

Zuverlässigkeit von Rundlaufkränen für Kernkraftwerke bei seismischer Erregung¹⁾

Wolfgang Kaiser, Lothar Knöfel, Hermann Friedrich

1. Problemstellung

Es hat sich international durchgesetzt, daß beim Bau von Kernkraftwerken auch in seismisch wenig aktiven Gebieten ein Sicherheitsnachweis für das Containment und die Komponenten des KKW bei einer angenommenen Erdbebenerregung (Auslegungserdbeben) zu führen ist.

Der Rundlaufkran, der sich im Containment auf einer kreisförmigen Kranbahn bewegt (Bild 1), gehört zwar nicht zu den Komponenten des KKW, an die sicherheitstechnisch besondere Anforderungen zu stellen sind, er muß jedoch bei einer Havarie durch ein Erdbeben, z. B. am Reaktor, voll funktionsfähig sein, um die Anlage vorschriftsmäßig außer Betrieb zu setzen.

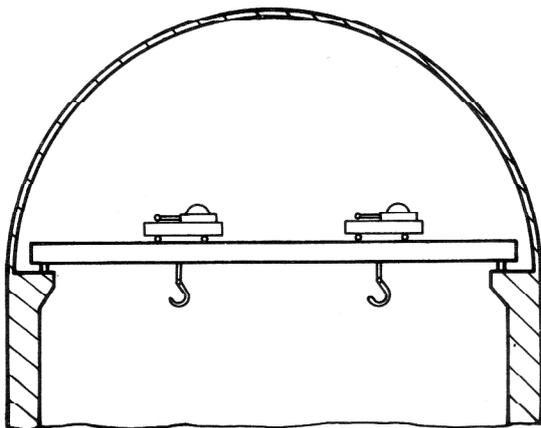


Bild 1
Rundlaufkran im Containment (nach [1])

Engelke und Fischer [1] haben mögliche Modelle für das dynamische Verhalten des Rundlaufkrans bei Erdbebenerregung und verschiedene Berechnungsverfahren gegenübergestellt. Sie weisen darauf hin, daß mit der Antwortspektren-Methode verhältnismäßig leicht ein Überblick über zu erwartende seismische Belastungen gegeben werden kann, jedoch die numerische Integration im Zeitbereich auf der Basis von gemessenen oder konstruierten Beschleunigungs-Zeit-Funktionen Reserven erkennen läßt. Es wurde deshalb in dem o. g. Beitrag vorrangig untersucht, inwieweit sich das komplexe System des Rundlaufkrans auf eine einfache Schwingungskette mit 2 Freiheitsgraden reduzieren läßt.

1) Die Untersuchungen wurden im Auftrage des VEB Schwermaschinenbau-Kombinat „Ernst Thälmann“ Magdeburg durchgeführt.

Bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen steht jedoch einerseits der Einfluß der Nichtlinearitäten auf die Beanspruchung des Rundlaufkrans im Mittelpunkt der Untersuchungen. Die Nichtlinearitäten haben ihre Ursache im Abheben des Krans von der Kranbahn, im Abheben der Katzen vom Kranbalken, im Erschlaffen der Kranseile oder im Rutschen der blockierten Räder des Krans auf der Kranbahn. Deshalb ist von einem umfassenden mechanischen Modell des Rundlaufkrans auszugehen, und es ist u. a. der Einfluß der vertikalen auf die horizontale Bewegung des Krans zu erfassen.

Andererseits sind die Rechnungen im Zeitbereich auf der Grundlage von Beschleunigungs-Zeit-Verläufen des Erdbebens durchzuführen. Als eine besondere Problematik ist dabei die Annahme der Erdbebenbelastung anzusehen, die für Zuverlässigkeitsaussagen in einem Umfang vorliegen muß, der eine statistische Auswertung der einzelnen Ergebnisse nach der Zeitverlaufsmethode gestattet. Im Abschnitt 4 wird dazu eine Lösung angeboten.

2. Mechanisches Modell des Rundlaufkrans

In das Modell des Rundlaufkrans gehen folgende Komponenten ein:

- Kranbrücke,
- Hauptkatze (bestehend aus Katzrahmen, Hubwerk und Last),
- Hilfskatze (bestehend aus Katzrahmen, Hubwerk und Last),
- Lagerung der Kranbrücke auf Federn,
- Erdbebenerregung in horizontaler und vertikaler Richtung.

Die Kranbrücke wird als Bernoulli-Balken mit stückweise konstanten Flächenträgheitsmomenten und stückweise konstanter Massenbelegung angenommen. Katzrahmen, Hubwerk und Lasten gehen als Punktmassen in das Modell ein.

Untersucht werden die vertikalen und horizontalen Bewegungen dieses Systems.

2.1. Bewegung in vertikaler Richtung

Das Modell für die vertikale Bewegung ist in Bild 2 dargestellt.

Die Kranbrücke ist auf den Federn c_A mit nichtlinearer Kennlinie gelagert. Der Anteil c_U der Feder ist eine Überlastfeder (antiseismische Lagerung der Kranbrücke, vgl. [1]). Die Zusatzfeder c_B wird so bestimmt, daß bei Annahme des Flächenträgheitsmomentes J_{xx} des Abschnittes I' auch für den relativ kurzen Abschnitt I' die statische Durchbiegung des Kranbalkens unverändert

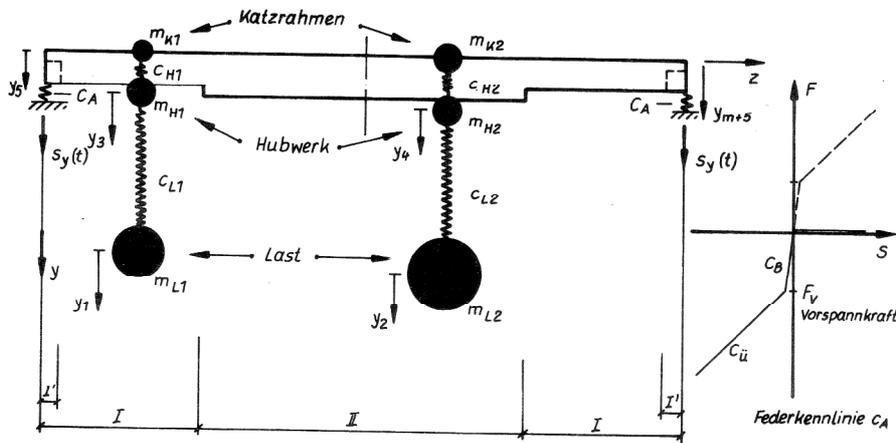


Bild 2
Modell für die vertikale Bewegung
des Rundlaufkranes

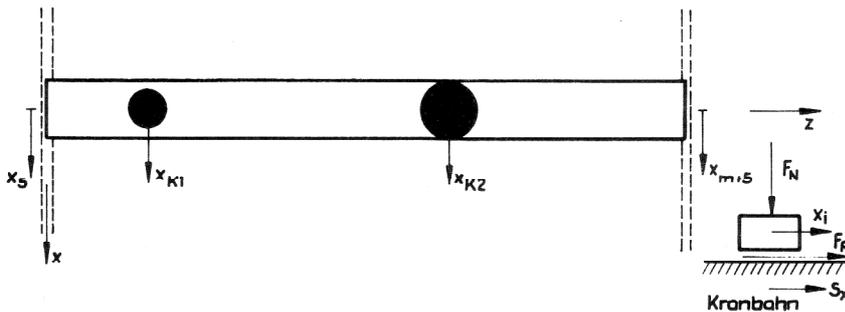


Bild 3
Modell für die horizontale Bewegung
des Rundlaufkranes

bleibt. Auf diese Weise wird den Schwierigkeiten bei der numerischen Auswertung, die sich bei Vorhandensein eines solchen kurzen Balkenabschnittes ergeben würden, aus dem Wege gegangen. Eine Zugkraft wird für c_A nicht zugelassen, da in diesem Fall der Kran von der Kranbahn (Auflager) abhebt. Weitere Nichtlinearitäten ergeben sich daraus, daß bei bestimmten Bewegungen die Seile schlaff werden. Deshalb werden in den Federn c_{L1} und c_{L2} nur Zugkräfte zugelassen.

Vorgesehen ist auch die Möglichkeit, daß die Katzrahmen m_{K1} und m_{K2} von der Brücke abheben.

2.2. Bewegung in horizontaler Richtung

Das Modell für die horizontale Bewegung ist aus Bild 3 ersichtlich.

Bei der horizontalen Bewegung der Kranbrücke werden die angehängten Lasten m_{L1} und m_{L2} nicht mit berücksichtigt. Die Masse des Hubwerkes wird jeweils zur Masse des Katzrahmens hinzugeschlagen. Berücksichtigt wird ein mögliches Rutschen der Enden der Kranbrücke bei blockierten Fahrwerken auf der Kranbahn. Dabei wird Coloumbsche Reibung vorausgesetzt. