

ISBN 3-88314-917-9

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Forschungsbericht 160

Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten

von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees

Juli 1989

88 Seiten, 80 Abbildungen, 3 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d
Telefax (030) 8 112 029 Teletex 2 627-308 372=bamb

Copyright © 1989 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

KURZFASSUNG

Das Ziel des vorliegenden Berichtes ist der Versuch einer konsequenten Weiterentwicklung dreidimensionaler Rechenmodelle für Probleme aus dem Bereich der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung. Von wesentlichem Einfluß ist dabei die Berücksichtigung der endlichen Biegesteifigkeit der Fundamentplatte mit konsistenter Kopplung an den Boden, wodurch die aus der Halbraumlösung herrührenden Einschränkungen der bisher vielfach verwendeten eindimensionalen Modelle (Feder-Dämpfer für den Boden und Balken für das Bauwerk) mit starrer Fundamentplatte bzw. der mehrdimensionalen Modelle mit verteilten Feder-Dämpfern entfallen.

Die Bodeneigenschaften werden durch die Kondensation eines lokal begrenzten Bodenausschnittes, hier als Makroelement bezeichnet, definiert. Eine den Feder-Dämpfer-Modellen vergleichbare, verbesserte Abstrahlungsdämpfung in Form einer Dämpfungsmatrix folgt aus der Kondensation von viskosen Dämpfern, welche an den Rändern des Bodenausschnittes wirken.

Ein Merkmal des Makroelementes ist die Möglichkeit der gleichen Diskretisierungsgenauigkeit für den Boden und für die Baustruktur.

Das Verfahren wird hier im Zeitraum für einen linearen Code mit Punktmassendarstellung und Rotationssymmetrie bei konsistenter Massenkopplung des Makroelementes numerisch behandelt.

Das Makroelement erlaubt eine realistischere dreidimensionale Strukturberechnung bei begrenztem numerischen Aufwand.

SUMMARY

This report presents the results of a three-dimensional model developed for the analysis of soil-structure interaction problems. The realistic treatment of the stiffness for the foundation plate avoids the restriction of lumped parameter models for one-dimensional beam-models with a rigid plate or for multi-dimensional models with distributed lumped parameters.

The soil-behaviour is defined by the condensation of a limited soil section, called macro-element. An improved matrix radiation damping comparable with lumped parameters is resultant from the condensation of viscous dampers, situated along the boundaries of the soil section.

The finess of discretization is similar for the soil and for the structure.

The method is presented in the time domain for a linear axisymmetric code with lumped mass having a consistent mass coupling of the macro-element.

By application of the macro-element a realistic three-dimensional system may be analyzed with a reasonable numerical effort.

SCHLAGWORTE

Methode der finiten Elemente - Strukturdynamik - Erdbebenbeanspruchung - Lastfall Flugzeugabsturz - räumliche Diskretisierung - Boden-Bauwerk-Wechselwirkung - Kernkraftwerksgebäude

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	5	3	Beispiele	24
2	Kondensation des Bodens bei biegeweichen Fundamenten für den Lastfall Erdbeben		4	Zusammenfassung und Ausblick	36
2.1	Kondensation im Frequenzraum	7		Dank	38
2.2	Kondensation im Zeitraum	9		Literatur	39
		14		Anhang mit 80 Abbildungen und 3 Tabellen	41

1. Problemstellung

Die Berechnung dynamisch beanspruchter Konstruktionen mit relativ steifen Fundamenten wie beispielsweise Kernkraftwerkskonstruktionen geschieht in der Praxis vielfach nach der Halbraumtheorie unter der Annahme starren Fundamentverhaltens. In diesem Falle kann der anstehende Boden durch einfache, an der Bodenplatte angeordnete Feder-Dämpfer-Elemente (lumped parameter analog) ersetzt werden [s. Modell M_1 in Abb. 1]. Bei Erdbebenbeanspruchung ist es ferner für die meisten Fälle ausreichend genau, nur die globale Strukturerrregung zu erfassen, d. h. das Bauwerk entsprechend Modell M_1 durch einfache Balkenelemente zu diskretisieren. Falls die Struktur räumlich betrachtet werden soll [s. Modell M_3 und M_4 in Abb. 1], führt diese Vorgehensweise zu Näherungsannahmen, die die Einführung von Steifigkeiten für die Fundamentplatte erfordern. Dabei werden die Parameter des den Boden simulierenden Halbraums durch räumliche Anordnung von geeigneten Elementen als Analogon nach der Finite Element Methode (FEM) simuliert. Untersuchungen haben gezeigt, daß auf der Basis von mit Struktur-Response-Spektren vorgenommene Vergleichsrechnungen der Modelle mit dem FEM-Analogon M_4 und der Ausschnittmodelle für den Boden entsprechend Modell M_5 gut übereinstimmen /1/.

Für die Simulation des Boden-FEM-Analogons können beispielsweise eindimensionale Stabelemente oder mehrdimensionale Volumenelemente herangezogen werden. Dabei ergibt sich, daß die Steifigkeitsverteilung des FEM-Analogons von wesentlichem Einfluß für die Beanspruchung der Baukonstruktionen, insbesondere aber für die Fundamentplatte ist /2/. Erste Untersuchungen mit den Modellen M_3 und M_4 haben erkennen lassen, daß die Verwendung von Stabelementen für erdbebenspezifische Lastfälle zu höheren Beanspruchungen der Bodenplatte führen können als die Verwendung von Volumenelementen, unabhängig davon, welche Steifigkeitsverteilung bei Anwendung des Bettungszifferverfahrens angenommen wird. Die Ursache ist darin zu finden, daß Stabelemente zur Simulation der Bettung nur eine direkte Kopplung zwischen ihren Freiheitsgraden aufweisen. Bei Verwendung von

Volumenelementen reduziert sich diese Form der Kräftekonzentration durch Kopplung innerhalb der einzelnen Elemente.

Eine wesentliche Resultatsverbesserung der Strukturbeanspruchung kann durch einen die Bodeneigenschaft konsistent optimierenden Steifigkeitsansatz erfolgen, bei welchem entsprechend der Halbraumtheorie alle an der Fundamentplatte definierten Freiheitsgrade miteinander gekoppelt sind. Ein möglicher Lösungsansatz soll nachfolgend aufgezeigt werden, wobei der Boden durch die kondensierten Eigenschaften eines lokal begrenzten Bodenausschnittes, hier als Makroelement bezeichnet, definiert wird. Auf die frequenzabhängige Darstellung des den Ausschnitt umgebenden Bodens wird zunächst verzichtet. Von der Definition und Anwendung dieses Makroelementes wird anders als durch alleinige Verfeinerung des FEM-Analog Rasters eine wesentliche Verbesserung in der Berechnung der Strukturbeanspruchung erwartet.

2. Kondensation des Bodens bei biegeweichen Fundamenten für den Lastfall Erdbeben

Die Kondensation von elementierten Bodenbereichen in ein Makroelement erlaubt die Berechnung sowohl von statischen Lastfällen - hier entfällt einfach die Notwendigkeit der Ermittlung von Masse- und Dämpfungskenngrößen - und von dynamischen Lastfällen. Die direkt an der Struktur angreifenden dynamischen Lasten wie z. B. Fundamenterregung, Flugzeugabsturz o. ä. sind auch direkt an ihren Angriffsstellen aufzubringen, während für den Lastfall Erdbeben die folgende Sonderbetrachtung notwendig ist.

Nach der Methode der Finiten Elemente läßt sich aus rechentechnischen Gründen nur ein in seiner Feinheit und Ausdehnung begrenztes diskretes Modell berechnen, es sind deshalb sinnvolle Randbedingungen einzuführen. Diese Notwendigkeit gilt besonders für Probleme der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung. Es ist also notwendig, zur Darstellung des Bodens einen Kompromiß hinsichtlich Rechenkapazität für die Diskretisierung in Freiheitsgrade und Ausdehnung der Bodenausschnittsbereiche zu finden. Der für Modell M_5 in Abb. 1 gezeigte Bodenausschnitt gibt nur eine sehr grobe Näherung des bei üblichen Verfahren angewendeten elastischen Halbraumverhaltens für den anstehenden Boden. Andererseits ist die Idealisierung des Bodens vor Ort als elastischer Halbraum auch nur eine Hypothese. Durch lokale Gegebenheiten wie Auflasten, Bodenschichtungen, Grundwasser, Bodeneinschnitte und tiefenabhängiges Steifigkeitsverhalten treten realiter natürlich Reflexionen und Dispersionen von Wellen auf, die nach der Halbraumlösung nicht ermittelbar, in einem begrenzten Bodenmodell aber in spezifischer Weise vorhanden sind. Deshalb erscheint es wohl in den meisten Fällen ausreichend und sinnvoll, den Boden durch einen geeigneten, begrenzten Ausschnitt zu diskretisieren. Wird beispielsweise aus Vergleichsgründen auch der Bezug zur Halbraumtheorie gewünscht, so kann mit Hilfe frequenzabhängiger Randbedingungen oder geeigneter viskoser Dämpfer, die an den Rändern des Bodenausschnitts anzubringen sind, die Halbraumlösung angenähert werden.

Zielsetzung ist es, die statischen und dynamischen Eigenschaften des anstehenden Bodens durch einfache Steifigkeits-Dämpfungs- und Massebeziehungen in einer direkt unter dem Fundament anzubringenden Schicht als Makroelement mit definiertem Schichtverhalten zu simulieren. Das globale Schichtverhalten, d. h. der Einfluß auf globale Bauwerksbeanspruchungen entspricht denen der in den Modellen M_3 und M_4 in Abb. 1 dargestellten fiktiven Schichten bestimmter Steifigkeiten. Es soll gezeigt werden, daß die statischen und dynamischen Eigenschaften des Makroelementes denen eines beliebig zu definierenden Bodenausschnittes zugeordnet sind, [s. System I in Abb. 2]. Die Bezeichnungen und die Darstellung der Systematik sind angelehnt an /3/. Die Bewegungsgleichung lautet

$$\text{im Zeitraum:} \quad [M](\ddot{v}) + [C](\dot{v}) + [K](v) = (P) \quad (1)$$

$$\text{im Frequenzraum:} \quad [\bar{S}](\bar{v}) = (\bar{P}) \quad (2)$$

$$\text{mit:} \quad [\bar{S}] = [K](1 + i2\beta) - \omega^2[M] \quad (3a)$$

$$\text{bzw.} \quad [\bar{S}] = [K]([k] + ia_0[c]) \quad (3b)$$

$$a_0 = \frac{\omega f}{c_s} \quad (3c)$$

Der Vektor (v) bedeutet in (1) die Deformation im Zeitraum, der Vektor (\bar{v}) in (2) ist die Verformungsgröße im Frequenzraum; (v) ist durch Fouriertransformation in (\bar{v}) überführbar.

(3a) kann direkt in (1) überführt werden, während in (3b) zusätzliche frequenzabhängige Größen Eingang finden. So ließe sich (3a) direkt auf Modell M_5 in Abb. 1 anwenden, während bei Einführung zusätzlicher frequenzabhängiger Randbedingungen in dieses Modell (3b) maßgeblich wird. Diese frequenzabhängigen Größen ließen sich auch in (3a) einfügen, es gäbe dann aber keine Möglichkeit mehr zur Transformation in (1). $[k]$ und $[c]$ enthalten frequenzabhängige Steifigkeits- bzw. Dämpfungskoeffizienten, c_s ist die Wellengeschwindigkeit.

Nach der Herleitung der Eigenschaften des Makroelementes soll gezeigt werden, daß eine auf diesem Makroelement gela-

gerte Struktur [s. System III in Abb. 2], die qualitativ gleiche Beanspruchung aus dem Lastfall Erdbeben erfährt wie das rechenstechnisch sehr aufwendige Gesamtsystem bestehend aus Boden und Bauwerk [s. System II in Abb. 2], wenn eine identische Freifelderregung (\bar{v}^F) an der Geländeoberkante vorliegt.

2.1 Kondensation im Frequenzraum

In Anlehnung an /3/ lautet die Bewegungsgleichung aufgeschlüsselt für die unterschiedlichen Systembereiche laut Abb. 2:

System I

$$\begin{bmatrix} [\bar{S}_{bb}] & [\bar{S}_{bi}] \\ [\bar{S}_{ib}] & [\bar{S}_{ii}] & [\bar{S}_{iu}] \\ & [\bar{S}_{ui}] & [\bar{S}_{uu}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\bar{v}_b) \\ (\bar{v}_i) \\ (\bar{v}_u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (0) \\ (0) \\ (\bar{R}_u) \end{pmatrix} \quad (4a)$$

(\bar{v}) ist die gesuchte Deformationsgröße in totaler Schreibweise, die Indizes b, i und u beziehen sich auf die in Abb. 2 gekennzeichneten Bereiche. An den Knoten b des Bodens wird die Baustruktur angebunden, der Verlauf dieser Verbindung kann beliebig sein, also auch eine Einbettung darstellen, i kennzeichnet die inneren Bodenpunkte und u die Randpunkte, in denen die Bodenerregung eingeleitet wird. Die Deformationsgröße (\bar{v}_u) von System I ist identisch mit der Freifelddeformation (\bar{v}_u^F) an gleicher Stelle, $(\bar{v}_u) = (\bar{v}_u^F)$. Deshalb lassen sich die Reaktionskräfte (\bar{R}_u) , die auf den Bodenausschnitt wirken, auch durch die Freifelderregung ausdrücken:

$$\begin{bmatrix} [\bar{S}_{bb}] & [\bar{S}_{bi}] \\ [\bar{S}_{ib}] & [\bar{S}_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\bar{v}_b) \\ (\bar{v}_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (0) \\ -[\bar{S}_{iu}] (\bar{v}_u^F) \end{pmatrix} \quad (4b)$$

Entsprechend lautet die Bewegungsgleichung für das Gesamtsystem [s. System II in Abb. 2], wenn die Indizes s Knoten der Bauwerkstruktur und f Knoten des zum Bauwerk gehörenden Fundaments, welches direkt gekoppelt ist mit den Bodenknoten b identischer Topologie, bezeichnen:

System II:

$$\begin{bmatrix} [\bar{S}_{ss}] & [\bar{S}_{sf}] \\ [\bar{S}_{fs}] & [\bar{S}_{ff}] + [\bar{S}_{bb}] \\ & [\bar{S}_{ib}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\bar{v}_s) \\ (\bar{v}_{fb}) \\ (\bar{v}_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0) \\ (0) \\ -[\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u^F) \end{bmatrix} \quad (5)$$

(\bar{v}_{fb}) definiert das Verhalten der Knoten f bzw. b, die sowohl dem Bauwerk als auch dem Boden zugeordnet sind. Die entsprechende Bewegungsgleichung für das reduzierte System III lautet entsprechend (4b):

System III:

$$\begin{bmatrix} [\bar{S}_{ss}] & [\bar{S}_{sf}] \\ [\bar{S}_{fs}] & [\bar{S}_{ff}] + [\bar{S}_{xx}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\tilde{v}_s) \\ (\tilde{v}_{fb}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0) \\ [\bar{S}_{bi}] (\bar{v}_x) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Die Tilde \sim soll ausdrücken, daß (6) zunächst einmal als Näherung aufgefaßt wird:

$$(\tilde{v}_s) \sim (\bar{v}_s)$$

$$(\tilde{v}_{fb}) \sim (\bar{v}_{fb})$$

Die Steifigkeitsmatrix $[\bar{S}_{xx}]$ soll die zur Identität notwendig anzuordnende Makrosteifigkeit bedeuten, die Verschiebungsgröße (\bar{v}_x) die zum identischen Verhalten von System II und System III notwendige Erregungsgröße, die an System III aufzubringen ist.

Die Summation für System I (4b) gibt:

$$[\bar{S}_{bb}](\bar{v}_b) + [\bar{S}_{bi}](\bar{v}_i) = (0) \quad (a)$$

$$[\bar{S}_{ib}](\bar{v}_b) + [\bar{S}_{ii}](\bar{v}_i) = -[\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u^F) \quad (b)$$

a) Aus (a) folgt:

$$(\bar{v}_b) = -[\bar{S}_{bb}]^{-1}[\bar{S}_{bi}](\bar{v}_i)$$

Eingesetzt in (b):

$$-[\bar{S}_{ib}][\bar{S}_{bb}]^{-1}[\bar{S}_{bi}](\bar{v}_i) + [\bar{S}_{ii}](\bar{v}_i) = -[\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u^F)$$

d. h.:

$$\{-[\bar{S}_{ib}] [\bar{S}_{bb}]^{-1} [\bar{S}_{bi}] + [\bar{S}_{ii}]\} (\bar{v}_i) = -[\bar{S}_{iu}] (\bar{v}_u^F)$$

$$(\bar{v}_i) = -\{[\bar{S}_{ii}] - [\bar{S}_{ib}] [\bar{S}_{bb}]^{-1} [\bar{S}_{ib}]\}^{-1} [\bar{S}_{iu}] (\bar{v}_u^F)$$

$$(\bar{v}_b) = [\bar{S}_{bb}]^{-1} [\bar{S}_{bi}] \{[\bar{S}_{ii}] - [\bar{S}_{ib}] [\bar{S}_{bb}]^{-1} [\bar{S}_{ib}]\}^{-1} [\bar{S}_{iu}] (\bar{v}_u^F) \quad (c)$$

b) Aus (b) folgt:

$$(\bar{v}_i) = [\bar{S}_{ii}]^{-1} \{-[\bar{S}_{ib}] (\bar{v}_b) - [\bar{S}_{iu}] (\bar{v}_u^F)\}$$

Eingesetzt in (a)

$$[\bar{S}_{bb}] (\bar{v}_b) + [\bar{S}_{bi}] [\bar{S}_{ii}]^{-1} \{-[\bar{S}_{ib}] (\bar{v}_b)\} + [\bar{S}_{bi}] [\bar{S}_{ii}]^{-1} \cdot \{-[\bar{S}_{iu}] (\bar{v}_u^F)\} = (0)$$

d. h.:

$$\{[\bar{S}_{bb}] - [\bar{S}_{bi}] [\bar{S}_{ii}]^{-1} [\bar{S}_{ib}]\} (\bar{v}_b) = [\bar{S}_{bi}] [\bar{S}_{ii}]^{-1} [\bar{S}_{iu}] (\bar{v}_u^F)$$

$$(\bar{v}_b) = \{[\bar{S}_{bb}] - [\bar{S}_{bi}] [\bar{S}_{ii}]^{-1} [\bar{S}_{ib}]\}^{-1} [\bar{S}_{bi}] [\bar{S}_{ii}]^{-1} [\bar{S}_{iu}] (\bar{v}_u^F) \quad (d)$$

(d) enthält die Dekonvolution der Erregung des Freifeldes am unteren Rand (\bar{v}_u^F) auf die Oberfläche (\bar{v}^F) .

Der in (d) enthaltene Term

$$[\bar{S}_{bi}] [\bar{S}_{ii}]^{-1} [\bar{S}_{iu}] (\bar{v}_u^F) = -[\bar{S}_{bu}] (\bar{v}_u^F) \quad (e)$$

entspricht der Dekonvolution der Erregung des unteren Randes (\bar{v}_u^F) auf den Kopplungsbereich der Punkte b. $[\bar{S}_{bu}]$ ist die rechnerisch schwer aufstellbare, dynamische Kopplungssteifigkeitsmatrix zwischen der Oberfläche und dem fiktiven Rand u. Nach dem Verfahren der Matrixaufteilung /4/ besteht Identität für die Teilmatrizen:

$$[\bar{S}_{bb}]^{-1} [\bar{S}_{bi}] \{[\bar{S}_{ii}] - [\bar{S}_{ib}] [\bar{S}_{bb}]^{-1} [\bar{S}_{ib}]\}^{-1} = \{[\bar{S}_{bb}] - [\bar{S}_{bi}] [\bar{S}_{ii}]^{-1} \cdot [\bar{S}_{ib}]\}^{-1} [\bar{S}_{bi}] [\bar{S}_{ii}]^{-1}$$

Somit läßt sich die Erregung der zum Boden gehörenden Fundamentpunkte durch (c) oder (d) ausdrücken.

Die Summation für System II (5) gibt:

$$[\bar{S}_{ss}](\bar{v}_s) + [\bar{S}_{sf}](\bar{v}_{fb}) = (0) \quad (\alpha)$$

$$[\bar{S}_{fs}](\bar{v}_s) + \{[\bar{S}_{ff}] + [\bar{S}_{bb}]\}(\bar{v}_{fb}) + [\bar{S}_{bi}](\bar{v}_i) = (0) \quad (\beta)$$

$$[\bar{S}_{ib}](\bar{v}_{fb}) + [\bar{S}_{ii}](\bar{v}_i) = -[\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u^F) \quad (\gamma)$$

Aus (γ) folgt:

$$(\bar{v}_i) = [\bar{S}_{ii}]^{-1} \{ -[\bar{S}_{ib}](\bar{v}_{fb}) - [\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u^F) \}, \text{ und}$$

eingesetzt in (β) ergibt sich:

$$[\bar{S}_{fs}](\bar{v}_s) + \{[\bar{S}_{ff}] + [\bar{S}_{bb}]\}(\bar{v}_{fb}) + [\bar{S}_{bi}][\bar{S}_{ii}]^{-1} \{ -[\bar{S}_{ib}](\bar{v}_{fb}) \} + \\ + [\bar{S}_{bi}][\bar{S}_{ii}]^{-1} \{ -[\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u^F) \} = (0)$$

oder

$$[\bar{S}_{fs}](\bar{v}_s) + \{[\bar{S}_{ff}] + [\bar{S}_{bb}] - [\bar{S}_{bi}][\bar{S}_{ii}]^{-1}[\bar{S}_{ib}]\}(\bar{v}_{fb}) = [\bar{S}_{bi}][\bar{S}_{ii}]^{-1} \cdot [\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u^F)$$

Der Ansatz:

$$[\bar{S}_{xx}] = [\bar{S}_{bb}] - [\bar{S}_{bi}][\bar{S}_{ii}]^{-1}[\bar{S}_{ib}] \quad (7)$$

führt auf:

$$[\bar{S}_{fs}](\bar{v}_s) + \{[\bar{S}_{ff}] + [\bar{S}_{xx}]\}(\bar{v}_{fb}) = [\bar{S}_{bi}][\bar{S}_{ii}]^{-1}[\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u^F) \\ = -[\bar{S}_{bu}](\bar{v}_u^F) \quad (8)$$

Wie gezeigt wird, besteht Identität zwischen den Schreibweisen für das Gesamtsystem (8) und für das reduzierte System mit Makroelement (6), wenn in (6) die für das Bodensystem I ermittelte Fundamentunterkantenverformung (\bar{v}_x) eingesetzt wird. Zunächst lautet (d) mit (7) und (e):

$$[\bar{S}_{xx}](\bar{v}_b) = -[\bar{S}_{bu}](\bar{v}_u) \quad (9a)$$

Durch den Ansatz:

$$(\bar{v}_x) = [\bar{S}_{ii}]^{-1}[\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u) \quad (9b)$$

gilt die Identität zwischen der 2. Gleichung (6) und (8) als nachgewiesen; System III und System II verhalten sich also identisch, d. h.

$$(\bar{v}_{fb}) = (\bar{v}_{fb})$$

$$(\bar{v}_s) = (\bar{v}_s)$$

Mit (9a), (9b) und (e) läßt sich die rechte Seite von (6) auch darstellen:

$$\begin{aligned} [\bar{S}_{bi}](\bar{v}_x) &= [\bar{S}_{bi}][\bar{S}_{ii}]^{-1}[\bar{S}_{iu}](\bar{v}_u) \\ &= -[\bar{S}_{bu}](\bar{v}_u) \end{aligned} \quad (9c)$$

und

$$(\bar{v}_x) = -[\bar{S}_{bi}]^{-1}[\bar{S}_{bu}](\bar{v}_u) \quad (9d)$$

oder

$$(\bar{v}_x) = [\bar{S}_{bi}]^{-1}[\bar{S}_{xx}](\bar{v}_b) \quad (9e)$$

Das kondensierte System mit Makroelement kann folgendermaßen erregt werden:

$$\cdot (\bar{P}_x) = [\bar{S}_{bi}](\bar{v}_x) \quad (\text{nach (6)})$$

(\bar{v}_x) wird je nach Vorgabe gemäß (9d) oder (9e) ermittelt und an den Knoten i, die mit den Knoten b gekoppelt sind, eingeleitet

$$\cdot (\bar{P}_x) = -[\bar{S}_{bu}](\bar{v}_u) \quad (\text{nach (9d)})$$

gemäß (8) oder (e) wird die Freifelderregung (\bar{v}_u) des Randes u direkt benutzt

$$\cdot (\bar{P}_x) = [\bar{S}_{xx}](\bar{v}_b) \quad (\text{nach (9e)})$$

(\bar{v}_b) wird als ohne Baustruktur am Rand b ermittelte Erregung an den entsprechenden Freiheitsgraden der Knoten des Makroelementes eingeleitet.

Laut Definition (3a) ist in der Steifigkeitsmatrix $[\bar{S}_{xx}]$ des Makroelementes keine Dämpfung enthalten, wenn mit $\beta \rightarrow 0$ der elastische Halbraum simuliert werden soll. Dann müßten die Steifigkeits- und Masseneigenschaften des Makroelementes allein den Halbraum beschreiben, wenn eine Abstrahlungsdämpfung nicht vorhanden ist.

Dieser Ansatz ist eine äußerst konservative Näherung; Untersuchungen mit dem Modell M_4 nach /1/ haben bestätigt,

daß eine zusätzliche, nach der elastischen Halbraumtheorie mit starrer Fundamentplatte eingeführte Abstrahlungsdämpfung bei einer Variation zwischen 0 und 30 % die Ordinaten der Response Spektren für die Struktur erheblich abmindern kann. Von entscheidendem Einfluß auf die dynamische Systembeanspruchung ist nach /2/ die Materialdämpfung der Struktur. Verläßt man weiter die Fiktion des elastischen Halbraums und setzt $\beta \neq 0$ in die Steifigkeitsmatrix $[S_{xx}]$ ein, so tritt der Dämpfungsterm für die Materialdämpfung des Bodens hinzu, wodurch die Ordinate weiter reduziert wird. Allgemein kann eine Abstrahlungsdämpfung der Modelle M_5 und M_6 durch geeignete Ansätze für die den Bodenausschnitt der nach l, r und u abgrenzenden Bereiche nach /5/, /6/, /7/, /8/ mittels viskoser oder konsistenter Randelemente ermittelt werden, wozu die Randbedingungen in System I bzw. in System II dann konsistent zu wählen sind, und die seitliche Halbraumbelastung zusätzlich anzubringen ist. Die Abstrahlungsdämpfung entspricht dann der Kondensation von Dämpfungseigenschaften der an l, r und u definierten Randelemente auf die Knoten b.

2.2 Kondensation im Zeitraum

Eine entsprechende Kondensation in ein Makroelement bei Annahme eines biegeweichen Fundamentes kann auch im Zeitraum vorgenommen werden. Von entscheidender rechentechnischer Bedeutung ist, daß die Bodenkondensation nur einmalig vorzunehmen ist, so daß die zeitliche Integration der die Struktur beschreibenden Differentialgleichung in einem stark reduzierten System möglich ist.

Zunächst sollen die Grundzüge der Kondensation /9/ wiederholt werden. (1) lautet aufgesplittet, wenn Freiheitsgrade mit dem Index 2 aus (10) herauskondensiert werden sollen:

$$\begin{bmatrix} [M_{11}] & [M_{12}] \\ [M_{21}] & [M_{22}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_1) \\ (\ddot{v}_2) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{11}] & [C_{12}] \\ [C_{21}] & [C_{22}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_1) \\ (\dot{v}_2) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_1) \\ (v_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (P_1) \\ (P_2) \end{pmatrix} \quad (10)$$

Die Transformation

$$(v_2) = [T](v_1) \quad (11)$$

führt auf die kondensierte Form:

$$[M_{11}^*](\ddot{v}_1) + [C_{11}^*](\dot{v}_1) + [K_{11}^*](v_1) = (P_1^*) \quad (12)$$

wobei:

$$[M_{11}^*] = [M_{11}] + [T]^T[M_{21}] + [M_{12}][T] + [T]^T[M_{22}][T] \quad (12a)$$

$$[C_{11}^*] = [C_{11}] + [T]^T[C_{21}] + [C_{12}][T] + [T]^T[C_{22}][T] \quad (12b)$$

$$[K_{11}^*] = [K_{11}] + [T]^T[K_{21}] + [K_{12}][T] + [T]^T[K_{22}][T] \quad (12c)$$

$$(P_1^*) = (P_1) + [T]^T(P_2) \quad (12d)$$

Wenn die Trägheits- und Dämpfungskräfte sowie die äußeren Kräfte der zweiten Gleichung von (10) vernachlässigt werden, folgt:

$$(v_2) = -[K_{22}]^{-1}[K_{21}](v_1) \quad (13)$$

oder

$$[T] = -[K_{22}]^{-1}[K_{21}] \quad (14)$$

für die sogenannte statische Kondensation. Die Koeffizienten lauten dann:

$$[M_{11}^*] = [M_{11}] - [K_{12}][K_{22}]^{-1}[M_{21}] - [M_{12}][K_{22}]^{-1}[K_{21}] + (12e) \\ + [K_{12}][K_{22}]^{-1}[M_{22}][K_{22}]^{-1}[K_{21}]$$

$$[C_{11}^*] = [C_{11}] - [K_{12}][K_{22}]^{-1}[C_{21}] - [C_{12}][K_{22}]^{-1}[K_{21}] + (12f) \\ + [K_{12}][K_{22}]^{-1}[C_{22}][K_{22}]^{-1}[K_{21}]$$

$$[K_{11}^*] = [K_{11}] - [K_{12}][K_{22}]^{-1}[K_{21}] \quad (12g)$$

$$(P_1^*) = (P_1) - [K_{12}][K_{22}]^{-1}(P_2) \quad (12h)$$

In der kondensierten Form sind alle Koeffizientenmatrizen nichtdiagonal, d. h. es besteht Kopplung zwischen allen Freiheitsgraden. Folgende Vereinfachungen sind möglich:

. Anwendung von Punktmassen (lumped mass):

$$d. h. [M_{21}] = [M_{12}] = [0]$$

$$[M_{11}^*] = [M_{11}] + [K_{12}][K_{22}]^{-1}[M_{22}][K_{22}]^{-1}[K_{21}] \quad (12i)$$

- . Anwendung der Rayleigh Dämpfung für eine Frequenz, wobei die Dämpfung proportional zur Masse eingesetzt wird:

$$[C_{11}^*] = [C_{11}] + [K_{12}][K_{22}]^{-1}[C_{22}][K_{22}]^{-1}[K_{21}] \quad (12j)$$

(a) und (b) haben jetzt weiter nichtdiagonale Form.

- . Vernachlässigung der Massen, die mit den kondensierten Freiheitsgraden gekoppelt sind, als kinematische Kondensation:

$$[M_{11}^*] \approx [M_{11}] \quad (12k)$$

$$[C_{11}^*] \approx [C_{11}] \quad (12l)$$

Diese Maßnahme wird für den vorliegenden Fall aber nicht relevant, da die Erdbebenerregungen (v_u^F) , (v^F) direkt durch Dekonvolution zwischen Bodenausschnittober- und -unterkante miteinander in Beziehung stehen.

Die dynamischen Grundgleichungen im Zeitraum lauten gemäß ihrer Darstellung im Frequenzraum bei gleicher Bezeichnungweise für:

System I, nach (4b)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [M_{bb}] & [M_{bi}] \\ [M_{ib}] & [M_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_b) \\ (\ddot{v}_i) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{bb}] & [C_{bi}] \\ [C_{ib}] & [C_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_b) \\ (\dot{v}_i) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{bb}] & [K_{bi}] \\ [K_{ib}] & [K_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_b) \\ (v_i) \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} (0) \\ -[M_{iu}](\ddot{v}_u^F) - [C_{iu}](\dot{v}_u^F) - [K_{iu}](v_u^F) \end{pmatrix} \quad (15) \end{aligned}$$

System II, nach (5)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{bb}] & [M_{bi}] \\ & [M_{ib}] & [M_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_s) \\ (\ddot{v}_{fb}) \\ (\ddot{v}_i) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sf}] \\ [C_{fs}] & [C_{ff}] + [C_{bb}] \\ & [C_{ib}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_s) \\ (\dot{v}_{fb}) \\ (\dot{v}_i) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{bb}] & [K_{bi}] \\ & [K_{ib}] & [K_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s) \\ (v_{fb}) \\ (v_i) \end{pmatrix} = \end{aligned}$$

$$= \begin{pmatrix} (0) \\ (0) \\ -[M_{iu}](\ddot{v}_u^F) - [C_{iu}](\dot{v}_u^F) - [K_{iu}](v_u^F) \end{pmatrix} \quad (16)$$

System III, nach (6)

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_s) \\ (\ddot{v}_{fb}) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sf}] \\ [C_{fs}] & [C_{ff}] + [C_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_s) \\ (\dot{v}_{fb}) \end{pmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s) \\ (v_{fb}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (0) \\ [M_{bi}](\ddot{v}_x) + [C_{bi}](\dot{v}_x) + [K_{bi}](v_x) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

Die Kondensation der Freiheitsgrade i von Gleichung (16) entsprechend (12), (12i), (12g), (12f), (12h) mit

$$[T] = -[K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \quad (18)$$

$$(P_1) = (0)$$

$$(P_2) = -[M_{iu}](\ddot{v}_u^F) - [C_{iu}](\dot{v}_u^F) - [K_{iu}](v_u^F)$$

führt für System II auf:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{bb}] + [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[M_{ii}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_s) \\ (\ddot{v}_{fb}) \end{pmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sf}] \\ [C_{fs}] & [C_{ff}] + [C_{bb}] - [C_{ib}^T] - [C_{bi}^T] + [C_{ii}^T] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_s) \\ (\dot{v}_{fb}) \end{pmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{bb}] - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s) \\ (v_{fb}) \end{pmatrix} = \\ & = \begin{pmatrix} (0) \\ [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}\{[M_{iu}](\ddot{v}_u^F) + [C_{iu}](\dot{v}_u^F) + [K_{iu}](v_u^F)\} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

wobei

$$[C_{ib}^T] = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[C_{ib}] \quad (19a)$$

$$[C_{bi}^T] = [C_{bi}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \quad (19b)$$

$$[C_{ii}^T] = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[C_{ii}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \quad (19c)$$

$$[M_{ii}^T] = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[M_{ii}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \quad (19d)$$

$$[K_{ii}^T] = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \quad (19e)$$

$$[C_v^T] = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[C_v][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \quad (19f)$$

$[C_v]$ für die viskosen Randdämpfer

In (19) ist eine Diagonalisierung insofern schon enthalten, als die Koppelterme i,b zu Null gesetzt sind:

$$[M_{ib}] = [M_{bi}] = [0].$$

Mit den Bezeichnungen

$$\begin{aligned} [K_{xx}] &= [K_{bb}] - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \\ &= [K_{bb}] - [K_{ii}^T] \end{aligned} \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} [M_{xx}] &= [M_{bb}] + [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[M_{ii}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \\ &= [M_{bb}] + [M_{ii}^T] \end{aligned} \quad (20b)$$

$$[C_{xx}] = [C_{bb}] - [C_{ib}^T] - [C_{bi}^T] + [C_{ii}^T] + [C_v^T] \quad (20c)$$

lautet (19):

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_s) \\ (\ddot{v}_{fb}) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sf}] \\ [C_{fs}] & [C_{ff}] + [C_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_s) \\ (\dot{v}_{fb}) \end{pmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s) \\ (v_{fb}) \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} (0) \\ [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}\{[M_{iu}](\ddot{v}_u^F) + [C_{iu}](\dot{v}_u^F) + [K_{iu}](v_u^F)\} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

Die Kondensation der Freiheitsgrade i für System I überführt (15) wiederum bei Vernachlässigung der Koppelterme i, b , d. h.

$$[M_{ib}] = [M_{bi}] = [0]$$

in:

$$\begin{aligned} & \{ [M_{bb}] + [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[M_{ii}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \} (\ddot{v}_b) + & (22) \\ & + \{ [C_{bb}] - [C_{ib}^T] - [C_{bi}^T] + [C_{ii}^T] \} (\dot{v}_b) + \\ & + \{ [K_{bb}] - [K_{bi}]^{-1}[K_{ii}]^{-1}[K_{ib}] \} (v_b) = \\ & = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1} \{ [M_{iu}](\ddot{v}_u^F) + [C_{iu}](\dot{v}_u^F) + [K_{iu}](v_u^F) \} = (0) \end{aligned}$$

Zwischen den Differentialgleichungen der Systeme II und III, (21) und (17) besteht Übereinstimmung, wenn (20a), (20b), (20c) erfüllt sind und die rechten Seiten identisch sind, d. h.,

$$\begin{aligned} & [M_{bi}](\ddot{v}_x) + [C_{bi}](\dot{v}_x) + [K_{bi}](v_x) = \\ & = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1} \{ [M_{iu}](\ddot{v}_u^F) + [C_{iu}](\dot{v}_u^F) + [K_{iu}](v_u^F) \} \end{aligned} \quad (23)$$

Die Belastung läßt sich andererseits einfach mit Hilfe der Dekonvolution, vorgenommen am System I, ausdrücken, wenn (20a), (20b), (20c) in (22) eingesetzt werden:

$$\begin{aligned} & [M_{xx}](\ddot{v}_b) + [C_{xx}](\dot{v}_b) + [K_{xx}](v_b) = & (24) \\ & = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1} \{ [M_{iu}](\ddot{v}_u^F) + [C_{iu}](\dot{v}_u^F) + [K_{iu}](v_u^F) \} \end{aligned}$$

Aus dem Vergleich von (23) und (24) geht hervor, daß die Belastung

$$(P_x) = [M_{bi}](\ddot{v}_x) + [C_{bi}](\dot{v}_x) + [K_{bi}](v_x) \quad (25a)$$

, die für System II ermittelt wurde, durch die Belastung

$$(P_x) = [M_{xx}](\ddot{v}_b) + [C_{xx}](\dot{v}_b) + [K_{xx}](v_b) \quad (25b)$$

ersetzt werden kann, das Makroelement also direkt mit (v_b) an der Fundamentunterkante erregt wird.

In Anlehnung an die üblichen, allgemein formulierten Computerprogramme, denen eine Basiserregung als Randbedingung zugrunde liegt, wird eine Trennung der totalen Bewegungs-

größe (v) in einen dynamischen Anteil (v^d) und einen quasistatischen (v^s) vorgenommen //11//:

$$(v) = (v^d) + (v^s) \quad (26)$$

Der quasistatische Anteil ist dann nicht mehr Bestandteil der Differentialgleichung und wird auf deren Lösung überlagert. Mit (25b) lautet dann die Bewegungsgleichung für System III nach (17):

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_s^d) \\ (\ddot{v}_{fb}^d) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sf}] \\ [C_{fs}] & [C_{ff}] + [C_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_s^d) \\ (\dot{v}_{fb}^d) \end{pmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s^d) \\ (v_{fb}^d) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (0) \\ [M_{xx}](\ddot{v}_b) + [C_{xx}](\dot{v}_b) + [K_{xx}](v_b) \end{pmatrix} - \\ & - \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_s^s) \\ (\ddot{v}_{fb}^s) \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sf}] \\ [C_{fs}] & [C_{ff}] + [C_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_s^s) \\ (\dot{v}_{fb}^s) \end{pmatrix} - \\ & - \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s^s) \\ (v_{fb}^s) \end{pmatrix} \quad (27) \end{aligned}$$

Die quasistatische Lösung folgt aus dem massenträgheitsunabhängigen Ansatz:

$$-[K](v^s) + [K_{xx}](v_b) = (0) \quad , \quad \text{also aus}$$

$$- \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s^s) \\ (v_{fb}^s) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [0] \\ [K_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (0) \\ (v_b) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (0) \\ (0) \end{pmatrix} \quad (28)$$

und lautet somit:

$$(v^s) = [r](v_b) \quad , \quad (29a)$$

wobei

$$[r] = \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{xx}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [0] \\ [K_{xx}] \end{bmatrix} \quad (29b)$$

Der dynamische Anteil (27) lautet dann:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_s^d) \\ (\ddot{v}_{fb}^d) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sf}] \\ [C_{fs}] & [C_{ff}] + [C_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_s^d) \\ (\dot{v}_{fb}^d) \end{pmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s^d) \\ (v_{fb}^d) \end{pmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [M_{xx}] \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{xx}] \end{bmatrix} \\
 & \cdot [r] \begin{Bmatrix} \{0\} \\ (\ddot{v}_b) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} [0] \\ [C_{xx}] \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sf}] \\ [C_{fs}] & [C_{ff}] + [C_{xx}] \end{bmatrix} [r] \begin{Bmatrix} \{0\} \\ (\dot{v}_b) \end{Bmatrix} \quad (30)
 \end{aligned}$$

Im Falle eines steifigkeitsproportionalen Dämpfungsansatzes würde der geschwindigkeitsproportionale Belastungsterm auf der rechten Seite verschwinden. Für den Fall einer massenproportionalen Dämpfung bliebe dieser Term allerdings bestehen; er könnte aber näherungsweise vernachlässigt werden. Gleichung (30) beinhaltet die Bewegungsgleichung infolge multipler Fußpunkterregung. Sie vereinfacht sich unter Annahme identischer Fußpunkterregung v_b

$$(1^s)v_b = [K]^{-1}[K_{xx}](1^b)v_b \quad (31)$$

und Weglassen der Dämpfungserregung auf:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_s^d) \\ (\ddot{v}_{fb}^d) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sf}] \\ [C_{fs}] & [C_{ff}] + [C_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_s^d) \\ (\dot{v}_{fb}^d) \end{pmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{xx}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s^d) \\ (v_{fb}^d) \end{pmatrix} = \quad (32) \\
 & \left\{ \begin{pmatrix} (0) \\ [M_{xx}](1^b) \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] + [M_{xx}] \end{bmatrix} (1^s) \right\} \ddot{v}_b = - \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sf}] \\ [M_{fs}] & [M_{ff}] \end{bmatrix} (1^s) \ddot{v}_b
 \end{aligned}$$

v_b ist die Größe der identischen Fußpunkterregung, (1^s) bzw. (1^b) sind die teilbesetzten Einheitsvektoren der Struktur allein bzw. der Struktur-Makroelement-Kopplung für vertikale oder horizontale Erregung.

Die Vorgabe der identischen Fußpunkterregung ist ein Näherungsansatz, der nur dann zulässig ist, wenn das Bodenprofil horizontal gleiche Kenngrößen beinhaltet und das Rechenmodell über eine seitlich ausreichend entfernte Begrenzung verfügt.

Die Berücksichtigung der Dämpfung des Makroelementes erfolgt zweckmäßigerweise auch hier über die Schreibweise nach Rayleigh, es ist

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (33)$$

Somit lautet die Dämpfungsmatrix in (32) mit ihren Teilmatrizen bei Verwendung diagonalisierter Massen nach (19a) bis (19e):

$$[C] = \begin{bmatrix} [C_{11}] & [C_{12}] \\ [C_{21}] & [C_{22}] \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$[C_{11}] = \alpha_s [M_{ss}] + \beta_s [K_{ss}] \quad (35a)$$

$$[C_{12}] = \beta_s [K_{sf}] \quad (35b)$$

$$[C_{21}] = \beta_s [K_{fs}] \quad (35c)$$

$$[C_{22}] = \alpha_b [M_{ff}] + \beta_s [K_{ff}] + \alpha_b [M_{bb}] + \beta_b [K_{bb}] \quad (35d)$$

$$- [C_{ib}^T] - [C_{bi}^T] + [C_{ii}^T]$$

Die Indizes s und b beziehen sich auf Struktur und Boden. Die Teilmatrizen aus (35d) sind gemäß Rayleigh bei Massendiagonalisierung:

$$[C_{ib}^T] = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1} \alpha_b [M_{ib}] + [K_{bi}][K_{ii}]^{-1} \beta_b [K_{ib}]$$

$$= \beta_b [K_{ii}^T]$$

$$[C_{bi}^T] = \alpha_b [M_{bi}][K_{ii}]^{-1} [K_{ib}] + \beta_b [K_{bi}][K_{ii}]^{-1} [K_{ib}]$$

$$= \beta_b [K_{ii}^T]$$

$$[C_{ii}^T] = [K_{bi}][K_{ii}]^{-1} \alpha_b [M_{ii}][K_{ii}]^{-1} [K_{ib}]$$

$$+ [K_{bi}][K_{ii}]^{-1} \beta_b [K_{ii}][K_{ii}]^{-1} [K_{ib}]$$

$$= \alpha_b [M_{ii}^T] + \beta_b [K_{ii}^T]$$

Somit wird aus (35d)

$$[C_{22}] = \alpha_s [M_{ff}] + \beta_s [K_{ff}] + \alpha_b [M_{bb}] + \beta_b [K_{bb}] + \alpha_b [M_{ii}^T] - \beta_b [K_{ii}^T] \quad (35e)$$

Da in $[K_{xx}]$ (20a) der Term $[K_{bb}] - [K_{ii}^T]$ bereits vorhanden ist, können Integrationsoperatoren mit implizitem Rayleigh-Ansatz für die Dämpfung auch bei der Berechnung von Makroelementensystemen unverändert weiter benutzt werden. Die Skalare α_b , β_b können so gewählt werden, daß das bezogene Dämpfungsmaß des Bodens

$$\beta_{i,i} = \frac{\alpha_b}{2\omega} + \frac{\beta_b \omega}{2} \quad (36)$$

für definierte Eigenfrequenzen ω die gewünschten Einhängewerte gibt.

3. Beispiele

Die Beispiele werden mit dem modifizierten Code ASHSD /12/ für das in Abb. 3 ohne Boden gezeigte, rotationssymmetrische Strukturmodell eines Kernkraftwerkgebäudes im Zeitbereich berechnet. Das Beschleunigungsverhalten wird in den markierten 4 Systempunkten, maximale vertikale Spannungen werden in den Elementen 1 bis 8 der Bodenplatte ermittelt.

Bodenkennwerte:

$$G = 400 \text{ MN/m}^2$$

$$\rho = .0019 \text{ MNs}^2/\text{m}^4$$

$$\nu = .40 \quad (\text{Poisson Zahl})$$

$$T = 20 \cdot 5.0 = 100 \text{ m (Modell } M_6) \text{ (Tiefe der Bodenschicht)}$$

$$= 6 \cdot 5.0 = 30 \text{ m (Modell } M_5)$$

Strukturkennwerte:

$$E = 30000 \text{ MN/m}^2$$

$$M = 138. \text{ MNs}^2/\text{m}$$

$$\nu = .20$$

$$R = 31.4 \text{ m (Außenradius)}$$

$$d = 3. \text{ m (Fundamentplattendicke)}$$

$$t = 1.8 \text{ m (Containmentdicke)}$$

Lastfall Einzellast

Knoten 4 wird durch eine horizontale Belastung, deren Zeitverlauf dem von der RSK vorgegebenen Flugzeugabsturzdiagramm entspricht, beaufschlagt, s. Abb. 4. Das System wird für die 1. Harmonische berechnet. Bei der Ermittlung der Steifigkeit des Makroelementes (20a) wird die Steifigkeitsmatrix $[K_{ii}]$ nicht invertiert, sondern das Produkt $[K_{ii}]^{-1}[K_{ib}]$ wird durch Triangulieren von $[K_{ii}]$ und vektorieller Multiplikation des rückeingesetzten $[K_{ib}]$ ermittelt. Der einzige Unterschied von der Einzellast zum Lastfall Erdbeben besteht darin, daß die angreifende Belastung nicht kondensiert wird, sondern direkt auftrifft.

Das Antwortverhalten eines dynamisch erregten Systems wird integral mittels Response Spektren aufgezeigt. Alle vorliegenden Response Spektren haben als Parameter 0 %, 2 %, 4 % und 7 % Dämpfung mit einer Integrationsendzeit von

0.21 s, also der dreifachen Belastungsendzeit. Abb. 5 bis Abb. 8 zeigen Response Spektren für den im Bereich der Boden-Bauwerk-Trennlinie liegenden Punkt 1 [s. Abb. 3] an der Fundamentunterkante. Das Spektrum in Abb. 5 gemäß Modell M_6 wird als Sollvorgabe betrachtet, nach der die Genauigkeit der aus Modell M_4 und System III ermittelten Spektren bewertet wird. Die Bezeichnung System III bedeutet, daß die Berechnung des Modells M_6 mit dem Makroelement erfolgt. Das Spektrum für Modell M_4 , dessen fiktive Bodenauflagerung aus Halbraumparametern ermittelt ist, liegt beinahe vollständig oberhalb des Spektrums für Modell M_6 , ist also für alle Frequenzbereiche als konservativ zu bezeichnen, vgl. Abb. 6. Das Spektrum nach System III zeigt die gleiche Tendenz, wenn für die kondensierten Massen $[M_{xx}]$ nur die Diagonale benutzt wird, vgl. Abb. 7. Im Frequenzbereich kleiner 10 Hz ist System III genauer, im Frequenzbereich 10 Hz bis 30 Hz zeigt System III höhere Amplituden. Die genaueste Annäherung zu Modell M_6 zeigt im Mittel Abb. 8 für System III mit konsistenter Massekopplung von $[M_{xx}]$, wobei dann im Bereich zwischen 1 bis 10 Hz allerdings eine Abweichung der Amplituden nach unten auftritt. Einschränkend gilt für Modell M_4 , daß nicht alle Bereiche seiner Spektren konservativ sind, also keine höhere Amplituden ausweisen, so liegen z. B. die Amplituden für Punkt 4 im Bereich kleiner 10 Hz unter den von Modell M_6 .

Der Vergleich ohne Strukturdämpfung führt zu unrealistisch hohen Unterschieden in den Modellberechnungen, realistische Dämpfungsvorgaben bewirken eine deutliche Annäherung der Ergebnisse.

Abb. 9 bis Abb. 11 zeigen Response Spektren für den im Bereich der Kranbahn liegenden Punkt 2, wobei für das gesamte Boden-Bauwerk-System 7 % Dämpfung angesetzt werden, wenn die Einhängung der Dämpfung nach Rayleigh bei $\nu_1 = 1$ Hz und $\nu_2 = 1.78$ Hz erfolgt. Für diesen Fall einer sehr hoch angesetzten Dämpfung ist eine gute Übereinstimmung zwischen den Spektren der drei Systeme zu verzeichnen.

Die Berechnungen haben gezeigt, daß wesentliche Beanspruchungen für die Struktur zeitlich erst nach Beendigung der Belastung auftreten, also nach einer Integrationsdauer von

0.07 s bis 0.21 s. Bezüglich der Integrationszeit hat die Dämpfung bis 0.07 s nur einen sehr geringen Einfluß auf die Beschleunigungsamplitude, wesentlichen Einfluß gewinnt die Dämpfung erst oberhalb 0.07 s Schwingungsdauer. Dieses Strukturverhalten zeigt sich auch bei nichtlinearem Materialverhalten /14/.

Tabelle I zeigt die Abweichungen der ermittelten maximalen Spannung in vertikaler Richtung bezogen auf das Modell M_6 in %. Negative Vorzeichen bedeuten, daß das verwendete Modell zu kleine Werte ergibt. Bei fehlender Dämpfung führt das einfache FEM-Analogon M_4 zu den geringsten Abweichungen (wenn hier keine Abstrahlungsdämpfung vorhanden ist [Bezeichnung: M_4^-]), während für System III zu hohe Werte ermittelt werden.

Nach Einführen einer Dämpfung jedoch folgen für System III die geringsten Spannungsabweichungen, fehlende Abstrahlungsdämpfung wird hier durch die Materialdämpfung in ihrer dissipativen Eigenschaft ersetzt. Die beste Annäherung ergibt sich, wenn die Masse konsistent kondensiert wird [Bezeichnung: System III^{**}]. Die relativ hohen Abweichungen von Modell M_4 lassen sich aus der Tatsache erklären, daß die maximalen Spannungen durch die Einführung der Dämpfung größenordnungsmäßig sehr viel kleiner geworden sind, so daß geringe Unterschiede zu einer relativ hohen prozentualen Abweichung führen können. Der Vergleich zeigt, daß das einfache Modell M_4 im Innenbereich zu große und im Außenbereich zu kleine Spannungen ergibt, während für das kondensierte Modell System III außen größere prozentuale Abweichungen ermittelt werden.

Für den Lastfall Einzellast sind die Knoten an der Basis u starr gefesselt und an den Rändern l und r horizontal verschieblich gelagert. Die Berechnungen haben gezeigt, daß die gewählte Größe des Bodenausschnittes bezüglich der genauen Ermittlung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung ausreichend ist, da eine Änderung der Randbedingungen durch Einführen viskoser Dämpfer an den Rändern /7/ nur geringen Einfluß auf die berechneten Beanspruchungsgrößen hat. Alle Untersuchungen für den Lastfall Einzellast beziehen sich auf die Mo-

delle M_4 und M_6 , System III ist somit ein kondensiertes Modell M_6 .

Lastfall Erdbeben

Die in Abb. 12 vorgegebene Freifelderregung aus dem TAFT-Erdbeben /15/ führt in grober Näherung auf das Response Spektrum nach KTA 2201 mit einer Einhängung von ca. 0.20 m/s^2 . Bei horizontaler Erregung wird die 1. Harmonische angesprochen. Die Fouriertransformierte des Zeitverlaufes für das TAFT-Erdbeben zeigt wesentliche Amplituden im Bereich 0.5 bis 12 Hz. Die Boden-Bauwerk-Wechselwirkung ist für den Lastfall Erdbeben ein Quellenproblem /3/; die folgenden Ergebnisse zeigen deshalb, daß anders als beim Lastfall Flugzeugabsturz die Diskretisierung des Bodenausschnittes von entscheidendem Einfluß auf die ermittelte Boden-Bauwerk-Wechselwirkung ist. Sowohl für die Berechnung am nichtkondensierten Gesamtsystem als auch am Makroelement ist beim Lastfall Erdbeben die Größe des Bodenausschnittes:

- die Bodentiefe,
- die Bodenbreite und
- das Verhältnis von Tiefe zu Breite

entsprechend der Vorgabe der Modelle M_5 und M_6 ein wesentlicher Einflußparameter. Das gilt besonders dann, wenn wie vorliegend zur Eineichung des numerischen Verfahrens unrealistisch konservativ ohne Systemdämpfung gerechnet wird. Mit zunehmender Dämpfung reduziert sich auch der Einfluß der Größe des Bodenausschnittes. Die Simulation einer Abstrahlungsdämpfung an der Bodenausschnittsumrandung durch Einführen viskoser Dämpfer an den Rändern l , r sowie u führt gleichfalls zu einer Verringerung der Bedeutung des gewählten Bodenausschnittes. Die Bewertung der Ergebnisse der Boden-Bauwerk-Wechselwirkungseffekte ist auch deshalb für den Lastfall Erdbeben schwieriger, weil anders als beim Lastfall Einzellast unterschiedliche Randbedingungen unterschiedliche Ergebnisse bewirken können. Für die hier ausschließlich horizontale Erdbebenerregung sind die Bezeichnungen der benutzten Randbedingungen BC als Prinzip aus Tabelle II ersichtlich. Die aus viskosen Randdämpfern /7/ gemäß (20c) ermittelten Makroelementdämpfung $[C_{xx}]$ bildet dann mit der Makroelementsteifigkeit $[K_{xx}]$ und der Makroelementmasse $[M_{xx}]$ ein Tripel, $[C_{xx}]$ simuliert somit die

erforderliche Abstrahlungsdämpfung. Es hat sich als sinnvoll erwiesen, die seitlichen Ränder zur Simulation der Kompatibilität mit dem außerhalb des Rechenmodells seitlich liegenden Boden vertikal starr zu lassen und nur horizontale viskose Dämpfer anzubringen (BC = 2, BC = 3, BC = 4). Die Bodenelemente haben außerhalb des Radius $R = 31.4$ m ein Verhältnis Tiefe/Breite = 5. m/6. m. Modell M_5 hat 10 Bodensäulen neben dem Kernkraftwerksmodell und 6 Schichten, Modell M_6 hat 20 Bodensäulen neben dem Kernkraftwerksmodell und 20 Schichten. Die Rechnungen zeigen, daß von einer bestimmten Breite des Bodenausschnittes ab, die mechanische Darstellung des seitlichen Randes bedeutungslos wird, egal ob er vollkommen frei ist oder horizontale und vertikale Dämpfer hat.

Die Randbedingung BC = 3 unterdrückt die Reflektion vertikal schwingender Wellen vom unteren Rand her. Interessant ist die in ihrer mechanischen Bedeutung irreguläre Randbedingung BC = 4, da gemäß (16) keine rechte Seite und somit keine Einleitung der Erregung an der Basis möglich ist. Die Kondensation neutralisiert diesen Fehler aber dadurch, daß sich unabhängig von der Randbedingung u immer die gewünschte Freifelderregung an der Oberfläche einstellt.

Alle vorliegenden für den Lastfall Erdbeben durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf den Fall identischer Freifelderregung nach (32). Das strukturdynamische Verhalten des Systems wird wie gehabt durch Response Spektren integral dargestellt, der Parameter der Spektren beträgt jeweils 0 %, 2 %, 4 %, 7 % Dämpfung. 0 % Strukturdämpfung ist der zum numerischen Systemvergleich benutzte, in der Praxis aber unrealistisch niedrige Dämpfungswert. Die in Abb. 13 bis 45 aus den genannten Vergleichsgründen erneut zu 0 % gewählte Systemdämpfung ist wiederum extrem konservativ. Abb. 47 bis 51 zeigen den Einfluß von 1 % Bodendämpfung auf das numerische Ergebnis, Abb. 52 bis 80 zeigen den Einfluß einer Systemdämpfung von 7 %. Die Bezeichnung System III bedeutet, daß die Berechnung der Modelle M_5 und M_6 mit dem Makroelement erfolgt.

Für die Berechnung der seismischen Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit realistisch gewählten Struktursteifigkeiten

existieren keine exakten Vergleichswerte; von numerischem Einfluß sind diesbezüglich die Feinheit des gewählten Elementnetzes, die Ausdehnung des zugrundegelegten Bodenausschnittes, sowie die für den Bodenausschnitt vorgegebenen Randbedingungen. Vorliegend wird als genaueste Referenz das am Modell M_6 mit der Randbedingung $BC = 3$ ermittelte Ergebnis zum Vergleich benutzt. Auf eine Anwendung von Modell M_6 mit der im mechanischen Sinn irregulären Randbedingung $BC = 4$ wird verzichtet, obwohl nach dem in /13/ geschilderten Verfahren auch bei bezüglich der Krafteinleitung falscher aber bezüglich der Wechselwirkungsberechnung richtiger Randbedingung die gewünschte Freifelderregung iterativ ermittelt werden könnte.

Das Verhalten von Punkt 1 im Fundament folgt aus Abb. 13 bis 30 bei fehlender Systemdämpfung. Während für Modell M_6 in [Abb. 13] und M_5 [Abb. 16] keine Abstrahlungsdämpfung vorhanden ist, wird ihr Einfluß auf eine Amplitudenreduzierung in Abb. 14, 15 für M_6 bzw. 17, 18 für M_5 deutlich. Abb. 17 zeigt, daß bei Modell M_5 seitliche horizontale Dämpfer nur wenig Einfluß haben.

Die entsprechenden Ergebnisse bei Verwendung des Makroelementes (System III) folgen aus Abb. 19 bis 28. Die in Abb. 20 und 25 zugrundegelegte diagonalisierte Massenkopplung von $[M_{xx}]$ zeigt, daß die Ergebnisse dieser Berechnung auf die Ergebnisse des Feder-Dämpfer-Modells (lumped parameter) M_4 tendieren, wenn keine Abstrahlungsdämpfung angesetzt wird, s. Abb. 29. Dieser Vergleich macht deutlich, wie bedeutsam die richtige Ankopplung der Bodenmasse an die Makrostruktur ist, eine Forderung die das Feder-Dämpfer-Modell M_4 nicht erfüllen kann. Im weiteren wird deshalb auf die Darstellung der diagonalisierten Massenkopplung des Bodens verzichtet, d. h. nur die konsistente Massenkopplung verwendet.

Bei Anwendung der viskosen Randdämpfer sind die Ergebnisse von Modell M_6 und M_5 [s. Abb. 15 und 18], sowie die Ergebnisse des Makroelementes System III (M_6) und System III (M_5) [s. Abb. 22 und 27] ausreichend übereinstimmend. Die entscheidende Amplitudenreduzierung wird von M_6 durch die horizontalen seitlichen viskosen Dämpfer und von M_5 durch die vertikalen

unteren viskosen Dämpfer bewirkt. Horizontale untere viskose Dämpfer bewirken keine weitere wesentliche Änderung der Ergebnisse [s. Abb. 23 und 28].

Abb. 29 und 30 zeigen die Ergebnisse des Feder-Dämpfer-Modells bei Verwendung der Halbraumparameter für Steifigkeit K und Abstrahlungsdämpfung C nach Newmark/Rosenblueth, wobei in Abb. 29 jede Abstrahlungsdämpfung fehlt. Der Vergleich dieser beiden Bilder verdeutlicht die Notwendigkeit der richtigen Abschätzung für die Abstrahlungsdämpfung. Unterschiedliche Formeln für die Abstrahlungsdämpfung führen zu unterschiedlichen Werten für C , gekoppelt mit der im jeweiligen Analogon zu verwendenden unterschiedlichen Formel für die Bodensteifigkeit K , starres Fundamentverhalten immer vorausgesetzt. Von gleicher Bedeutung auf das zu erwartende Ergebnis wie die Größen von C und K ist die Art ihrer Verteilung längs des Fundamentradius. Da im vorliegenden Fall der horizontalen Erregung nur der Kipp- und der Horizontalmodus in die Berechnung eingehen, können die Parameter des Kippmodus durch vertikale Bodensteifigkeiten K_v und vertikale Abstrahlungsdämpfer C_v beschrieben werden, wobei vorliegend willkürlich eine konstante Verteilung vorausgesetzt wird. Zur Erfüllung dieser Bedingungen wird der Code ASHSD /12/ um TRUSS-Elemente und um konzentrierte Dämpfer erweitert. Der Vergleich der Abb. 29 und 30 zeigt den Einfluß der verwendeten Abstrahlungsdämpfung für $\beta_\varphi = 12.1 \%$ auf die sog. Starrkörperbeschleunigung im Bereich 20 Hz bis 40 Hz. Allerdings liegen für diesen Bereich die Beanspruchungswerte in nichtkonservativer Weise unterhalb der Werte aus der neueren Berechnung nach Modell M_6 , vgl. Abb. 15.

Der Einfluß des Kippmodus ohne Dämpfung für die Struktur wird an Abb. 31 bis 45 für den Punkt 2 an der Kranbahn verdeutlicht. Im Prinzip führt die Bildfolge zu den gleichen Aussagen wie für Punkt 1; die Amplituden der Spektren von Punkt 2 sind lediglich größer und die Ergebnisübereinstimmung zwischen den Modellen M_6 und M_5 und ihren Makroelementen System III (M_6) und System III (M_5) vermindert sich bei Vergleich mit jeweils gleichen Randbedingungen. Die Amplituden bei Verwendung des Makroelements liegen dann unter denen des Referenzsystems. Erst durch Einführen horizontaler unterer viskoser Dämpfer ($BC = 4$) ergibt sich auch für das

Makroelement System III (M_6) eine gute Übereinstimmung [s. Abb. 40] mit dem am genauesten eingestuftem Referenzsystem M_6 [s. Abb. 33], die vergleichbar mit der Genauigkeit des Feder-Dämpfer-Modells M_4 [s. Abb. 45] ist. Bei Anwendung des Makroelementes ist also aus Genauigkeitsgründen die Randbedingung $BC = 4$ zu wählen.

Trotz der im vorliegenden Fall guten Übereinstimmung der Ergebnisse des Feder-Dämpfer-Modells M_4 wird die Anwendung des Makroelementes als konsistenter Lösungsweg für das Gesamtsystem bevorzugt; andere Steifigkeits- und Massenverhältnisse können bezüglich der Ergebnisgenauigkeit von M_4 zu anderen Bewertungen führen. Diese Aussage wird durch die Möglichkeit einer Variation der Formeln für die Halbraumparаметer und deren je nach Notwendigkeit veränderbaren Zuordnung am biegeweichen System bestärkt.

Die Frage, ob eine kleine, begrenzte Bodendämpfung in der Lage ist, Reflektionen an den Rändern des Bodenausschnittes zu unterdrücken und die Berechnung somit unabhängig von den gewählten Randbedingungen zu machen, beantworten Abb. 46 bis 51 für die Randbedingung $BC = 1$. Während am Modell M_6 1 % Dämpfung am Gesamtsystem angesetzt wird [s. Abb. 46 und 49], ist am Makroelement 1 % Dämpfung nur auf den Boden bezogen [s. Abb. 47, 48, 50 und 51], d. h. $\beta_s = 0$ in (35a), (35b), (35c), (35d), (35e). Deshalb ist die Veränderung der Amplituden bei Modell M_6 auch deutlicher als am Makroelement, sie erreicht aber trotzdem nicht die mittels viskoser Randdämpfer ermittelten Werte, vgl. Abb. 15 und 33. Bei lokal unterschiedlichen Dämpfungsmaßen für die Strukturbereiche muß der Integrationsoperator mit impliziter Rayleigh-Dämpfung um explizite Terme erweitert werden. Die Dämpfungsmatrix reduziert sich auf die Teilmatrix (35e) und lautet

$$[C_{22}] = \alpha_b [M_{bb}] + \beta_b [K_{bb}] + \alpha_b [M_{ij}^T] - \beta_b [K_{ij}^T] \quad (37)$$

In (37) bewirken die ersten drei Terme eine Amplitudenreduzierung, während der Term $-\beta_b [K_{ij}^T]$ als negative Dämpfung eine Amplitudenerhöhung bedeuten kann. Hierbei ist eine gewisse Instabilität durch Anwendung der Rayleigh-Dämpfung dann möglich, wenn die höhere Einhängfrequenz zu klein gewählt wird. Je nach Vorgabe von α_b und β_b ist somit eine Dominanz

des amplitudenreduzierenden Massenterms bzw. des verstärkenden Steifigkeitsterms möglich. Quantitativ bewirkt 1 % Bodendämpfung keine wesentliche Amplitudenveränderung; diese Aussage gilt in gleicher Weise für einen kleinen Bodenausschnitt (M_5) als auch für den großen Bodenausschnitt (M_6). Die Größe des hier gewählten Bodenausschnittes hat bezüglich des Dämpfungseffektes reflektierter Wellen bei 1 % Dämpfung keinen wesentlichen Einfluß. Während die Ordinaten des größeren kondensierten Systems M_6 mit $\beta_b = 0$ allein durch den Massenterm in (37) mit (36) (Einhängung an der vierundzwanzigsten Eigenfrequenz) vermindert werden [s. Abb. 47, Abb. 50], steigen für das kleinere kondensierte System M_5 mit $\alpha_b \neq 0$, $\beta_b \neq 0$ (Einhängung in der ersten und achten Eigenfrequenz) die Ordinaten sogar ein wenig an [s. Abb. 48, Abb. 51].

Die Modelle M_4 , M_5 , M_6 haben unterschiedliche Eigenwerte, so daß bei Unterlassung der Identifikation identischer Eigenformen unterschiedliche Einhängungen der Dämpfung möglich sind:

Eigenfrequenz Hz	Modell M_4	Modell M_5	Modell M_6
ω_1	2.25	2.69	1.13
ω_2	4.58	3.84	1.73
ω_8	19.74	7.14	3.67
ω_{16}			5.63
ω_{24}			6.70

Den Einfluß einer höheren Dämpfung bei Einhängung der Rayleigh-Hyperbel an der ersten und zweiten Eigenfrequenz zeigen Abb. 52 bis 73 für 7 % Dämpfung am Gesamtsystem. Um den Vergleich zu den Ergebnissen von Modell M_6 durchzuführen, ist es erforderlich, für die iterative Dekonvolution nach /13/ am Modell M_6 mit viskosen Randdämpfern eine Verfeinerung vorzunehmen. Das Verfahren konvergiert für die Randbedingungen $BC = 2$ und $BC = 3$, wenn - bedingt durch den in diesem Fall erforderlichen erhöhten Frequenzgehalt der Basiserregung v_u - die Elementtiefe auf 4 m reduziert und die Integrationsschrittweite auf $\Delta t = .005$ s halbiert wird. Bei 7 % Systemdämpfung vermindert sich der Einfluß der Randbedingungen des Bodens, der Einfluß reflektierter Wellen

wird durch die Bodendämpfung weitgehend ausgeschlossen, wie besonders für den tiefen Boden Abb. 52 bis 54 am Modell M_6 und Abb. 55 und 56 auch für den flacheren Boden am Modell M_5 für Punkt 1 zeigen. Der Grad der Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Gesamtsysteme mit Dämpfung und ihren Kondensationssystemen entspricht weitgehend den ohne Dämpfung erzielten Resultaten. Die beste Übereinstimmung der Kondensationssysteme folgt wieder aus $BC = 4$, wenn als Referenzmodell M_6 mit Randbedingung $BC = 3$ zugrundegelegt wird. Im Frequenzbereich größer 3 Hz folgt aus dem Makroelementsystem allerdings eine asymptotische Amplitudenabminderung. Die Übereinstimmung kann aber durch gezielte Veränderung der Rayleigh-Einhängung verbessert werden (s. Ende des Kapitels). Vertikale viskose Basisdämpfer haben keinen Einfluß auf das Ergebnis für Punkt 1. Das Spektrum des Feder-Dämpfer-Modells M_4 ist nicht in allen Frequenzbereichen konservativ, vgl. Abb. 61 für Punkt 1.

Die im Falle von 7 % Systemdämpfung für Punkt 1 gefundenen Ergebnisbewertungen gelten weitgehend auch für Punkt 2 [s. Abb. 62 bis 73]. Durch die Dämpfung wird auch diese Amplitude stark verringert, behält aber weiter ihr gegenüber Punkt 1 höheres Niveau. Für Punkt 2 wird anders als für Punkt 1 der Einfluß der vertikalen viskosen Basisdämpfer am Rand u sichtbar [s. Abb. 69 und 72]. Das Spektrum des Feder-Dämpfer-Modells M_4 zeigt für Punkt 2 eine mit dem Makroelement vergleichbare Übereinstimmung mit dem Spektrum des Referenzmodells M_6 .

Maximale vertikale Spannungen an der Bodenplatte sind Tabelle III zu entnehmen. Der Vergleich mit den Ergebnissen des Lastfalles Einzellast dokumentiert eine höhere Variation im Lastfall Erdbeben, wenn als Referenz wiederum die Rechnung von Modell M_6 zugrundegelegt wird.

Bei fehlender Systemdämpfung führt die Kondensation von M_6 zu einer genaueren Übereinstimmung als die Kondensation von M_5 . Die konservativste Lösung aus der Kondensation von M_6 folgt aus Randbedingung $BC = 1$ (Zeile 3) bzw. aus einer Verbesserung durch Einführen von 1 % Dämpfung (Zeile 7). Die im Durchschnitt genaueste, aber nicht in jedem Element konservative Lösung beinhaltet Randbedingung $BC = 4$ (Zeile 6). Die größten Abweichungen ergeben sich für das Feder-Dämpfer-

Modell M_4 , die Spannungen des Innenbereiches sind um ein Vielfaches zu hoch, während die Spannungen im Außenbereich nicht in jedem Fall konservativ sind (Zeile 17). Bei einer Systemdämpfung von 7 % führt die Kondensation von M_6 wiederum zu der genaueren Übereinstimmung, s. Zeile 23 für Randbedingung $BC = 4$. Lediglich Element 2 zeigt generell nicht konservative Werte, hervorgerufen durch die in diesem Element gegenüber dem ungedämpften System ermittelten höheren Spannungen (Zeile 33). Das Feder-Dämpfer-Modell M_4 führt wiederum zu den größten Abweichungen gegenüber dem Referenzsystem (Zeile 32).

Die Tabelle zeigt, daß die genaueste Kondensationslösung aus M_6 folgt, während die Kondensation aus M_5 eine größere Streuung ergibt. Die Ergebnisgenauigkeit beider Modelle übertrifft die von Modell M_4 deutlich, die größten Abweichungen von M_4 erscheinen im Innenbereich.

Den Einfluß höherer Einhängfrequenzen auf die Dämpfungshyperbel und somit auf das strukturelle Dämpfungsverhalten bei 7 % Dämpfung zeigen Abb. 74 bis Abb. 80 an Punkt 2, da für Punkt 2 dieser Einfluß ausgeprägter ist als für Punkt 1. Während bis zur Abb. 73 die Einhängung nur in den jeweils ersten beiden Eigenfrequenzen erfolgt, wird nun in der ersten und achten bzw. vierundzwanzigsten Eigenfrequenz eingehängt. Abb. 74 zeigt im Vergleich zu Abb. 64 für das größere Gesamtsystem Modell M_6 , daß hier eine modifizierte Einhängung keine wesentliche Änderung des Response Spektrums bewirkt; anders verhalten sich das kondensierte System und das Feder-Dämpfer-Modell. Für das kondensierte System läßt sich feststellen, daß mit anwachsender Frequenz des höheren Einhängwertes auch die Amplituden größer werden und die Übereinstimmung zum genaueren Referenzsystem Modell M_6 [Abb. 64 oder Abb. 74] deutlich steigt, vgl. Abb. 75 bei Einhängung an der ersten und zweiten Eigenfrequenz von Modell M_4 und Abb. 76 bei Einhängung an der ersten und vierundzwanzigsten Eigenfrequenz von Modell M_6 . Diese im asymptotischen Bereich verbesserte Lösung liegt zwischen dem Referenzmodell M_6 und dem nichtkonservativen Feder-Dämpfer-Modell M_4 , s. Abb. 73.

Eine weitere Genauigkeitssteigerung des kondensierten Systems folgt aus der Vorgabe unterschiedlicher Dämpfungswerte für den Strukturbereich und für den Bodenbereich. Abb. 77 zeigt die Erhöhung des Response Spektrums, wenn für die Struktur an der ersten und vierundzwanzigsten und für den Boden an der ersten und sechzehnten Eigenfrequenz von Modell M_6 eingehängt wird. Ein im Vergleich zum Referenzmodell gleichwertiges Ergebnis kann für das Makroelement dann erzielt werden, wenn der Koppelterm der Bodendämpfung $\beta_b [K_{bb}]$ aus (35e) vernachlässigt wird, [s. Abb. 78 bei Einhängung in der vierundzwanzigsten Eigenfrequenz]. Die Massenterme $\alpha_b [M_{bb}]$ und $\alpha_b [M_{ii}^T]$ in (35e) beeinflussen das Antwortverhalten nur unwesentlich.

Den Einfluß der Dämpfungseinhängung auf das Feder-Dämpfer-Modell M_4 zeigen Abb. 79 und Abb. 80. Wird der Einhängung die erste und zweite Eigenfrequenz von M_6 zugrundegelegt, zeigt sich eine deutliche Abminderung der Amplitude [s. Abb. 79]. Andererseits erhöhen sich die Amplituden von M_4 nicht wesentlich, wenn an der ersten und vierundzwanzigsten Eigenfrequenz von M_6 eingehängt wird [s. Abb. 80], M_4 bleibt somit im Vergleich zum Referenzsystem M_6 bezüglich der Asymptote immer auf der nicht konservativen Seite.

Um die mit dem Makroelement erzielbar hohe Ergebnisgenauigkeit zu erreichen, ist

- . die Randbedingung $BC = 4$ einzuhalten
- . die Einhängung der Rayleigh-Hyperbel an einer höheren zweiten Frequenz vorzunehmen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Boden-Bauwerk-Wechselwirkung kann wie vorgeschlagen konsistent durch Steifigkeits-, Masse- und Dämpfungseigenschaften eines lokalen, räumlich begrenzt anzusetzenden Bodenausschnittes, hier als Makroelement bezeichnet, genau erfaßt werden. Voraussetzung dafür ist die Annahme vertikal propagierender Wellen. Das vorgeschlagene Verfahren ist besonders für die Berechnung biegeweicher Fundamente bei statischer oder dynamischer Belastung geeignet, für dynamische Probleme wird hier die Integration im Zeitbereich gezeigt. Fundamente können beliebige Formen annehmen; Makroelemente sind für zweidimensionale, rotationssymmetrische und dreidimensionale Problemstellungen geeignet. Wechselwirkungsprobleme zwischen benachbarten Bauwerken sind durch entsprechende Definition von konsistenten Makroelementen in gleicher Weise zu berechnen.

Die Bodenausschnittsdarstellung als Finite Elemente erlaubt durch Wahl geeigneter Umgrenzungslinien im Bereich des Fundamentes auch die Berücksichtigung von Einbettungseffekten. Nichtlinearitäten im Verhalten der Baukonstruktion sind bei Integration im Zeitbereich beliebig erfaßbar, für die Lösung nichtlinearer Probleme im Frequenzraum existieren iterative Verfahren /10/. Bei nichtlinearem Verhalten im Bodenbereich oder im Kopplungsbereich Fundament/Boden ist die in Abb. 2 definierte Trennlinie zwischen Fundamentunterkante und Boden einfach so zu verschieben, daß die Struktur quasi um diesen nichtlinearen Bodenbereich erweitert wird. Hierdurch wird durch Vergrößerung des nichtkondensierten Bereiches der numerische Aufwand bei der Integration vergrößert. In diesem Fall ist von einer multiplen Fußpunkterregung (30) auszugehen, die gemäß /13/ an dem in /3/ beschriebenen Grundsystem zu ermitteln ist.

Der den Bodenausschnitt umgebende Boden kann bei Integration im Zeitraum durch die Kondensation von an diesem Rand nach /7/ anzubringenden viskosen Dämpfern erfaßt werden. Die entsprechende Verwendung frequenzabhängiger Randbedingungen und ihre transformierte Darstellung im Zeitraum erfordert einen höheren Aufwand /6/.

Die statische und die kinematische Kondensation, erforderlich für die Integration im Zeitraum, sind Näherungsansätze /9/. Vergleiche von Spannungen und Beschleunigungen zeigen die Verbesserung der ermittelten Ergebnisse bei Anwendung konsistenter Makroelemente. Bewertungsmaßstab für die Qualität des benutzten Rechenmodells ist der Grad der Übereinstimmung der Ergebnisse des FEM-Modells M_6 (Abb. 1) mit den Ergebnissen des FEM-Analog Modells M_4 einerseits und den Ergebnissen des Makroelements (Abb. 2) andererseits.

Für eine systematische Anwendung des Makroelementes könnte ein standortabhängiger Atlas für Steifigkeit, Masse und Dämpfung in Abhängigkeit von der Bauwerksabmessung und der Diskretisierungsart erstellt werden. Je nach dynamischer Beanspruchung ermöglicht die Anwendung des Makroelementes einen erheblichen Rechenzeitgewinn (für den Lastfall Erdbeben z. B. um einen Faktor größer 10) gegenüber der nicht kondensierten Lösung.

Dank

Die vorliegende Arbeit ist eine konsequente Entwicklung aus langjährigen Untersuchungen auf dem Gebiet der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung bei Kernkraftwerken. Den Herren Dr. F. Buchhardt, Dr. G. Magiera und Dr. W. Rücker sei an dieser Stelle für ihre fachliche Diskussionsbereitschaft gedankt.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. G. Magiera für die optimale Auswertung und Bereitstellung der sehr rechenzeitintensiven EDV-Prozeduren und Frau I. Rybczynski für die sorgfältige Anfertigung der Formeln und des Textes. Für die freundliche Zusammenarbeit und umgehende Unterstützung durch das BAM-Rechenzentrum sei hier ebenso Herr K. Martini genannt.

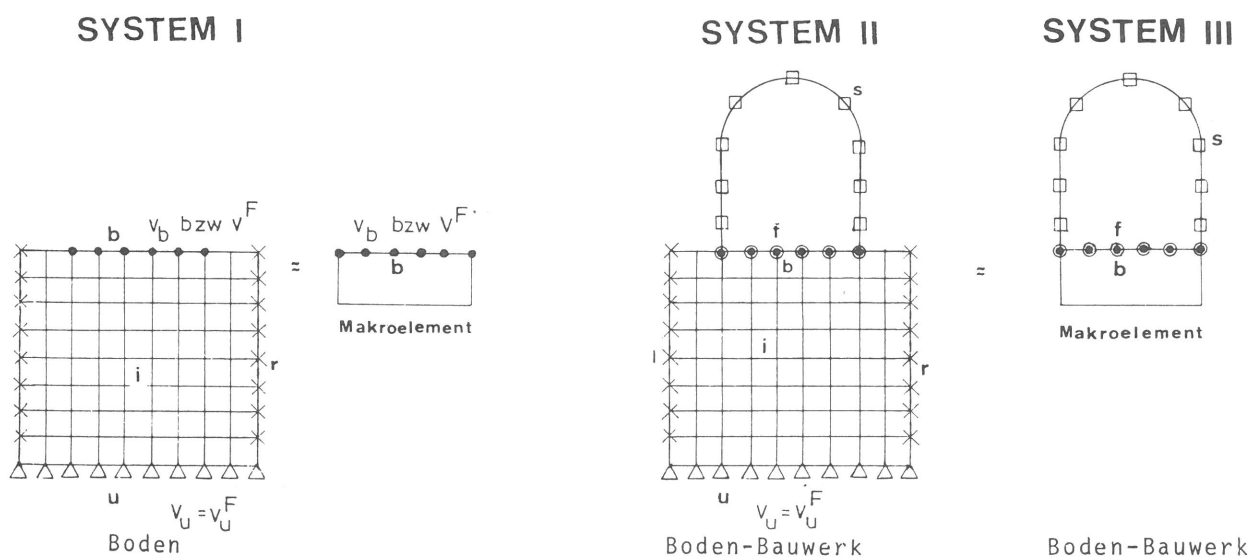
Literatur

- / 1/ W. Matthees, F. Buchhardt, G. Magiera
A three-dimensional soil structure lumped parameter
analysis for earthquake events
8th International Conference on Structural Mechanics
in Reactor Technology (SMiRT) 1985, Paper K5/5
- / 2/ F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak
Ermittlung elastischer Grenztragbereiche unter dem
Zusatzlastfall Erdbeben
Forschungsvorhaben SR 355 für den BMU, 1986
- / 3/ J. P. Wolf
Dynamic Soil-Structure Interaction
Prentice-Hall Inc., 1985
- / 4/ J. S. Przemieniecki
Theory of Matrix Structural Analysis
McGraw-Hill, 1968
- / 5/ G. Waas
Semifinite Elemente für statische und dynamische
Probleme in der Bodenmechanik aus: Finite Elemente
in der Baupraxis,
Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, S. 185-195, 1978
- / 6/ H. C. Gerhardt, D. Hosser, G. König, S. Liphardt
Methodenuntersuchungen zur erdbebensicheren Auslegung
von Kernkraftwerken
Förderungsvorhaben BMFT RS 308, König und Heunisch,
1979
- / 7/ W. Rücker
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb
schienegebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Unter-
suchung des Einflusses einzelner Parameter auf die
Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen
Umgebung
Forschungsbericht Nr. 64 der Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM), 1980
- / 8/ W. Matthees, G. Magiera
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dyna-
mische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerks-
bauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
Forschungsbericht Nr. 71 der Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM), 1980
- / 9/ M. F. Nelson
The Use of Condensation Techniques für solving Dynamic
Problems
International Conference on Vehicle Structural
Mechanics, S. 145-153, 1974
- /10/ W. Matthees
A strategy for the solution of soil dynamic problems
involving plasticity by transform
Int. J. for Numerical Methods in Engineering Vol. 18,
S. 1601-1611, 1985

- /11/ R. W. Clough, J. Penzien
Dynamic of Structures
McGraw-Hill, 1975
- /12/ ASHSD 2: Dynamic Stress Analysis of Axisymmetric
Structures under arbitrary Loading
Berkeley, 1975
- /13/ W. Matthees, G. Magiera
Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung
für den Zeitraum
zur Veröffentlichung vorgesehen
- /14/ F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber
Interaction between material nonlinearity and
damping for aircraft impact analysis
8th SMiRT, Paper J5/5, 1985
- /15/ F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber
Zum Einfluß von Dämpfung und Materialnichtlinearität
am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben
bei Kernkraftwerken
4. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Erd-
beben-Ingenieurwesen und Bodendynamik e. V.,
DGEb-Publikation Nr. 2
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Berlin, 1987

3-D-Code		Rotationssymmetrischer Code		
Klassisches Halbraum Analogon	FEM Analogon	FEM Analogon	FEM Standort Diskretisierung	
<p>M₁ M₂ M₃</p> <p>DOF Anzahl der Freiheitsgrade NP Anzahl der Knotenpunkte</p> <p>22 NP 36 NP 800 NP 57 DOF 198 DOF 4000 DOF</p>	<p>M₄ M₅ M₆</p> <p>119 NP 206 NP 710 NP 338 DOF 567 DOF 2023 DOF</p>			

Abb. 1 Diskrete Strukturmodelle zur Darstellung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung



SYMBOL	BEDEUTUNG
△	feste Randbedingung u . Anbringen der seismischen Basiserregung
×	△ horizontal verschiebliches Widerlager zur Simulation der Randbedingung i, r bei horizontaler Erdbebenbeanspruchung
◁	△ vertikal verschiebliches Widerlager zur Simulation der Randbedingung i, r bei vertikaler Erdbebenbeanspruchung
•	Bodenrandpunkte b zur Kopplung des Bauwerks
□	innere Systempunkte i des Bodens
○	Bauwerksrandpunkte f zur Kopplung des Bodens (Fundament)
□	Bauwerkspunkte s (Struktur)

Abb. 2 Darstellung der Gesamt- und Teilstrukturen

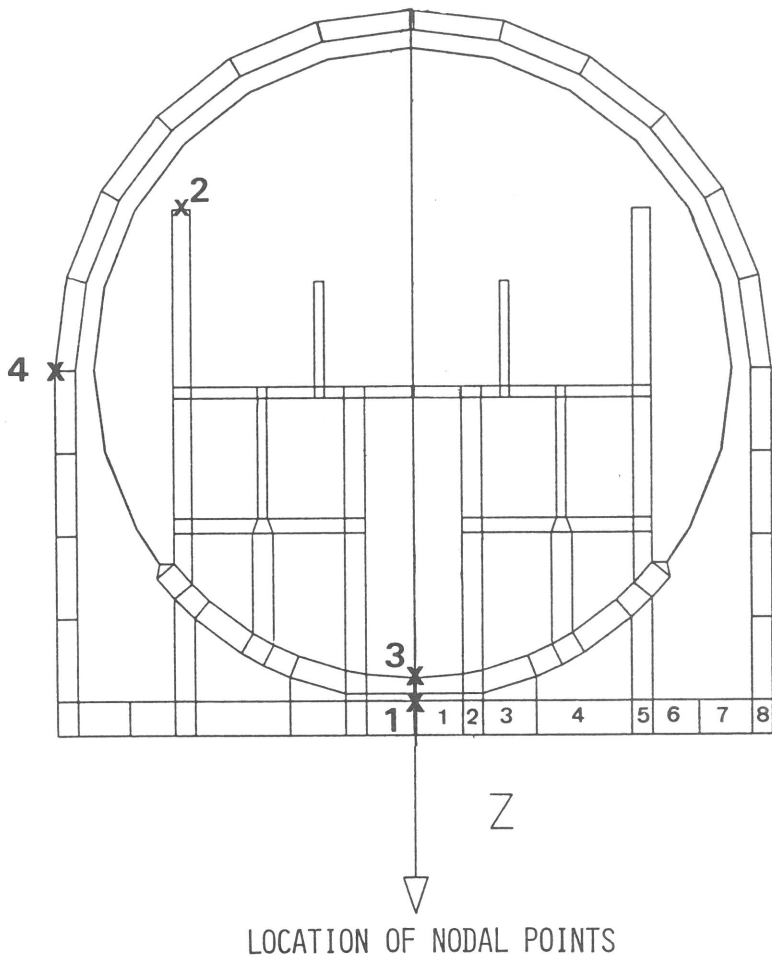


Abb. 3
Lage von Knotenpunkten
und Elementen

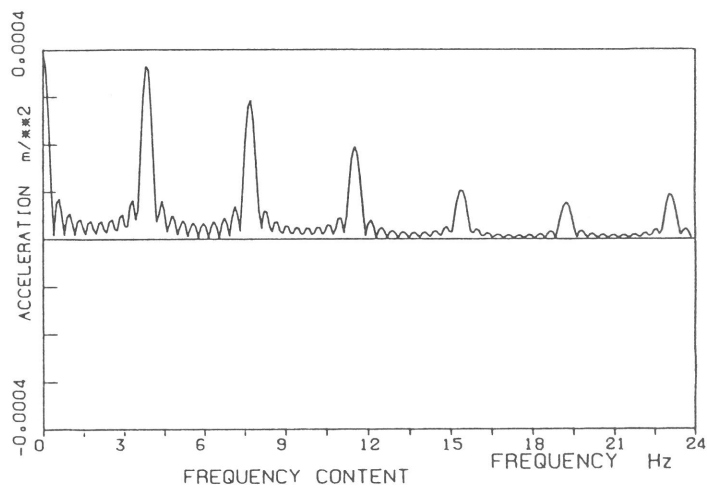
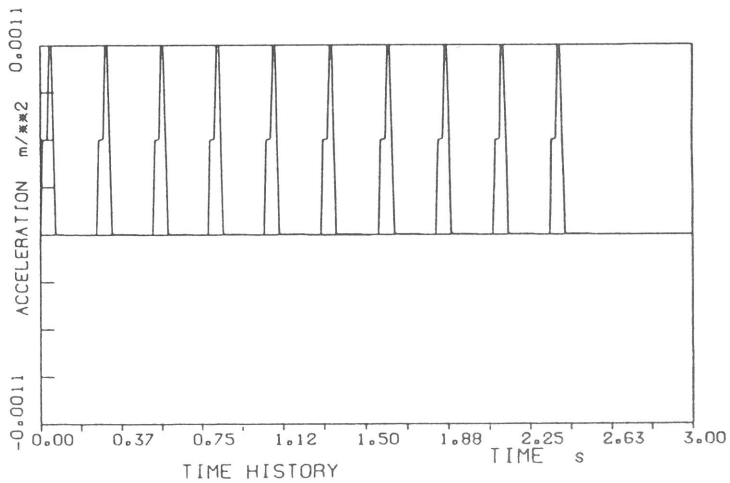
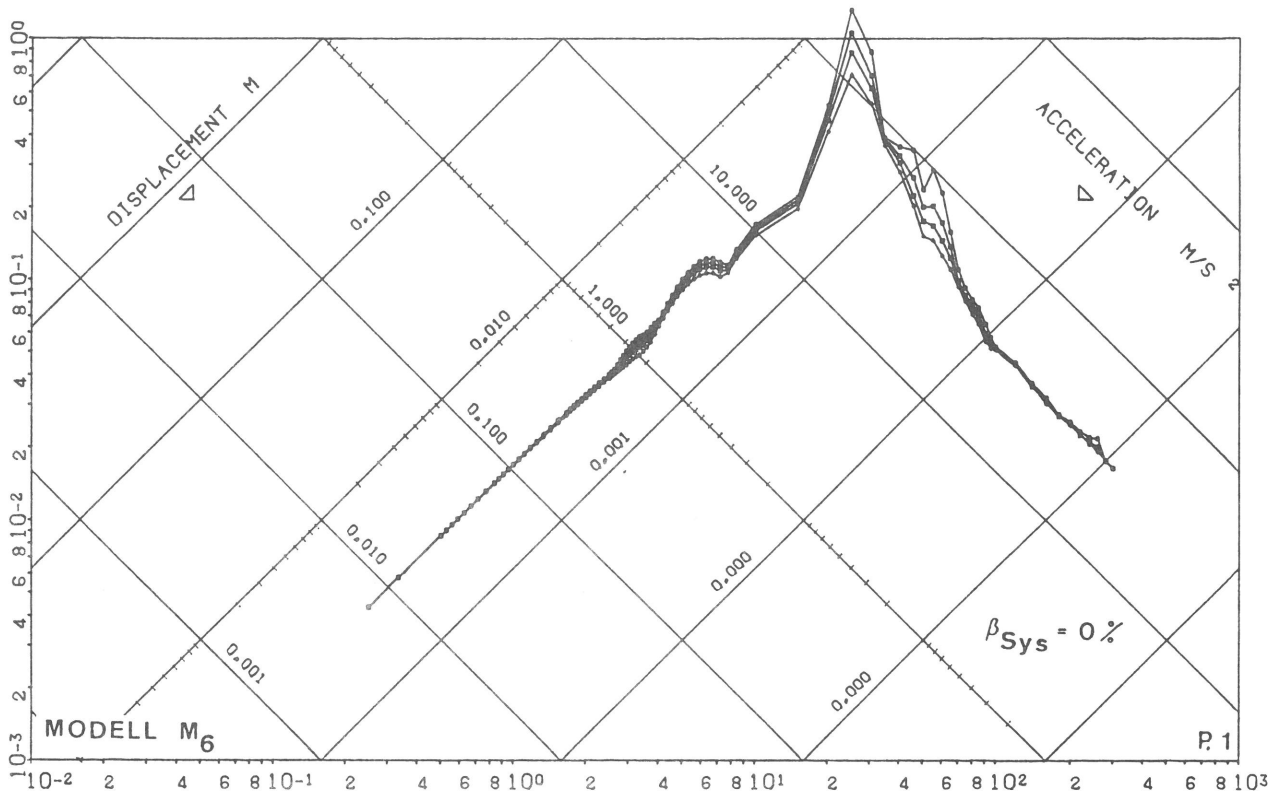


Abb. 4
Last-Diagramm für den
Lastfall Flugzeugabsturz

a) Betrags-Fourierspektrum



b) Last-Zeit-Verhalten



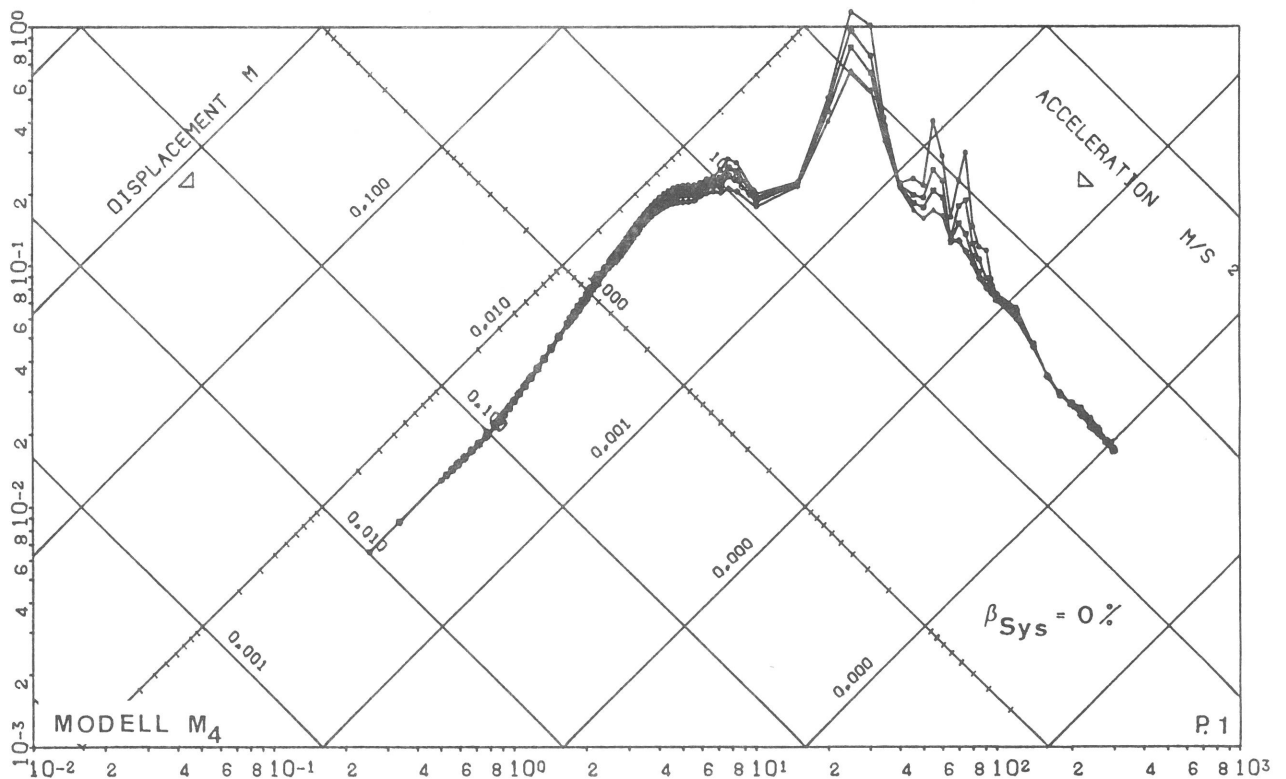
N.P.: 73.

LMN801VX



Abb. 5

Modell M₆ Response Spektrum ohne Dämpfung für Punkt 1



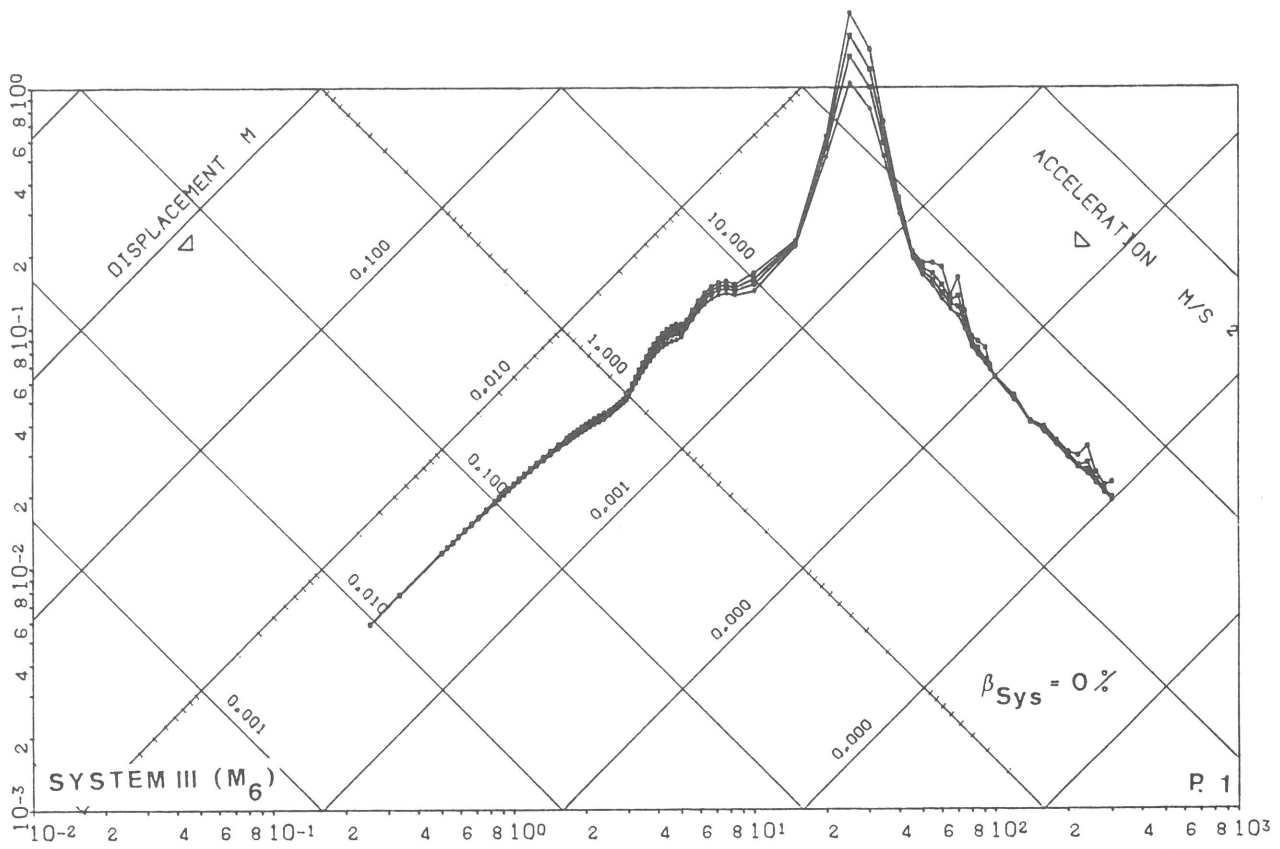
N.P.: 3.

LUMPED PAR



Abb. 6

Modell M₄ Response Spektrum ohne Dämpfung für Punkt 1



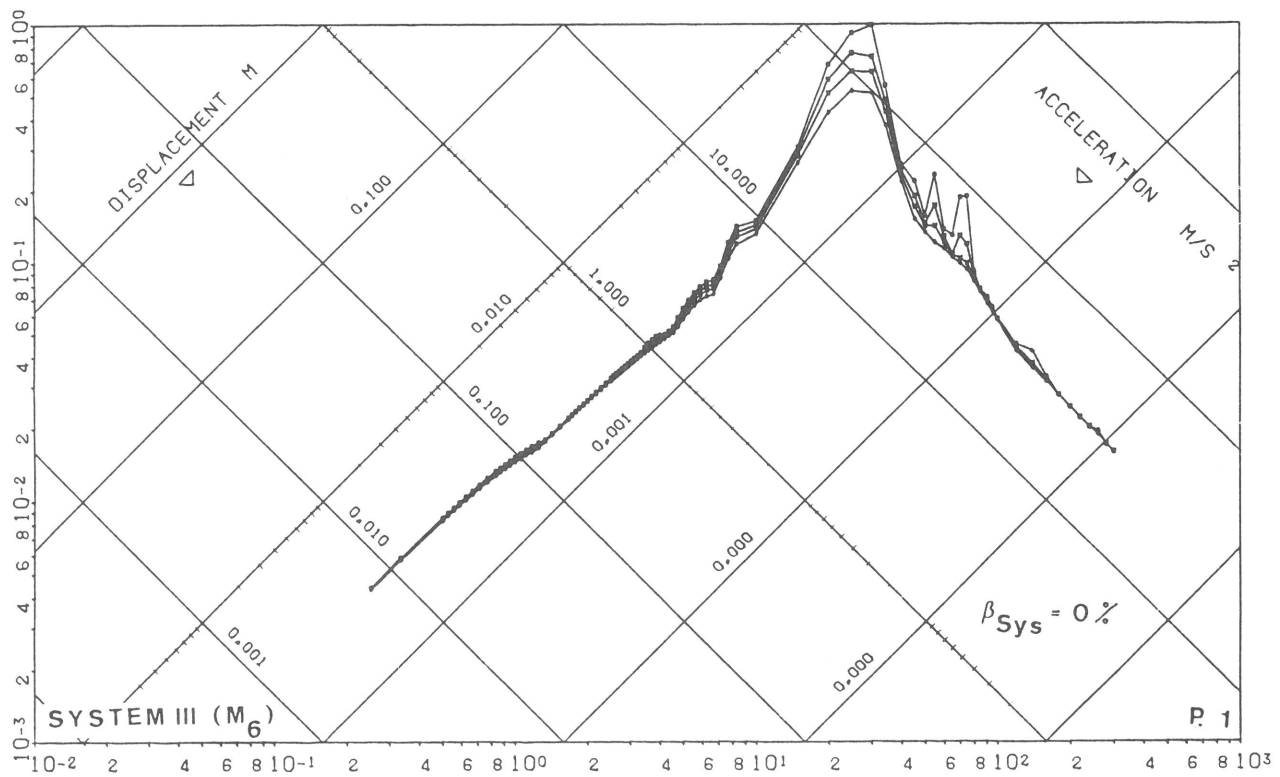
N.P.: 73.

LMN801V2



Abb. 7

System III Response Spektrum ohne Dämpfung für Punkt 1 mit konsistenter Massenkopplung



N.P.: 73.

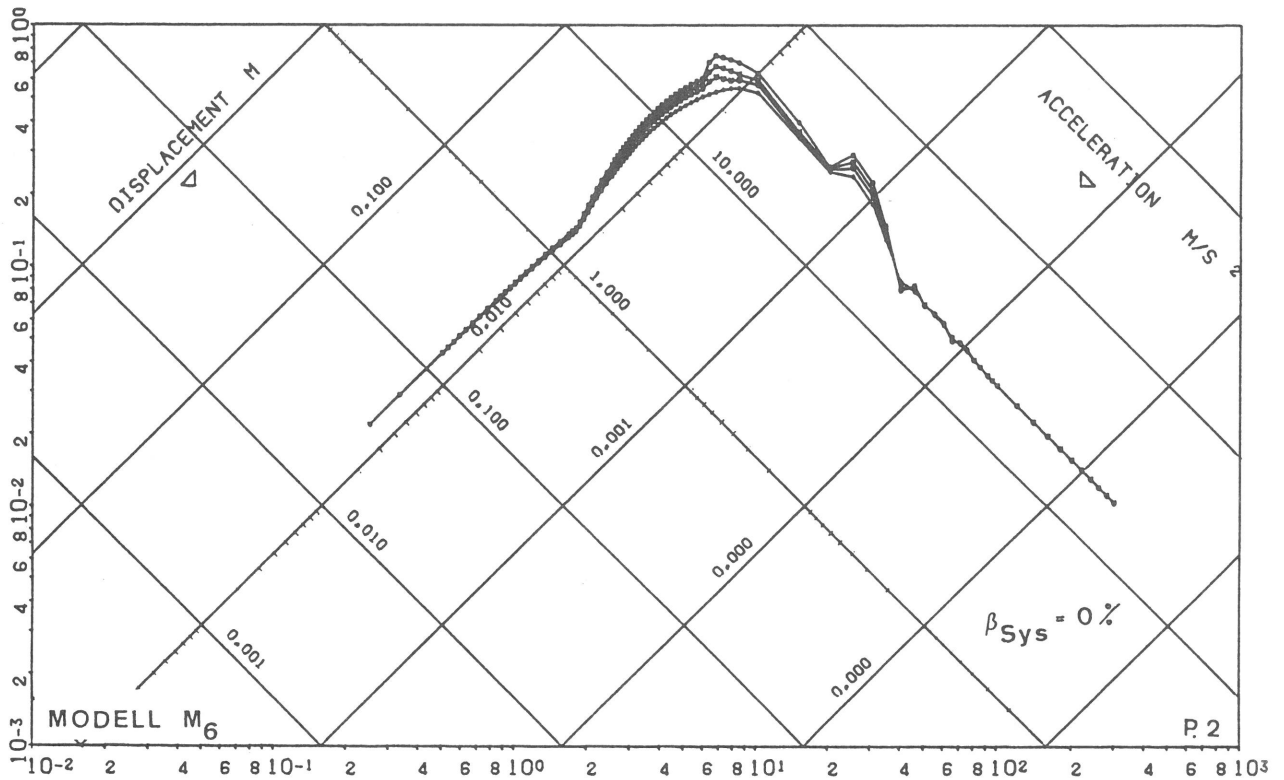
LMN801V2

K



Abb. 8

System III Response Spektrum ohne Dämpfung für Punkt I mit diagonalisierter Massenkopplung



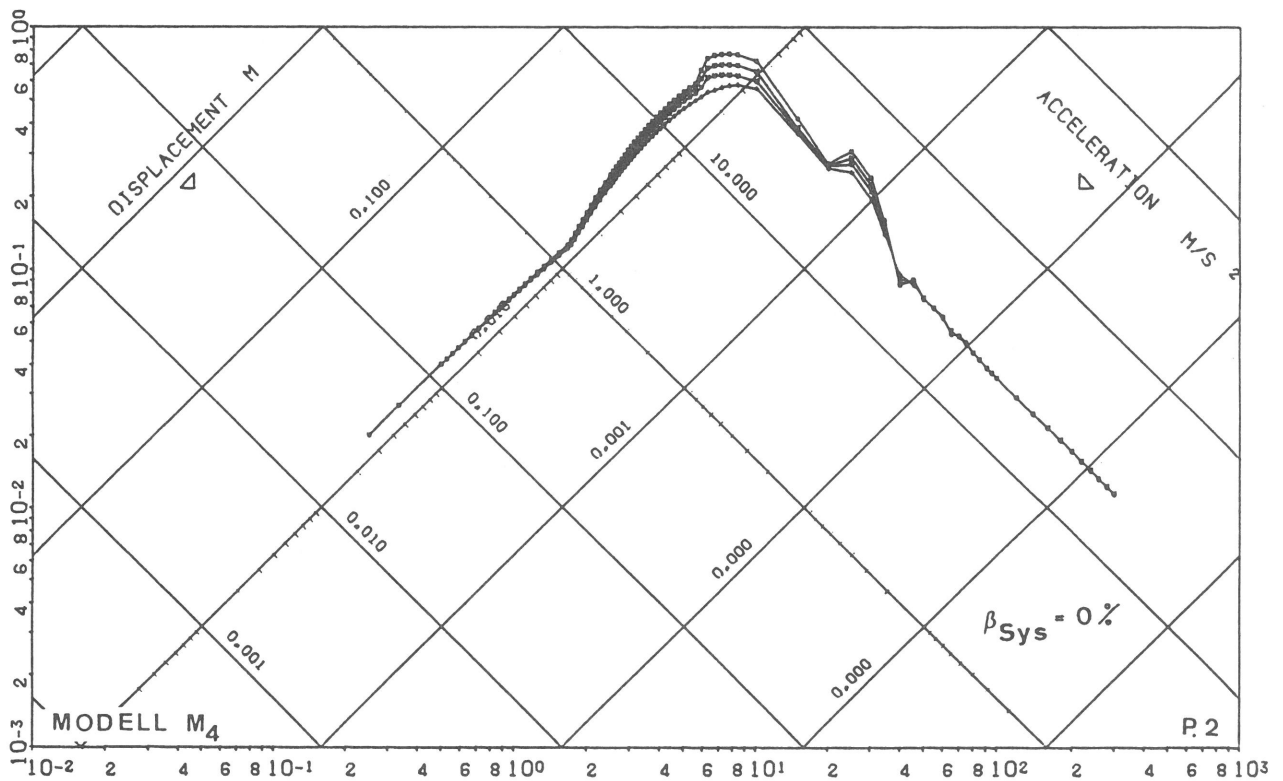
N.P.: 4.

LMN801VX



Abb. 9

Modell M₆ Response Spektrum bei 7 % Dämpfung für Punkt 2



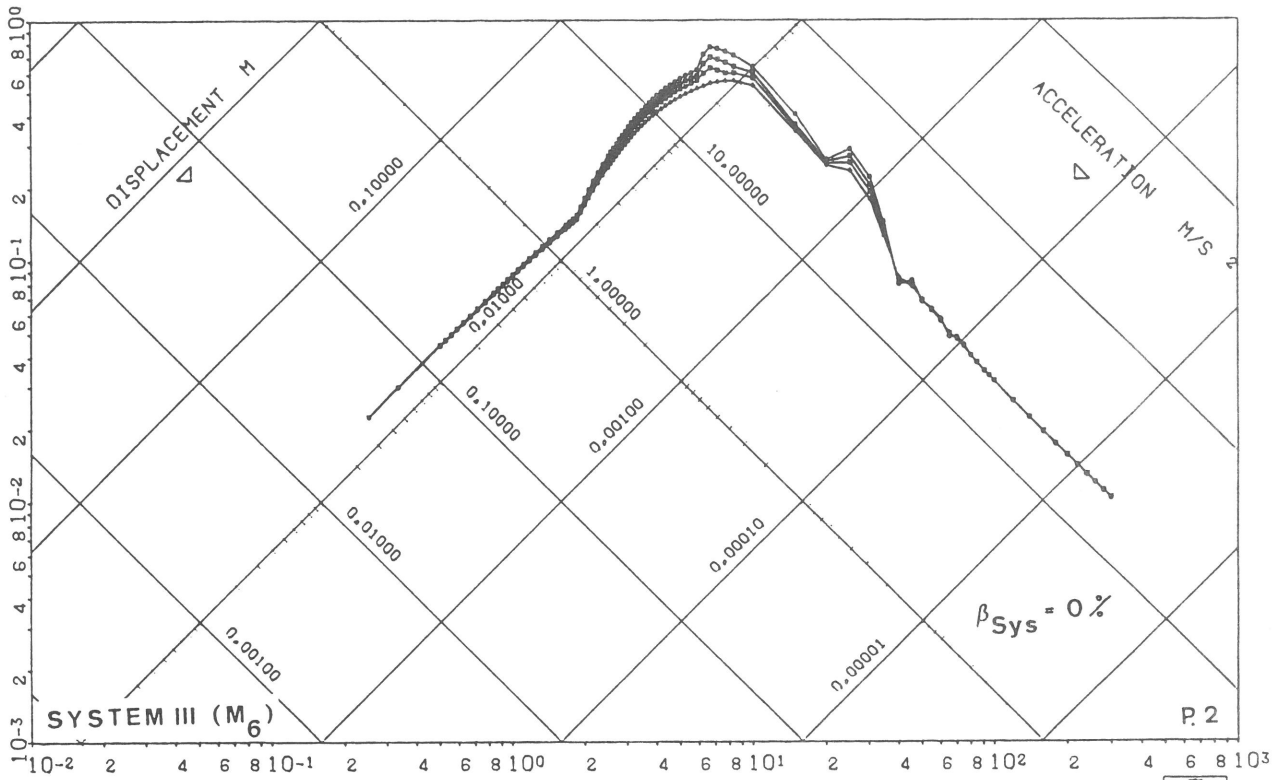
N.P.: 73.

LUMPED PAR



Abb. 10

Modell M₄ Response Spektrum bei 7 % Dämpfung für Punkt 2



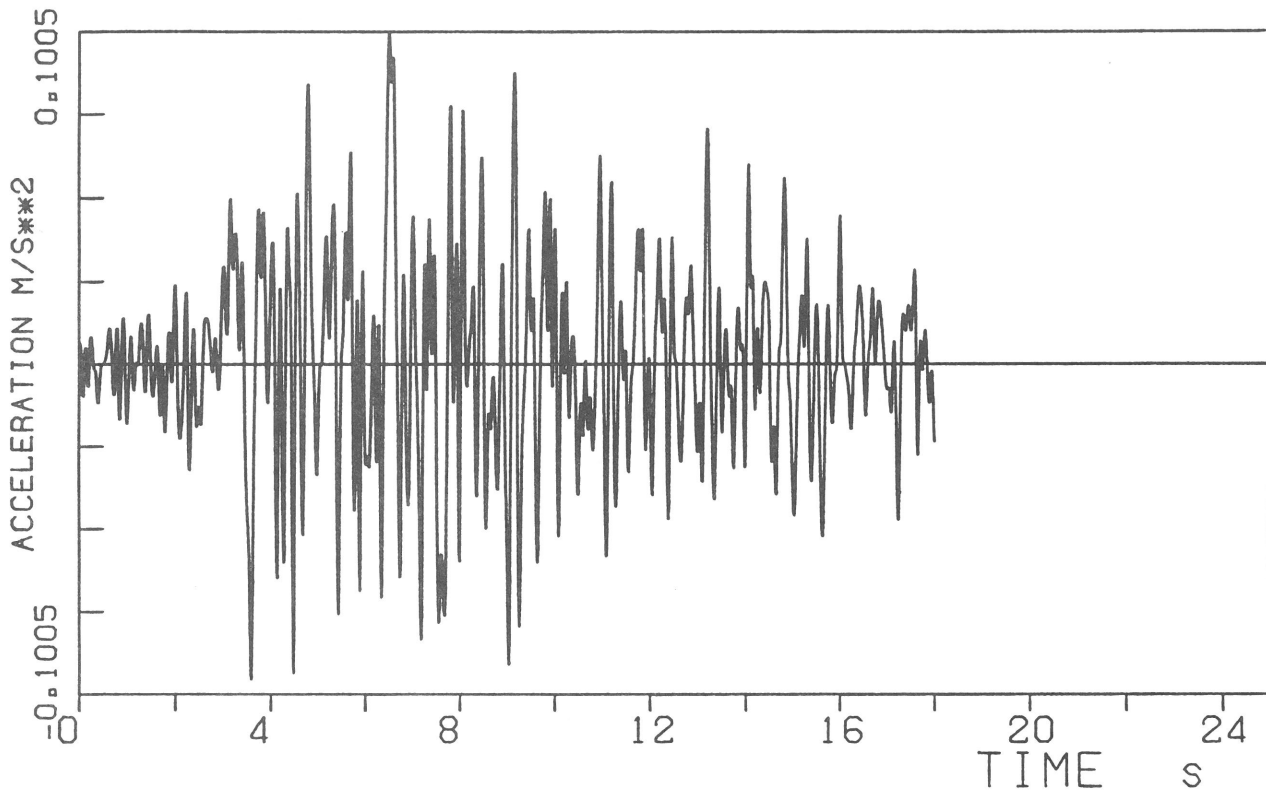
N.P.: 4.

LMN801V2 L

BAM-2.01

Abb. 11

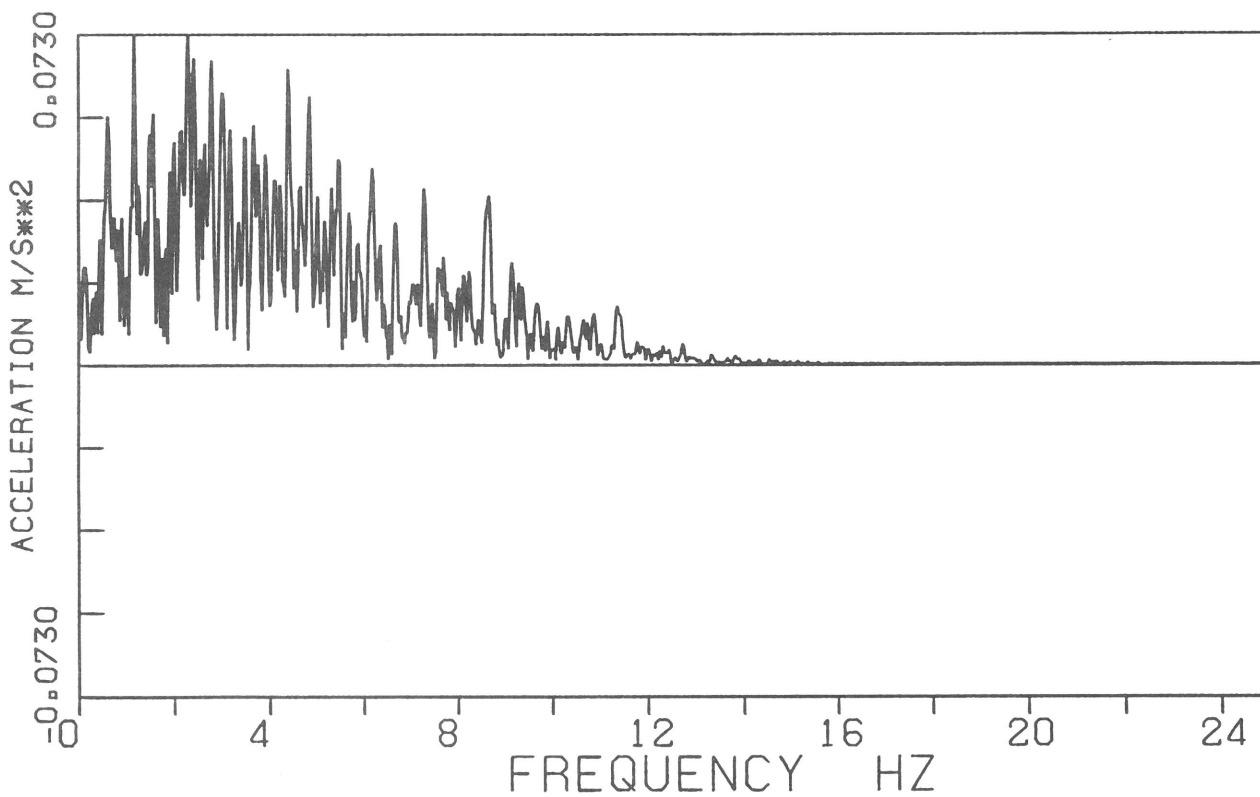
System III Response Spektrum bei 7 % Dämpfung für Punkt 2
mit diagonalisierter Massenkopplung



TIME HISTORY OF TAFT-EARTHQ.
 NT = 1800 NF = 4096



a) Normierter Beschleunigungs-Zeit-Verlauf



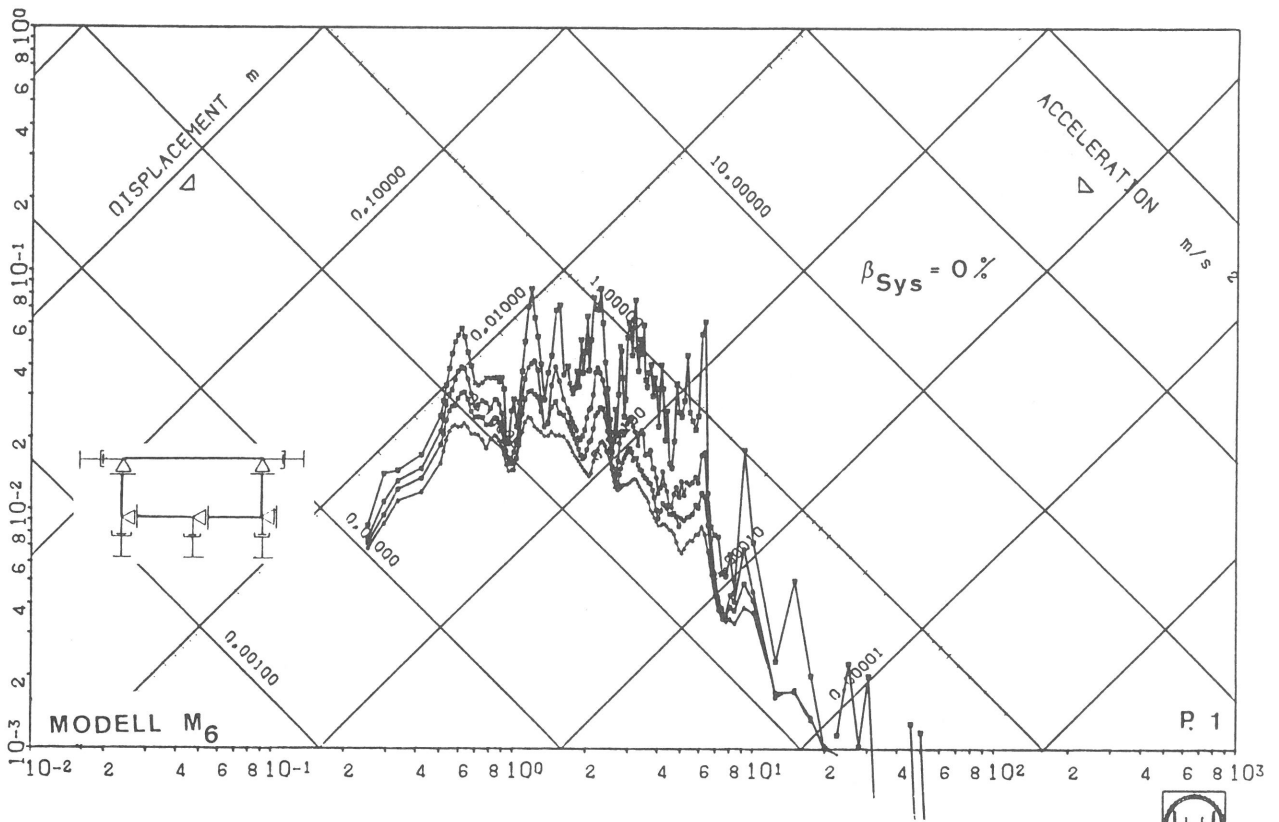
FOURIER SPECTRUM OF TAFT-EARTHQ.
 NT = 1800 NF = 4096



b) Betrags-Fourierspektrum

Abb. 12

TAFT-Erdbebeneingabe für den Lastfall Erdbeben



No. P.: 73.

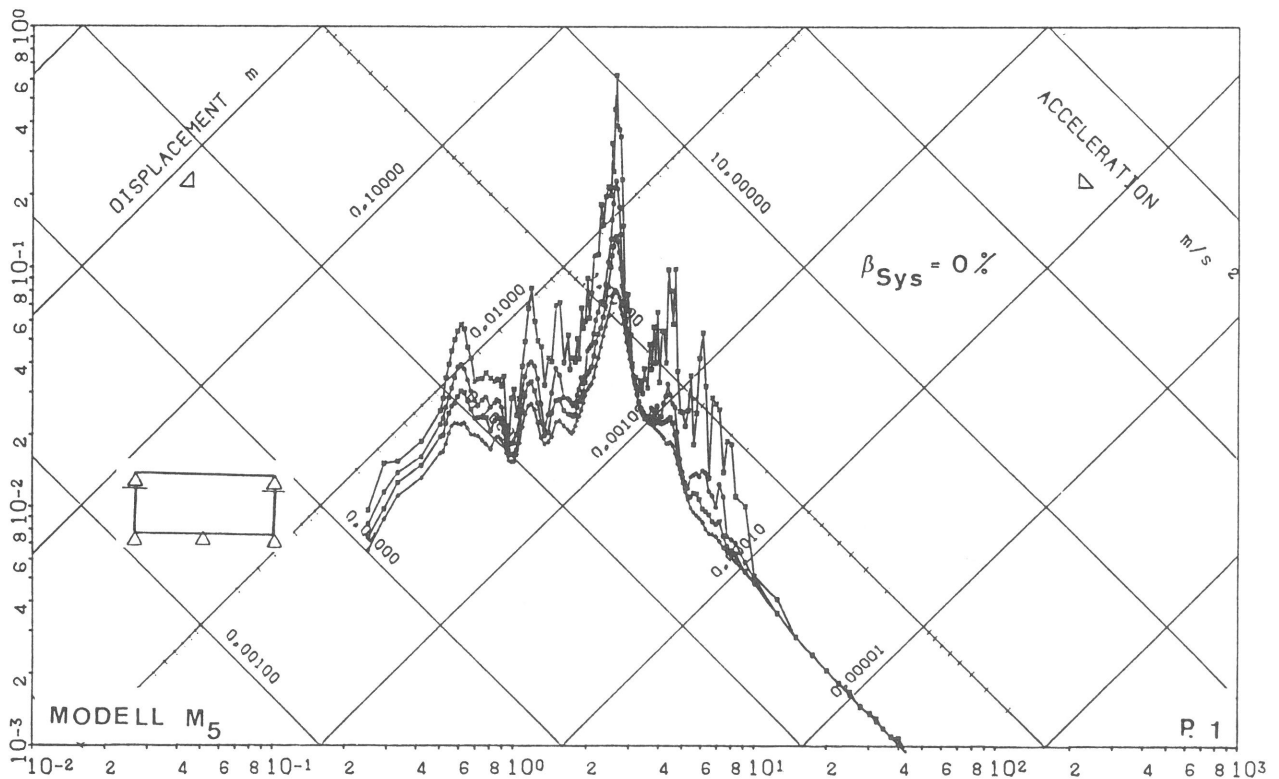
SMW801-14

ZYKLUS=10

BAM-2.01

Abb. 15

Modell M₆ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung
BC = 3 für Punkt 1



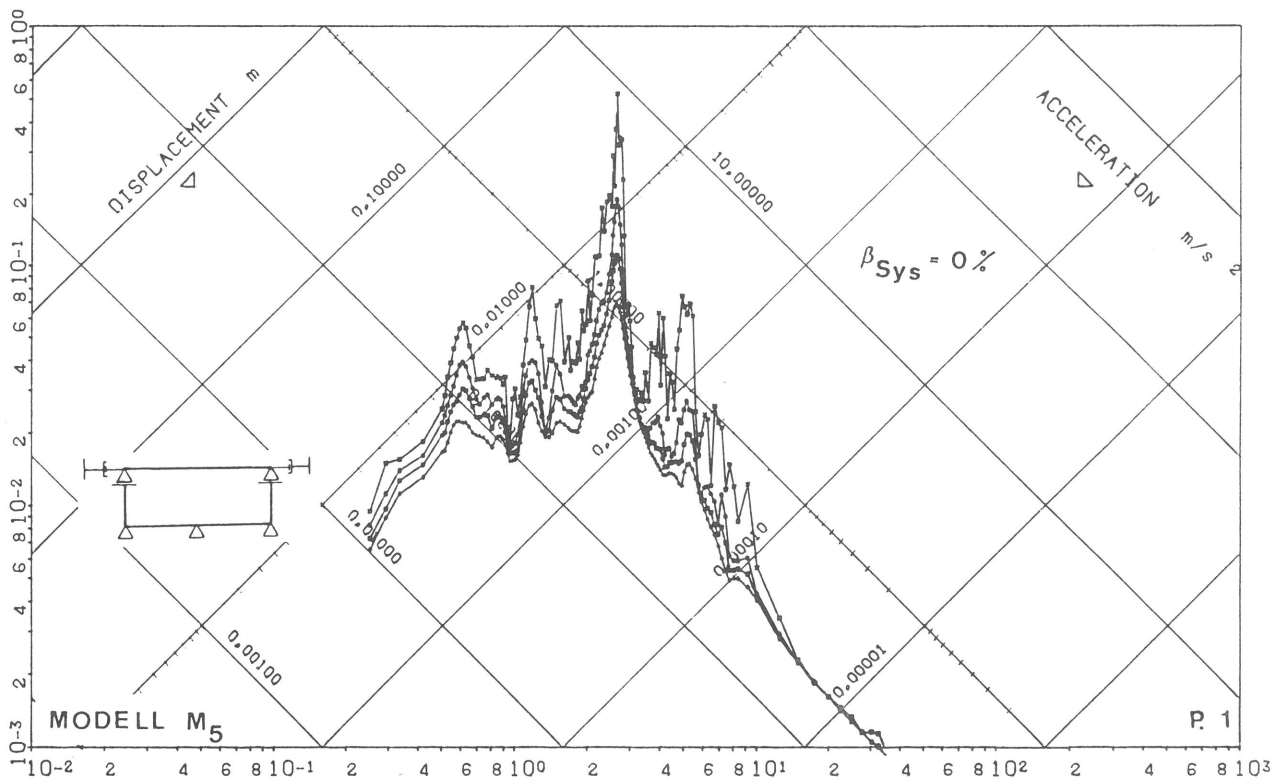
No. P.: 73.

SMW060-01-10S

BAM-2.01

Abb. 16

Modell M₅ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung
BC = 1 für Punkt 1



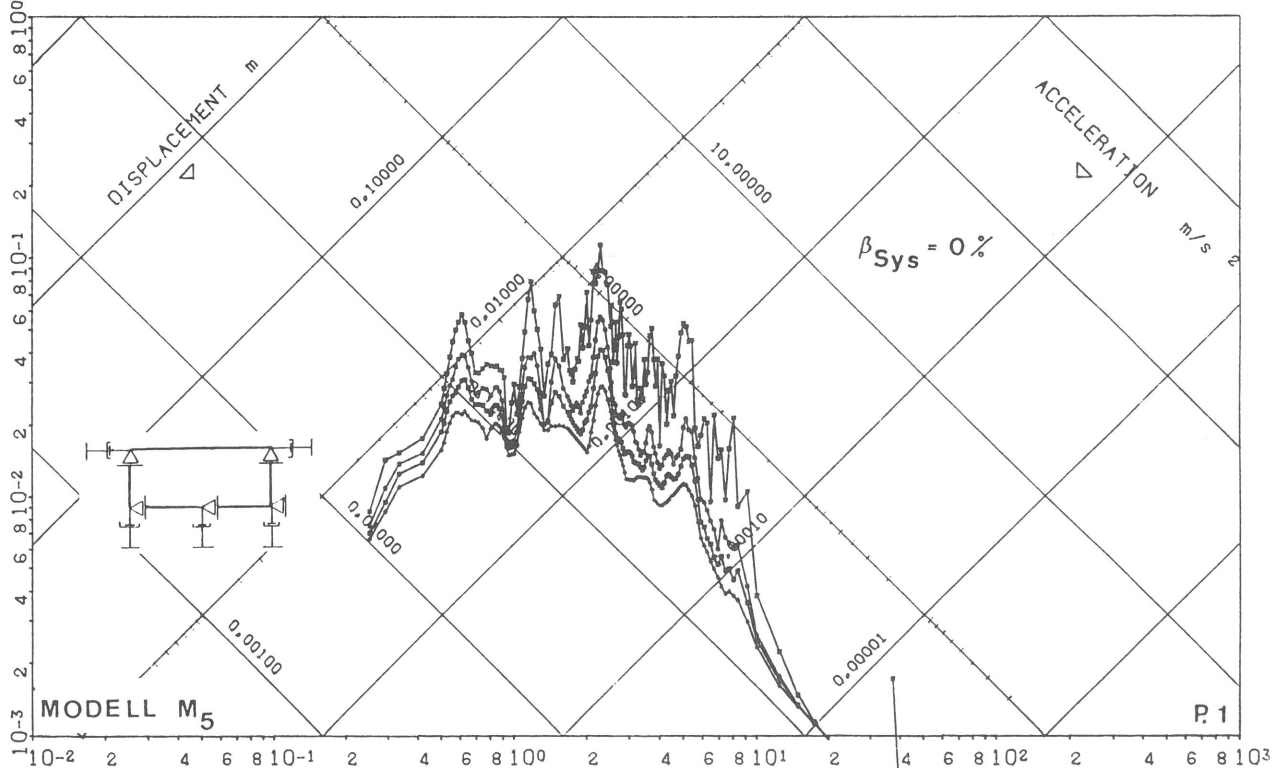
N.P.: 73.

