

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 111 (1993)
Heft: 43

Artikel: Dynamisches Verhalten maschinentechnischer Systeme bei extremen Belastungen: Sicherheit und Risiko bei der Wahl der Berechnungsmethode
Autor: Baraf, Lupu
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78261>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 15.01.2026

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

Dynamisches Verhalten maschinentechnischer Systeme bei extremen Belastungen

Sicherheit und Risiko bei der Wahl der Berechnungsmethode

Das neuentwickelte Computerprogramm ERMSRS, mit welchem Berechnungen durch Anwendung der Zeitverlaufmethode unter Berücksichtigung der schwachen horizontalen Richtung und unterschiedlicher Anregungsschwingungen an verschiedenen Festpunkten durchgeführt werden können, wird für die Beurteilung anderer in der Praxis angewandter Methoden verwendet. Die Resultate der mit verschiedenen Verfahren durchgeführten Berechnungen sind zusammenfassend in sechs Histogrammen verglichen.

Das umweltgerechte Konstruieren von maschinentechnischen Systemen setzt zunächst die Erstellung eines Sicher-

VON LUPU BARAF, ZÜRICH

heitskonzepts voraus, bei dem aufgrund einer eingehenden Analyse festgelegt wird, welche Maschinen und Anlagen

- für die Gewährleistung der Sicherheit unbedingt in Funktion bleiben müssen,
- sicher und ohne Gefahr für die Umgebung ausfallen dürfen und
- bei einem Bruch keinen schädigenden Einfluss auf die Umwelt ausüben.

Eine wichtige Konsequenz des Sicherheitskonzepts ist, dass für ähnliche Maschinen- und Anlagenkomponenten, selbst für solche, die sich in der gleichen Anlage befinden, bei unterschiedlichen Anforderungen für die Herstellung, Qualitätskontrollen usw., oft unterschiedliche Methoden für die Durchführung der Spannungsanalyse gewählt werden.

Die Berechnungen bei der Analyse des dynamischen Verhaltens von maschinentechnischen Systemen sind im allgemeinen aufwendig. Nicht selten sind die Berechnungskosten viel höher als die Herstellungskosten. Aus wirtschaftlichen Gründen wird der Wahl der Berechnungsmethode deshalb eine besondere Bedeutung beigemessen. Zur Erleichterung dieser Wahl wurde an der ETH Zürich ein relativ aufwendiges Verfahren entwickelt, das jedoch im Vergleich zu den in der Industrie verwendeten genauer ist. [4], [6]. Verschiedene Resultate bekannter Berechnungsverfahren wurden miteinander und mit der neuentwickelten genaueren Methode verglichen [7].

Berechnungsverfahren im Vergleich

In [1] ist ein kurzer Überblick über die allgemeinen Methoden zur Analyse des dynamischen Verhaltens zu finden. Zur Durchführung der Spannungsanalyse maschinentechnischer Systeme mit Hilfe verschiedener Computerprogramme werden in der Industrie folgende Verfahren am häufigsten angewandt:

Die *Antwort-Spektrum-Methode* [2] dient der Berechnung des dynamischen Verhaltens bei Schwingungsanregungen mit einem breiten Frequenzband. Die Methode ergibt nur die *maximalen Antworten* des Schwingungssystems, die zur Berechnung der Festigkeit von ausschlaggebender Bedeutung sind. Weil die Berechnungskosten angemessen und meist nur die maximalen Spannungen von Interesse sind, wird diese Methode oft verwendet.

Sie wurde später verfeinert, indem unterschiedliche Antwortspektren in verschiedenen Festpunkten benutzt werden können. In verschiedenen Computerprogrammen ist diese Verfeinerung als die Methode der differenzierten Schwingungsanregungen (Multiple Support Excitation) [3] zu finden. Eine weitere Verbesserung besteht in der Berücksichtigung der schwachen horizontalen Richtung des komplexen maschinentechnischen Systems bei der Berechnung der maximalen Spannungen [1] und [4].

Die *Zeitverlaufmethode* (Time History) mit *Modaler Analyse* [5] ist von Vorteil, falls die verschiedenen Werte der Verschiebungen im Laufe der Zeit bei der Untersuchung eines maschinentechnischen Systems von Bedeutung sind. Die Methode gibt auch genauere Resultate

im Vergleich zur Antwort-Spektrum-Methode.

Die Zeitverlaufmethode wurde verfeinert, indem sowohl unterschiedliche Festpunktanregungen als auch die schwache horizontale Richtung des maschinentechnischen Systems berücksichtigt wurden [6]. Die Berechnungen werden unter diesen Umständen jedoch so aufwendig, dass die Berechnungskosten für solche Untersuchungen wirtschaftlich kaum zu vertreten sind. Das Computerprogramm ERMSRS, das an der ETH Zürich am Institut für Konstruktion und Bauweisen entwickelt wurde, dient zur Auswertung anderer Berechnungsmethoden, um auch besonders heikle und umweltgefährdete Teile maschinentechnischer Systeme berechnen zu können. Die weitere Entwicklung der Computersysteme, was die Speicherkapazität und Berechnungsgeschwindigkeit betrifft, lässt erwarten, dass in Zukunft aufwendigere Programme wie ERMSRS in der Praxis häufiger verwendet werden.

Das Programm ERMSRS

Das 1985 entwickelte Computerprogramm ROTRS [1] entstand, indem im Programm SAP IV ein zyklisches Suchverfahren zur Bestimmung der schwachen horizontalen Richtung installiert wurde. Das Suchverfahren wurde nur für die Anwendung der Antwort-Spektrum-Methode entwickelt. Das Programm ERMSRS ist eine Weiterentwicklung des Programms ROTRS [1] und enthält im wesentlichen folgende Neuerungen gegenüber den Programmen SAP IV und ROTRS:

- Die schwache horizontale Richtung des Schwingungssystems kann sowohl für die Antwort-Spektrum-Methode als auch für die Zeitverlaufmethode bestimmt werden.
- Es besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Anregungsschwingungen an verschiedenen Knotenpunkten einzugeben.

Das Programm rechnet zunächst eine Anregungsschwingung in Form eines Zeitverlaufes für jeden Berechnungspunkt und jeden Freiheitsgrad, und erst danach werden die entkoppelten Gleichungen der Bewegungen mit dem Duhamel-Integral numerisch gelöst. Die Implementierung von Subprogrammen für die Berechnung der schwachen horizontalen Richtung bei verschiedenen Schwingungsanregungen in den Festpunkten führte bei der sehr aufwendigen Zeitverlaufmethode zu einer we-

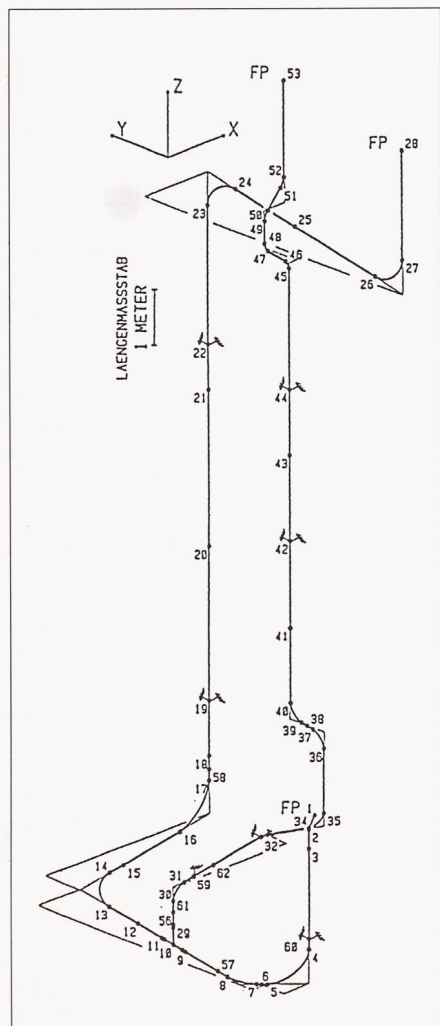


Bild 1. Berechnungsmodell «62» eines Rohrleitungssystems. Rohrleitung zwischen den Punkten 1 ÷ 10 ÷ 28. $D = 406,4 \text{ mm}$; $s = 5,6 \text{ mm}$. Rohrleitung zwischen den Punkten 10 ÷ 53. $D = 168,3 \text{ mm}$; $s = 2,9 \text{ mm}$. Material: austenitischer Stahl

