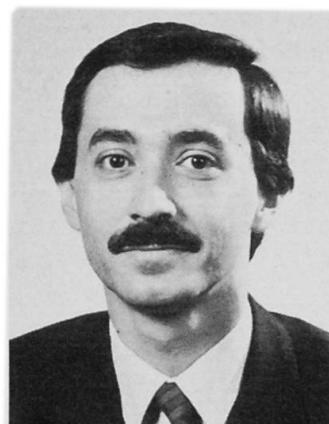
Effet d'un séisme sur la rigidité et l'amortissement d'une structure en béton armé

**Gert KÖNIG**  
Professor Dr.-Ing.  
TH Darmstadt  
Fed. Rep. of Germany



Geboren 1934. Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Darmstadt, 1960 Diplom. Seit 1971 Beratender Ingenieur VBI, seit 1972 Prüfingenieur für Baustatik. 1975 Berufung an die Technische Hochschule Darmstadt. Arbeitsgebiete: Spannbetonbrücken, Hochhäuser aus Stahlbeton, Kernkraftwerke, Baudynamik, Grundlagen des Massivbaus.

**Atilla ÖTES**  
Dipl.-Ing.  
TH Darmstadt  
Fed. Rep. of Germany



Geboren 1953. Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Darmstadt, 1977 Diplom, Tätigkeit in einem Ingenieurbüro. Seit 1980 am Institut für Massivbau TH Darmstadt als wissenschaftlicher Assistent auf dem Gebiet der Erdbebenbeanspruchung von Stahlbetontragwerken tätig.

### ZUSAMMENFASSUNG

Zur realistischen Beurteilung von Beanspruchungen in Stahlbetontragwerken beim Lastfall Erdbeben ist u.a. die Kenntnis über die Änderung der Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften des Tragwerks erforderlich. Der Aufsatz interpretiert Erdbebensimulationsversuche an Rahmenbauteilen und stellt zwei Modelle vor: Ein werkstoffgerechtes Modell zwecks genauerer Tragwerksanalyse und ein einfaches Näherungsmodell zum überschläglichen Nachweis der Tragfähigkeit.

### SUMMARY

For a realistic assessment of seismic loads in reinforced concrete structures a knowledge of the stiffness and damping characteristics is essential. The paper interprets earthquake simulation tests on members of reinforced concrete frame structures and makes two alternative suggestions for modelling: A model based on material properties and developed for accurate analysis of frames and a simple, practical model for a rough check of the load carrying capacity.

### RESUME

Pour juger de façon réaliste les sollicitations des structures en béton armé lors d'un séisme, il faut connaître les modifications des rigidités et des propriétés d'amortissement. Cette contribution interprète des essais de simulation sur des cadres et présente deux modèles: un modèle plus complet qui tient compte des propriétés des matériaux et un modèle plus simple pour une estimation de la capacité portante.



## 1. EINFÖHRUNG

Die Erdbebentauglichkeit von Rahmentragwerken aus Stahlbeton wurde in den letzten zwei Jahrzehnten erheblich erhöht. Das dabei verfolgte Prinzip, zähes Bauteilverhalten mit guten dissipativen Eigenschaften zu bewerkstelligen, ist ein optimales Konstruktionskonzept für einen Lastfall, dem wegen der geringen Auftretenshäufigkeit wirtschaftlich begegnet werden soll. [1]

Möglichkeiten für große Verformbarkeit ohne Versagen (Duktilität) bietet beim Stahlbeton die Werkstoffkomponente Stahl. Durch eine entsprechende Proportionierung der zähen, plastifizierbaren Komponente (Stahl) und der eher spröden Komponente (Beton) in den Riegeln und Stielen eines Rahmentragwerkes können hohe zyklische Beanspruchungen durch z.T. plastische Verformungen aufgenommen werden, ohne daß große Schnittgrößen entstehen müssen. [2]

Für den Ingenieur, der die Trag- und Gebrauchsfähigkeit des Tragwerks unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeitsaspekten sicherstellen soll, hat das Prinzip duktilen Konstruierens die Konsequenz, daß er sich mit nichtlinearem und plastischem Bauteilverhalten auseinandersetzen muß. Weil das Materialverhalten die Übertragung der dynamischen Anregung vom Baugrund auf die einzelnen Tragwerksmassen mitgestaltet, entscheidet es im zeitlichen Ablauf auch stets darüber, wie groß die vom Bauwerk absorbierte Energie bzw. die tatsächliche Beanspruchung im Tragwerk wird.

So werden neben dem ersten Schritt der dynamischen Berechnung, nämlich der diskreten Abbildung des Bauwerks in ein mechanisches Tragwerksmodell mit Steifigkeiten und Massen, nun auch realistische Rechenmodelle benötigt, die die Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften wirklichkeitsnah erfassen.