SMW601-10-10S



Abb. 17

Modell M₅ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung
BC = 2 für Punkt 1



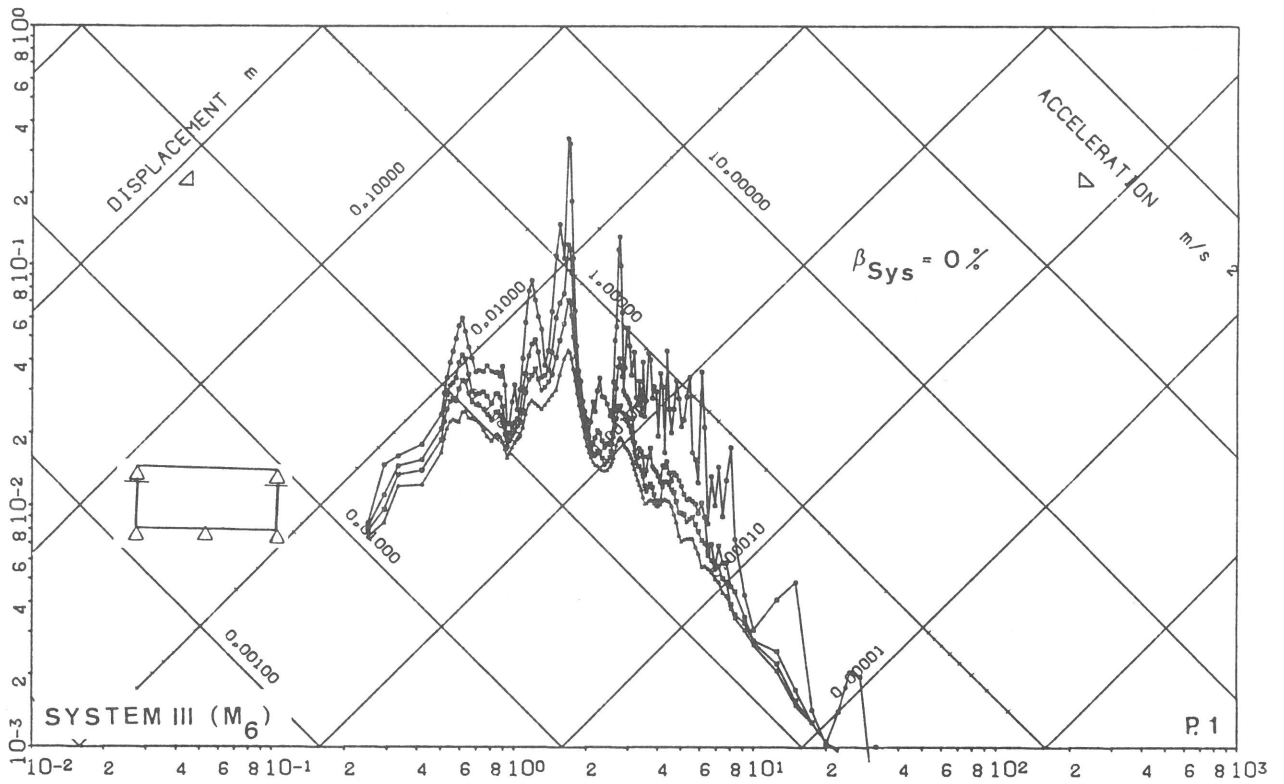
N.P.: 73.

SMW601-14-10S



Abb. 18

Modell M₅ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung
BC = 3 für Punkt 1

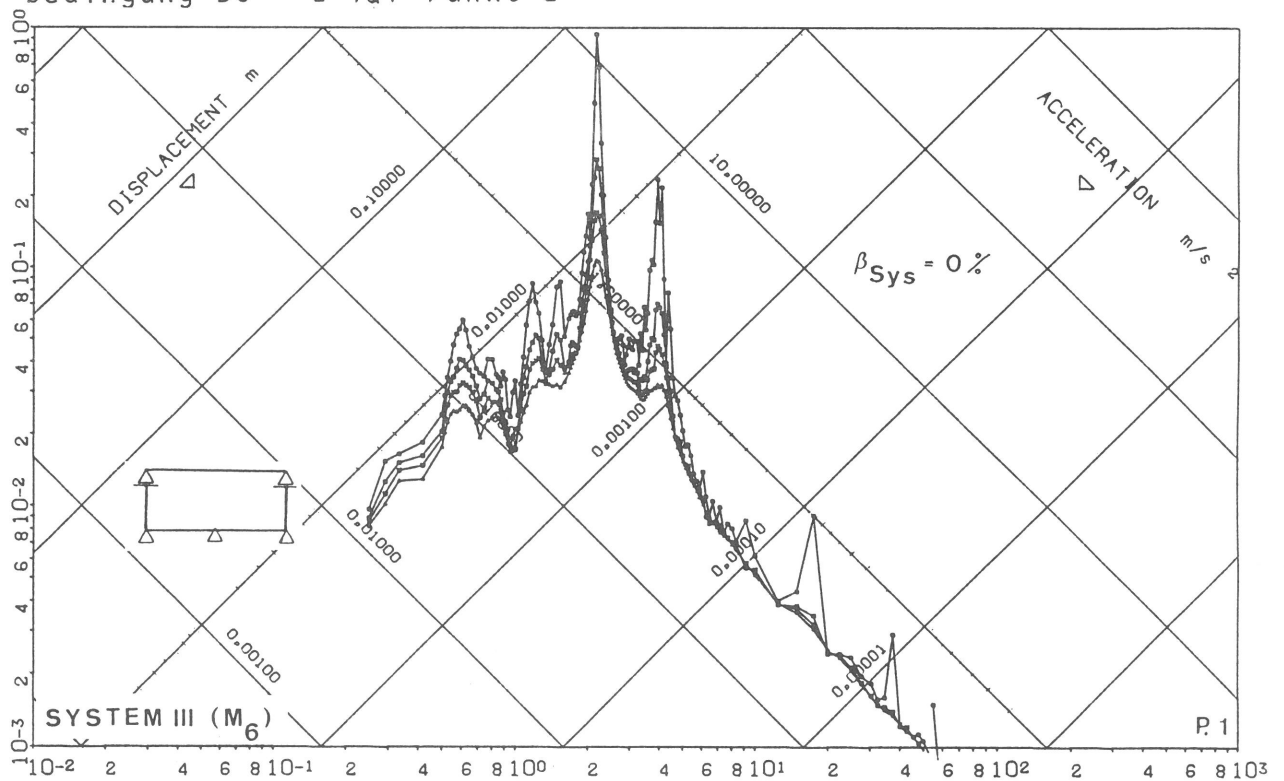


N_aP_a: 73.

801 IRTY=6

Abb. 19

System III (M₆) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 1

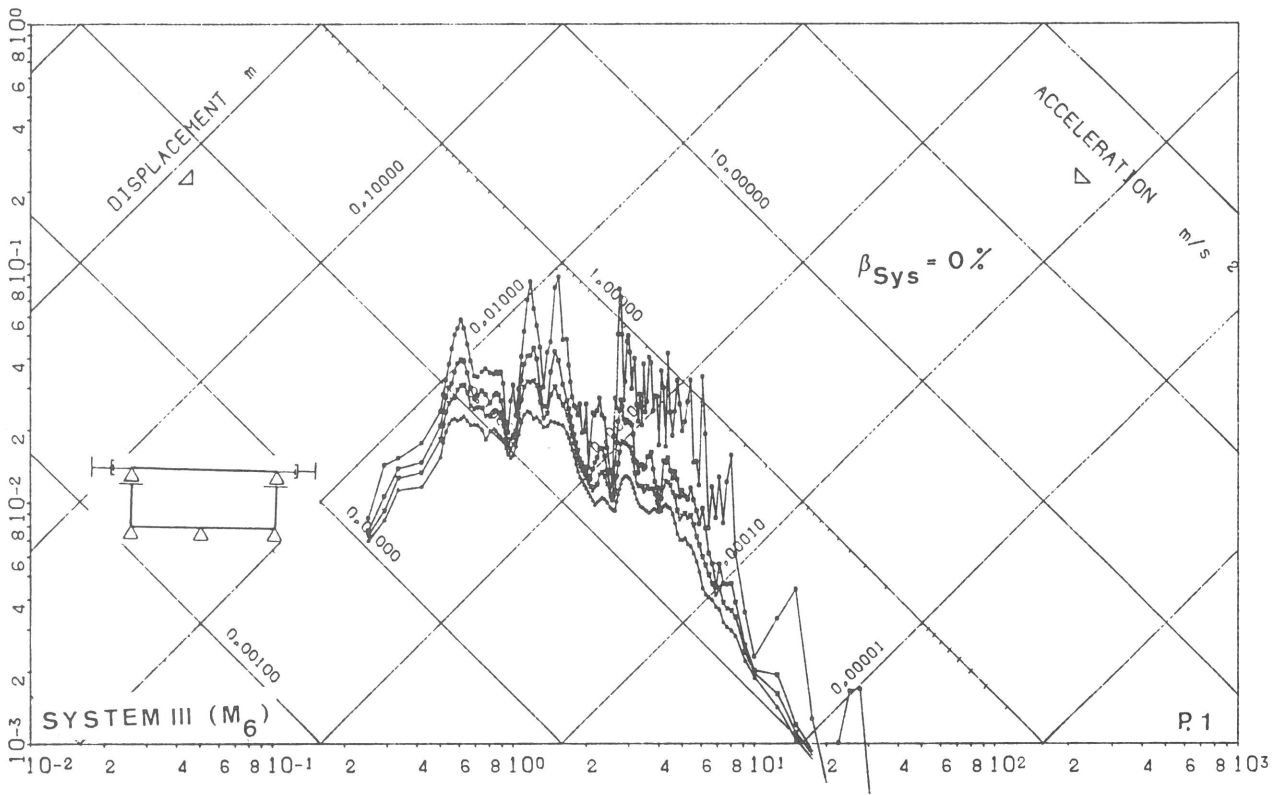


N_aP_a: 73.

801V0 IRTY=6

Abb. 20

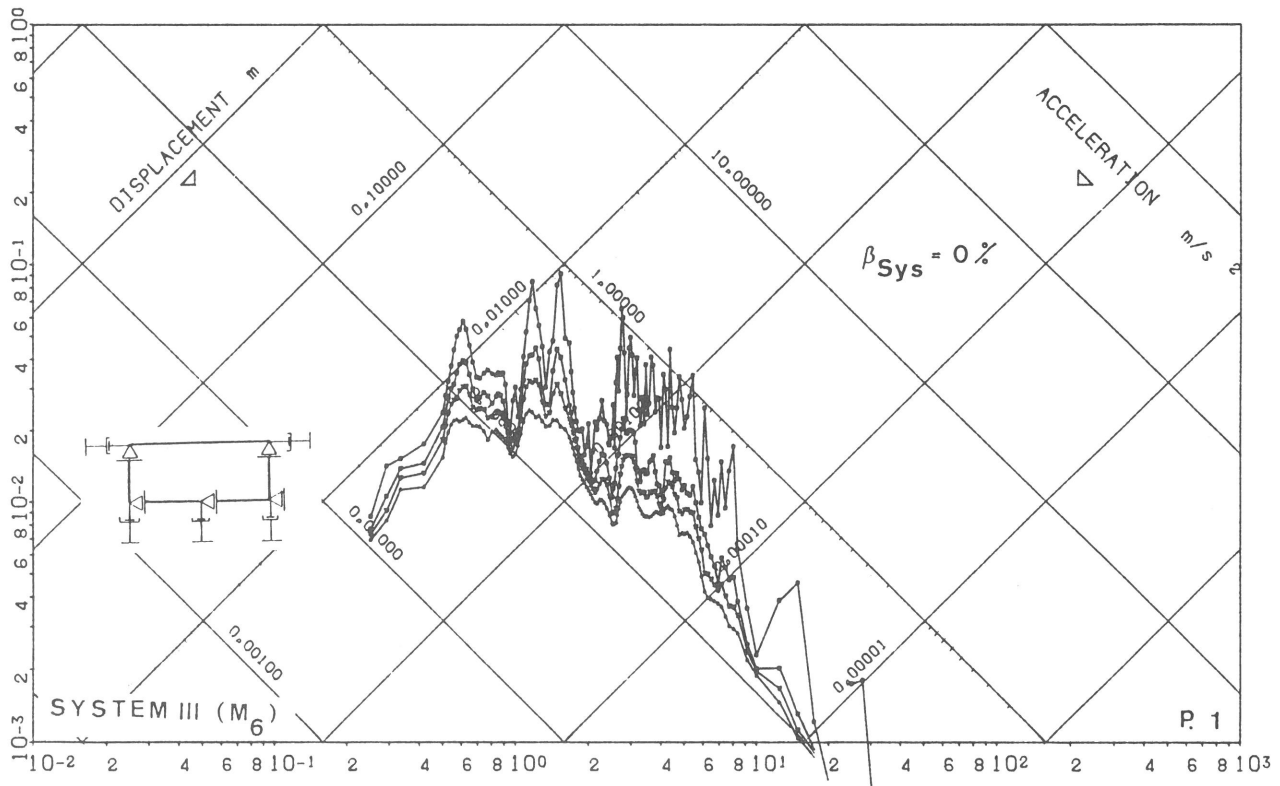
System III (M₆) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 1 bei diagonalisierter Massenkopplung



N.P.: 73.

801 IRTY=20

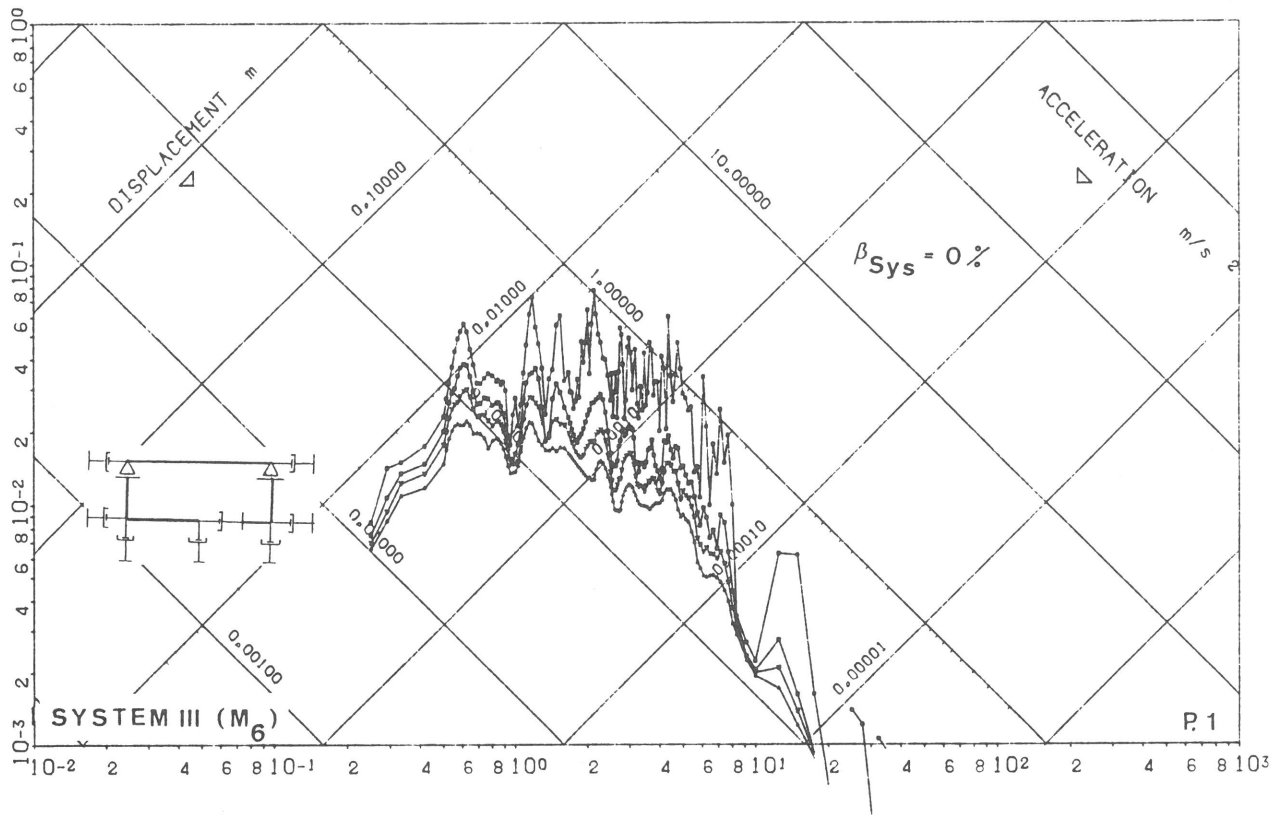
Abb. 21
System III (M_6) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Rand-
bedingung BC = 2 für Punkt 1



N.P.: 73.

801 IRTY=24

Abb. 22
System III (M_6) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Rand-
bedingung BC = 3 für Punkt 1

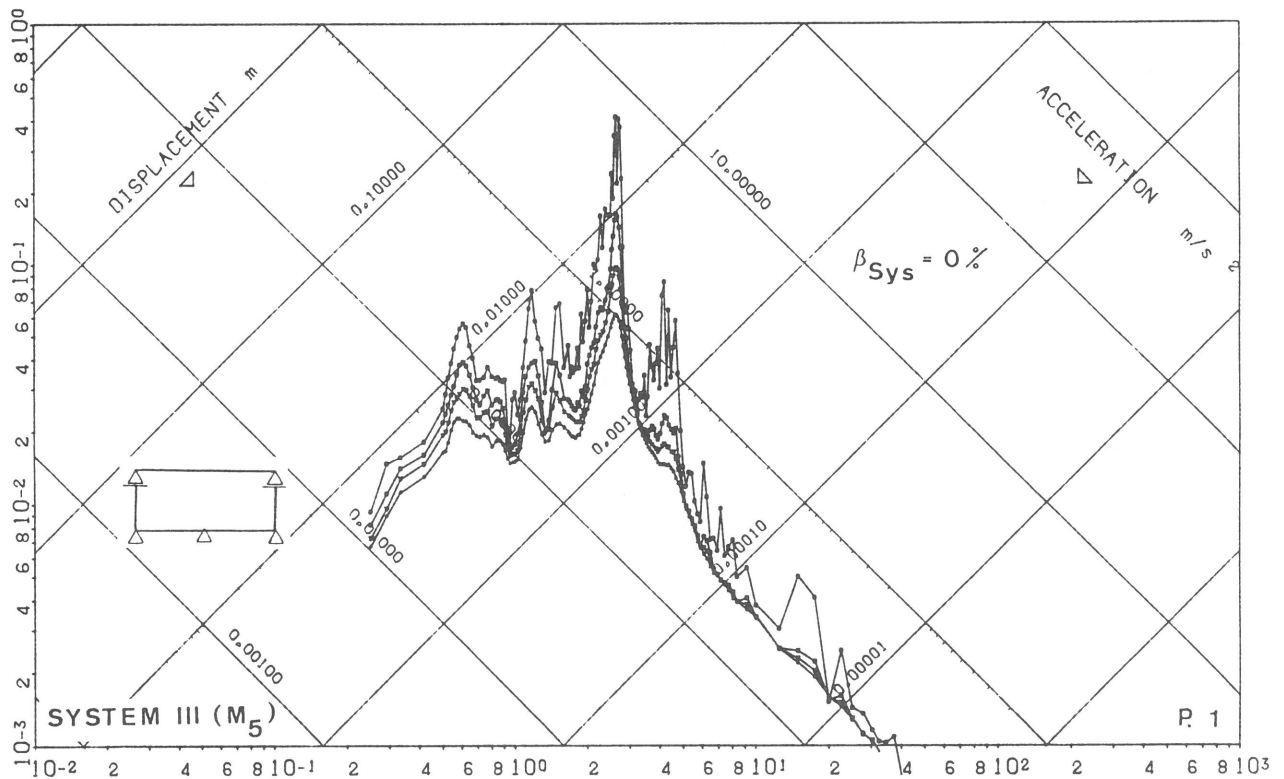


N.P.: 73.

801 IRTY=25

Abb. 23

System III (M_6) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 1

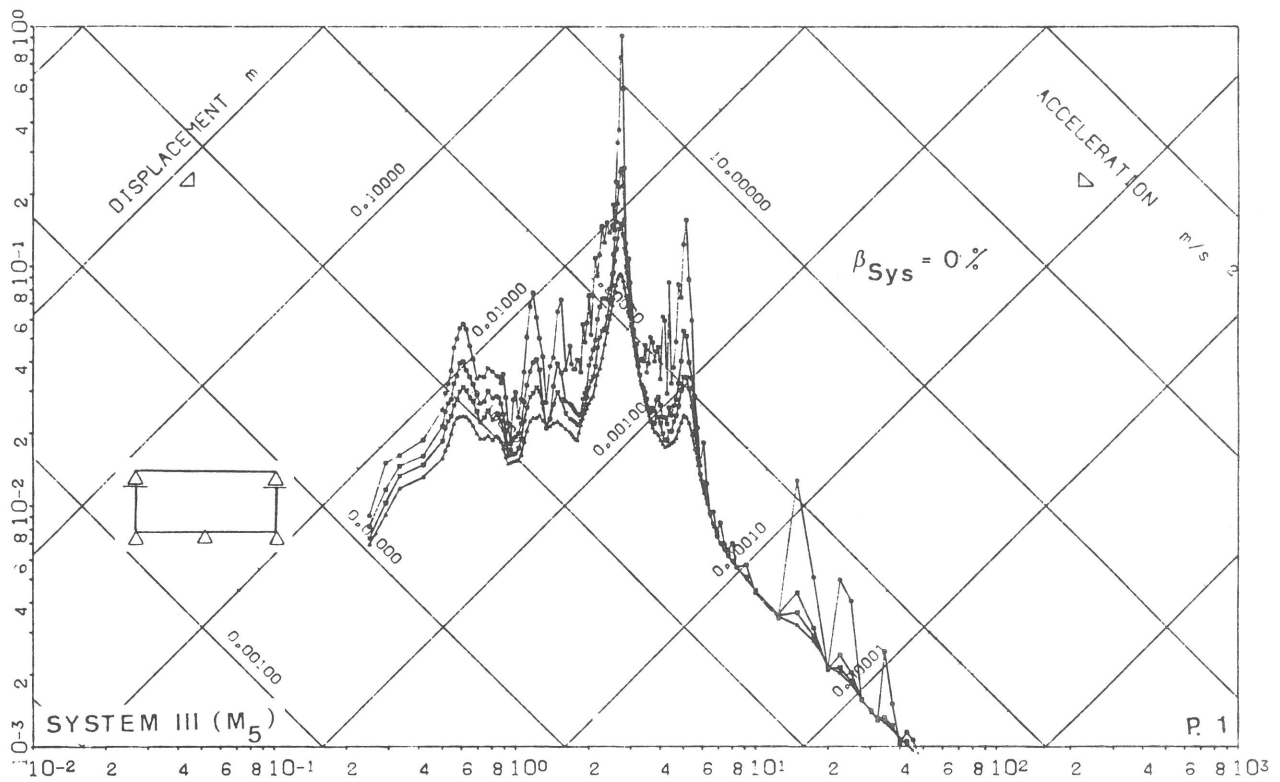


N.P.: 73.

SMW6/10 IRTY=6

Abb. 24

System III (M_5) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 1

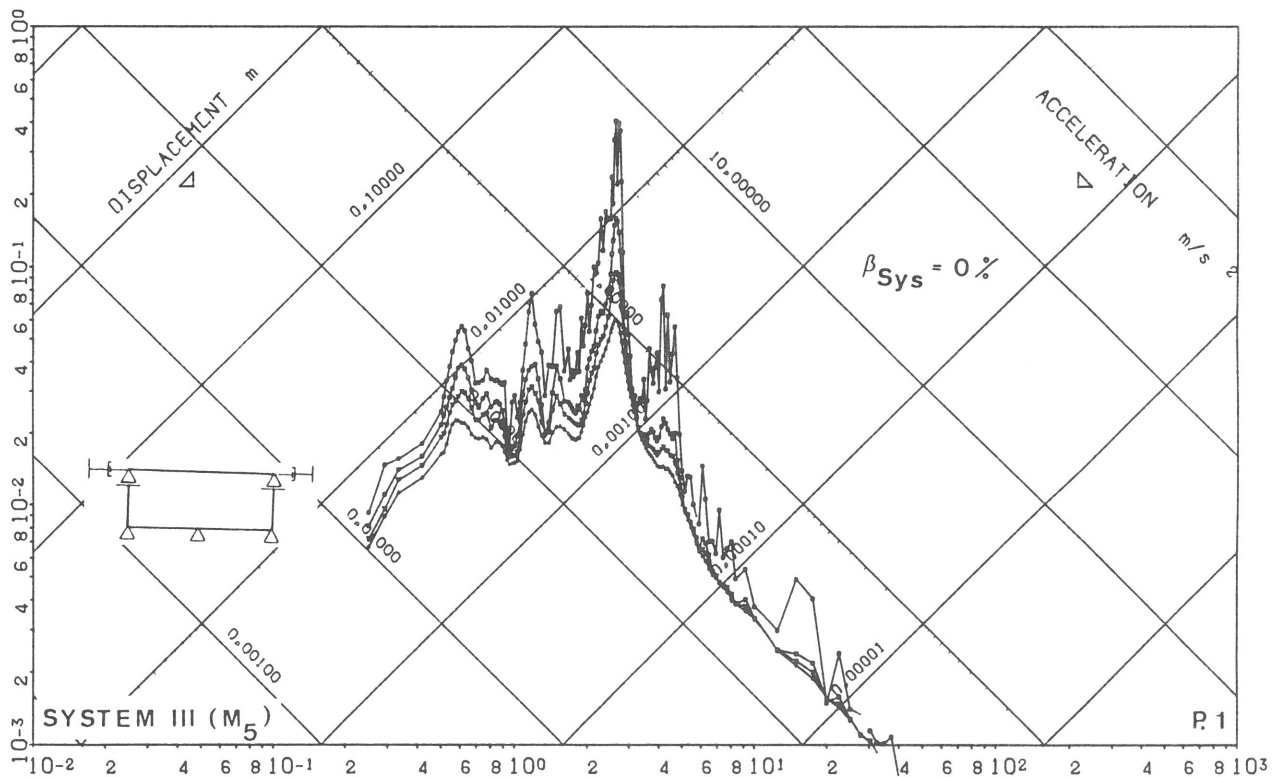


N_aP_a: 73_a

SMW6/10 IRTY=6 LUMPED

Abb. 25

System III (M_5) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 1 bei diagonalisierter Massenkopplung

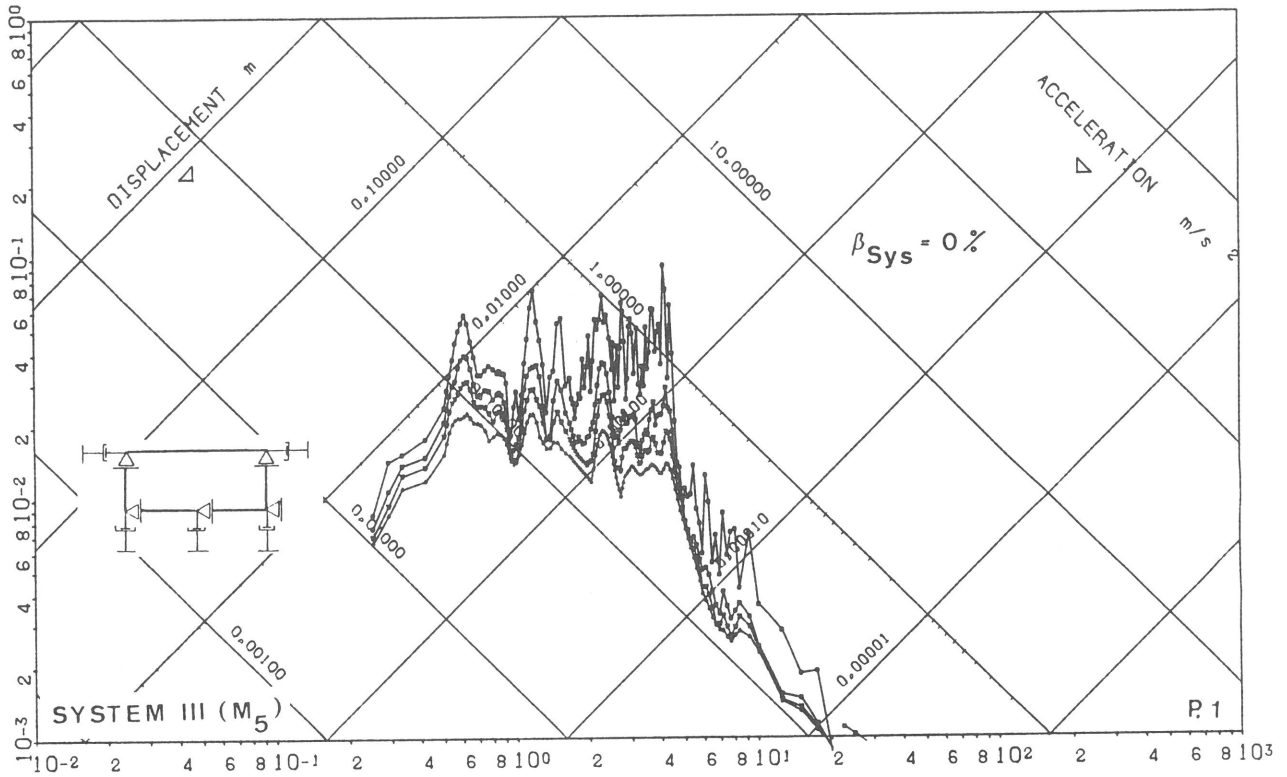


N_aP_a: 73_a

SMW6/10 IRTY=20

Abb. 26

System III (M_5) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 2 für Punkt 1

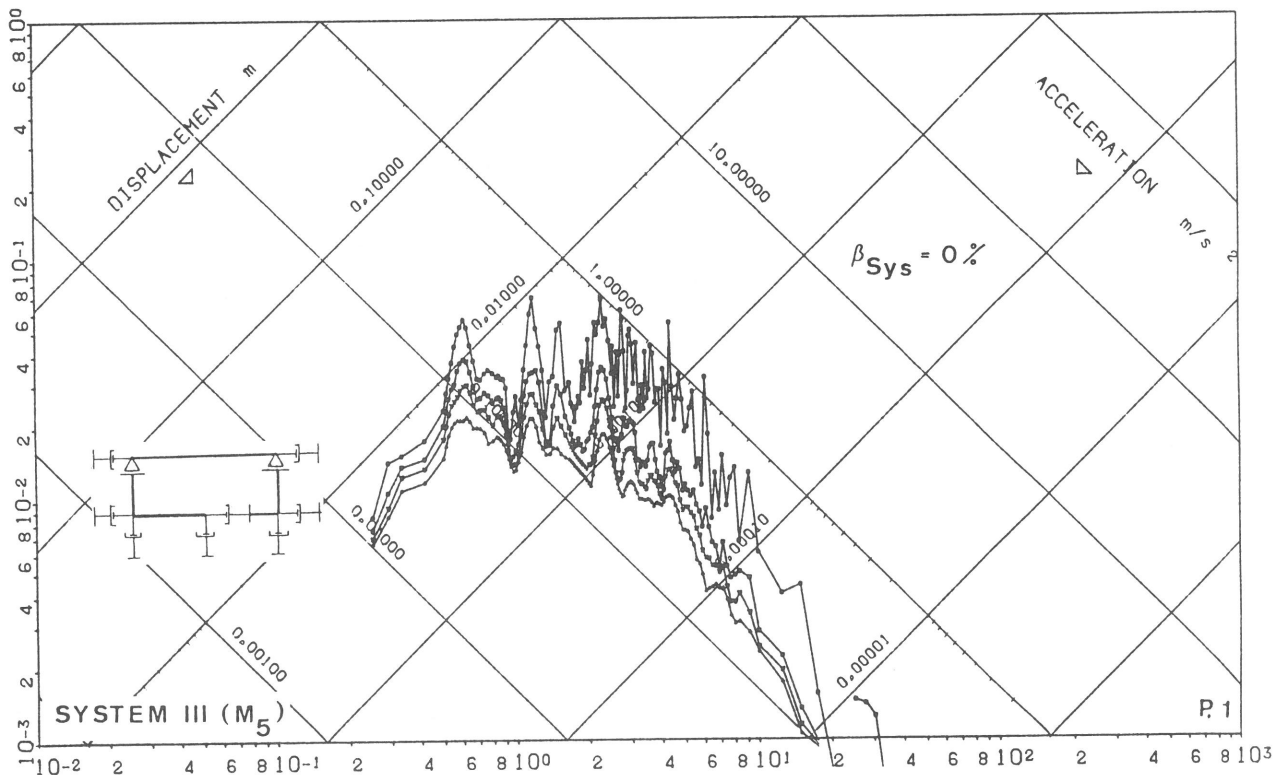


N.P.: 73.

SMW6/10 IRTY=24

Abb. 27

System III (M_5) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 3 für Punkt 1

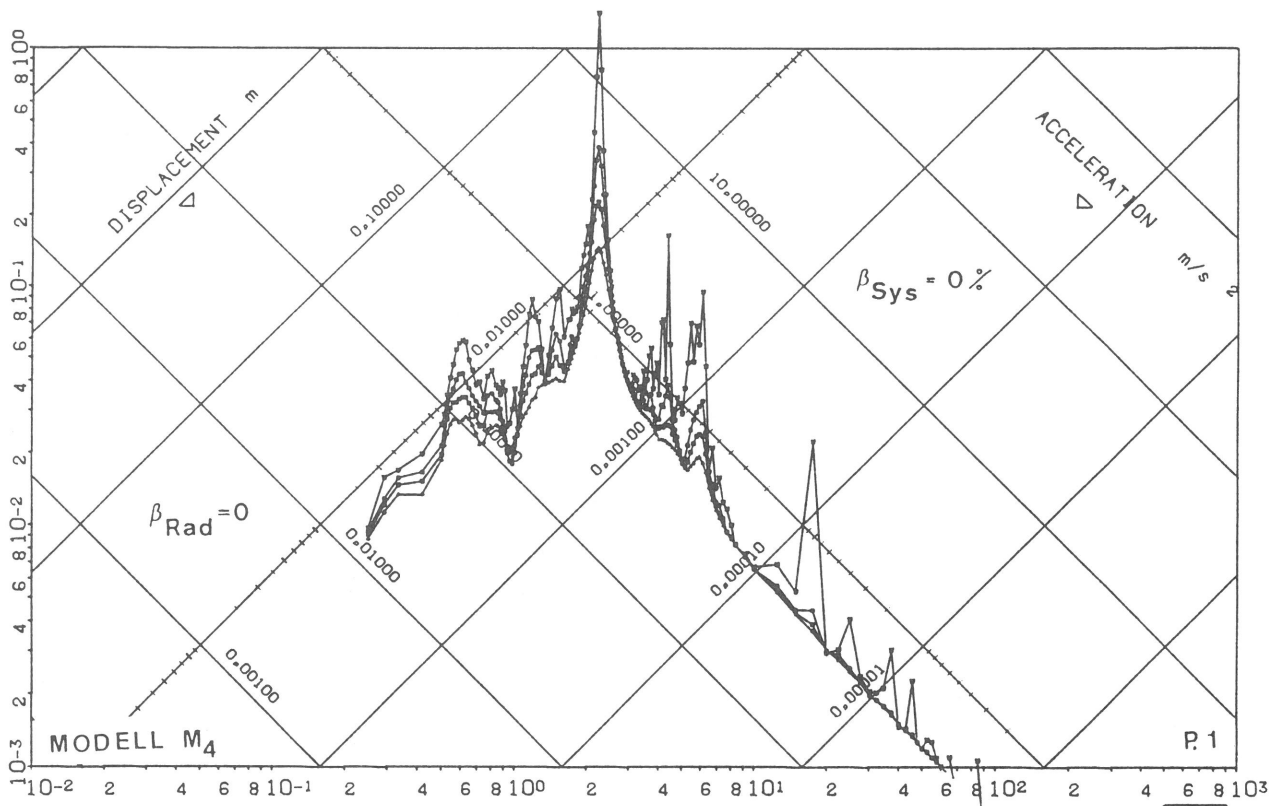


N.P.: 73.

SMW6/10 IRTY=25

Abb. 28

System III (M_5) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 1



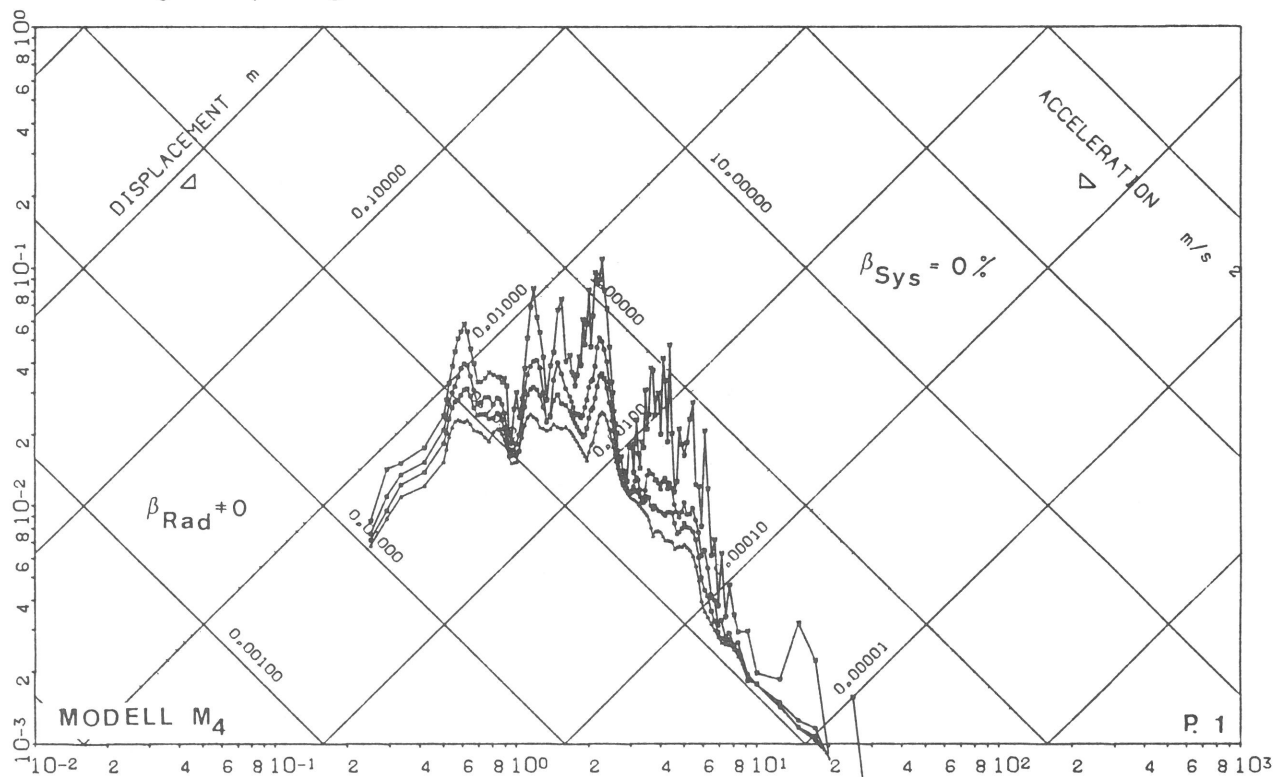
N.P. : 3.

SML601



Abb. 29

Modell M_4 Response Spektrum ohne Dämpfung und ohne Abstrahlungsdämpfung für Punkt 1



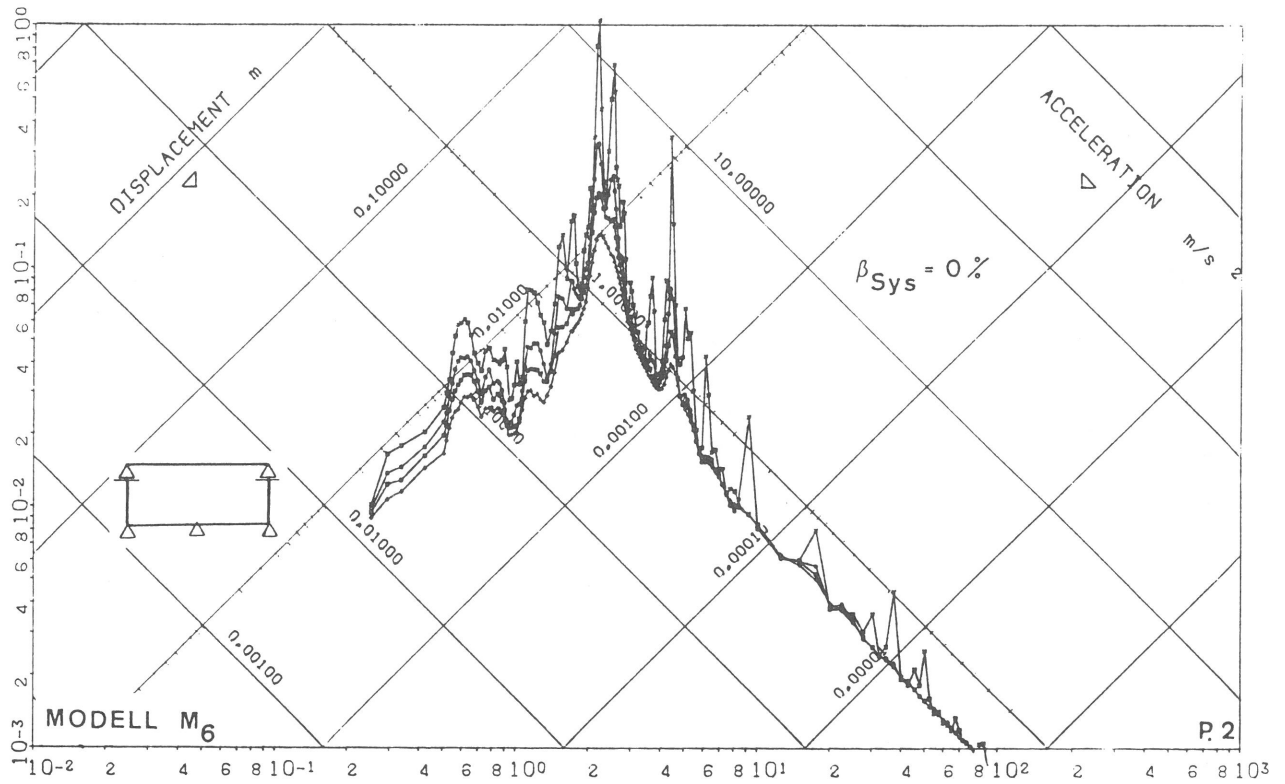
N.P. : 3.

SML601 RR



Abb. 30

Modell M_4 Response Spektrum ohne Dämpfung und mit Abstrahlungsdämpfung für Punkt 1



N.P.: 4.

SMW801-01

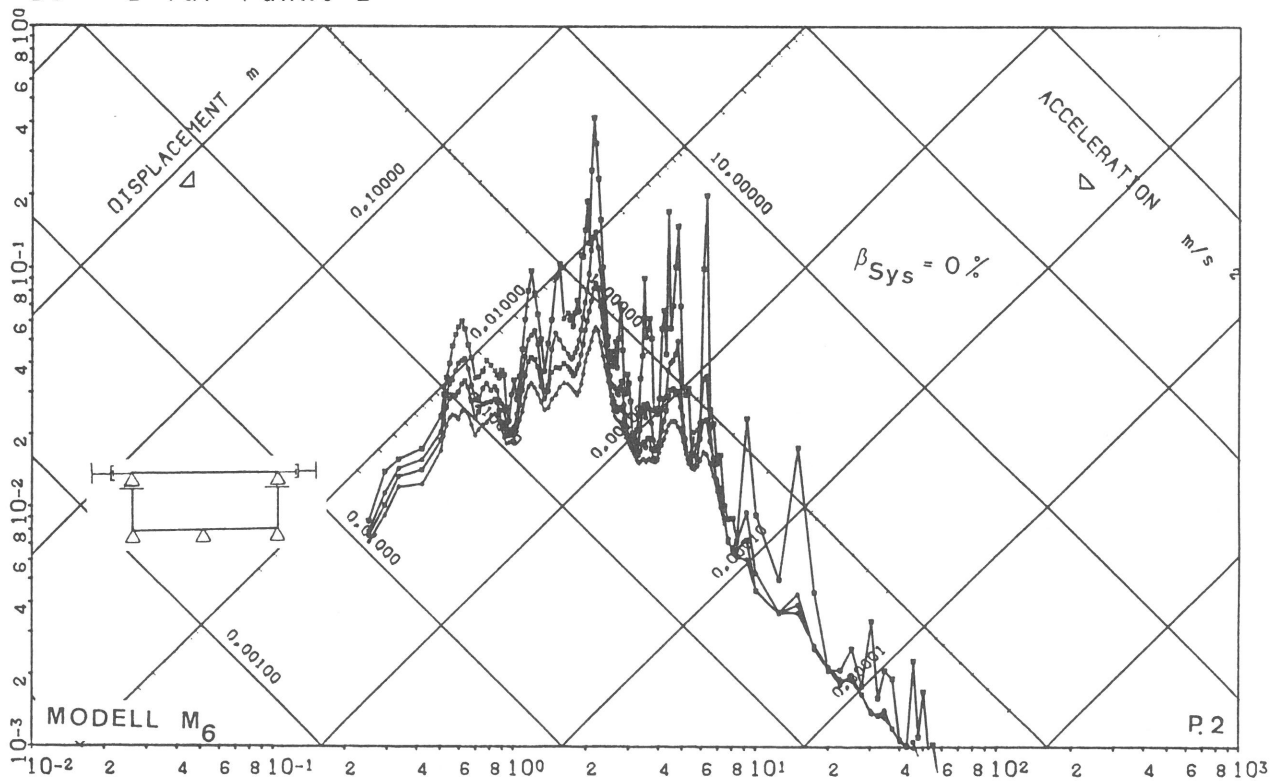
ZYKLUS=12



Abb. 31

Modell M₆ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung

BC = 1 für Punkt 2



N.P.: 4.

SMW801-10

ZYKLUS=6



Abb. 32

Modell M₆ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung

BC = 2 für Punkt 2

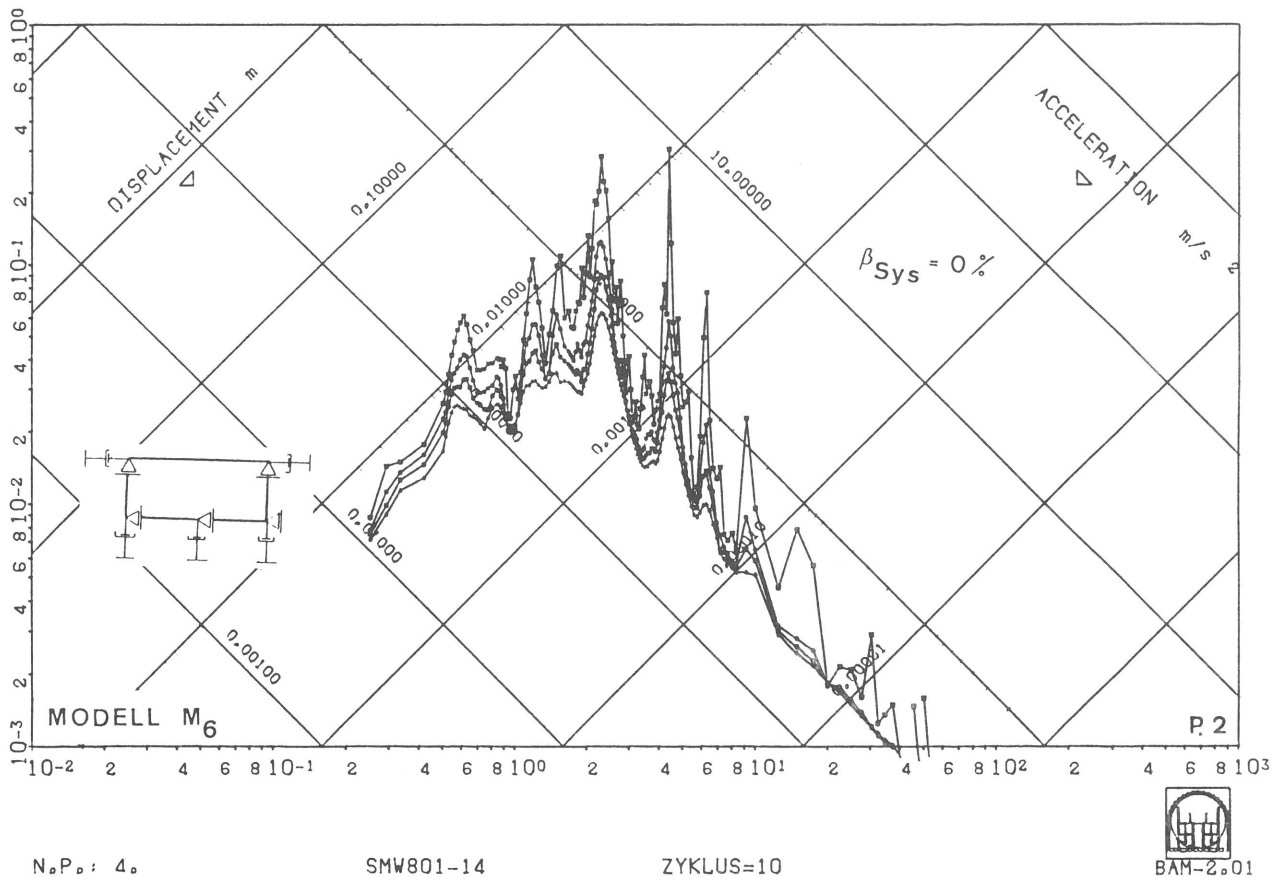


Abb. 33
 Modell M₆ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung
 BC = 3 für Punkt 2

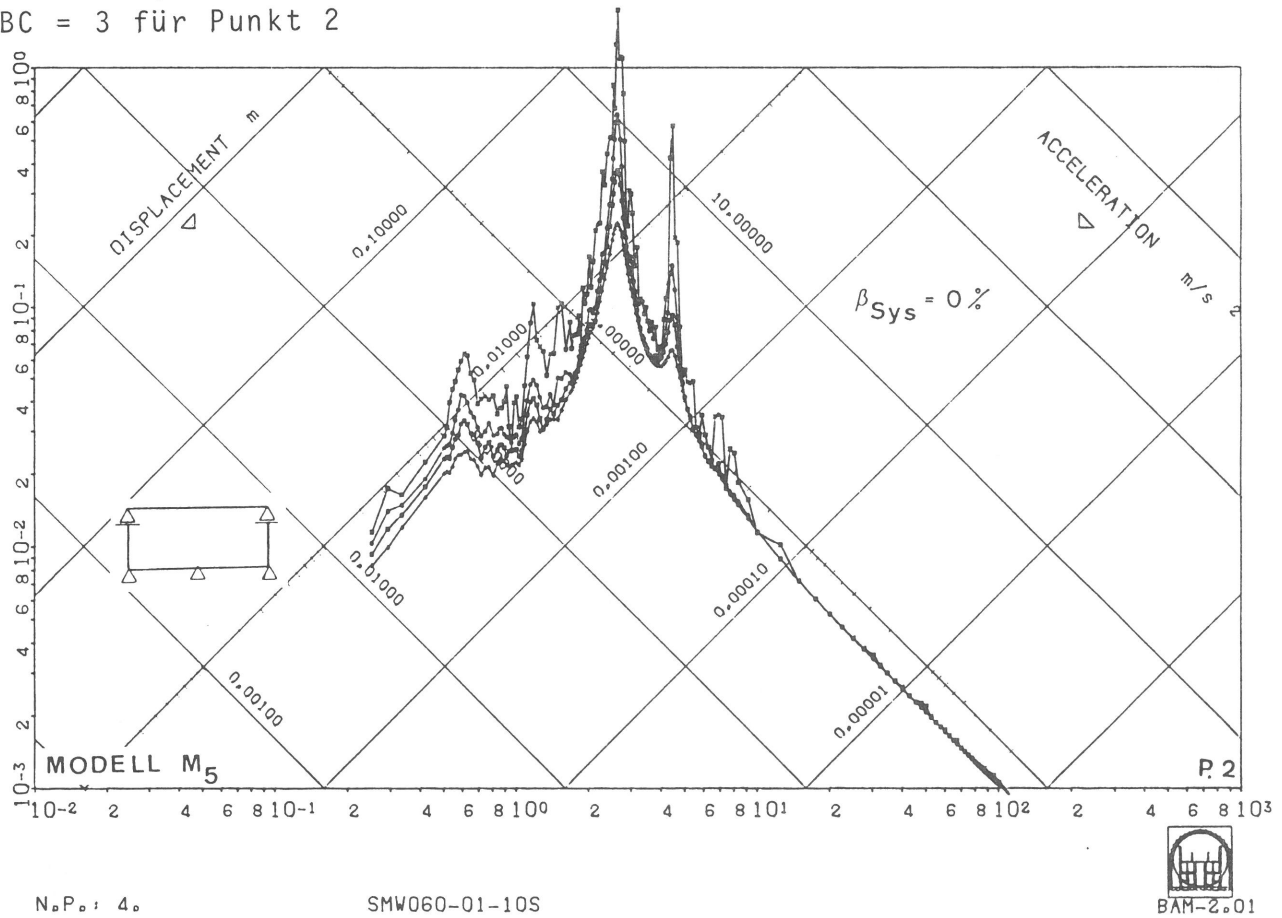
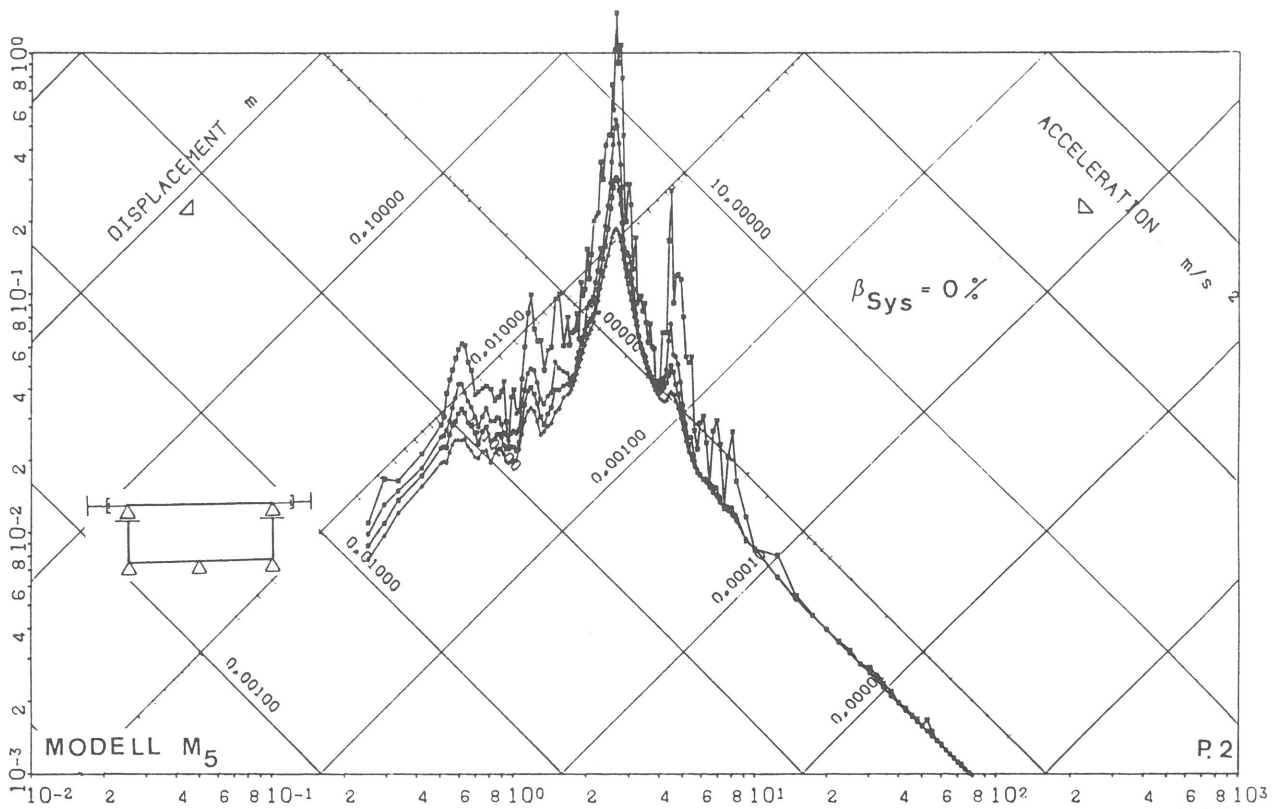


Abb. 34
 Modell M₅ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung
 BC = 1 für Punkt 2



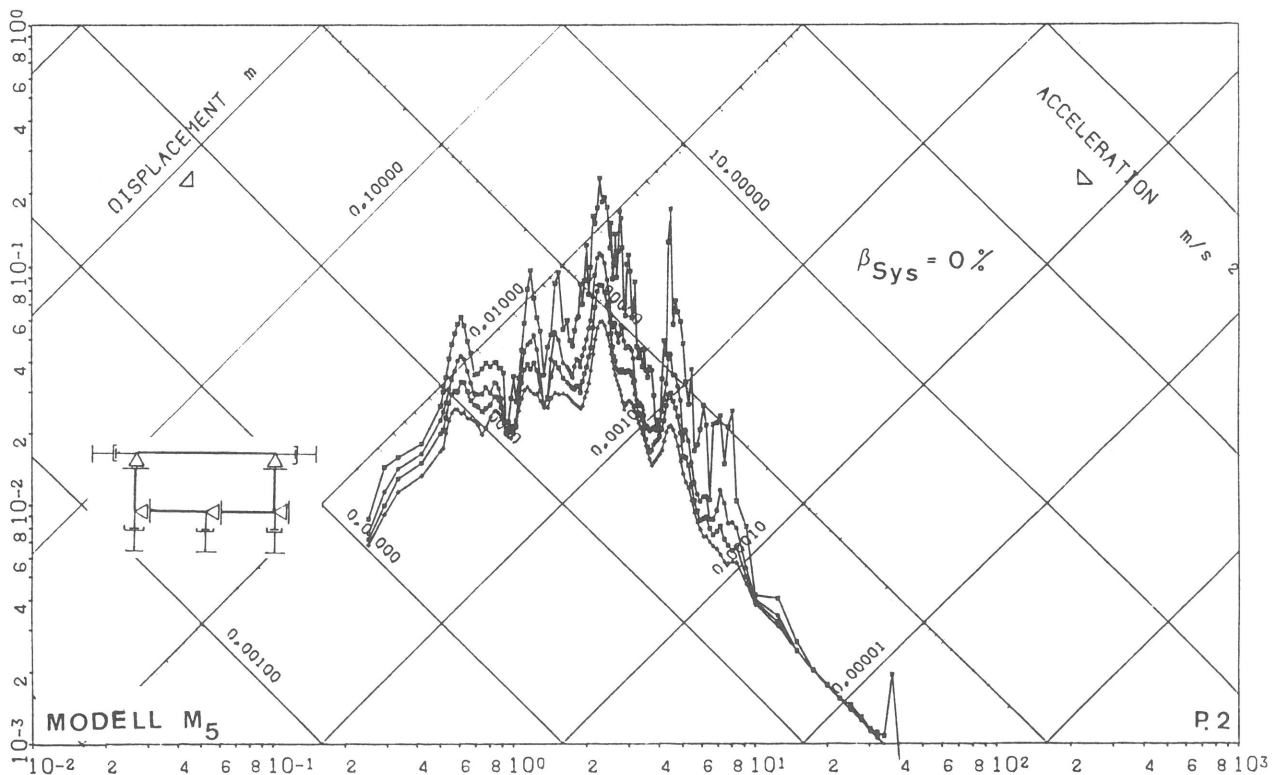
N.P.: 4.

SMW601-10-10S



Abb. 35

Modell M₅ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung
BC = 2 für Punkt 2



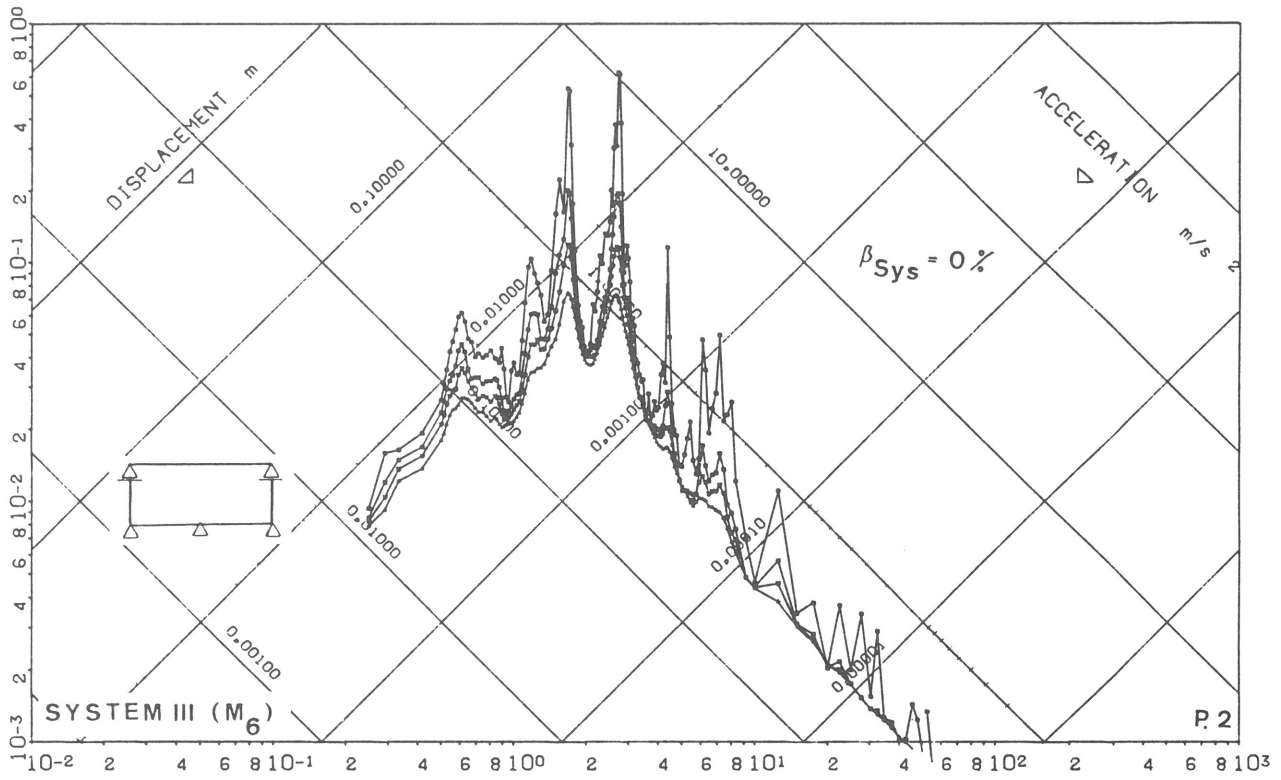
N.P.: 4.

SMW601-14-10S



Abb. 36

Modell M₅ Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung
BC = 3 für Punkt 2

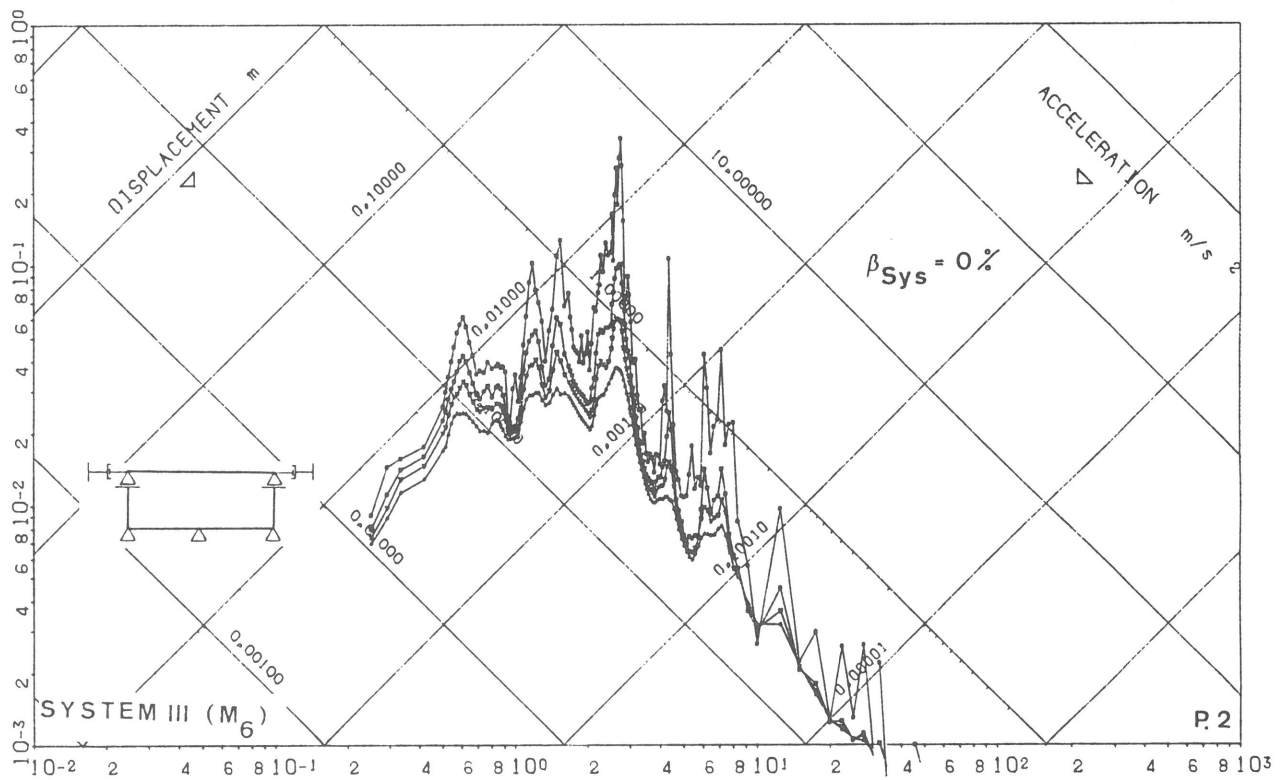


N.P.: 4.

801 IRTY=6

Abb. 37

System III (M_6) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 2

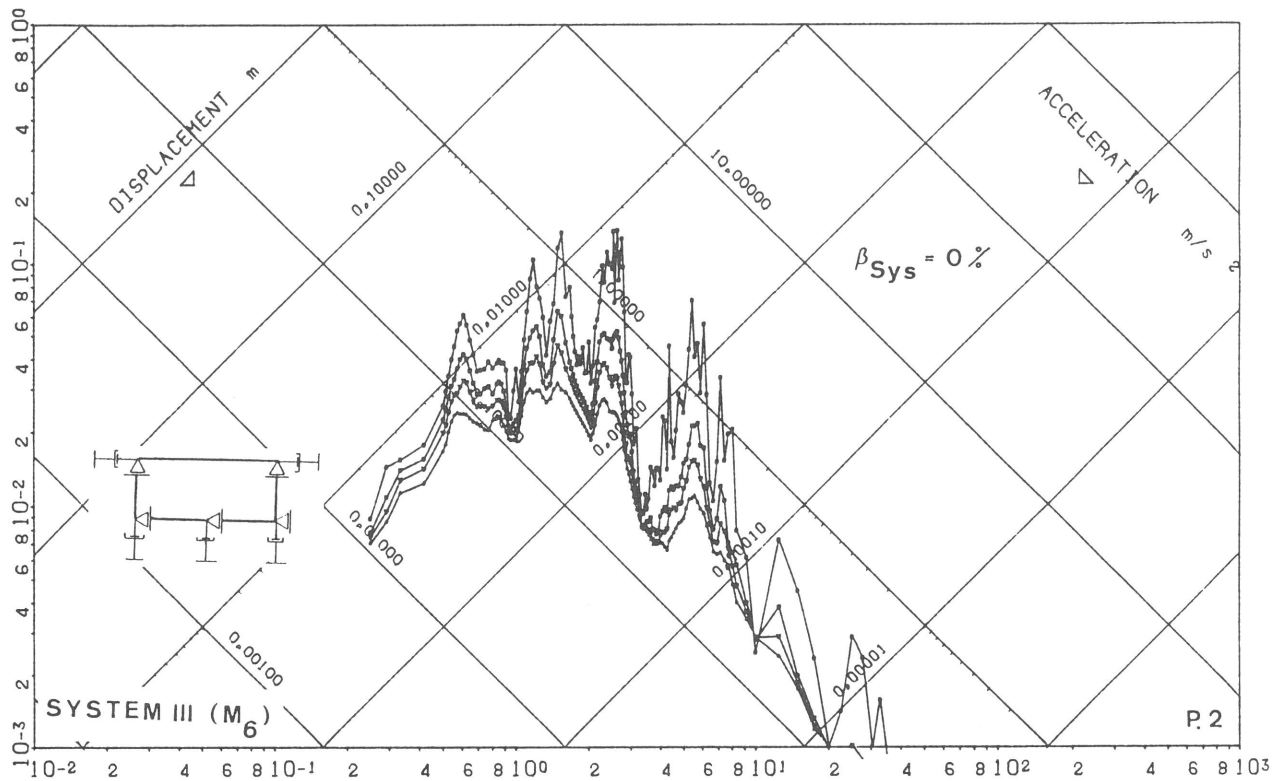


N.P.: 4.

801 IRTY=20

Abb. 38

System III (M_6) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 2 für Punkt 2

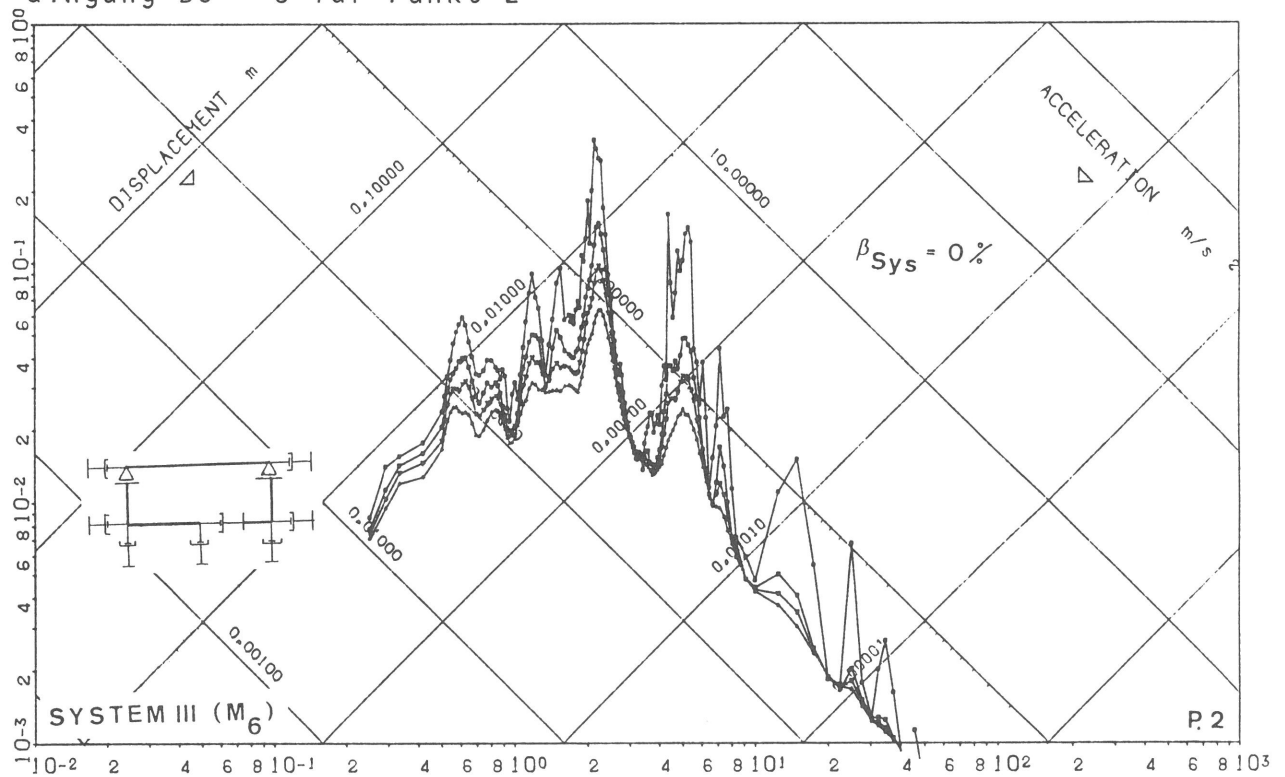


N.P.: 4.

801 IRTY=24

Abb. 39

System III (M_6) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 3 für Punkt 2

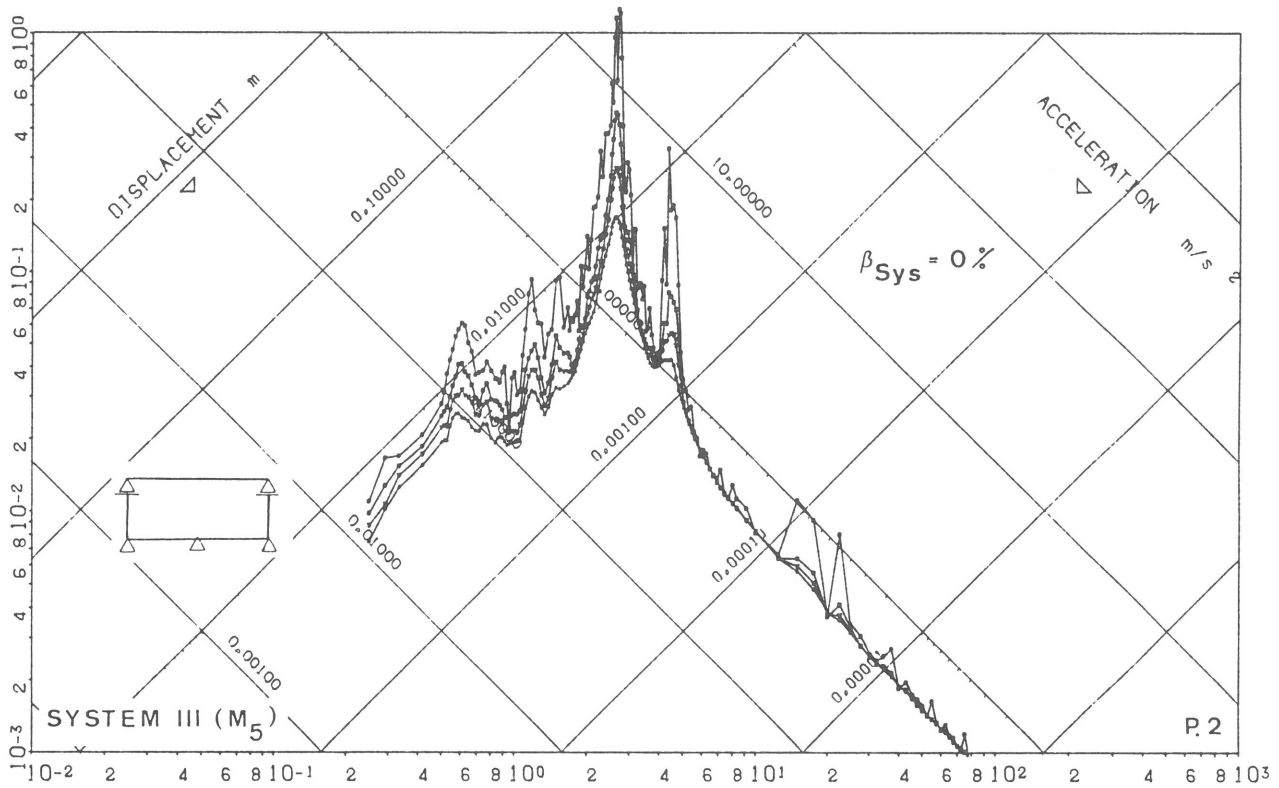


N.P.: 4.

801 IRTY=25

Abb. 40

System III (M_6) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 2

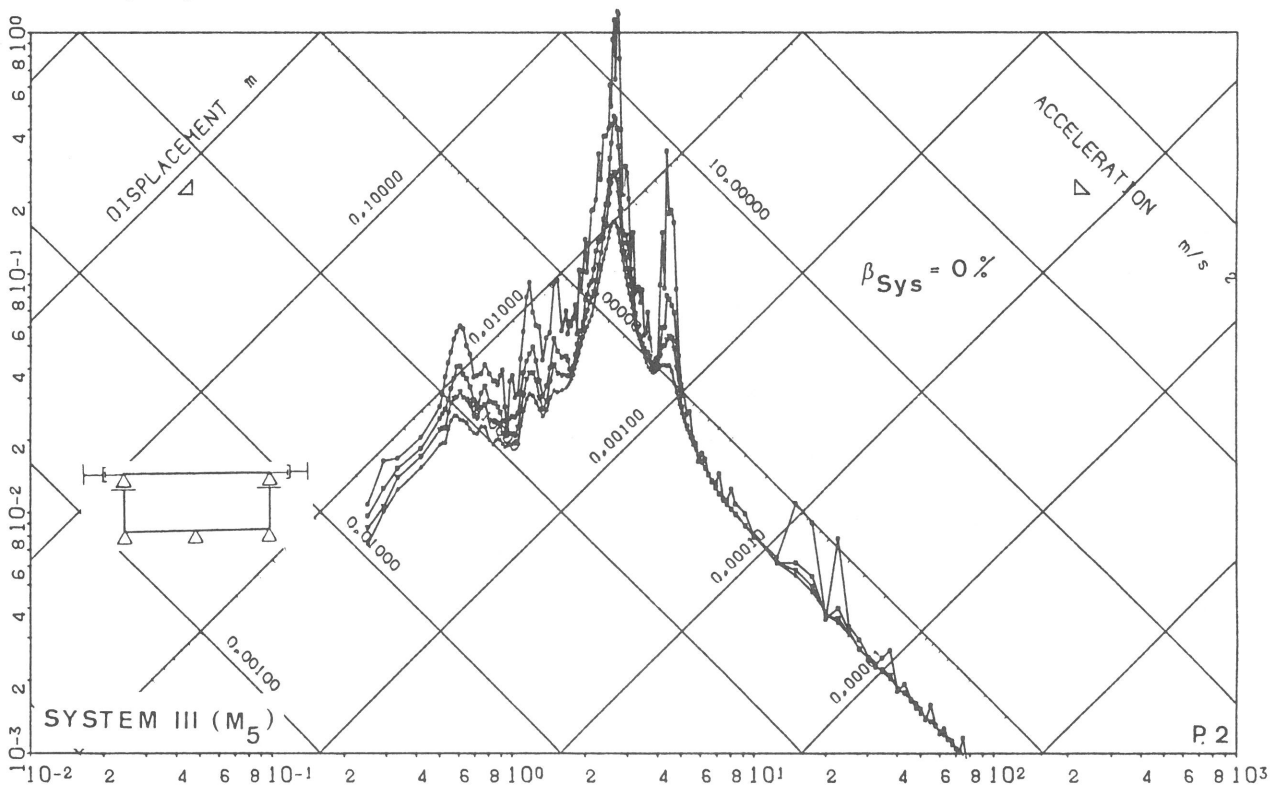


N.P.: 4.

SMW6/10 IRTY=6

Abb. 41

System III (M₅) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 2

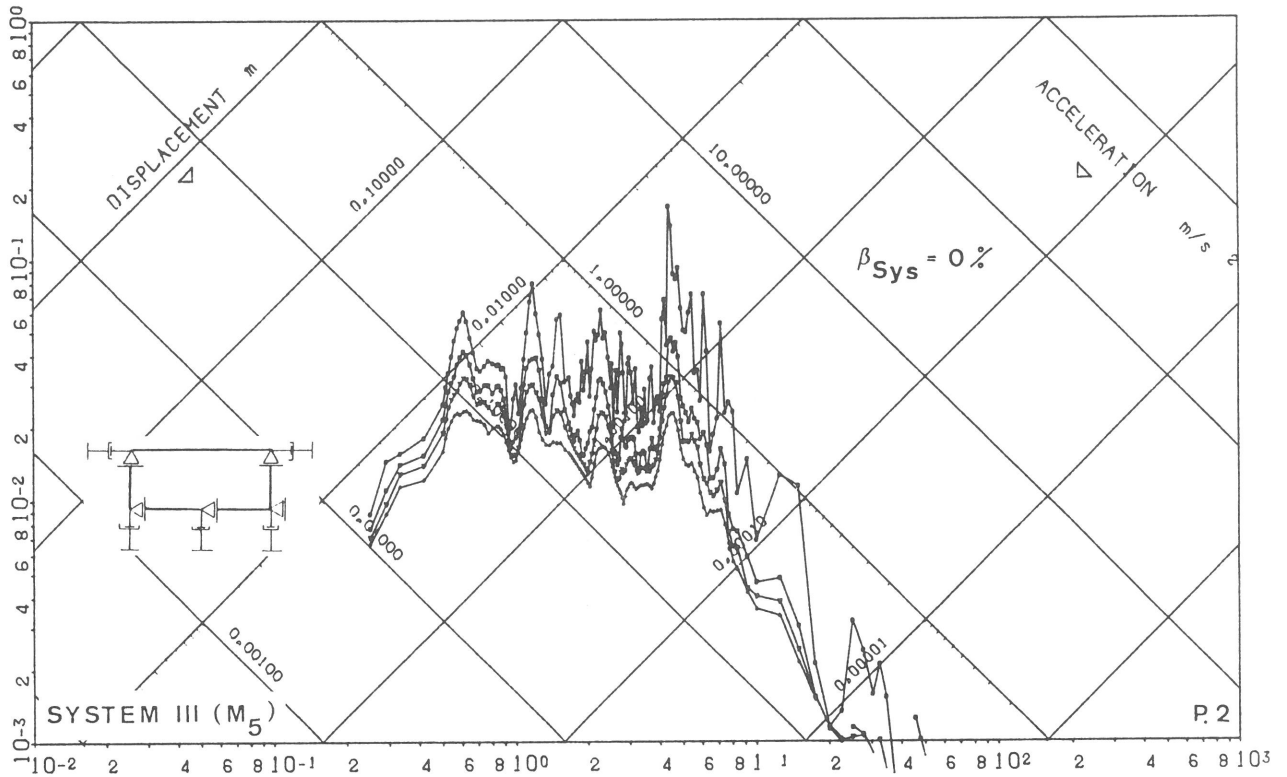


N.P.: 4.

SMW6/10 IRTY=20

Abb. 42

System III (M₅) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 2 für Punkt 2

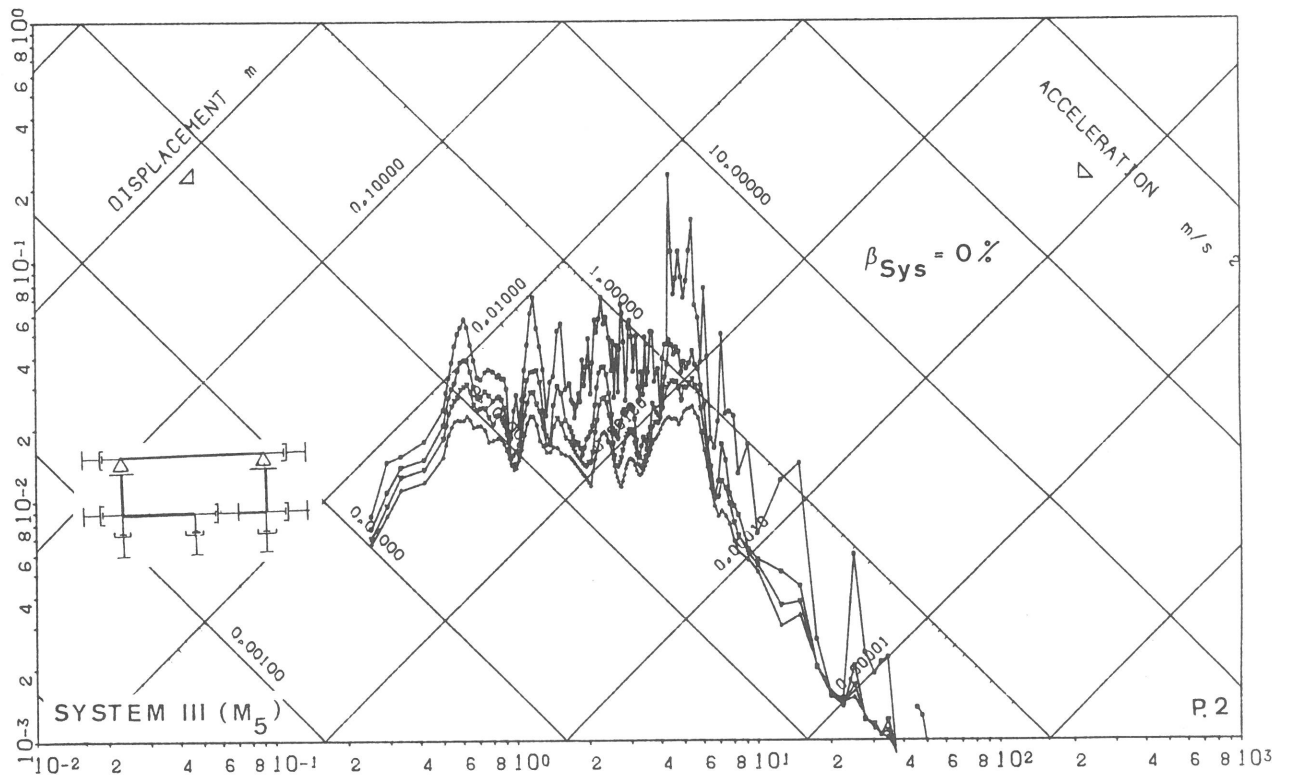


N.P.: 4.

SMW6/10 IRTY=24

Abb. 43

System III (M_5) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 3 für Punkt 2

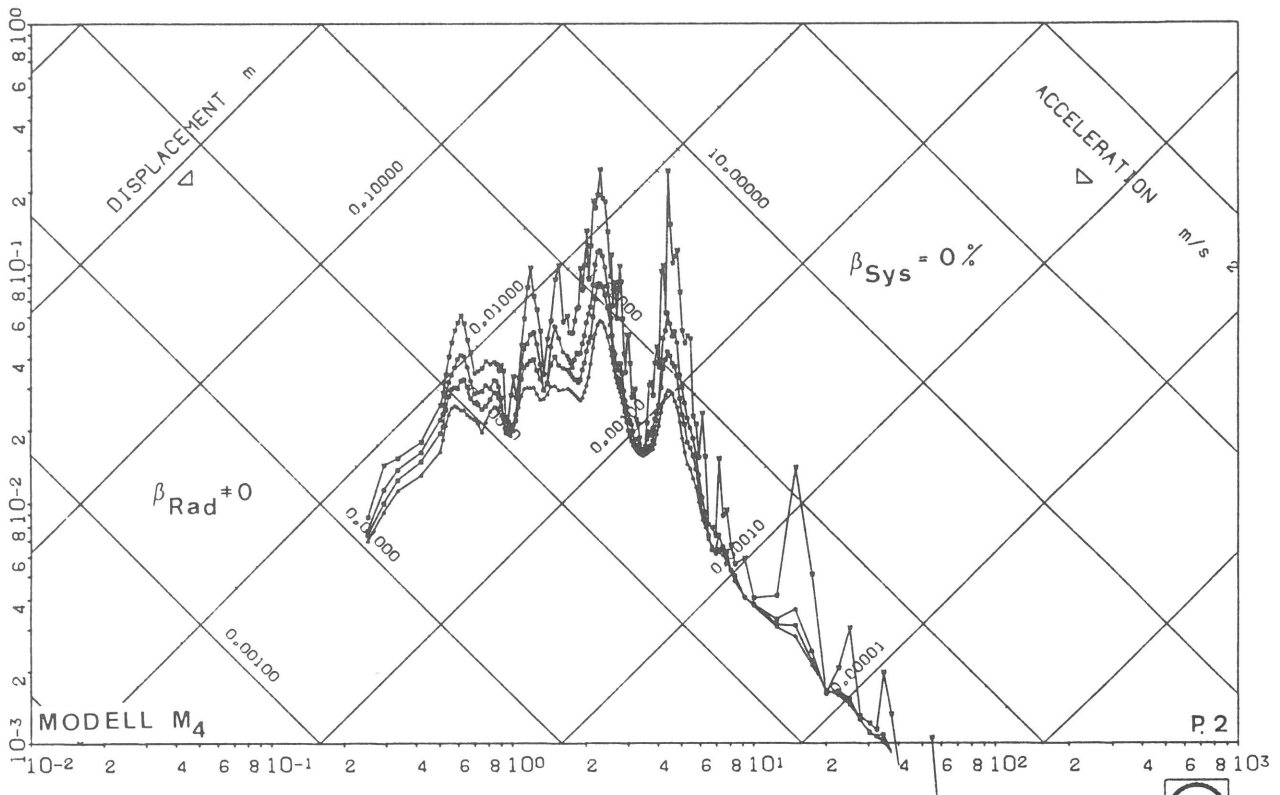


N.P.: 4.

SMW6/10 IRTY=25

Abb. 44

System III (M_5) Response Spektrum ohne Dämpfung mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 2



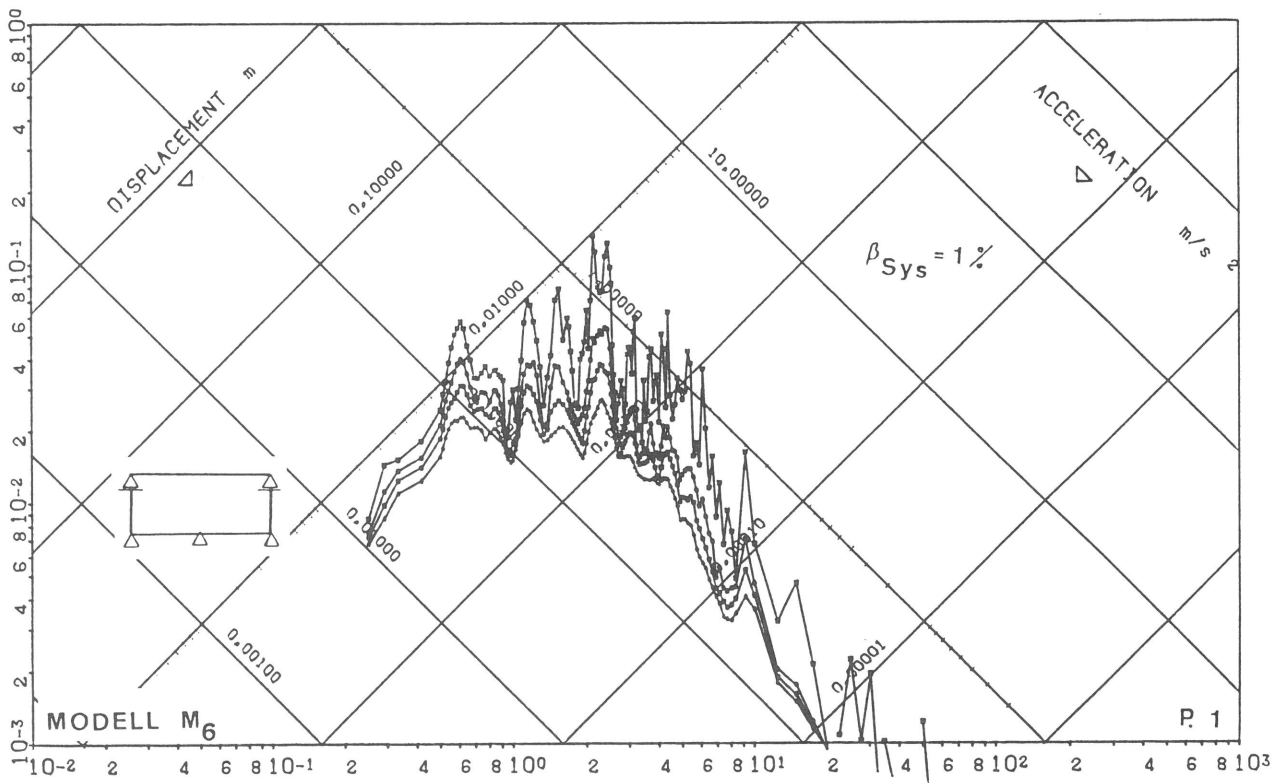
N.P.: 73.

SML601 RR



Abb. 45

Modell M_4 Response Spektrum ohne Dämpfung und mit Abstrahlungsdämpfung für Punkt 2



N.P.: 73.

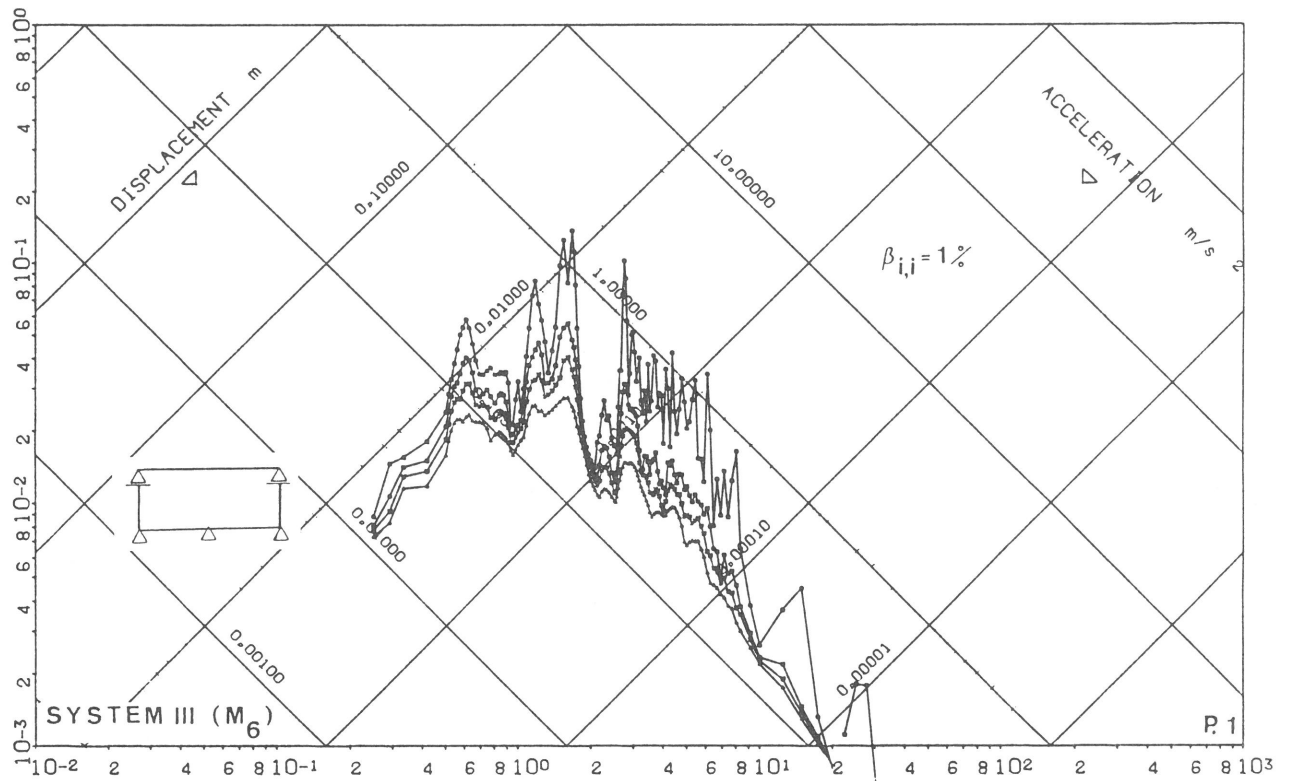
SMW8011-01

ZYKLUS=7



Abb. 46

Modell M_6 Response Spektrum bei 1 % Dämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 1

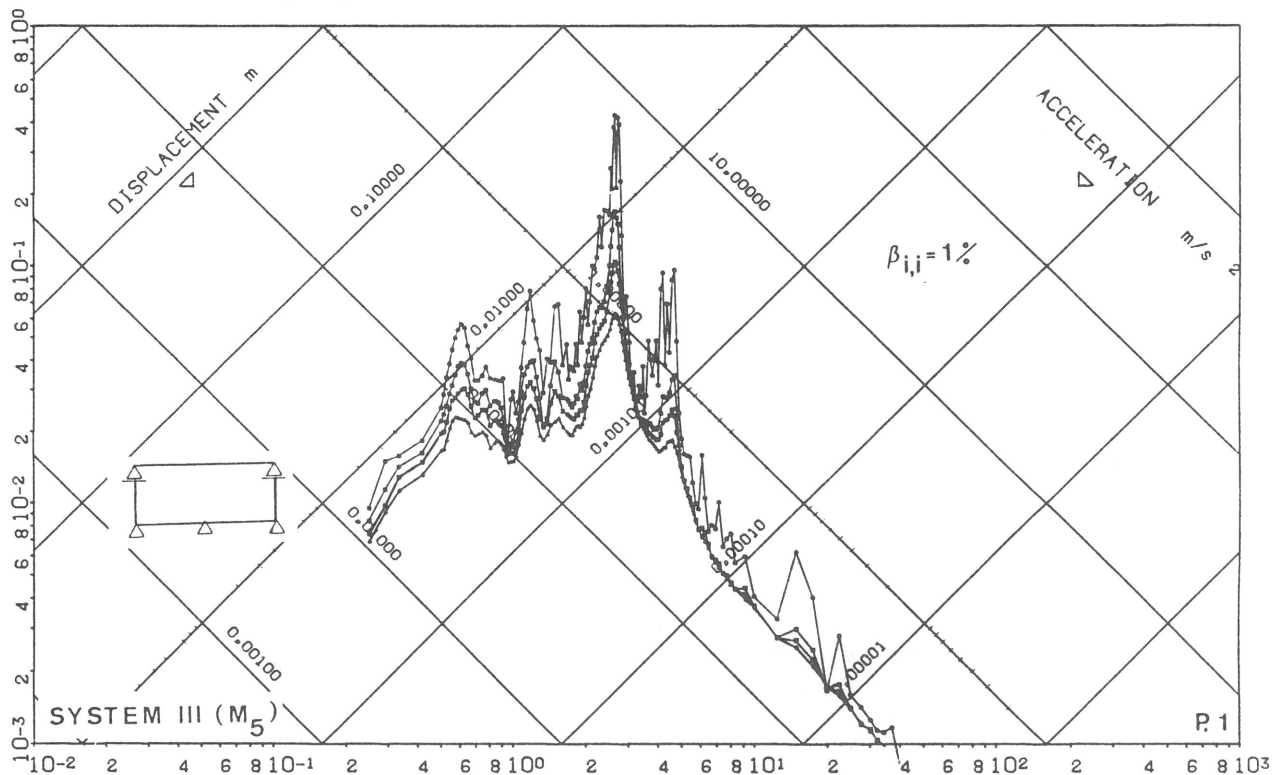


N.P. 73.

801 IRTY=6 0/0 .74/0 1%

Abb. 47

System III (M₆) Response Spektrum bei 1 % Bodendämpfung
mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 1

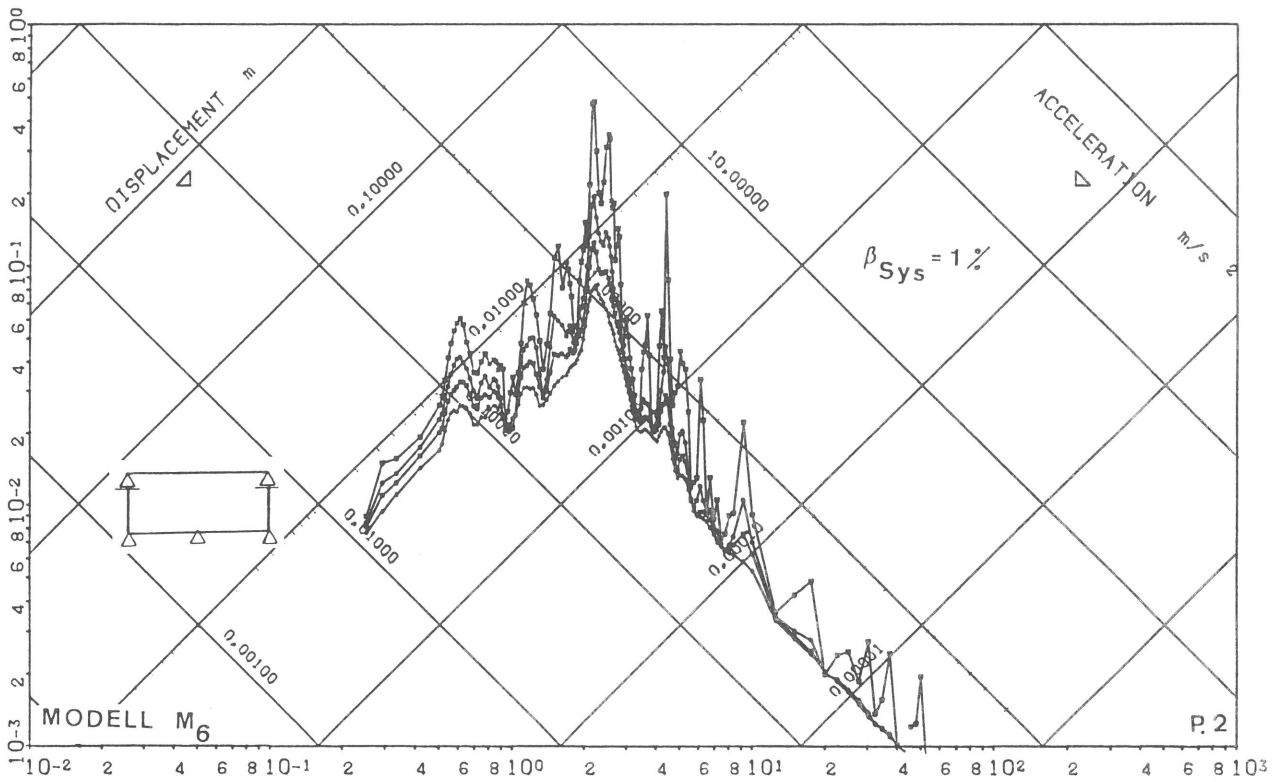


N.P. 73.

SMW6/10 IRTY=6 0/0 .333/- .000254 1%

Abb. 48

System III (M₅) Response Spektrum bei 1 % Bodendämpfung
mit Randbedingung BC = 1 für Punkt I



N_p: 4_o

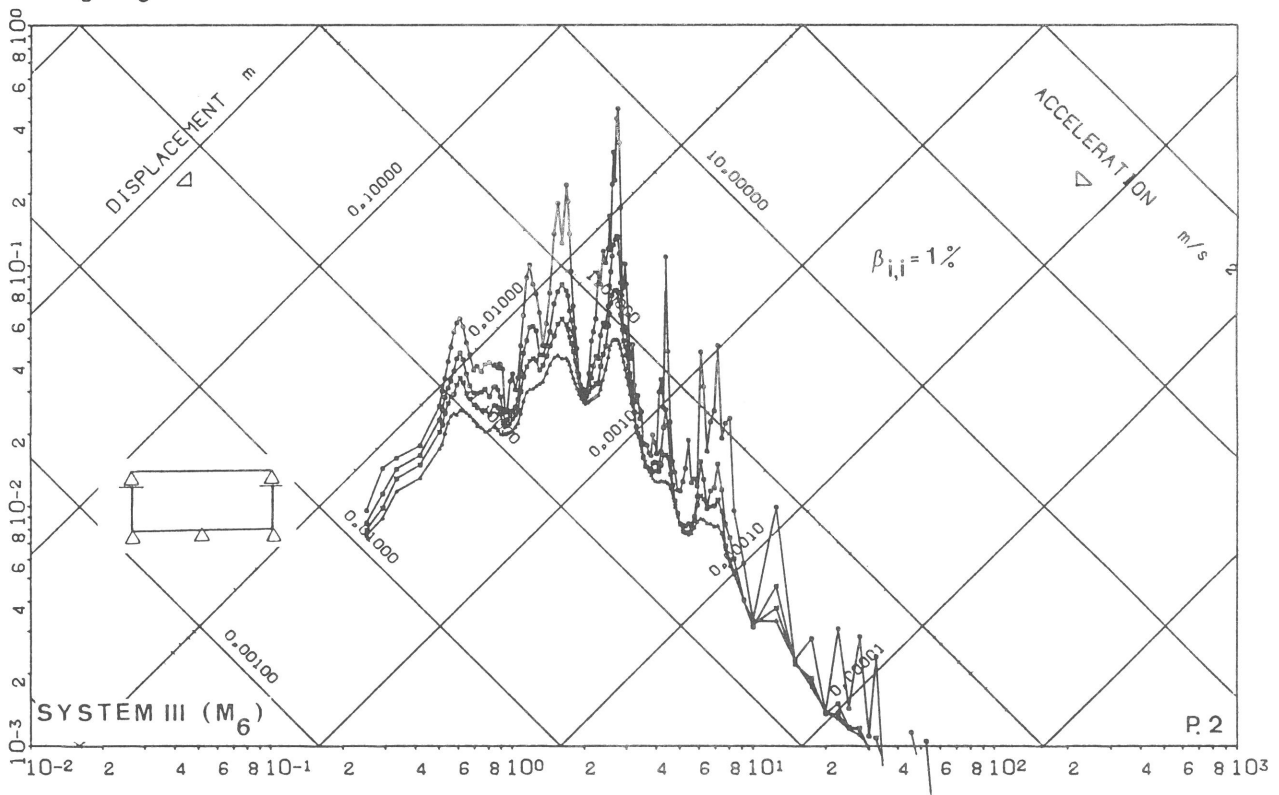
SMW8011-01

ZYKLUS=7



Abb. 49

Modell M₆ Response Spektrum bei 1 % Dämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 2

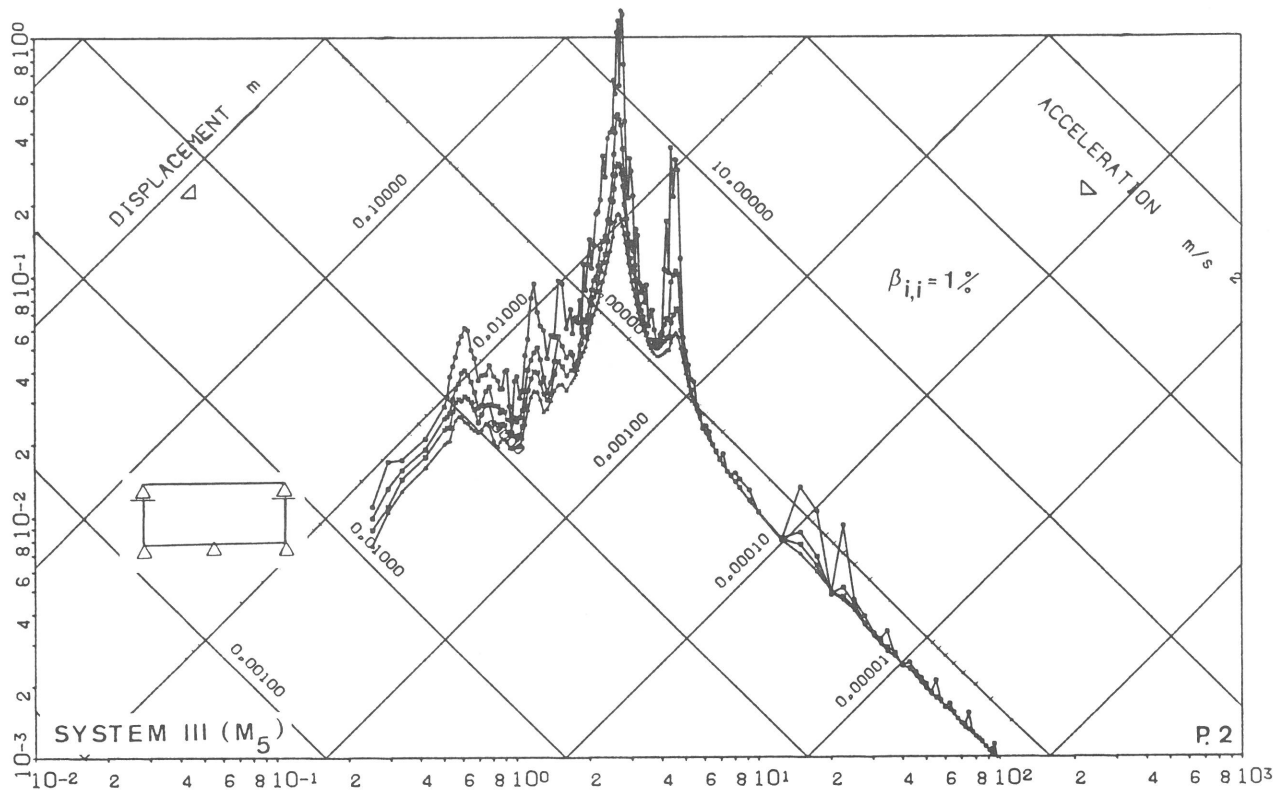


N_p: 4_o

801 IRTY=6 0/0 74/0 1%

Abb. 50

System III (M₆) Response Spektrum bei 1 % Bodendämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 2

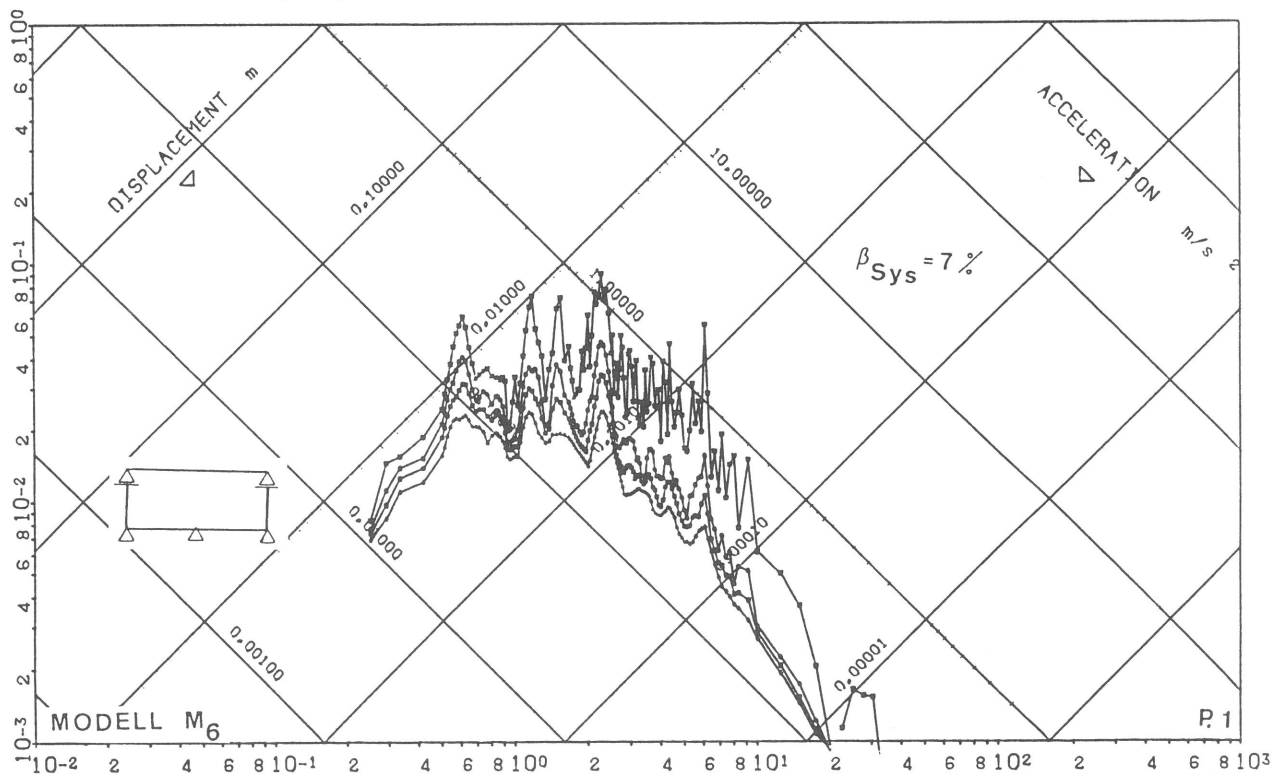


N.P.: 4.

SMW6/10 IRTY=6 0/0 .333/-0.000254 1%

Abb. 51

System III (M_5) Response Spektrum bei 1 % Bodendämpfung
mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 2



N.P.: 73.

SMW8010-01

ZYKLUS=6



Abb. 52

Modell M_6 Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit
Randbedingung BC = 1 für Punkt 1

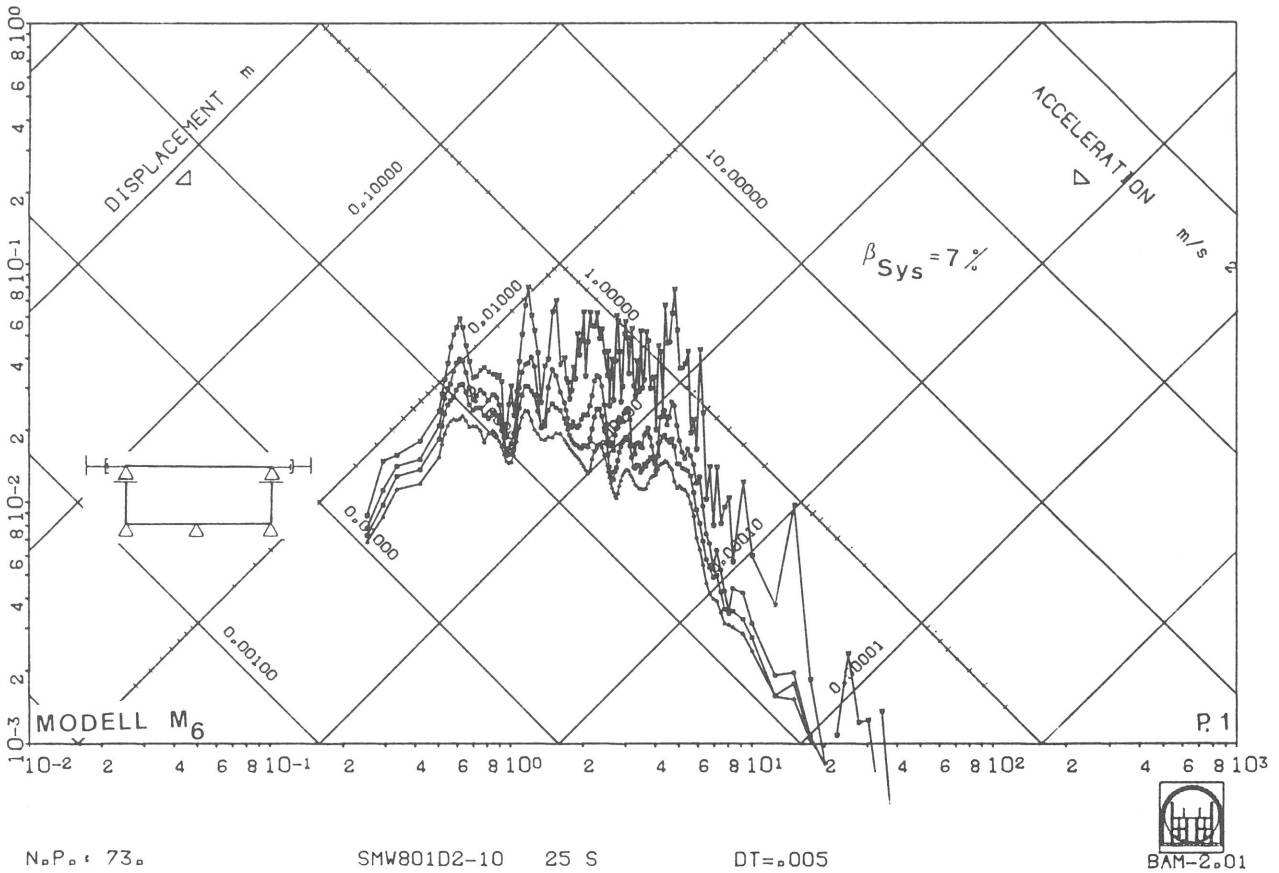


Abb. 53
 Modell M₆ Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit
 Randbedingung BC = 2 für Punkt 1

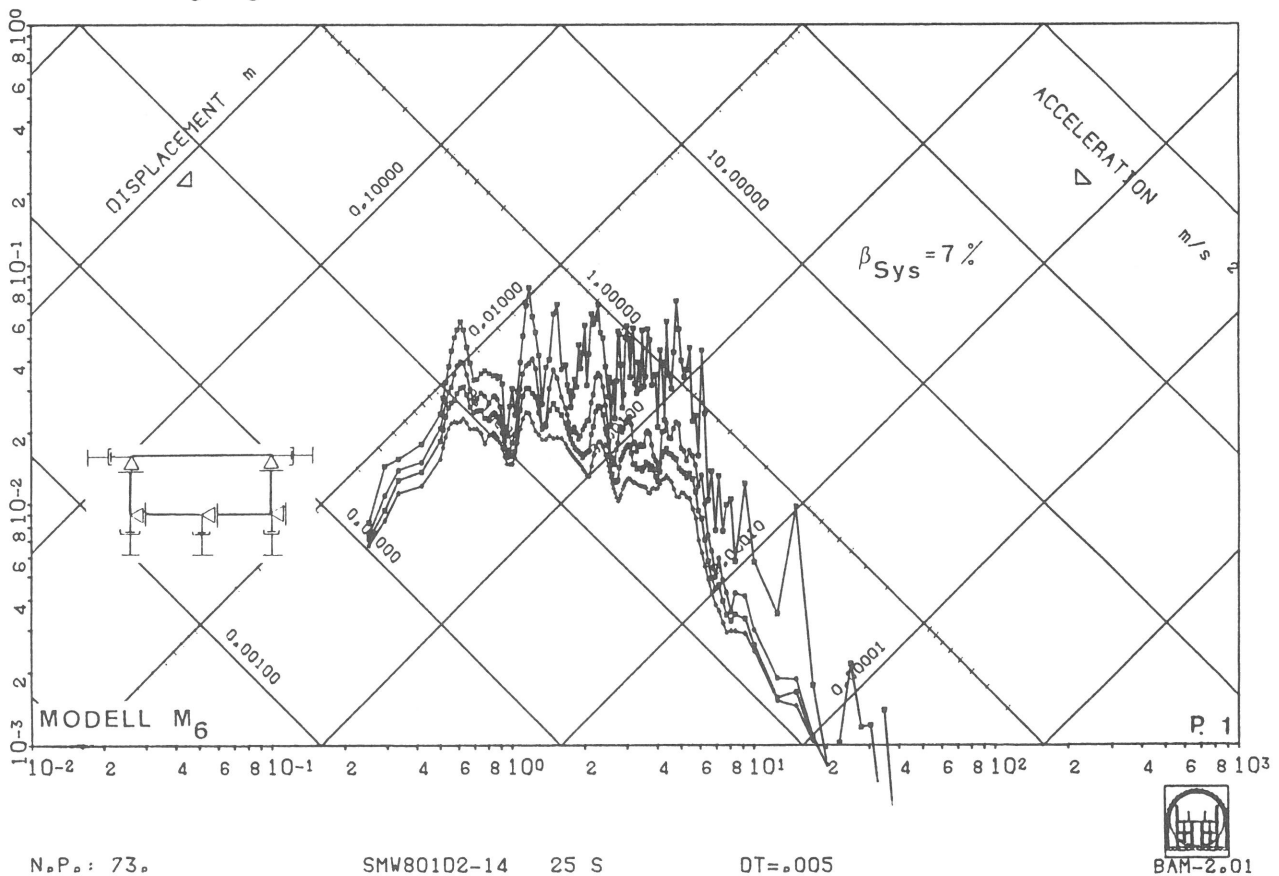
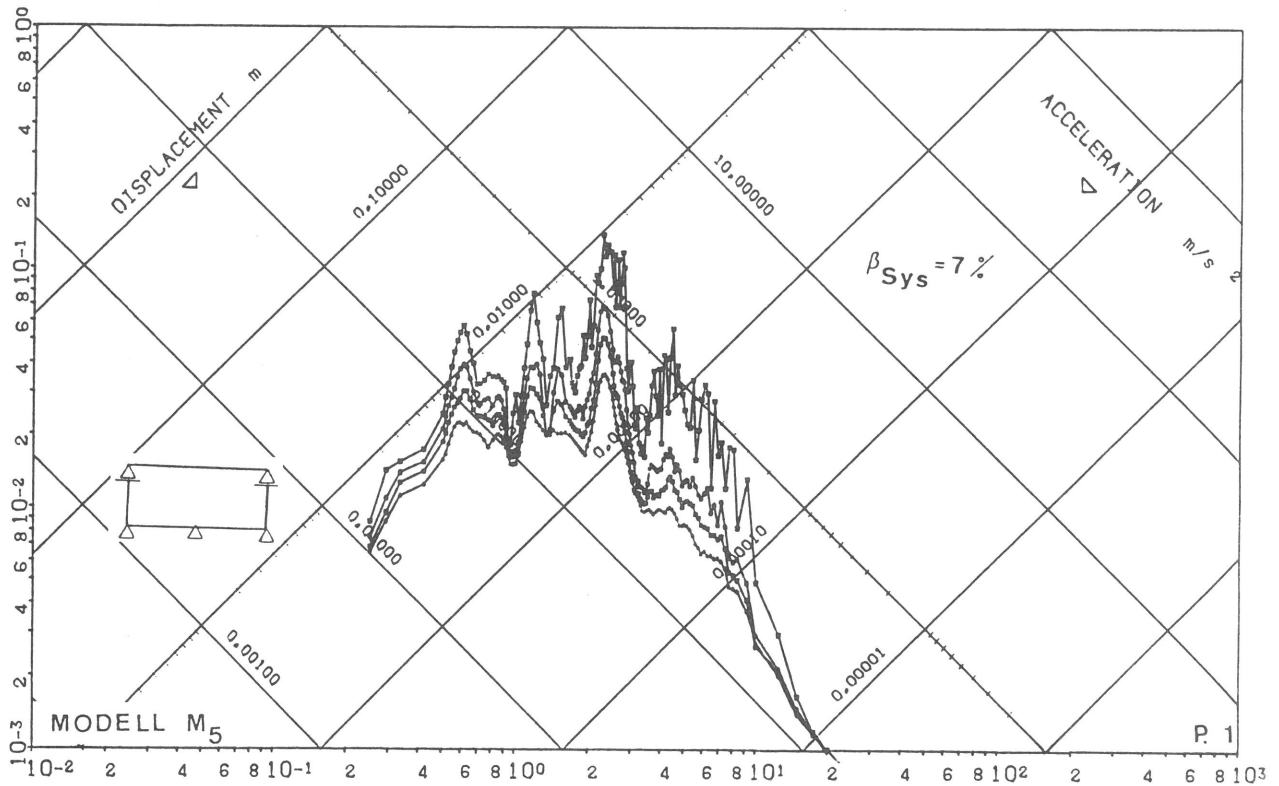


Abb. 54
 Modell M₆ Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit
 Randbedingung BC = 3 für Punkt 1



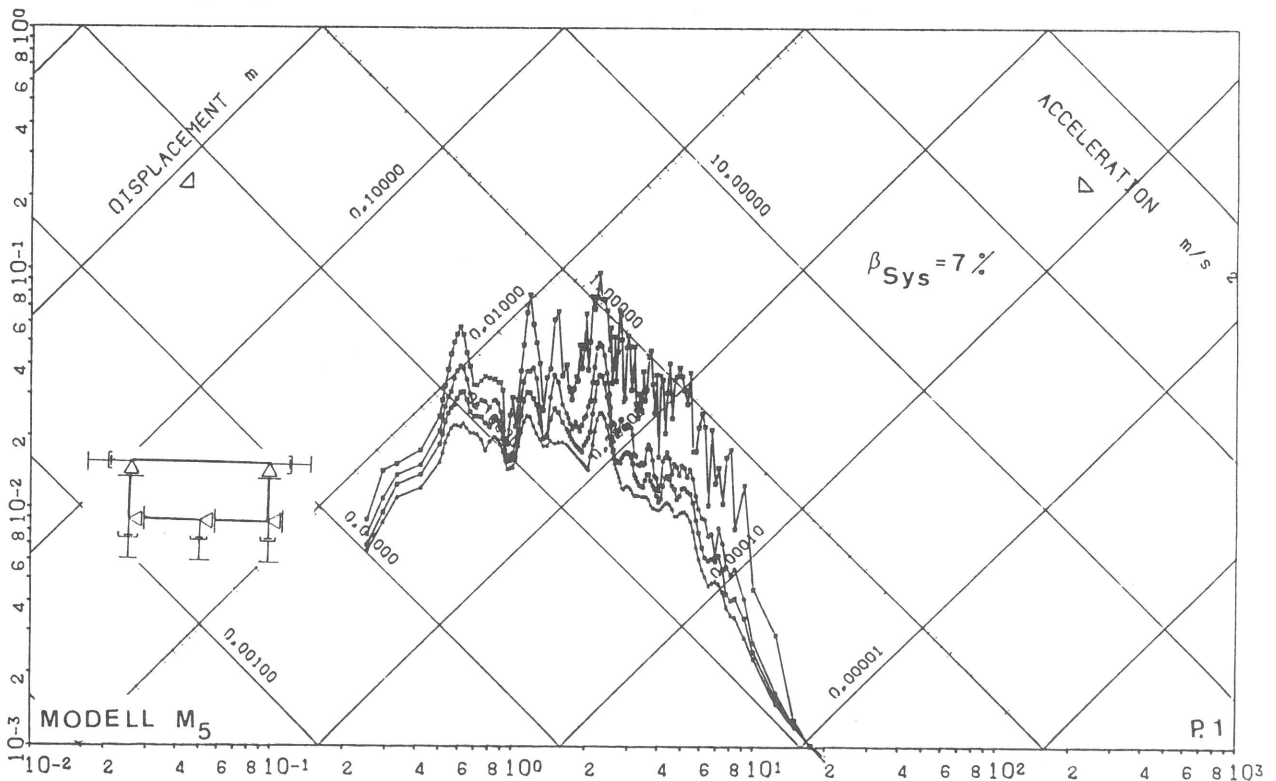
N.P.: 73.

SMW601-01-10S



Abb. 55

Modell M₅ Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit
Randbedingung BC = 1 für Punkt 1



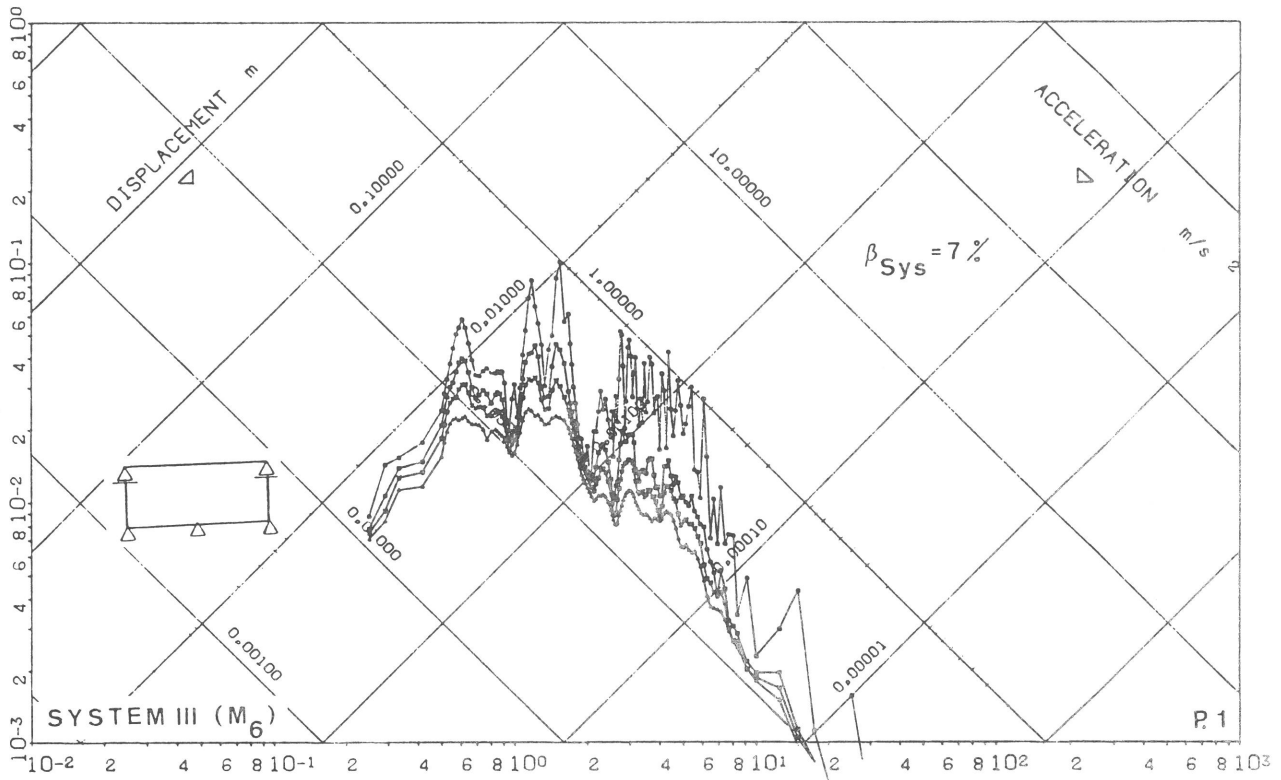
N.P.: 73.

SMW601-14-10S



Abb. 56

Modell M₅ Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit
Randbedingung BC = 3 für Punkt 1

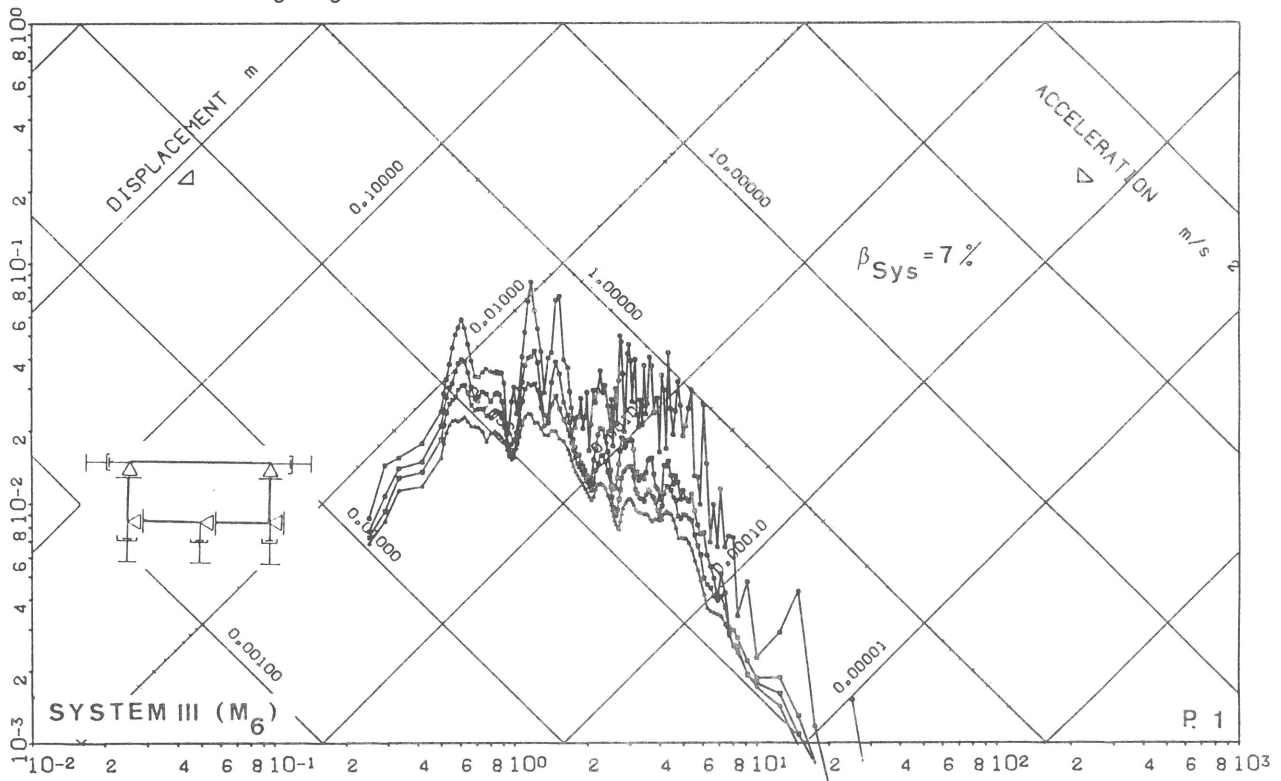


No. P.: 73.

801 IRTY=6 .614/00761

Abb. 57

System III (M_6) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung
mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 1

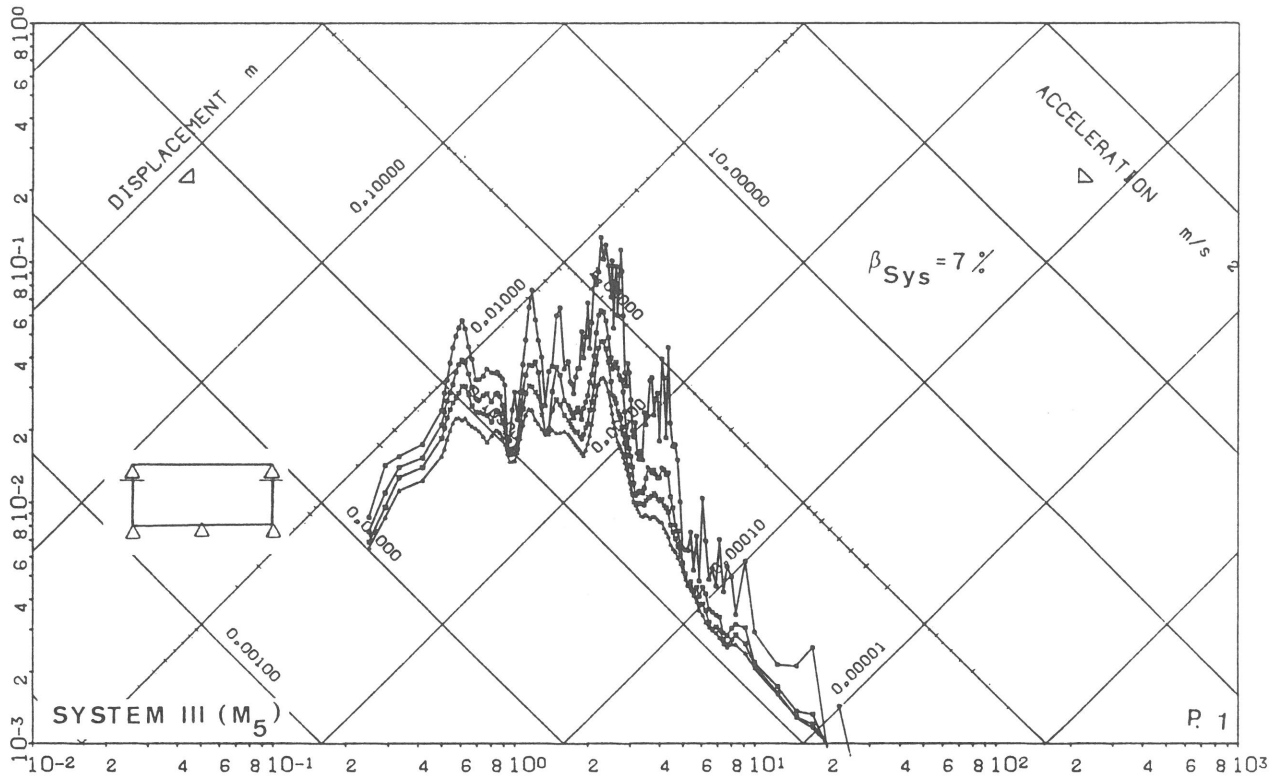


No. P.: 73.

801 IRTY=24 .614/00761

Abb. 58

System III (M_6) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung
mit Randbedingung BC = 3 für Punkt 1

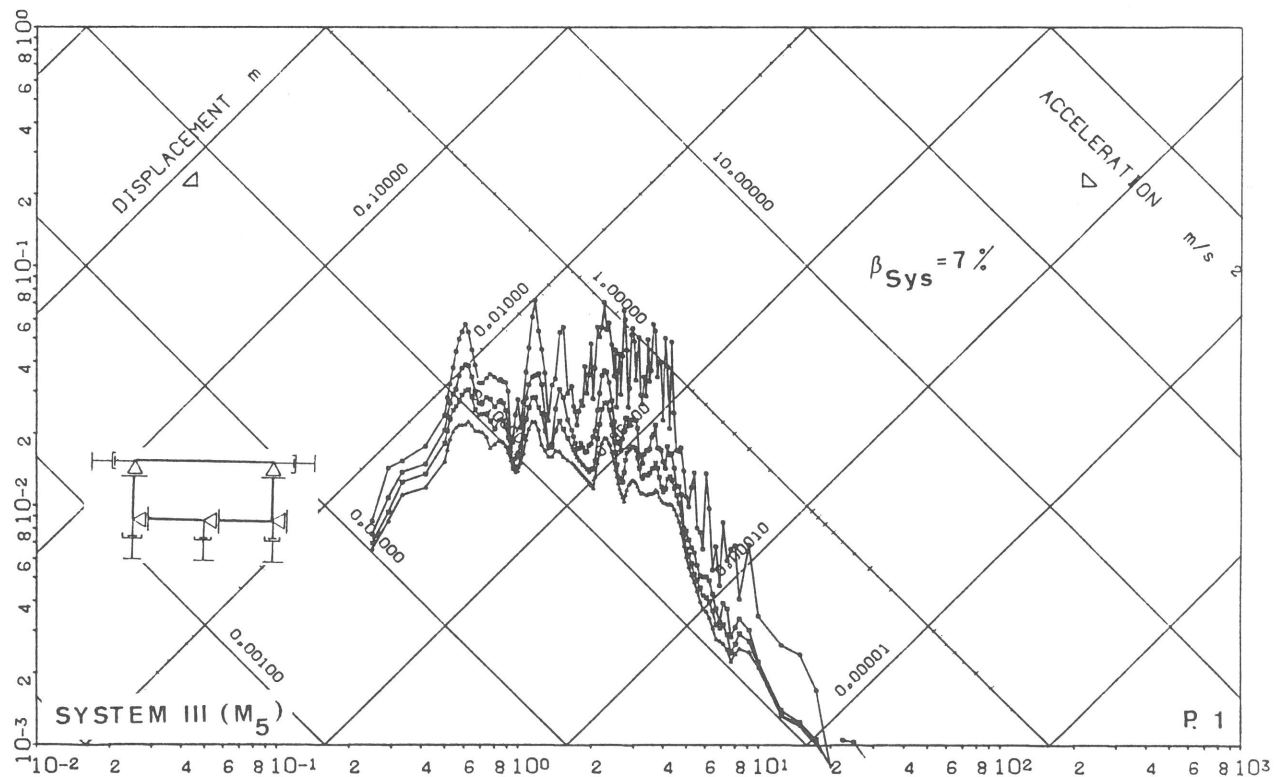


No. P. : 73.

SMW6/10 IRTY=6 1.799/00271

Abb. 59

System III (M_5) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung
mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 1

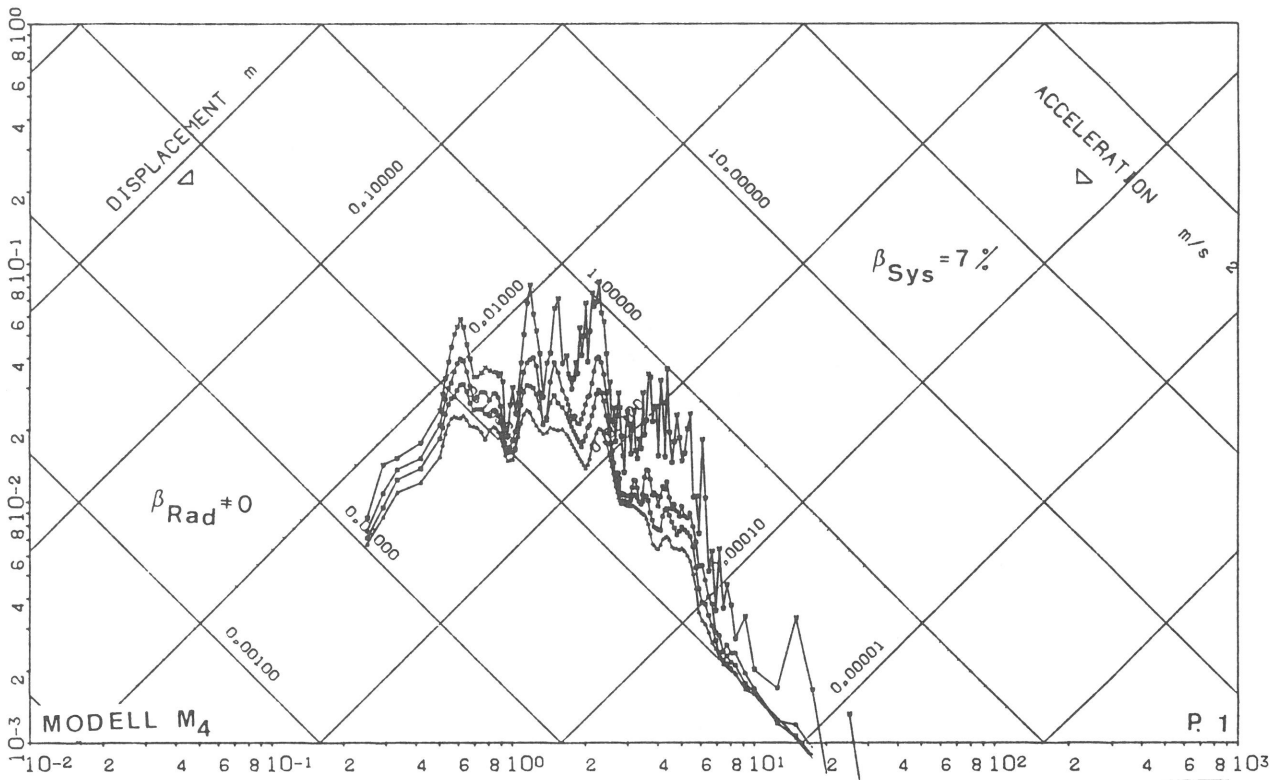


No. P. : 73.

SMW6/10 IRTY=24 1.799/00271

Abb. 60

System III (M_5) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung
mit Randbedingung BC = 3 für Punkt 1



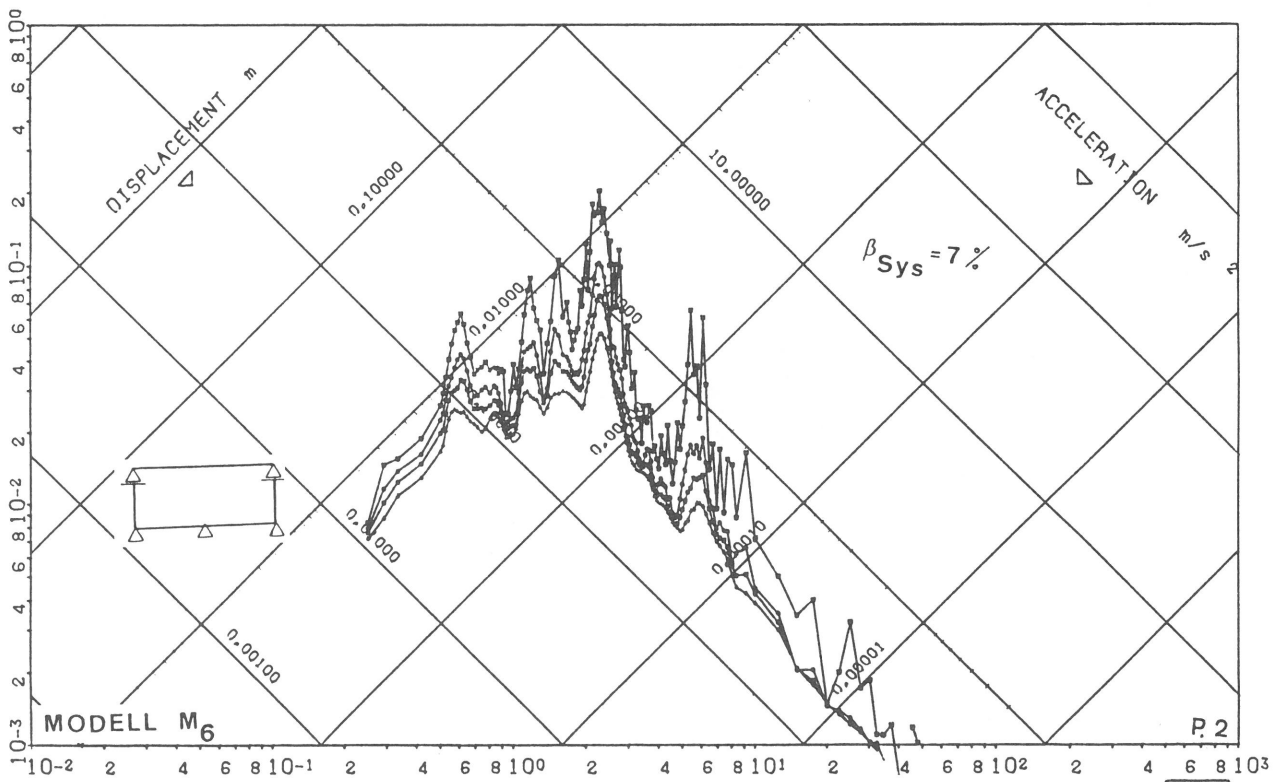
No. P.: 3.

SML601SRR



Abb. 61

Modell M_4 Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Abstrahlungsdämpfung für Punkt 1



No. P.: 4.

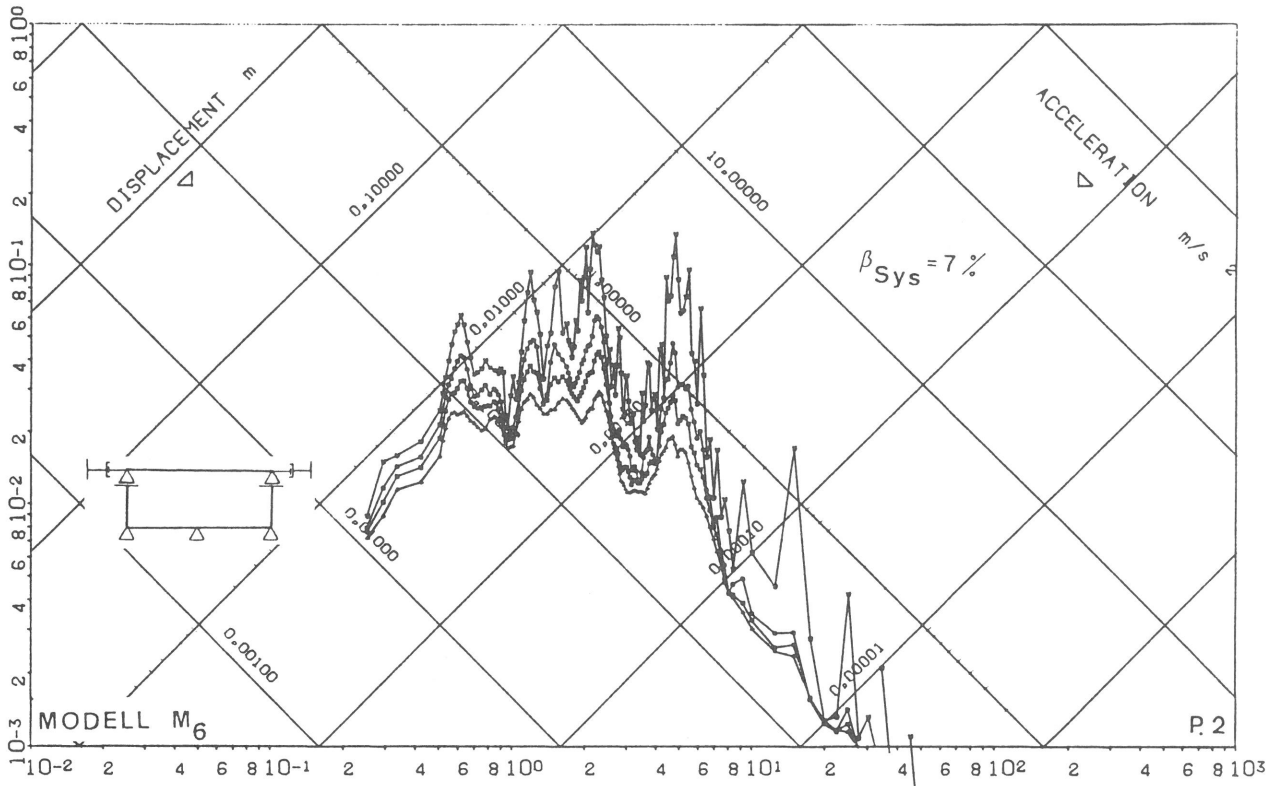
SMW801D-01

ZYKLUS=6



Abb. 62

Modell M_6 Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 2



N_p: 4

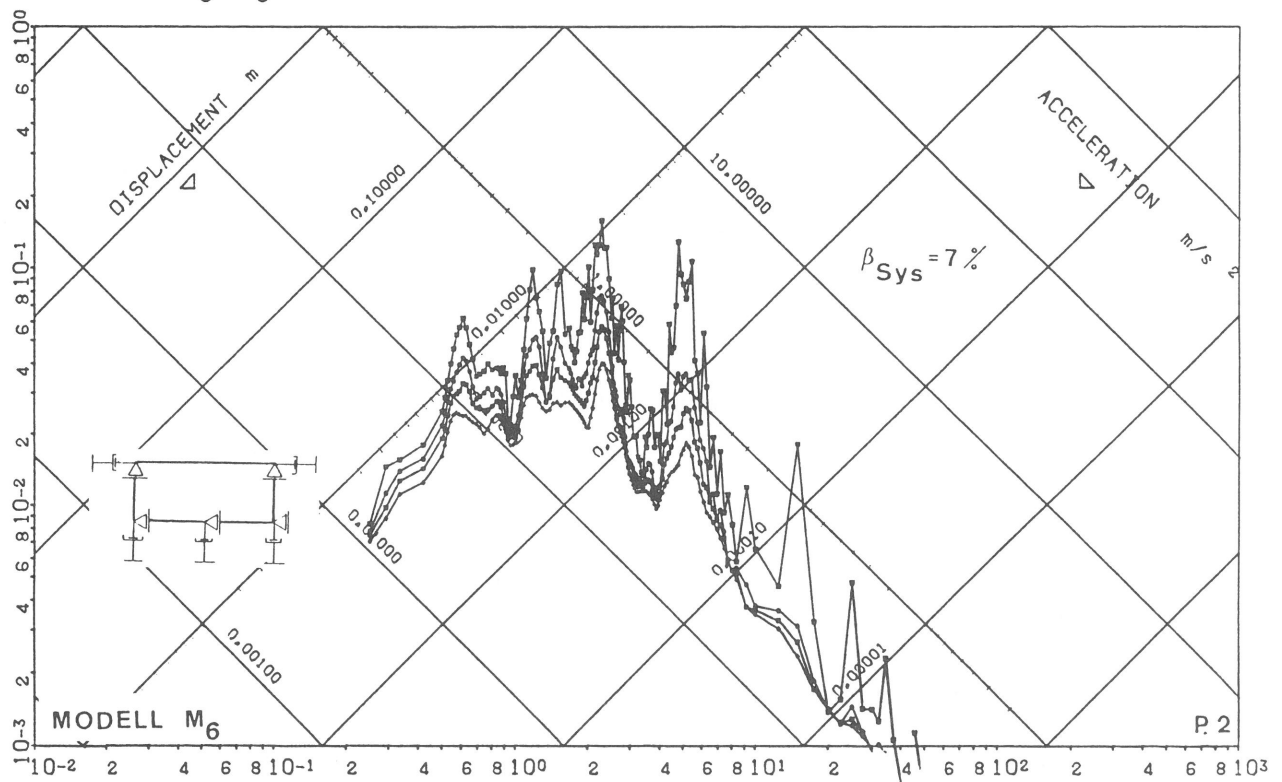
SMW801D2-10 25 S

DT=0.005



Abb. 63

Modell M₆ Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit
Randbedingung BC = 2 für Punkt 2



N_p: 4

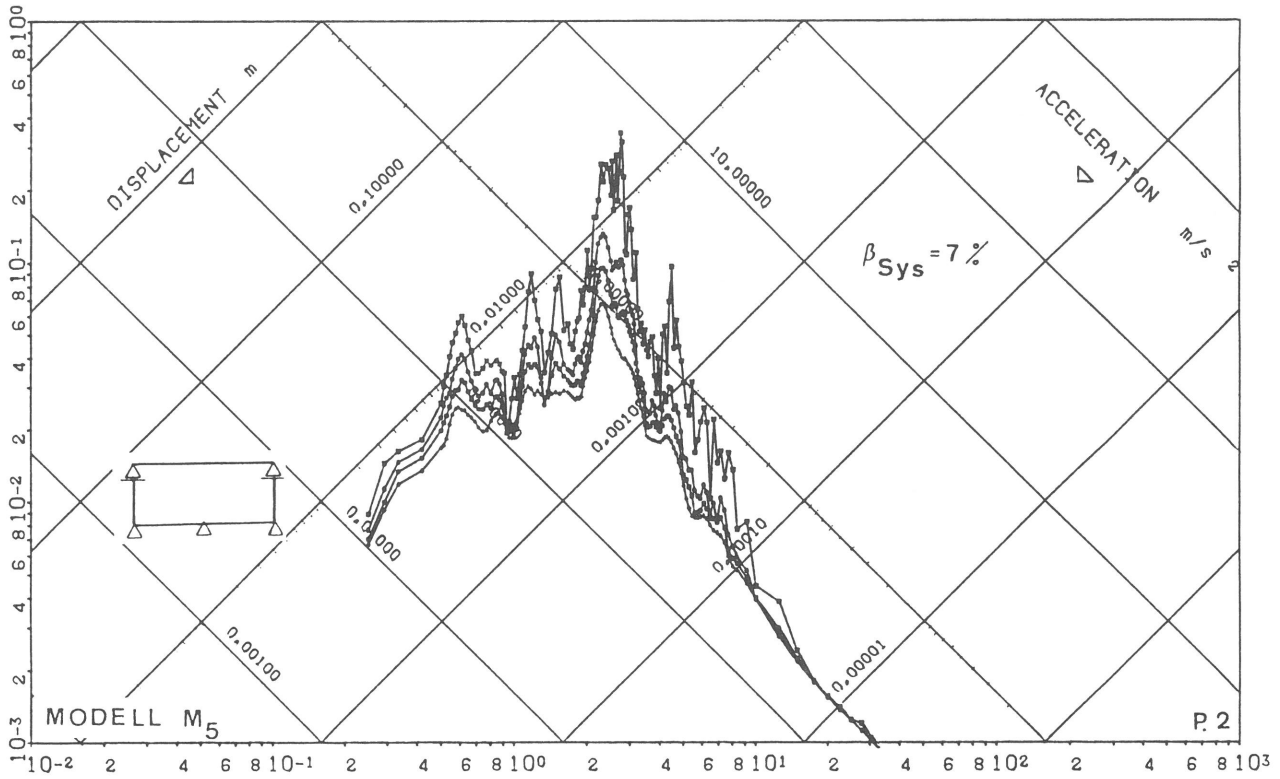
SMW801D2-14 25 S

DT=0.005



Abb. 64

Modell M₆ Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit
Randbedingung BC = 3 für Punkt 2



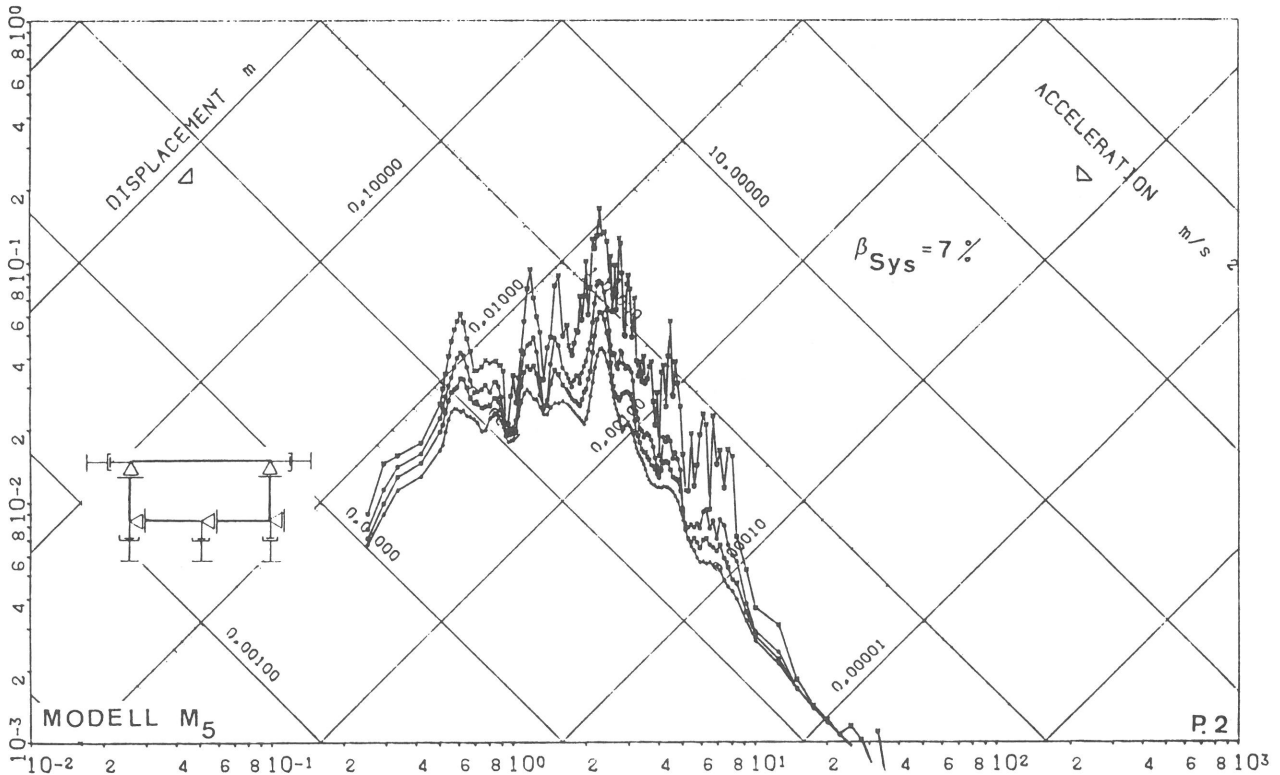
N.P.: 4.

SMW601-01-10S



Abb. 65

Modell M₅ Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit
Randbedingung BC = 1 für Punkt 2



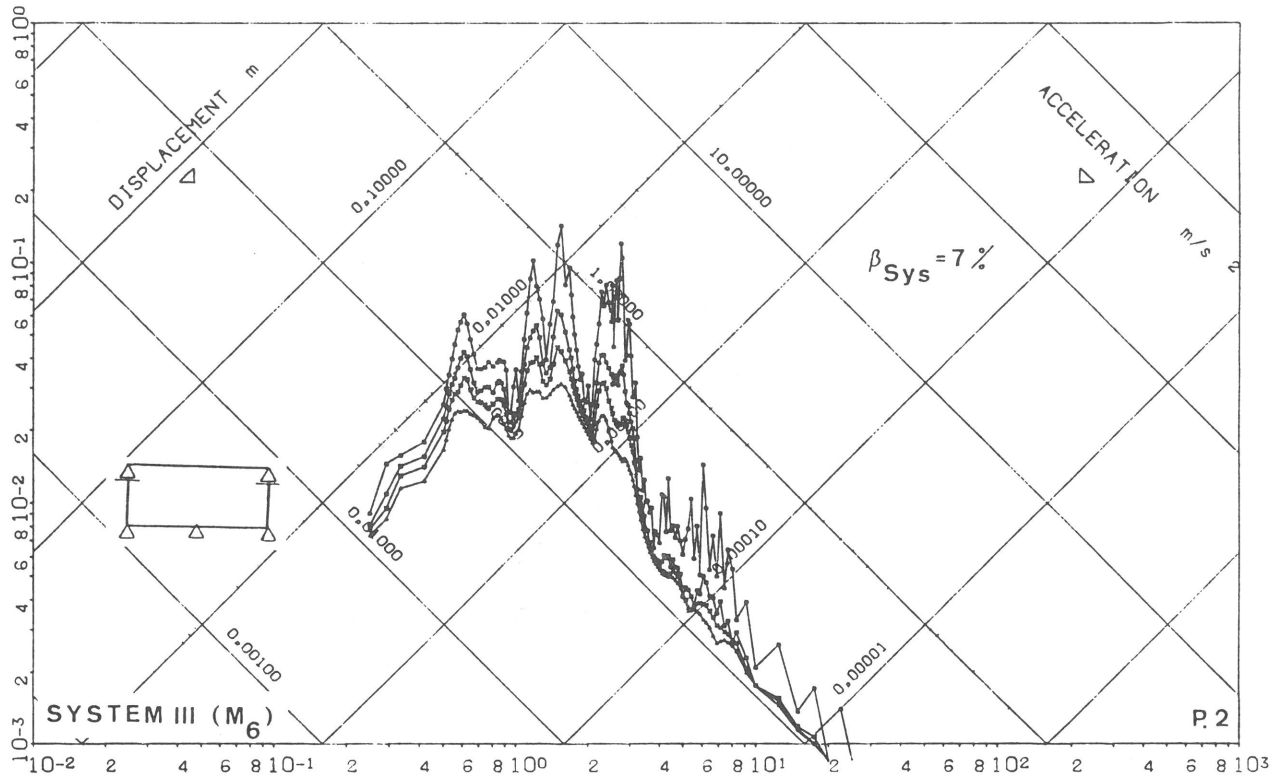
N.P.: 4.

SMW601-14-10S



Abb. 66

Modell M₅ Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit
Randbedingung BC = 3 für Punkt 2

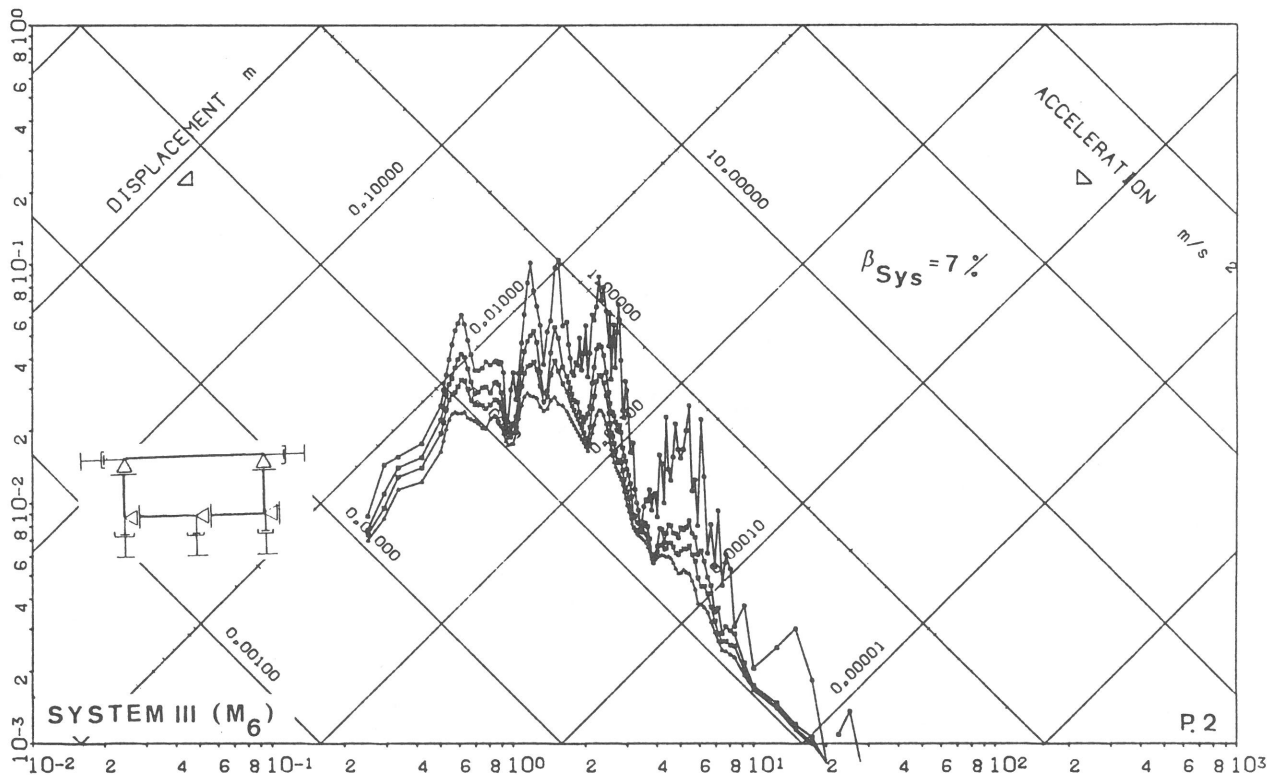


N.P.: 4.

801 IRTY=6 .614/00761

Abb. 67

System III (M_6) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung
mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 2

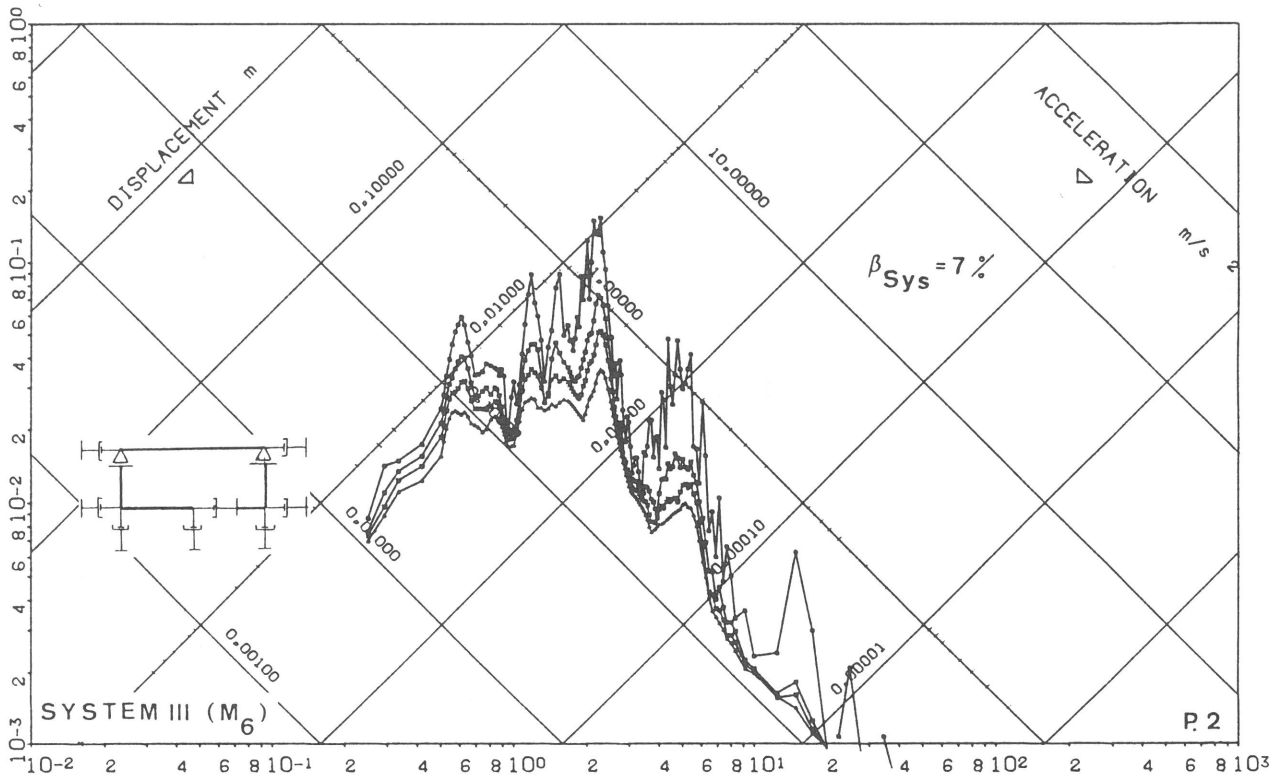


N.P.: 4.

801 IRTY=24 .614/00761

Abb. 68

System III (M_6) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung
mit Randbedingung BC = 3 für Punkt 2

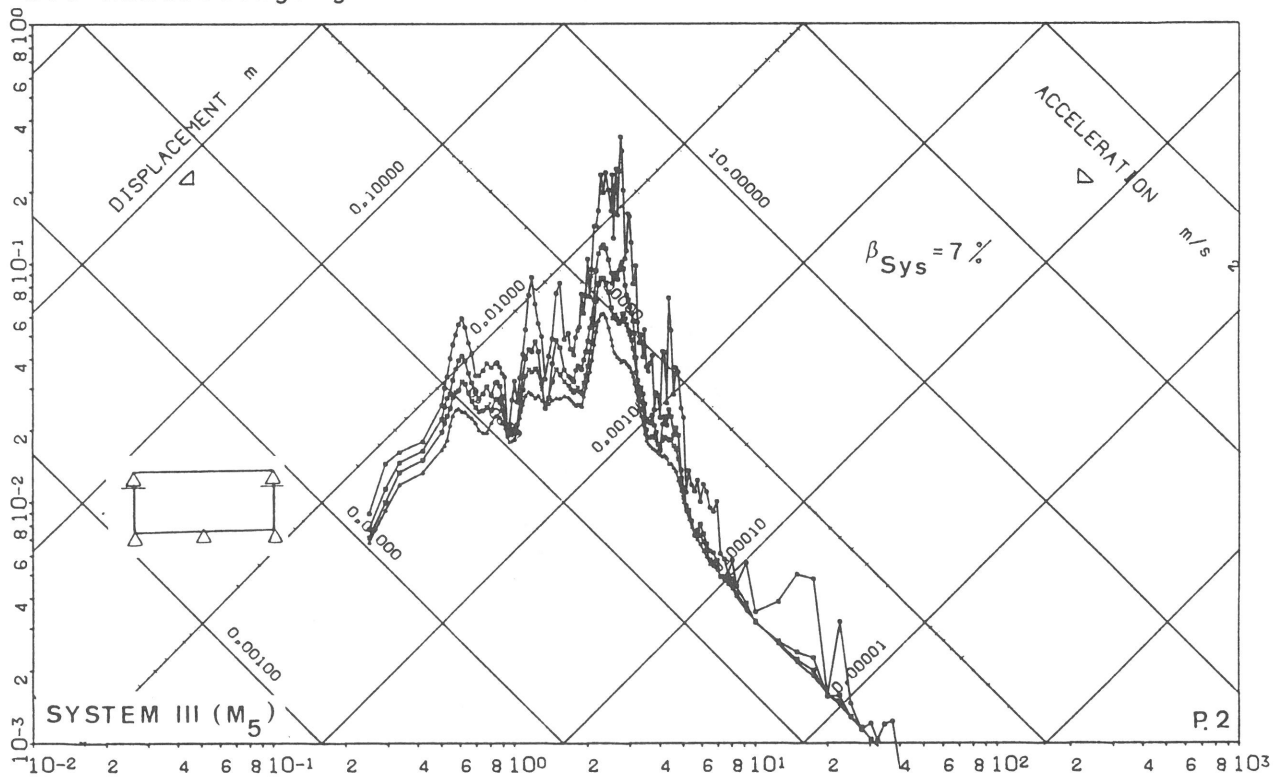


N_aP_a: 4_a

801 IRTY=25 614/00761

Abb. 69

System III (M₆) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung
mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 2



N_aP_a: 4_a

SMW6/10 IRTY=6 1.799/00271

Abb. 70

System III (M₅) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung
mit Randbedingung BC = 1 für Punkt 2

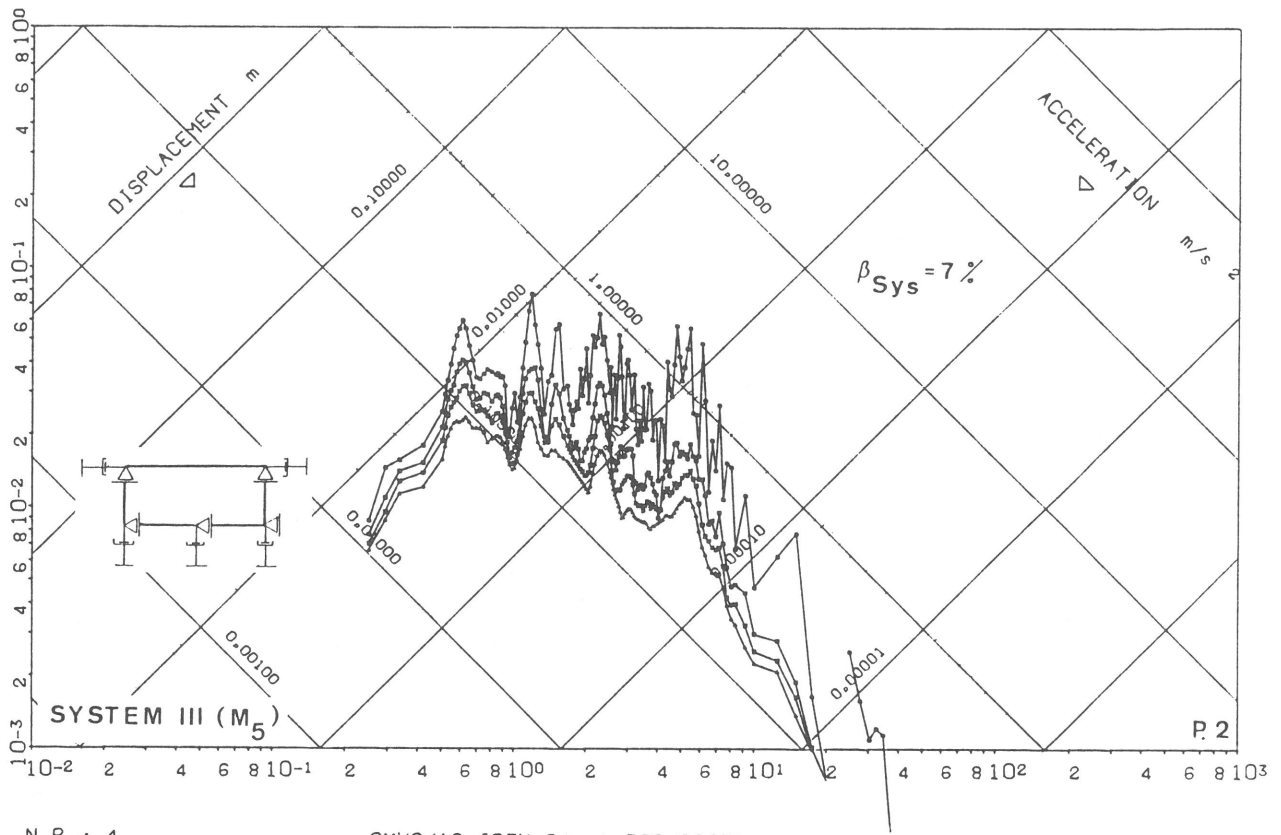


Abb. 71

System III (M₅) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Randbedingung BC = 3 für Punkt 2

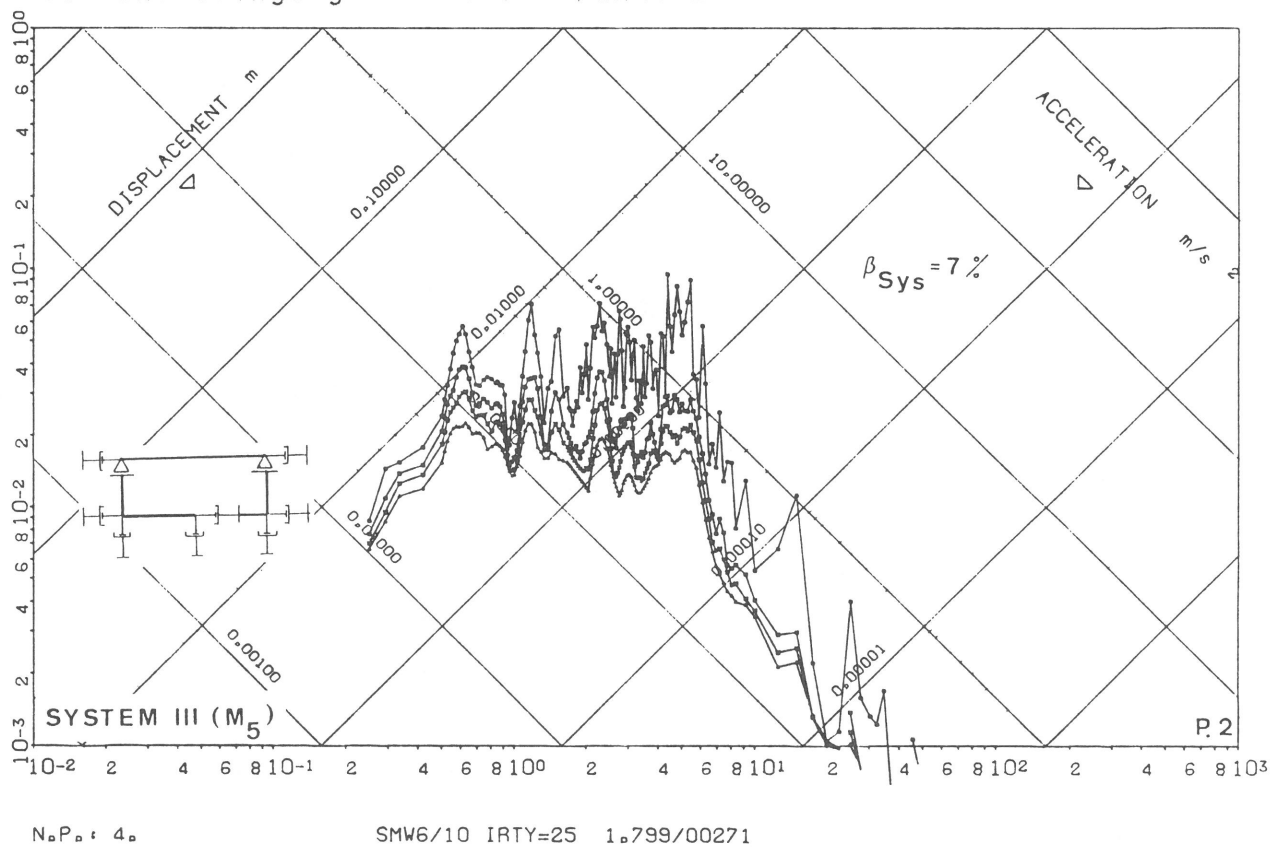
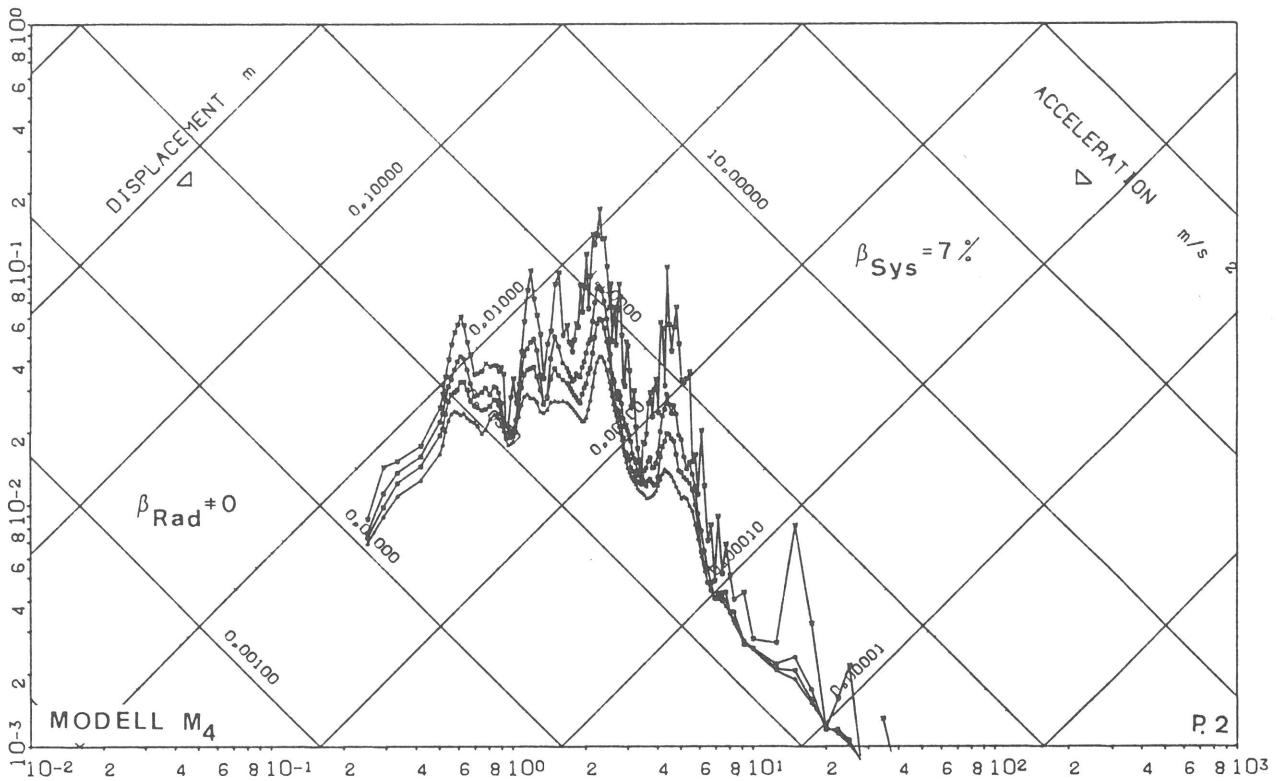


Abb. 72

System III (M₅) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 2

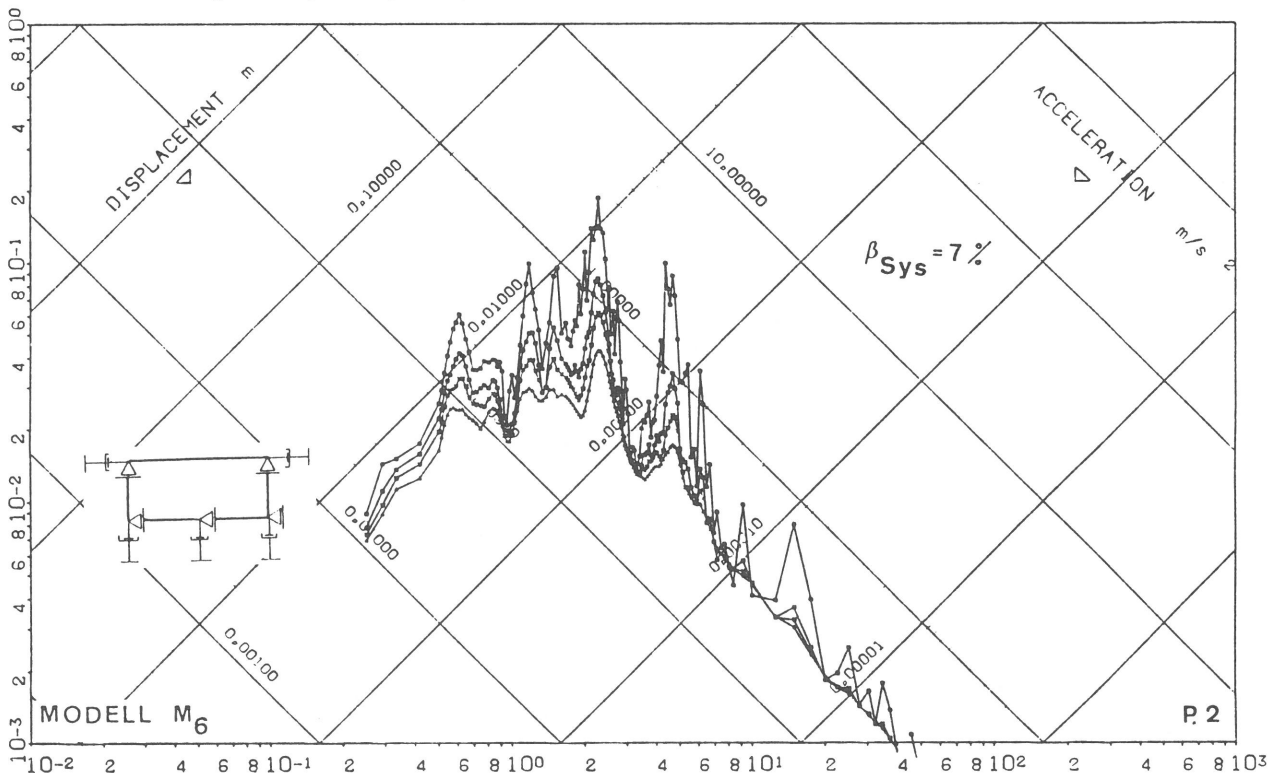


N.P.: 73.

SML601SRR

Abb. 73

Modell M_4 Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Abstrahlungsdämpfung für Punkt 2

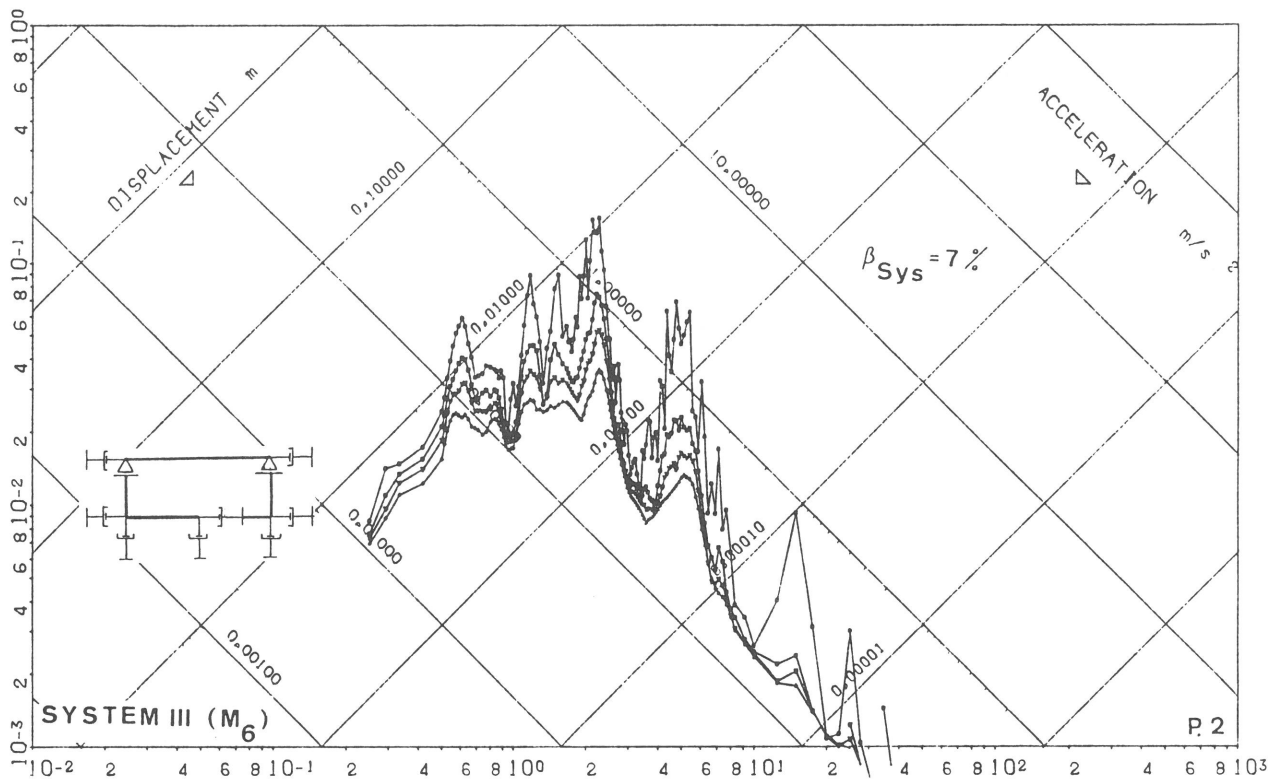


N.P.: 4.

801 IRTY=14 .87/.00264

Abb. 74

Modell M_6 Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Randbedingung BC = 3 für Punkt 2, Einhängung der Rayleigh-Dämpfung an der 1. und 24. Eigenfrequenz

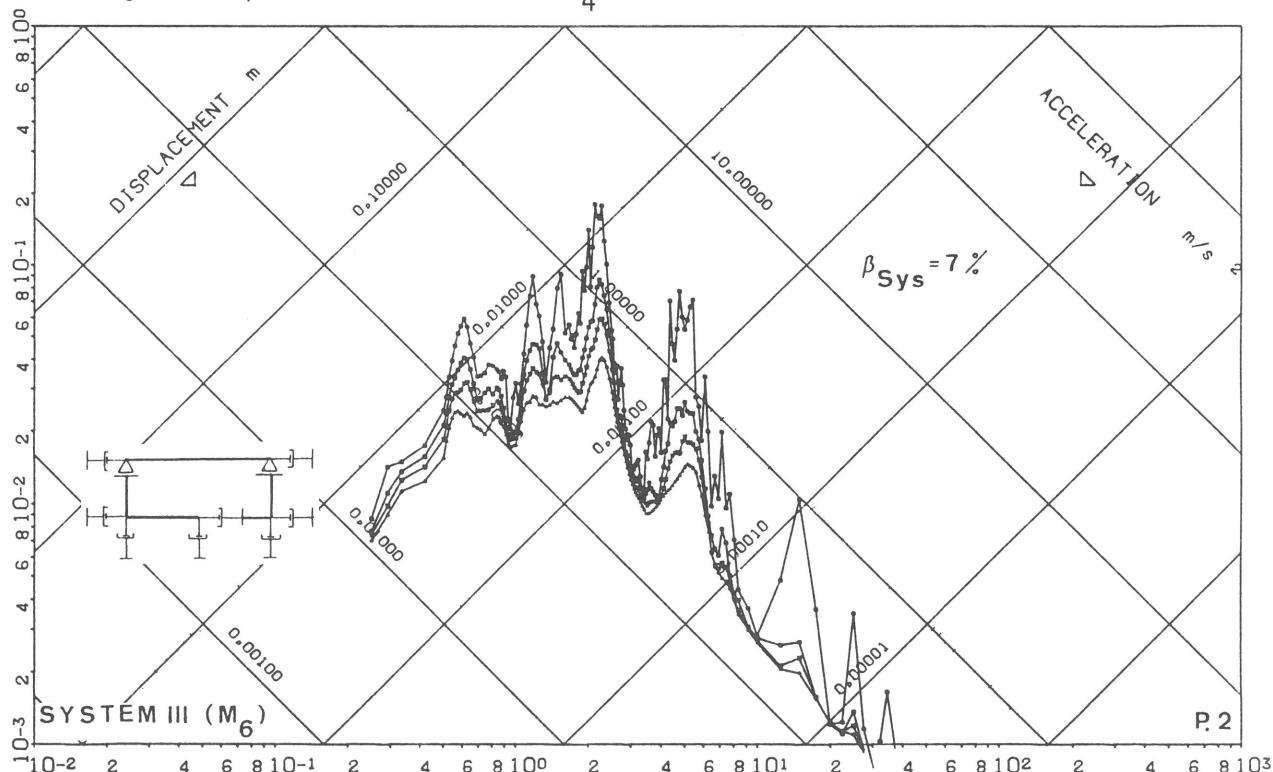


N.P.: 4.

801 IRTY=25 1.33/00326

Abb. 75

System III (M₆) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 2, Einhängung der Rayleigh-Dämpfung für alle Strukturbereiche an der 1. und 2. Eigenfrequenz von Modell M₄



N.P.: 4.

801 IRTY=25 .87/00264

Abb. 76

System III (M₆) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 2, Einhängung der Rayleigh-Dämpfung für alle Strukturbereiche an der 1. und 24. Eigenfrequenz

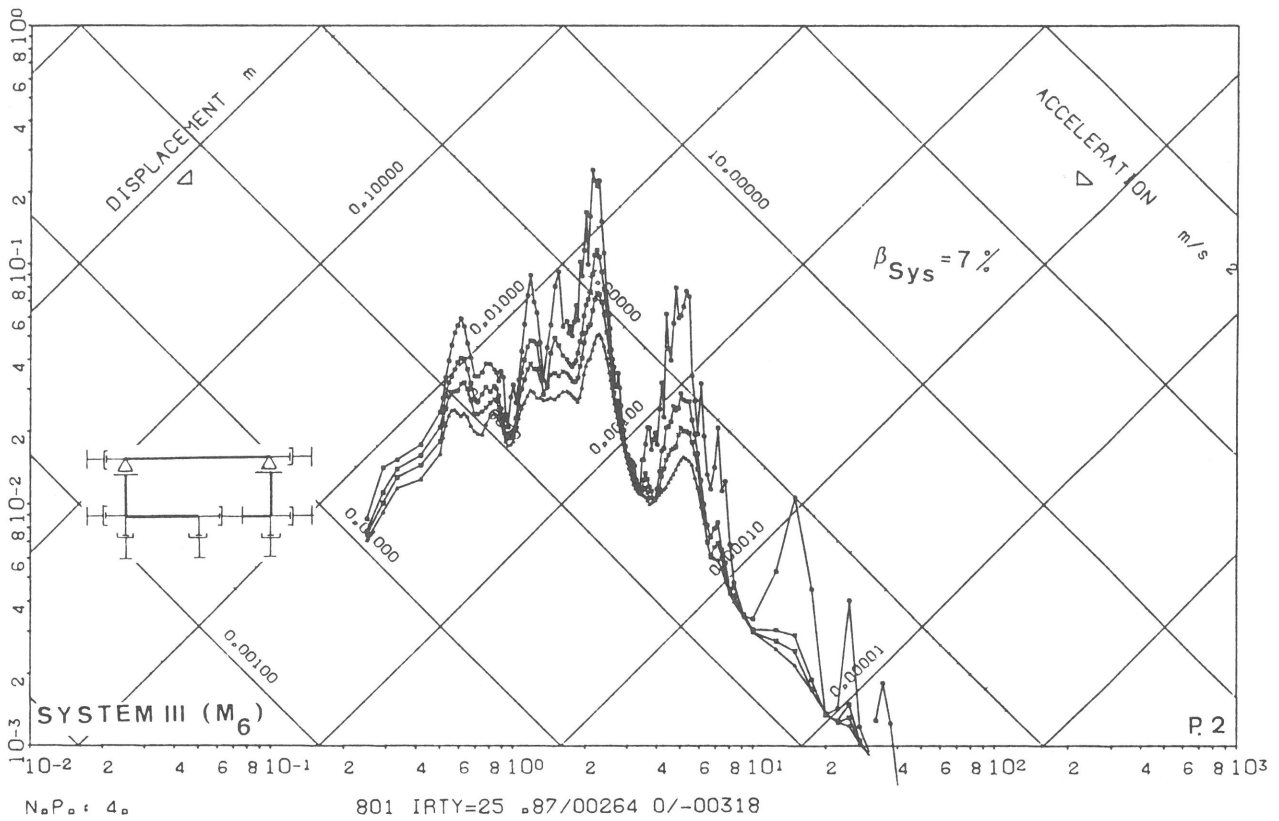


Abb. 77

System III (M_6) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 2, Einhängung der Rayleigh-Dämpfung für die Struktur an der 1. und 24. Eigenfrequenz und für den Boden an der 1. und 16. Eigenfrequenz

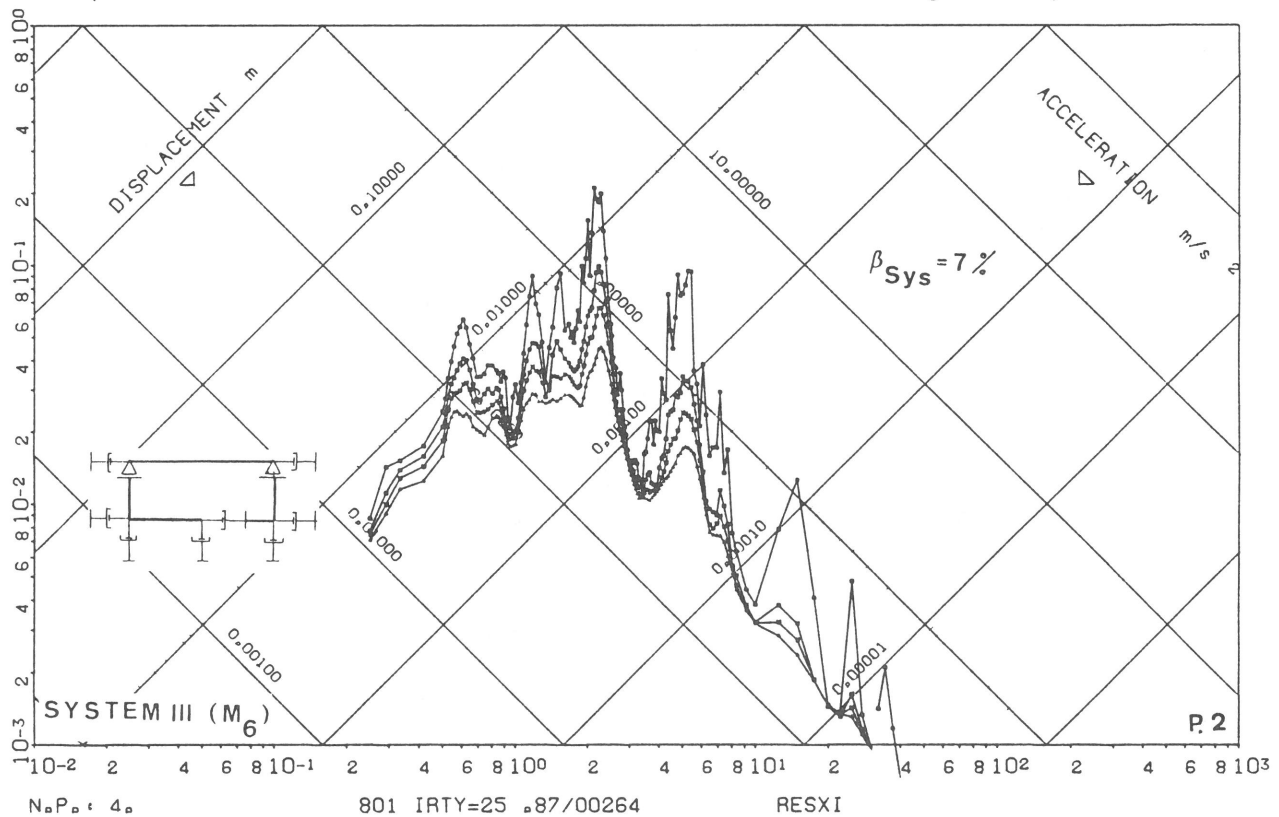
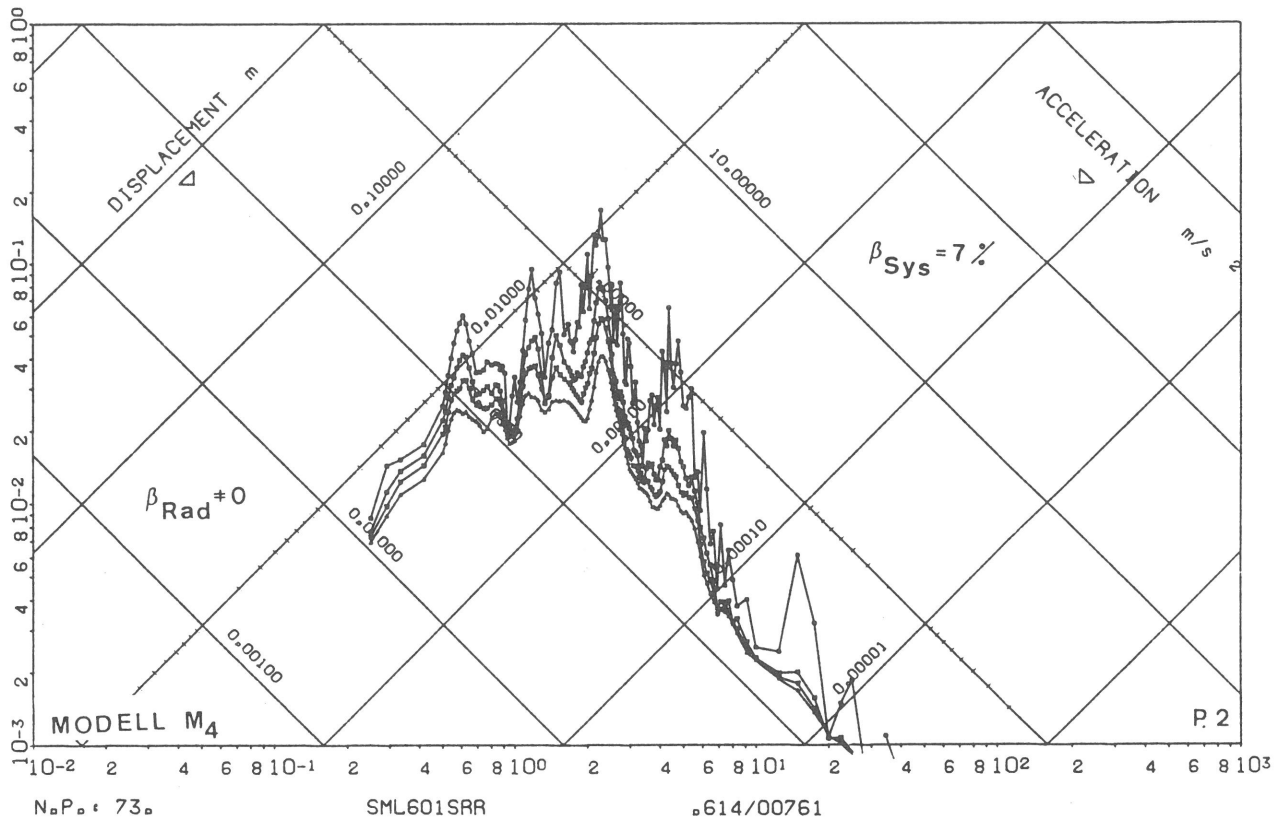


Abb. 78

System III (M_6) Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Randbedingung BC = 4 für Punkt 2, Einhängung der Rayleigh-Dämpfung für die Struktur an der 1. und 24. Eigenfrequenz und Vernachlässigung der Bodendämpfung



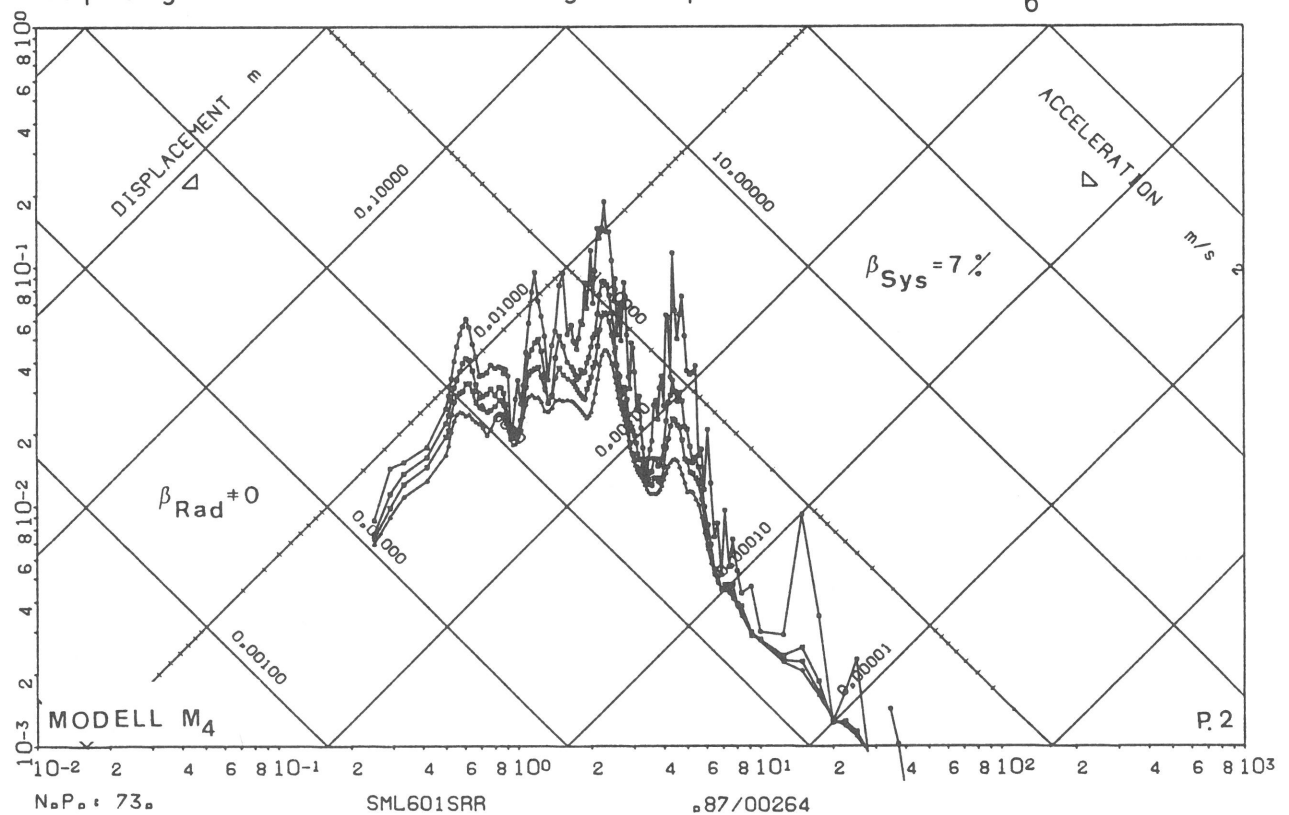
N.P. 73.

SML601SRR

.614/00761

Abb. 79

Modell M_4 Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Abstrahlungsdämpfung für Punkt 2, Einhängung der Rayleigh-Dämpfung an der 1. und 2. Eigenfrequenz von Modell M_6



N.P. 73.

SML601SRR

.87/00264

Abb. 80

Modell M_4 Response Spektrum bei 7 % Systemdämpfung mit Abstrahlungsdämpfung für Punkt 2, Einhängung der Rayleigh-Dämpfung an der 1. und 24. Eigenfrequenz von Modell M_6

Tabelle I

% Abweichung der extremalen vertikalen Spannungen an der Bodenplatte bezogen auf die Ergebnisse von Modell M_6 (Einzellast)

% ABWEICHUNG DER EXTREMALEN VERTIKALEN SPANNUNG AN DER BODENPLATTE BEZOGEN AUF DIE ERGEBNISSE VON MODELL M_6 (EINZELLAST)

Element-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	Dämpfung
Modell M_4^- / M_6	+ 0.7 +	23.8 +	12.5 +	46.4 +	18.4 -	0.8 +	57.8 -	2.2	
Modell M_4^+ / M_6	+ 46.1 +	65.7 -	12.8 +	27.1 +	8.1 -	0.1 +	13.7 -	44.6	
System III* / M_6	+ 8.6 +	252.9 +	94.0 +	153.0 +	11.5 -	8.3 +	66.8 +	106.9	$\beta = 0 \%$
System III** / M_6	+ 165.3 +	276.9 +	73.7 +	193.9 +	22.8 -	4.2 +	51.8 +	178.8	
Modell M_4^- / M_6	+ 100.8 +	241.0 +	120.4 +	127.1 +	34.1	0	+ 10.2 -	19.5	
Modell M_4^+ / M_6	+ 363.1 +	376.7 +	79.6 +	47.7 +	32.5 +	13.9 +	17.4 -	47.5	
System III* / M_6	- 20.2 -	47.7 -	16.6 -	17.0 -	4.5 -	2.1 +	1.7 +	1.7	$\beta = 7 \%$
System III** / M_6	+ 3.3 +	3.1 +	3.9 +	5.5 +	0.7 +	0.6 +	5.9 +	17.5	

* : lumped mass condensation (diagonalisierte Massenkopplung)

** : consistent mass condensation (konsistente Massenkopplung)

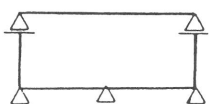
M_4^- : ohne Abstrahlungsdämpfung

M_4^+ : mit Abstrahlungsdämpfung nach Newmark/Rosenblueth

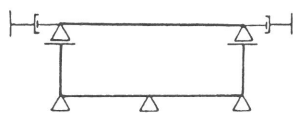
Tabelle II

Bezeichnung der Randbedingungen für die Bodenauflagerung

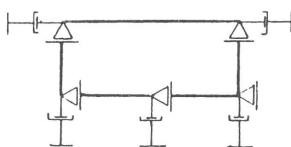
BC=1



BC=2



BC=3



BC=4

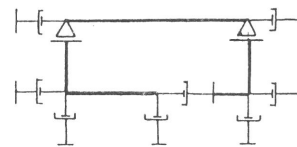


Tabelle III

% Abweichung der extremalen vertikalen Spannungen an der Bodenplatte mit konsistenter Massenkopplung bezogen auf die Ergebnisse von Modell M_6 mit der Randbedingung $BC = 3$ (Erdbeben)

Element Nr:	1	2	3	4	5	6	7	8	Dämpfung
1 Modell $M_6(BC=1)/M_6(BC=3)$	+ 130.	+ 14.	+ 102.	+ 116.	+ 119.	+ 127.	+ 130.	+ 125.	
2 Modell $M_6(BC=2)/M_6(BC=3)$	+ 21.	+ 37.	+ 29.	+ 28	+ 24.	+ 22.	- 1.	- 2.	
3 System III($M_6, BC=1$)/ $M_6(BC=3)$	+ 45.	- 27.	+ 38.	+ 45.	+ 45.	+ 26.	+ 42.	+ 49.	
4 System III($M_6, BC=2$)/ $M_6(BC=3)$	- 29.	- 50.	- 21.	- 23.	- 20.	- 17.	- 22.	- 24.	
5 System III($M_6, BC=3$)/ $M_6(BC=3)$	- 33.	- 64.	- 28.	- 32.	- 30.	- 28.	- 47.	- 35.	
6 System III($M_6, BC=4$)/ $M_6(BC=3)$	- 5.	- 52.	+ 13.	+ 9.	+ 22.	+ 30.	- 6.	+ 16.	
7 System III*($M_6, BC=1$)/ $M_6(BC=3)$	- 7.	- 45.	- 6.	- 2.	- 14.	- 18.	- 1.	- 1.	
8 Modell $M_5(BC=1)/M_6(BC=3)$	+ 330.	+ 301.	+ 290.	+ 266.	+ 223.	+ 218.	+ 185.	+ 217.	$\beta = 0 \%$
9 Modell $M_5(BC=2)/M_6(BC=3)$	+ 269.	+ 222.	+ 230.	+ 213.	+ 155.	+ 138.	+ 98.	+ 169.	
10 Modell $M_5(BC=3)/M_6(BC=3)$	+ 14.	- 18.	- 1.	- 1.	+ 4.	+ 18.	- 24.	+ 9.	
11 System III($M_5, BC=1$)/ $M_6(BC=3)$	+ 167.	+ 224.	+ 209.	+ 203.	+ 146.	+ 142.	+ 107.	+ 172.	
12 System III($M_5, BC=2$)/ $M_6(BC=3)$	+ 242.	+ 219.	+ 203.	+ 197.	+ 142.	+ 134.	+ 103.	+ 167.	
13 System III($M_5, BC=3$)/ $M_6(BC=3)$	- 50.	- 37.	- 34.	- 44.	- 38.	- 23.	- 34.	- 44.	
14 System III($M_5, BC=4$)/ $M_6(BC=3)$	- 62.	- 14.	- 37.	- 39.	- 6.	+ 14.	- 49.	- 24.	
15 System III*($M_5, BC=1$)/ $M_6(BC=3)$	+ 153.	+ 129.	+ 128.	+ 115.	+ 84.	+ 80.	+ 58.	+ 90.	
16 Modell $M_4^-/M_6(BC=3)$	+3333.	+3565.	+1310.	+1224.	+ 564.	+ 240.	+1293.	+ 135.	
17 Modell $M_4^+/M_6(BC=3)$	+ 664.	+ 736.	+ 234.	+ 221.	+ 56.	- 13.	+ 229.	- 36.	
18 Modell $M_6(BC=1)/\bar{M}_6(BC=3)$	+ 37.	- 74.	+ 26.	+ 14.	+ 20.	+ 27.	- 2.	+ 24.	
19 Modell $M_6(BC=2)/\bar{M}_6(BC=3)$	- 7.	- 8.	- 7.	- 12.	- 1.	- 2.	- 21.	- 14.	
20 System III($M_6, BC=1$)/ $\bar{M}_6(BC=3)$	- 25.	- 70.	- 17.	- 24.	- 18.	- 15.	- 21.	- 16.	
21 System III($M_6, BC=2$)/ $\bar{M}_6(BC=3)$	- 14.	- 73.	- 5.	- 14.	- 8.	- 5.	- 29.	- 7.	
22 System III($M_6, BC=3$)/ $\bar{M}_6(BC=3)$	- 18.	- 79.	- 14.	- 22.	- 16.	- 14.	- 33.	- 13.	
23 System III($M_6, BC=4$)/ $\bar{M}_6(BC=3)$	- 7.	- 76.	- 3.	- 16.	- 5.	+ 16.	- 17.	- 1.	
24 Modell $M_5(BC=1)/\bar{M}_6(BC=3)$	+ 105.	+ 1.	+ 85.	+ 55.	+ 57.	+ 58.	+ 19.	+ 49.	$\beta = 7 \%$
25 Modell $M_5(BC=2)/\bar{M}_6(BC=3)$	+ 96.	- 7.	+ 81.	+ 53.	+ 53.	+ 54.	+ 13.	+ 47.	
26 Modell $M_5(BC=3)/\bar{M}_6(BC=3)$	+ 34.	- 54.	+ 14.	0.	+ 12.	+ 24.	- 37.	+ 29.	
27 System III($M_5, BC=1$)/ $\bar{M}_6(BC=3)$	+ 89.	- 9.	+ 77.	+ 48.	+ 46.	+ 47.	+ 28.	+ 41.	
28 System III($M_5, BC=2$)/ $\bar{M}_6(BC=3)$	+ 89.	- 9.	+ 77.	+ 48.	+ 46.	+ 46.	+ 27.	+ 40.	
29 System III($M_5, BC=3$)/ $\bar{M}_6(BC=3)$	- 36.	- 71.	- 21.	- 38.	- 30.	- 23.	- 77.	- 32.	
30 System III($M_5, BC=4$)/ $\bar{M}_6(BC=3)$	- 60.	- 51.	- 31.	- 39.	+ 2.	+ 24.	- 61.	- 14.	
31 Modell $M_4^-/\bar{M}_6(BC=3)$	+1406.	+ 785.	+ 540.	+ 473.	+ 186.	+ 25.	+ 588.	+ 10.	
32 Modell $M_4^+/\bar{M}_6(BC=3)$	+ 755.	+ 411.	+ 269.	+ 230.	+ 67.	- 17.	+ 290.	- 34.	
33 $M_6(BC=3, \beta=0\%)/\bar{M}_6(BC=3, \beta=7\%)$	+ 38.	- 24.	+ 37.	+ 28.	+ 46.	+ 50.	+ 50.	+ 45.	
34 $M_4^-(\beta=0\%)/\bar{M}_6(BC=3, \beta=7\%)$	+4635.	+2702.	+1838.	+1589.	+ 870.	+ 409.	+1996.	+ 241.	
35 $M_4^+(\beta=0\%)/\bar{M}_6(BC=3, \beta=7\%)$	+ 954.	+ 539.	+ 359.	+ 310.	+ 128.	+ 31.	+ 396.	- 7.	
36 $M_6(BC=1, \beta=1\%)/M_6(BC=3, \beta=0\%)$	+ 69.	- 32.	+ 68.	+ 76.	+ 85.	+ 76.	+ 147.	+ 122.	

* : 1 % Bodendämpfung

 M_4^- : ohne Abstrahlungsdämpfung M_4^+ : mit Abstrahlungsdämpfung nach Newmark/Rosenblueth \bar{M}_6 : 20 → 25 Bodenschichten, $DT = .01 \text{ s} \rightarrow .005 \text{ s}$ Integrationsschrittweite

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)

Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern

von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungseilen als Beispiel für Verbundbauteile

von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren

von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken

von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen

von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie

von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung

von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen

von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode

von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden

von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren

von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr

von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz

von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse

von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer

von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen

von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen

Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden

von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung

Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen

von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen

von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung

von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen

von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —

von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall

von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern

von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall

von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology

von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung

von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen

von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens

von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen

von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —

von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles

von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen

— Vorschlag für ein Prüfverfahren —

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4

von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung

von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/Juni 1976

Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren

von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/Okttober 1976

Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten

von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/Okttober 1976

Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft

von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/Okttober 1976

Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/November 1976

Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“

von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/Dezember 1976

Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten

von Dr.-Ing. W. Paatsch

Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)

Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung

Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses

von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/Juni 1977

Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen

von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/Okttober 1977

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn

von Dr.-Ing. U. Holzlöhner

Nr. 49/Dezember 1977

Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung

von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)

Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern

von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/Juni 1978

Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen

von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/August 1978

Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörpergleitreibung

von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/Okttober 1978

Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge

von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

- Nr. 54/Oktober 1978
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 % -Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/August 1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln
Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 65/Februar 1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines vollzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/September 1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 73/November 1980
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener
- Nr. 74/November 1980
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller
- Nr. 75/November 1980
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 76/November 1980
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 77/April 1981
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzech
- Nr. 78/September 1981
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 79/Dezember 1981
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann
- Nr. 80/Dezember 1981
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch
- Nr. 81/Dezember 1981
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt
- Nr. 82/April 1982
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmur Ledworuski
- Nr. 83/Juli 1982
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen
— Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle
- Nr. 84/Juli 1982
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Oktober 1982
Technische Materialforschung und -prüfung
— Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ —
Materials Research and Testing
— Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme “Basic Technological Research” —
von Prof. Dr. Horst Czichos
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügekennmerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Oktober 1983
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren
— Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Oktober 1984
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Oktober 1984
Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Oktober 1984
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985
Zur Wirkung der Schruppbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
von Dr.-Ing. Mohamed Omar
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985
Wasserstoff als Energieträger
von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
von Dr.-Ing. Wolfgang Lützw
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen
von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985
Farbempfindungsmerkmal Elementaruntun und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
von Privatdozent Dr. Klaus Richter
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Oktober 1985
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Oktober 1985
Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/Oktober 1985
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/November 1985
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I
von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/April 1986
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
von Dr.-Ing. Andreas Hecht
- Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/Juni 1986
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungbedingungen: Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung
von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/Juli 1986
Entsorgung kerntechnischer Anlagen
von J. Mischke
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88 314-531-9/Juli 1986
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
von Dr. rer. nat. Detlef Rennoch
- Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/Juli 1986
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas
- Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/Juli 1986 (vergriffen)
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolation von Flüssiggas-Lagertanks
von Dr.-Ing. Bernhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst
- Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/August 1986
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 127/ISBN 3-88 314-564-5/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 128/ISBN 3-88 314-568-8/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 129/ISBN 3-88 314-569-6/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 130/ISBN 3-88 314-570-X/November 1986
Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 131/ISBN 3-88 314-585-8/November 1986
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 132/ISBN 3-88 314-595-5/Januar 1987
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
von Dipl.-Ing. Christian Herold und Dipl.-Ing. Frank-Ulrich Vogdt
- Nr. 133/ISBN 3-88 314-609-9/Januar 1987 (vergriffen)
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
von Dipl.-Ing. Mathias Woydt und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 134/ISBN 3-88 314-615-3/Februar 1987
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
von Dr. Götz Andreae und Gottfried Niessen
- Nr. 135/ISBN 3-88 314-618-8/Februar 1987
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
von Dipl.-Ing. Jörg Ludwig, Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich Mischke und Dipl.-Ing. Armin Ulrich
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/April 1987
Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau
von Prof. Dr. rer. silv. Hans-Joachim Deppe und Klaus Schmidt
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/Mai 1987
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Komponentensicherheit
Projektleiter: Dr. Dietmar Aurich
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/Mai 1987
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.
von Dipl.-Geol. Michael Dogunke und Dr.-Ing. Frank Buchhardt
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/Juni 1987
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle.
von Dipl.-Ing. Jürgen Olschewski und Sven-Peter Scholz
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/Juni 1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/Oktober 1987
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Wolfgang Mathees, Dr.-Ing. Götz Magiera und Dr.-Ing. Friedrich Mathiak
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/Oktober 1987
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Ing. Günter Krüger, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Dr. rer. nat. Sigrid von Zahn-Ullmann
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/November 1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
Experimental and numerical investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load
von/by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/November 1987
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Wolfgang Mathees, Dr.-Ing. Michael Weber, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Dr.-Ing. Jürgen Altes, Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/November 1987
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
von Dr.-Ing. Ulrich Holzlöhner
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/November 1987
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
von Dipl.-Ing. Wolfgang Schön und Dipl.-Ing. Michael Mallon
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/Dezember 1987
Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
von Dipl.-Ing. Hans-Dieter Kleinschrodt
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/Mai 1988
Theoretische Untersuchung von Variationen für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
von Dipl.-Ing. Wilfried Müller
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/Mai 1988
Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
von Dr.-Ing. Ulrich Holzlöhner

- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/Mai 1988
VG3D Zeichenprogramm für die Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen
 von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/Juni 1988
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen
 von Dipl.-Ing. Lutz Auersch-Saworski
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/Juli 1988
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn
 von Dr.-Ing. Günther Plauk, Dipl.-Ing. Günter Kretschmann, Dipl.-Ing. Rolf-G. Rohrmann
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/Juli 1988
Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung
 von Dr.-Ing. Harro Sander, Professor Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/Okttober 1988
Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie
 von Dr. rer. nat. Konrad Breitkreutz, Dr. rer. nat. Rüdiger Uttech, Dr.-Ing. Kurt Haedecke
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/Okttober 1988
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental
 von Dr.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/April 1989
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen
 von Dr.-Ing. Günter Klamrowski, Dipl.-Ing. Paul Neustupny, Prof. Dr. habil. Hans-Joachim Deppe, Ing. Klaus Schmidt und Dr.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/April 1989
Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung
 von Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dr.-Ing. Klaus Brandes
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/April 1989
Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung — Literaturübersicht —
 von Dr.-Ing. Rolf Wäsche und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/Mai 1989
Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hauschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6
 von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/Juli 1989
Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten
 von Dr.-Ing. Wolfgang Mathees
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/Juli 1989
Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen
 von Dipl.-Ing. Günter Mellmann, Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/Juli 1989
Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben
 von Dipl.-Ing. Wolfgang Brünner
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/Juli 1989
Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen
 von Dipl.-Ing. Wolfgang Brünner, Dipl.-Ing. Günter Mellmann, Dr.-Ing. Werner Struck