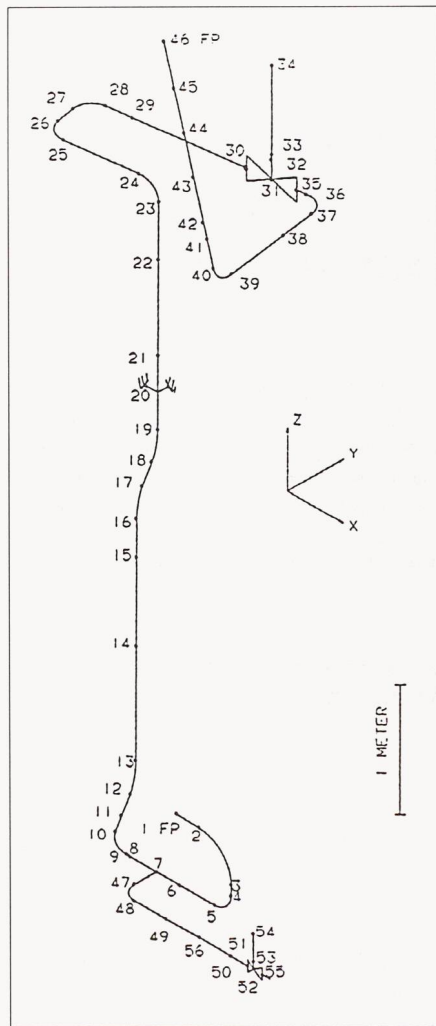


Bild 3. Berechnungsmodell «56» eines Rohrleitungssystems mit zwei Armaturen. $D = 114 \text{ mm}$; $s = 13,8 \text{ mm}$. Material: austenitischer Stahl

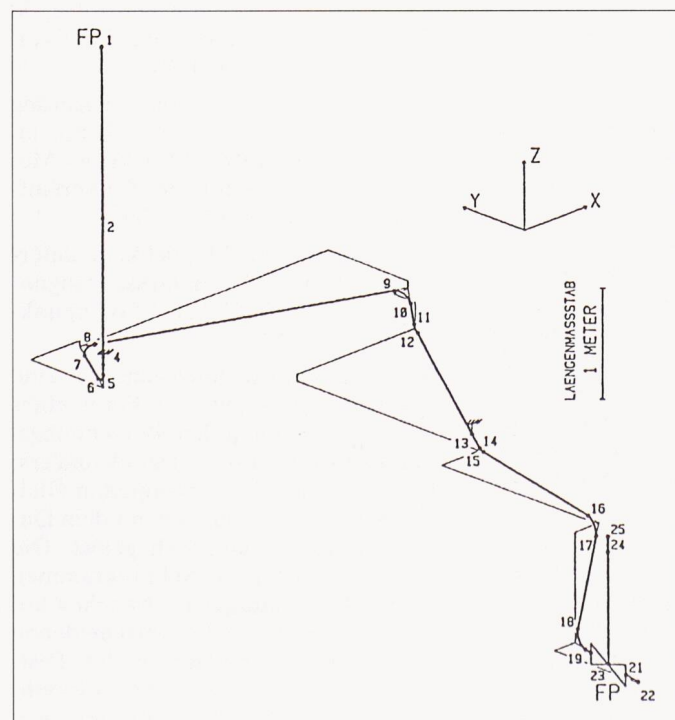


Bild 2. Berechnungsmodell «25» eines Rohrleitungssystems mit Armatur. $D = 89 \text{ mm}$; $s = 3,5 \text{ mm}$. Material: austenitischer Stahl

sentlichen Verteuerung der Berechnungen im Vergleich zur Antwort-Spektrum-Methode. Es wurde dafür ein Programm entwickelt, das die Resultate der Berechnungen wirklichkeitsnäher als die bisher bekannten Computerprogramme liefert.

Vergleich der mit verschiedenen Berechnungsverfahren erzielten Resultate

Eine systematische wissenschaftliche Untersuchung, die alle potentiellen Varianten abdeckt, ist aus folgenden Gründen nicht möglich:

- Komplexität der maschinentechnischen Systeme
- Vielfalt der Schwingungsarten
- Beliebige Richtung der Schwingungsanregung
- Grosse Anzahl der Parameter, die variiert werden können (Dämpfung, Anzahl der Stützpunkte, Anzahl der Berechnungspunkte, Einfluss benachbarter Systeme usw.)

Die begrenzten, an typischen Modellen durchgeführten Untersuchungen können jedoch interessante Resultate zur allgemeinen Beurteilung der Berechnungsmethoden liefern.