Unterscheidet man dabei zwischen der Bemessungsaufgabe und der Nachweisaufgabe, die der Ingenieur zu bewältigen hat, so soll dafür gesorgt werden, daß er im ersten Fall zwecks einer schnellen Orientierung eine möglichst einfache Modellierung anwenden kann. Für die zweite Aufgabe jedoch dürfen aufwendigere Algorithmen in Betracht kommen, sofern sie auf realistischen Materialmodellen basieren und sofern hohe Ansprüche an Wirklichkeitsnähe gestellt sind.

## 2. STEIFIGKEITS- UND DÄMPFUNGSSÄNDERUNG BEI STAHLBETONBAUTEN

Während mit Steifigkeit die Federungseigenschaften des schwingenden Systems angesprochen werden, repräsentiert der Begriff "Dämpfung" die Energiedissipationsfähigkeit des Tragwerks, nämlich die Umwandlung der Bewegungsenergie in nicht-reversible Energieformen. Im folgenden wird sie durch das Verhältnis der nicht reversiblen Energie zur Gesamtverformungsenergie erfaßt. Um die Frage beantworten zu können, wie diese dynamischen Kenngrößen beim Werkstoff Stahlbeton im Gebrauchs- bzw. ganzen Tragfähigkeitsbereich eines Rahmentragwerks variieren, wurden in [3] Erdbebensimulationsversuche an Stahlbetonversuchskörpern durchgeführt. Dabei wurden repräsentative Tragwerksteile, wie Stahlbetonstützen und -rahmen in mehreren Laststufen, mit steigenden Amplituden für horizontale Bodenbewegungen, bis zum Versagen beansprucht (Fig. 1).

In der mit dem Beginn der Rißentwicklung einsetzenden nichtlinearen aber noch fast elastischen Anfangsphase verlieren die vorwiegend auf Biegung beanspruchten Bauteile mit fortschreitender Rißbildung deutlich an Biegesteifigkeit (Fig. 2). In den Kraft-Verformungszyklen wird ein Verfestigungscharakter bei größer werdenden Amplituden beobachtet. Ursache dafür sind die plastischen Relativverschiebungen des Stahls gegen den Beton (Schlupf) in rißnahen Bereichen. Beim nahezu linear-elastischen Verformungsverhalten des Stahls und des Betons steigt die ursprünglich aus reiner Materialdämpfung im elastischen Zustand bestehende Energiedissipation infolge plastischer Verbundeigenschaften und infolge Reibung entlang der Rißufer im Beton an.

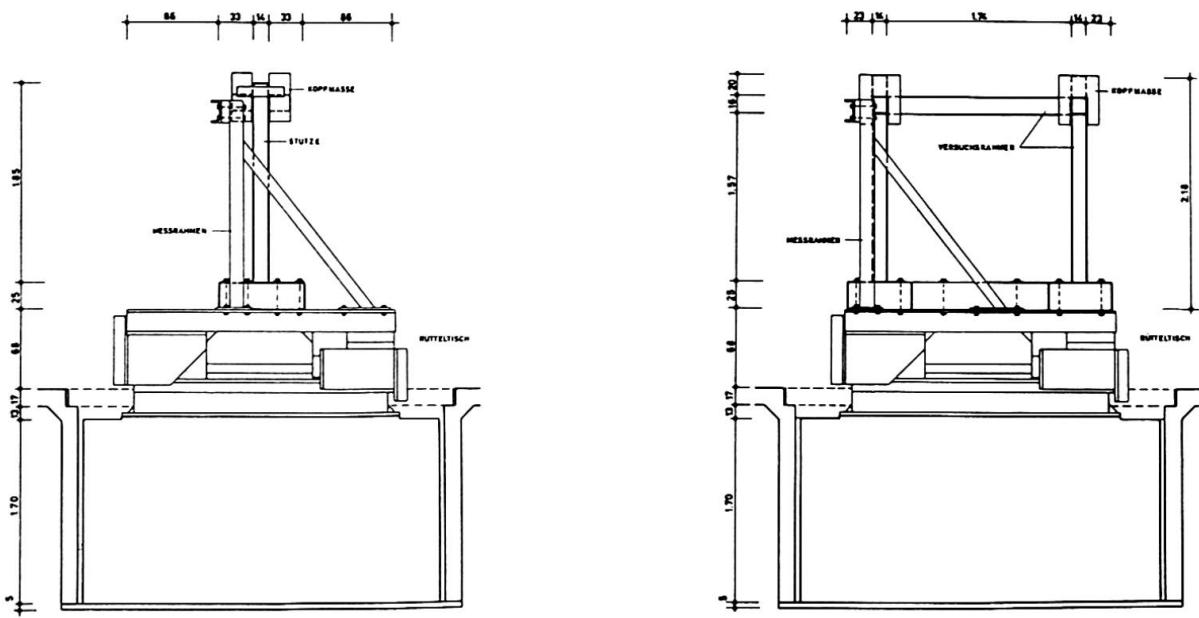


Fig.1 Erdbebensimulationsversuch mit Stahlbetonkragarm und -rahmen

Die plastische Formänderung des Bewehrungsstahls führt bei einer Beanspruchung über die Fließgrenze hinaus zu einem nichtlinearen, plastischen Bauteilverhalten. Die Zyklen weisen im Bereich großer Verformungen eine abnehmende Steifigkeit auf (Fig. 3). Die Energiedissipation wächst mit zunehmenden plastischen Verformungen und erreicht Werte, die ein Vielfaches der Werte in der elastischen Phase betragen. Abnehmende Steifigkeit im Stahl und Abplatzen der Betondeckung bei größeren Rotationen verschlechtern die Festigkeitseigenschaften in der Druckzone. Mit Abnahme des inneren Hebelarms sinkt auch das aufnehmbare Moment. Wird das noch vorhandene Arbeitsvermögen des Bauteils durch die zugeführte Energie überschritten, so versagt der Träger.

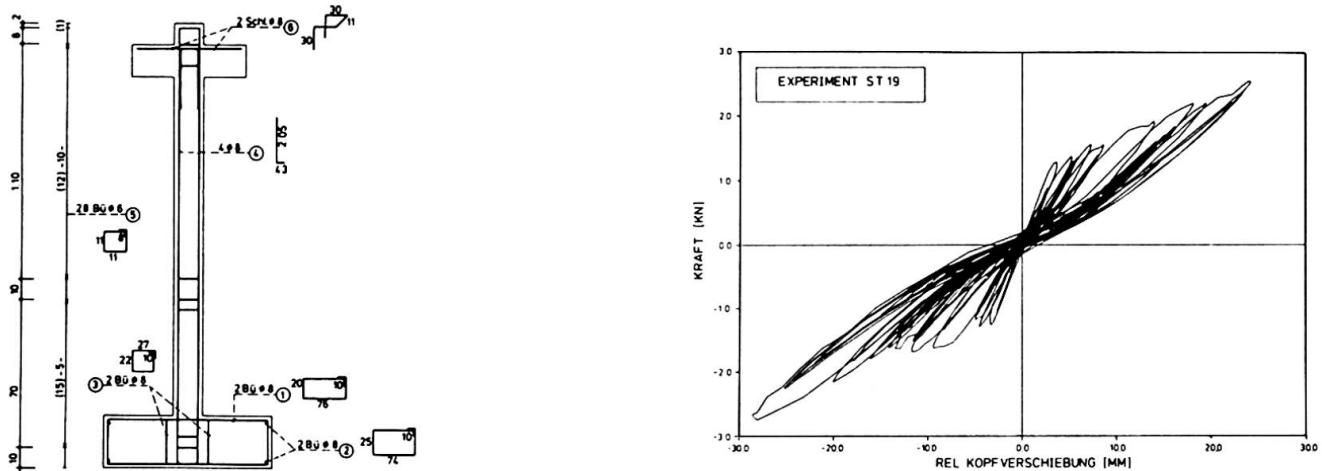
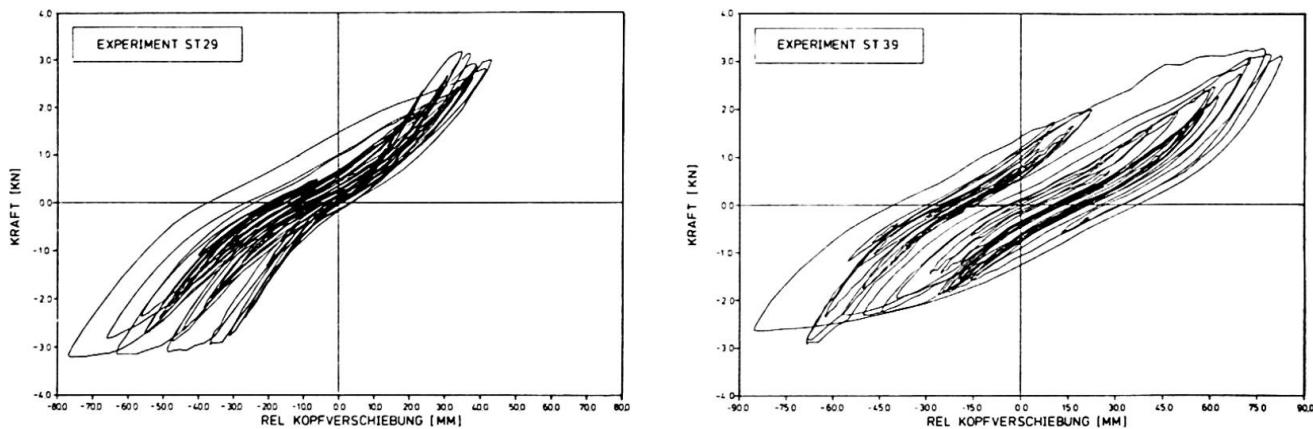


Fig.2 Nichtlinear-elastisches Bauteilverhalten des Stahlbetonkragarms



**Fig. 3** Nichtlinear-plastisches Bauteilverhalten des Stahlbetonkragarms

### 3. MODELLIERUNG DER STEIFIGKEITS- UND DÄMPFUNGSSÄNDERUNG

Mit welcher Genauigkeit und mit welchem Rechenaufwand das Werkstoffverhalten modelliert werden soll, hängt mit der jeweiligen Aufgabenstellung zusammen, wie bereits im ersten Abschnitt diskutiert wurde:

Stellt sich die Aufgabe als eine Dimensionierungs- und Bemessungsaufgabe, so wird man von einer tolerierbaren Schädigung ausgehend durch integrale Größen, wie z.B. Energie (Vergleich der aufnehmbaren und der aufzunehmenden), eine schnelle Orientierung suchen.

Ist dagegen eine genauere Kenntnis über die Tragwerksantwort erforderlich, z.B. zwecks Nachweis der Erfüllung bestimmter Sicherheitsanforderungen bzw. Lokalisierung von plastischen Verformungen auf bestimmte Tragwerksteile, so ist ein genaueres und dafür aufwendigeres Bauteilmodell notwendig. Nur sollte sich dies auf experimentellen Untersuchungen gründen und die Funktionsweise für den Anwender nachvollziehbar bleiben. Sein Anwendungsbereich soll möglichst deutlich angegeben werden. Innerhalb seiner Anwendungsgrenzen sollen fundamentale Werkstoffbeziehungen benutzt und damit die Eingabe dem Benutzer leicht gemacht werden.

Im folgenden wird zunächst ein solches werkstoffgerechtes Modell für das dynamische Verhalten schlanker, hauptsächlich biegebeanspruchter Rahmenbauteile vorgestellt. Das Modell basiert auf der systematischen Identifikation und Synthese der Einzelphänomene bei Versuchen, die im Kap. 2 zusammengefaßt wiedergegeben wurden. Dann wird ein vereinfachtes Rechenmodell präsentiert, welches dem Ingenieur als eine praxisfreundliche und zuverlässige Beurteilungshilfe für die werkstoffbedingten Tragwerkseigenschaften bei erdbebenbeanspruchten Stahlbetonrahmen dienen soll.

#### 3.1 Werkstoffgerechte Modellierung

Wird das in Fig. 4 dargestellte idealisierte Tragwerksmodell einer horizontalen Bodenbeschleunigung ausgesetzt, so erhält man in den einzelnen Bauteilen einen vorwiegend linearen Momentenverlauf mit nur einem Nullpunkt. Es wird ersichtlich, daß jedes Bauteil aus zwei Kragarmen zusammengesetzt werden kann. Hat man ein Modell für den Kragarmmodul, das sein dynamisches Verformungsverhalten beschreibt, so kann mit den Mitteln der Stabstatik das ganze Tragwerksverhalten beschrieben werden.

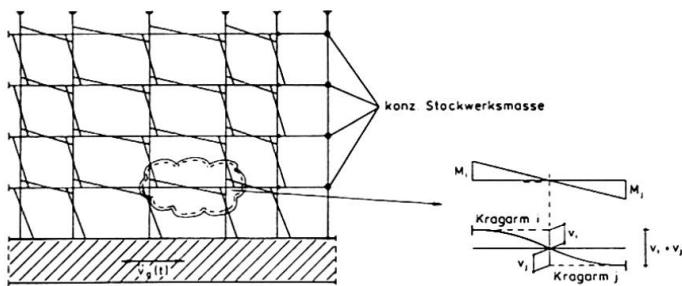


Fig.4  
Idealisiertes Tragwerksmodell  
unter Erdbebenerregung

Beginnend mit dem ungerissenen Zustand wird in [3] der vollständige Tragfähigkeitsbereich des zähen Kragarms in drei Phasen zusammengefaßt: 1.) linear-elastisch; 2.) nichtlinear-elastisch; 3.) nichtlinear-plastisch. Beim ersten Riß vollzieht sich der Übergang von der ersten Phase in die zweite und beim Fließbeginn im Bewehrungsstahl der Übergang in die dritte Phase (Tabelle 1).

- Die linear-elastische Phase ist durch eine konstante Steifigkeit charakterisiert, mit der das Bauteil unabhängig von der Lastspielzahl auf Be- und Entlastung reagiert. Die im Kraft-Verformungs-Diagramm umschlossene, recht schmale Fläche reflektiert die Energiedissipation infolge des vorwiegend thermo-elastischen Energietransfers. Bildet man sie äquivalent viskos ( $c_{aq}$ ) ab, so kann mit einer einheitlichen Steifigkeit  $K_0$  für Be- und Entlastung gerechnet werden.

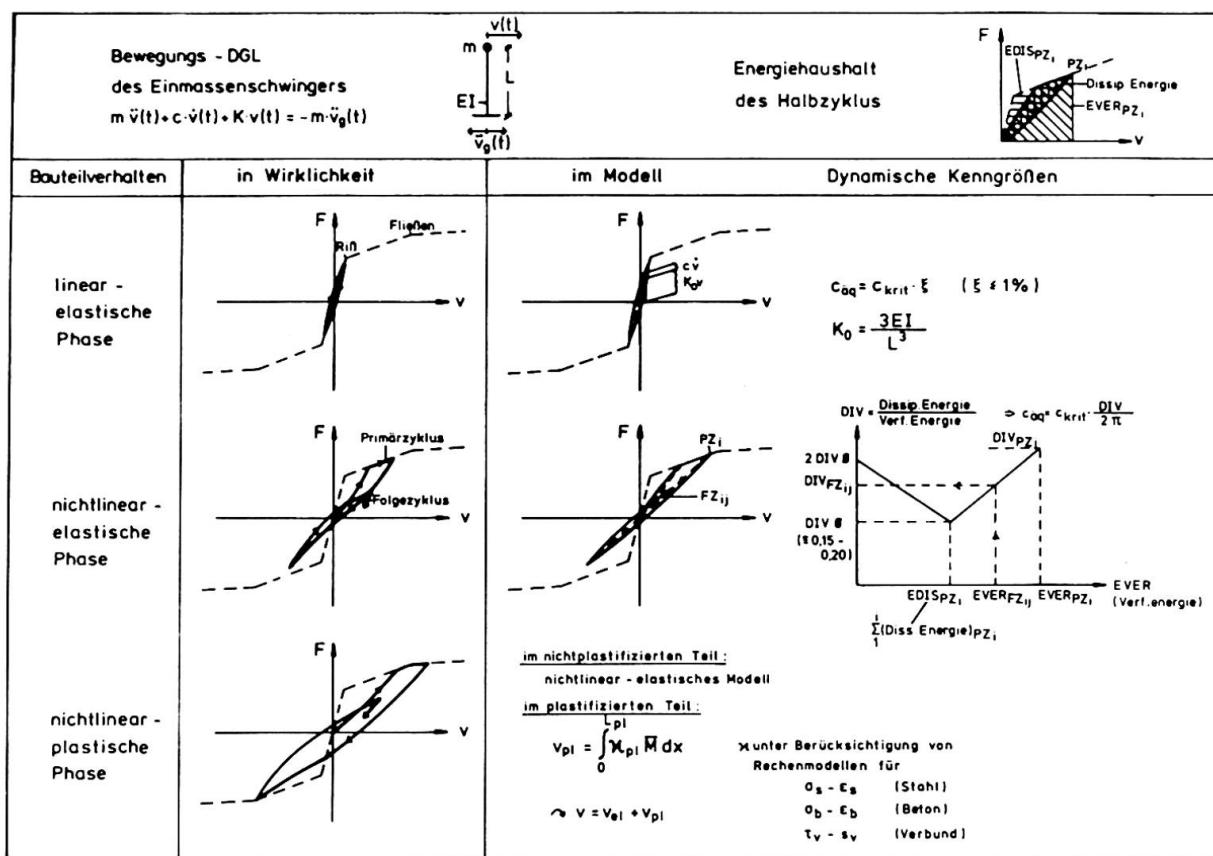


Tabelle 1 Prinzipien der werkstoffgerechten Modellierung



Die nichtlinear-elastische Phase ist durch einen Steifigkeitsabbau gekennzeichnet. Um diesen Schädigungsprozeß einfach beschreiben zu können, wird für die Zyklen folgende Klassifizierung vorgenommen: Im Beobachtungszeitraum  $i$  werden der Zyklus mit der bisher größten Verformungsamplitude Primärzyklus  $PZ_i$  und die ihm folgenden Zyklen mit kleineren Amplituden Folgezyklen  $FZ_{ij}$  genannt. Bildet man mit der veränderlichen Steifigkeit  $K$  die rissbedingte Schädigung des Bauteils bei Beanspruchungssteigerung durch die Primärzyklen und die dazwischen konstant bleibenden Steifigkeitseigenschaften mit Hilfe der Folgezyklen ab, so wird eine recht gute Annäherung an das tatsächliche Kraft-Verformungsverhalten erreicht.

Die einfachen Be- und Entlastungsregeln für  $PZ$  erfassen dabei die mit der Rißentwicklung korrespondierende Energiedissipation. Aber auch dem Dissipationsvorgang in den Phasen ohne Rißentwicklung, d.h. zwischen den Primärzyklen, kommt eine Bedeutung zu, weil er die Phasenbeziehung zwischen der Erregung und der Antwort beeinflußt. In der Tabelle 1 wird ein Modell vorgestellt, das sowohl den Schädigungsgrad als auch die aktuelle Amplitude des betrachteten Folgezyklus berücksichtigt und die Energiedissipation äquivalent viskos ( $c_{\text{äq}}$ ) abbildet. Dabei dienen die Primärzyklus-Energien  $EV_{PZ_i}$  (Verformungsenergie im zug. Primärzyklus) und  $EDIS_{PZ_i}$  (Summe der dissipierten Energie in den bisherigen Primärzyklen) als Schadenskenngrößen zur Bestimmung von  $c_{\text{äq}}$  eines jeden Folgezyklus  $FZ_{ij}$ .

In der nichtlinear-plastischen Phase entfalten die einzelnen Werkstoffkomponenten (Stahl, Beton, Verbund) bei zunehmenden Verformungen ihre Nichtlinearitäten und Plastizitäten so stark, daß ein globales Verhaltensschema für das Bauteil nicht realistisch formulierbar ist.

Hier hilft nur eine konsequente Berücksichtigung der  $\sigma - \varepsilon$ -Beziehung für Stahl und Beton und der  $\tau - s$ -Beziehung für Verbund, die unter Einhaltung von Gleichgewichts- und Verträglichkeitsbedingungen in einigen Schnitten diskret verfolgt werden. Die Superposition der einzelnen Beiträge liefert eine Information über den vom Plastifizieren erfaßten Bauteilabschnitt. Der mit dieser Vorgehensweise verbundene Rechenaufwand kann durch entsprechende Wahl der Anzahl der Schnitte gesteuert werden.

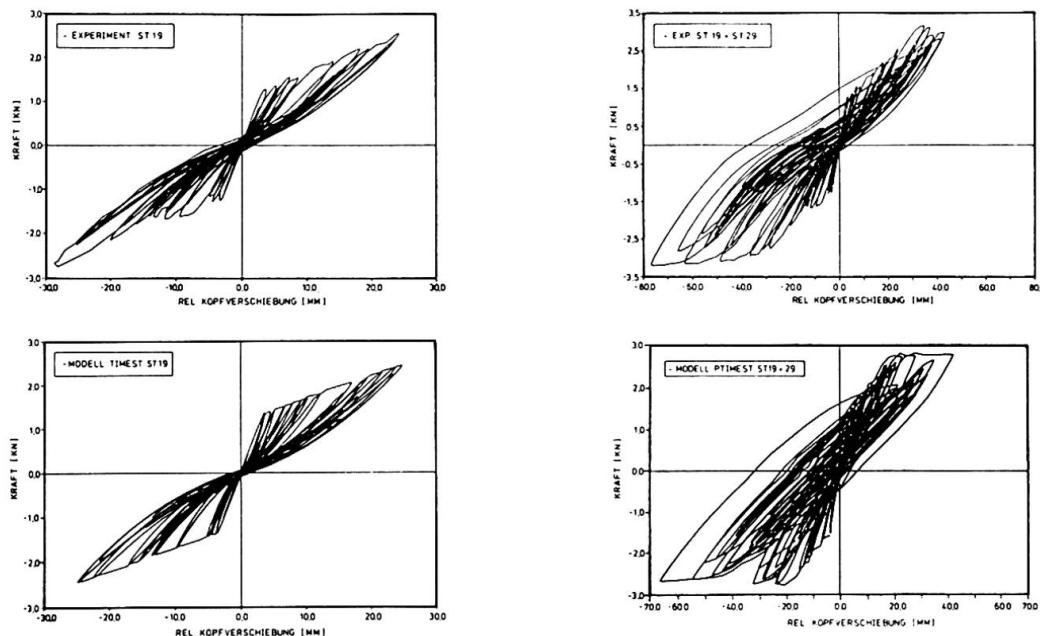


Fig.5 Vergleich zwischen Experiment und Berechnung mit werkstoffgerechtem Modell

Das oben präsentierte Modell wurde in [3] in eine Zeitschrittmetode mit direkter Integration der DGL implementiert. Bei der Nachrechnung der im Kap. 2 beschriebenen Erdbebenversuche an einfachen Stahlbetontragwerken zeigte das Modell eine gute Übereinstimmung. In Fig. 5 sind die Vergleiche von Experiment und Berechnung eines Kragarm-Versuchs in aufeinanderfolgenden Beanspruchungsstufen dargestellt.

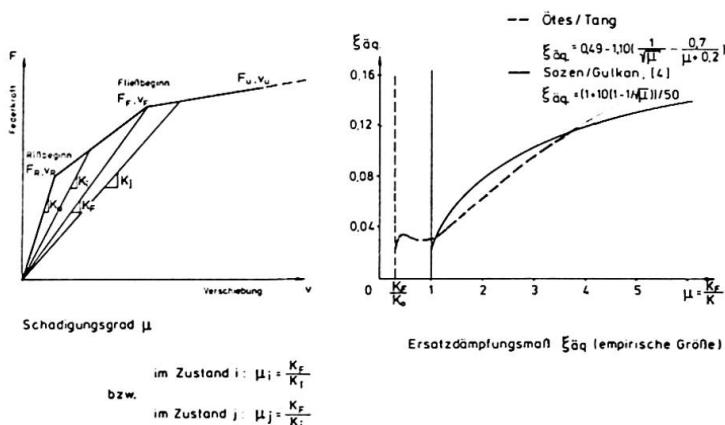


Fig.6 Linearisierte Kraft-Verformungsbeziehung und Ersatzdämpfungsmaß

### 3.2 Vereinfachte Modellierung

Ausgehend von der monotonen Kraft-Verformungsbeziehung des Bauteils mit linearisierten Be- und Entlastungssäten kann versucht werden, die Steifigkeitsreduktion durch den sog. Schädigungsgrad  $\mu = K_f/K$  ( $K_f$  = Steifigkeit beim Fließbeginn) zu beschreiben (Fig. 6). Zusätzlich wird eine empirische Beziehung, die den Zusammenhang zwischen dem Schädigungsgrad  $\mu$  und der korrespondierenden Energiedissipation  $\xi_{eq}$  direkt wiedergibt, herangezogen (Fig. 6). Mit beiden Beziehungen wird die Möglichkeit geschaffen, das praxisfreundliche Antwortspektrum mit realistischen Eingangswerten zu benutzen. Diese bereits in [4] für die Bemessung zäher Rahmenkonstruktionen vorgestellten Näherungsmodelle werden im folgenden ergänzt (Fig. 7):

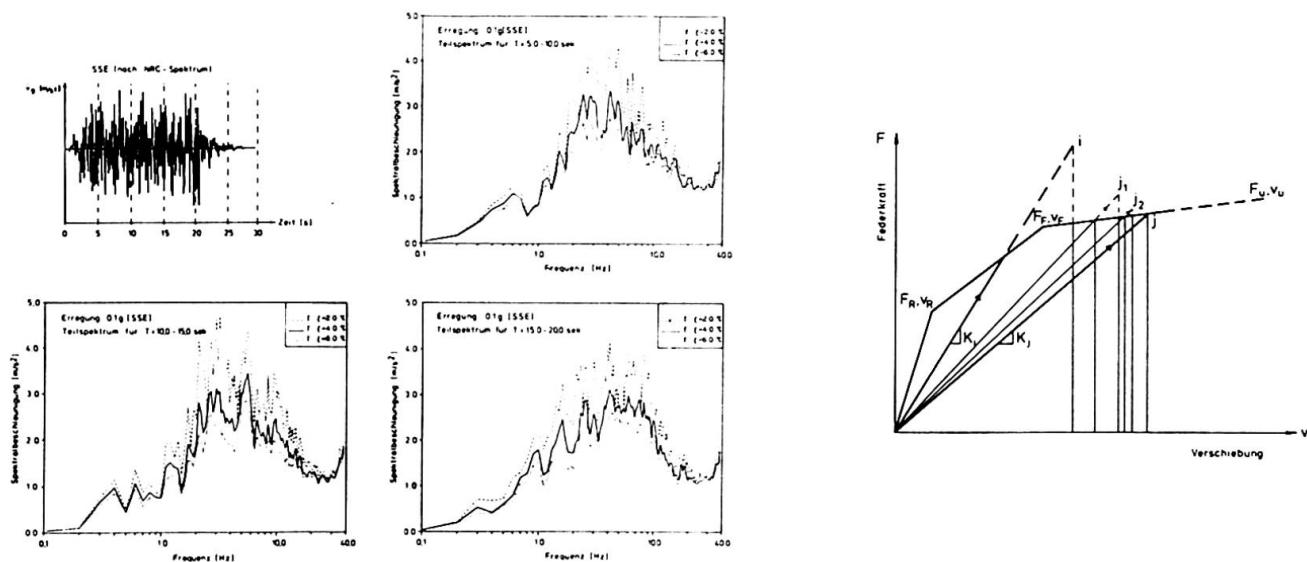


Fig.7 Teilantwortspektren und Energievergleichsmethode



- Benutzung von Teilantwortspektren statt des gesamten Antwortspektrums: So kann das zeitlich veränderliche Beanspruchungsbild, wenn auch in großen Intervallen, im Hinblick auf Auswirkungen auf Werkstoff- und damit Bauteilkenngrößen besser rekonstruiert werden. Mit Hilfe der Maximalantwort im betrachteten Teilantwortspektrum wird zunächst die Frage beantwortet, ob die Schädigung zunimmt. Im Falle einer Zunahme werden die Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften aktualisiert. Mit diesen aktualisierten dynamischen Kenngrößen wird die Berechnung im nächsten Teilspektrum fortgesetzt.
- Implementierung einer modifizierten Energievergleichsmethode zur Umrechnung der linear absorbieren Energie ( $E_j$ ) in das nichtlinear-plastische System: Die für den Zustand  $i$  im betrachteten Teilantwortspektrum abgelesene Spektralbeschleunigung  $S_{a,j}(f_j, \xi_j)$  führt zu der absorbieren Energie  $E_j$ . Sie ist für Beanspruchungen, die über das gegebene Kraft-Verformungsdiagramm hinausgehen, ein theoretischer Wert. Daher wird sie bei der Ermittlung der vom nichtlinear-plastischen System absorbieren Energie nur als eine erste Näherung benutzt. Aus  $E_{j,1} = E_j$  folgen der Schädigungsgrad  $\mu_{j,1}$  und das zug. Ersatzdämpfungsmaß  $\xi_{j,1}$ . Liegt die Antwort des linearen Schwingers  $j,1$  im gleichen Teilantwortspektrum nicht auf der F-v Linie, so wird die zug. absorbieren Energie ( $E_{j,1}$ ) wieder in eine F-v gerechte Energie ( $E_{j,2}$ ) umgewandelt. Die Iteration kann abgebrochen werden, wenn ein Schädigungsgrad erreicht wird, bei dem die lineare Systemreaktion einen mit dem F-v Diagramm verträglichen Energiehaushalt aufweist.

In Fig. 8 ist ein Vergleich zwischen dem so entwickelten Teilspektrerverfahren und einem Kragarm-Versuch in einigen aufeinanderfolgenden Beanspruchungsstufen dargestellt.

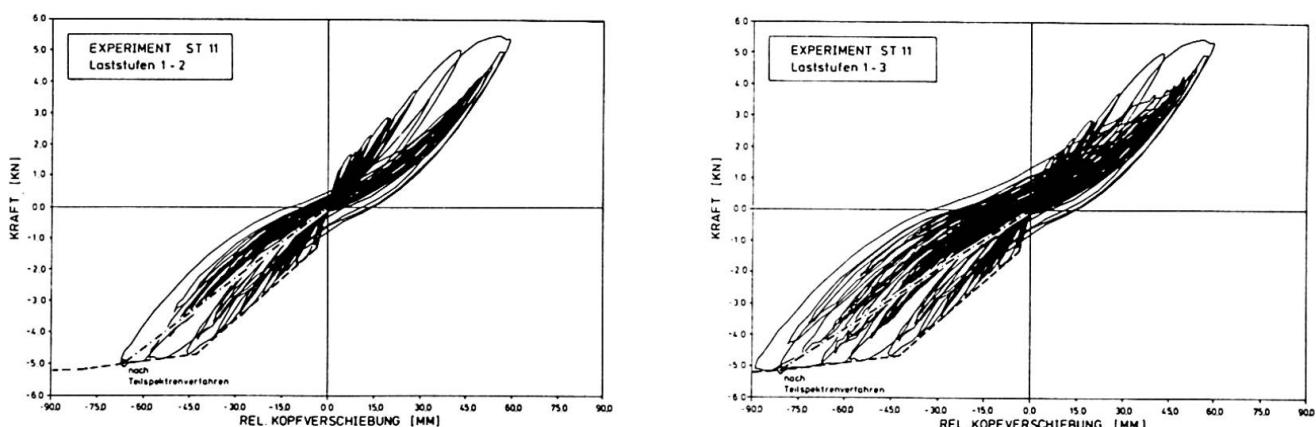


Fig.8 Vergleich zwischen Experiment und Näherungsverfahren

#### LITERATURVERZEICHNIS

1. CEB Model Code for Seismic Design of Concrete Structures, Comite du Beton, Bulletin D'Information No 160, 1983
2. TASSIOS T.P., et al., Response of R.C. Critical Regions Under Large Amplitude Reversed Actions, CEB-Bulletin D'Information No 161, 1983
3. KÖNIG G., KROGEL O., ÖTES A., Untersuchungen zum nichtlinearen Verhalten erdbebenbeanspruchter Stahlbetonkonstruktionen, Abschlußbericht, Teil I: BMFT-RS-150444; Teil II: BMFT-RS-1500444 A9, Sept. 1983
4. SHIBATA A., SOZEN M.A., Substitute Structure Method for Seismic Design in R/C. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 102, No. ST1, 1976