Einfachheitshalber wurden für diese Forschungsaufgabe Rohrleitungsmodelle gewählt. Die Rohrleitungen werden durch eine einfache Linie im Raum modelliert, sie weisen jedoch alle Eigenschaften komplexerer räumlicher maschinentechnischer Systeme auf. Für die Untersuchung wurden drei Berechnungsmodelle gemäss Bild 1 bis 3 gewählt, wobei D den Aussendurchmesser des Rohres und s dessen Wandstärke bedeuten.

Diese Modelle wurden zuerst mit einem umhüllenden Zeitverlauf (Bild 4a) oder mit dem umhüllenden Antwort-Spektrum, das sich aus dem umhüllenden Zeitverlauf ergibt, angeregt. Schliesslich wurden für verschiedene Festpunkte eines maschinentechnischen Systems unterschiedliche Anregungsschwingungen gewählt, die jedoch den gleichen umhüllenden Zeitverlauf beziehungsweise Antwort-Spektrum, wie in Bild 4a und b angegeben, aufweisen. Die Resultate der Spannungsanalyse in allen Berechnungspunkten der drei Modelle sind zusammenfassend in Form von Histogrammen dargestellt. Auf der Ordinate wurde die Anzahl der Berechnungspunkte angegeben und auf der Abszisse das Verhältnis der berechneten Verschiebungen mit einer Methode zu den berechneten Verschiebungen mit einer zweiten, zu vergleichenden Methode. Zur kompakten Darstellung wurden folgende Abkürzungen für die Berechnungsverfahren verwendet:

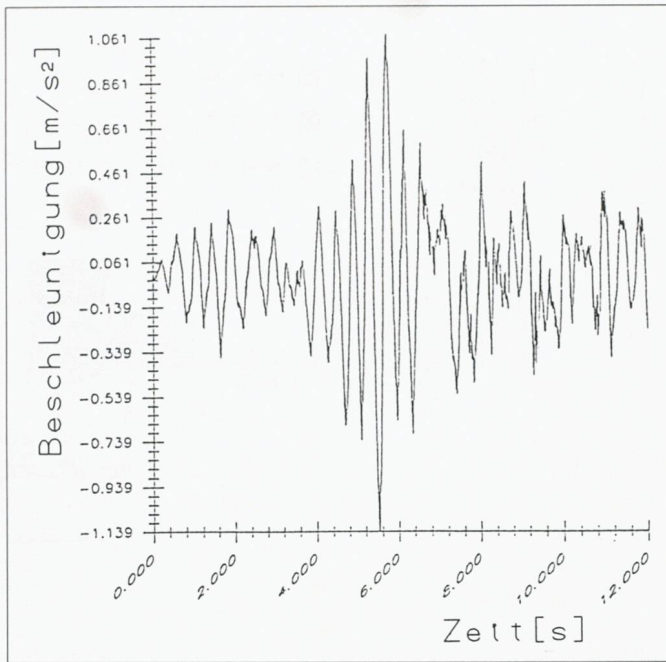


Bild 4a. Zeitverlauf der Beschleunigungen

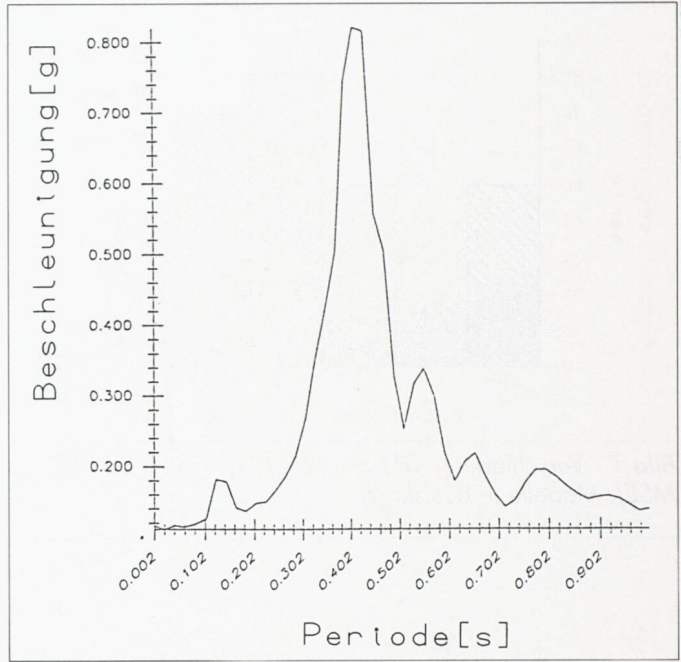


Bild 4b. Antwort-Spektrum, das dem Zeitverlauf in Bild 4a entspricht

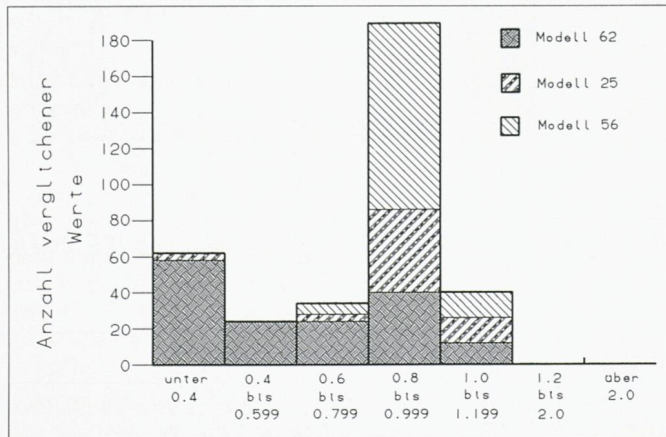


Bild 5. Verschiebung [TH mit MSE]/Verschiebung [TH mit U]. Modelle in Basislage

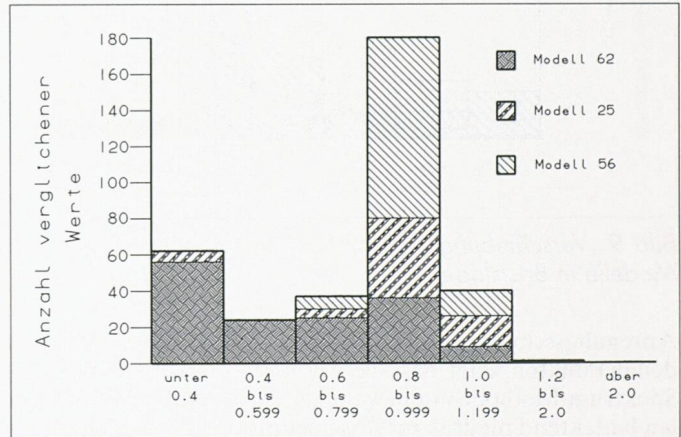


Bild 6. Verschiebung [TH mit MSE]/Verschiebung [TH mit U]. Modelle um 75° rotiert aus Basislage

- TH mit MSE
Zeitverlauf* mit verschiedenen Anregungsschwingungen in unterschiedlichen Festpunkten**.
- TH mit U
Zeitverlauf* mit gleicher Anregungsschwingung (die Umhüllende der unter Pkt. 1. verwendeten Anregungsschwingungen) in allen Festpunkten.
- RS mit MSE
Antwort-Spektrum-Methode*** mit verschiedenen Antwort-Spektren in unterschiedlichen Festpunkten**.
- RS mit U
Antwort-Spektrum-Methode mit gleichem Antwort-Spektrum (die Umhüllende der unter Pkt. 3 verwendeten Antwort-Spektren) in allen Festpunkten

* Time History

** Multiple Support Excitation

*** Response Spectrum

Für die Bestimmung der schwachen horizontalen Richtung wurde bei den Berechnungen immer das «zyklische Suchverfahren» verwendet. Die grössten Verschiebungen und entsprechend die höchsten Spannungen ergaben sich für das Modell 62 bei einer Rotation um 75° gegenüber der horizontalen Basisachse. Aus diesem Grund wurde, neben der Basislage, ein zweiter Vergleich der Verschiebungen für eine um 75° gedrehte horizontale Hauptachse geführt, wobei die Anregungsschwingung immer in die Richtungen der Hauptachsen wirkt. In Wirklichkeit werden verschiedene «schwache Richtungen» (siehe [1]) für unterschiedliche Berechnungspunkte auftreten. Eine zweite Möglichkeit wäre, einen Vergleich der berechneten Werte bei unterschiedlichen schwachen Richtungen der einzelnen Berechnungspunkte zu führen. Von dieser zweiten Möglichkeit wurde kein Gebrauch gemacht, weil wir hauptsächlich

an einem Vergleich der Berechnungsmethoden und nicht der eigentlichen Spannungen interessiert sind.

In den Histogrammen in Bild 5 und 6 erkennt man, dass die Zeitverlaufmethode mit Umhüllender nur Resultate liefert, die im Vergleich mit der genaueren Methode, dem Zeitverlauf mit differenzierten Anregungsrichtungen, auf der sicheren Seite liegen. Die genauere Methode ist nur in den Fällen anzuwenden, bei denen eine leichte Überschreitung der zulässigen Spannungen im maschinentechnischen System auftreten und konstruktive Änderungen sehr aufwendig sind oder nicht gezielt ausgeführt werden können, so dass die Berechnungen mehrmals wiederholt werden müssen, bis man zu einem annehmbaren Resultat gelangt.

Der Vergleich der Zeitverlaufmethode mit der Antwort-Spektrum-Methode, unter Anwendung unterschiedlicher

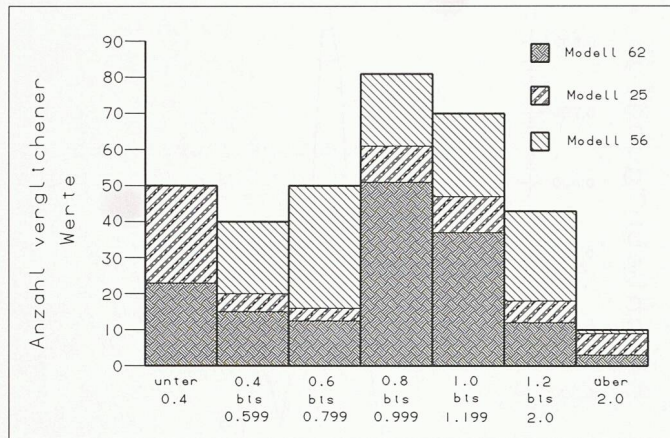


Bild 7. Verschiebung [TH mit MSE]/Verschiebung [RS mit MSE]. Modelle in Basislage

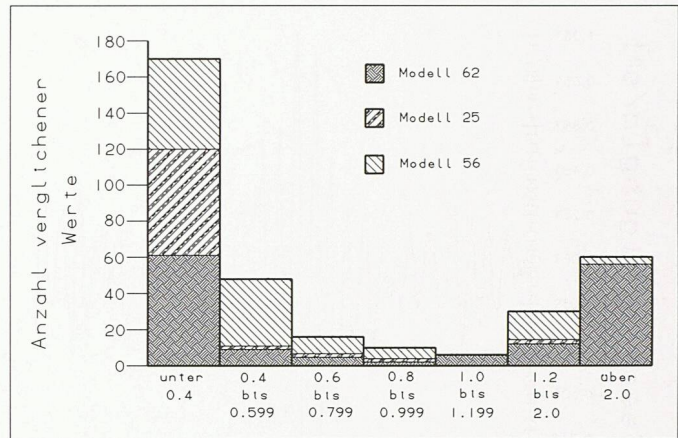


Bild 8. Verschiebung [TH mit MSE]/Verschiebung [RS mit MSE]. Modelle um 75° rotiert aus Basislage

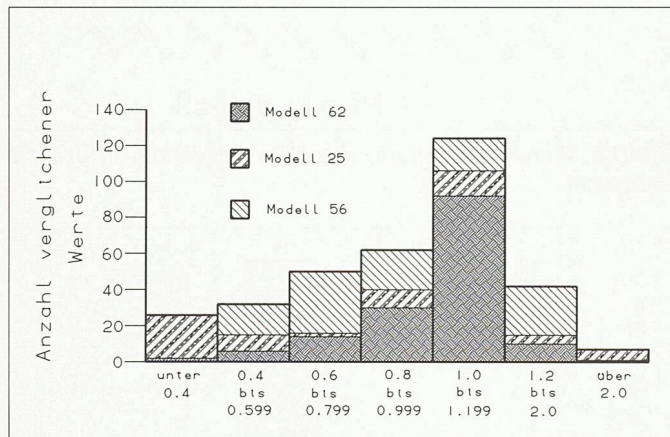


Bild 9. Verschiebung [TH mit U]/Verschiebung [RS mit U]. Modelle in Basislage

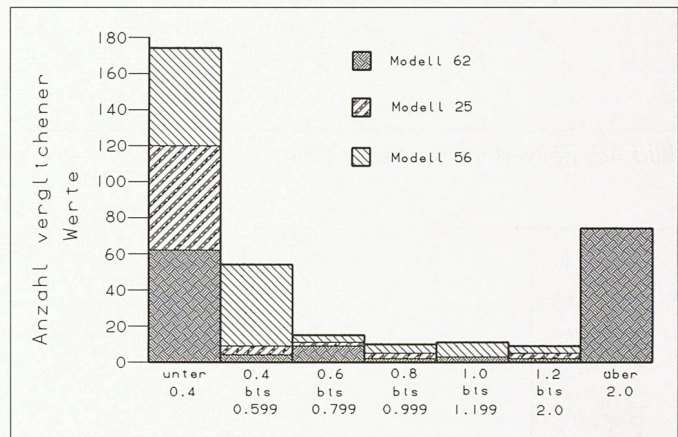


Bild 10. Verschiebung [TH mit U]/Verschiebung [RS mit U]. Modelle um 75° rotiert aus Basislage

Anregungsschwingungen in verschiedenen Punkten, zeigt, dass die Antwort-Spektrum-Methode nur in wenigen Fällen bedeutend niedrigere Verschiebungen als die Zeitverlaufmethode aufweist (siehe Bild 7). Der Vergleich der unter Berücksichtigung der schwachen Richtungen erzielten Werte bringt aber ein ganz anderes Bild (siehe Bild 8). Auf-

grund der hier erzielten Resultate ist ernsthaft die Frage zu stellen, ob die Antwort-Spektrum-Methode ohne hohe Sicherheitskoeffizienten überhaupt anzuwenden ist. Zu ähnlichen Schlussfolgerungen führen die Bilder 9 und 10, bei denen die umhüllenden Zeitverläufe mit umhüllenden Antwort-Spektren verglichen werden.

Zusammenfassung

Das an der ETH Zürich entwickelte Programm ERMSRS für die Analyse des dynamischen Verhaltens maschinen-technischer Systeme unter Berücksichtigung der schwachen horizontalen Anregungsrichtung bei unterschiedlichen Zeitverlaufanregungen in verschiedenen Punkten ermöglicht eine genauere Bestimmung der Verschiebungen. Die so berechneten Verschiebungen lassen erkennen, dass bei mehr als 20% der mit der bis jetzt bekannten Methode (Zeitverlauf mit Umhüllender) erzielten Resultate Reserven von mehr als 100% vorhanden sind. Die Anwendung des Programms ERMSRS wird jedoch nur für besonders kritische Fälle empfohlen, weil die Berechnungen relativ aufwendig sind. Die Anwendung der Antwort-Spektrum-Methode wird trotz der ungünstigen Resultate bei den Vergleichen mit genaueren Methoden wegen der niedrigeren Kosten weiter empfohlen. Bei der Bewertung der Resultate ist jedoch ein Sicherheitskoeffizient von mindestens 2 zur Gewährleistung der Festigkeit zu wählen.

Adresse des Verfassers: PD Dr. L. Baraf, Institut für Konstruktion und Bauweisen, ETH Zürich, 8092 Zürich

Literatur

- [1] Baraf, L.: Beiträge zur Berechnung der Erdbebenwirkung auf Rohrleitungen. In «Mitteilungen aus dem Institut für Grundlagen der Maschinenkonstruktion ETH Zürich», Nr. 13, 1985, S. 20-25.
- [2] Biggs, J. M.: Seismic Response Spectra for Equipment Design in Nuclear Power Plants. Transaction of the First International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, 1971, Vol. 5, Part K, p. 329-342.
- [3] Gupta, A. K.: Response Spectrum Method. Blackwell Scientific Publications, Boston, Oxford, London, Edinburgh, Melbourne, 1990, p. 163.
- [4] Baraf, L.: Comparative Analysis of Solution Methods for Determining the Weak Direction in Complex Vibrating Systems. Transactions of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Brussels, Belgium, 1985, Vol K, p. 475-480.
- [5] Clough, R. W., Penzien J.: Dynamics of Structures. New York, 1975, p. 640.
- [6] Baraf, L., Schepp, D.: «ERMSRS»-Computerprogramm zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von maschinentechnischen Systemen, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Festpunktanregungen bei komplexen Anregungsschwingungen im Zeitbereich. ETH Zürich, Inst. für Konstruktion und Bauweisen, 1991.
- [7] Frei-Spreiter, B., Baraf L.: Berechnung des dynamischen Verhaltens maschinentechnischer Systeme. Semesterarbeit, ETH Zürich, Institut für Konstruktion und Bauweisen, WS 1992/93.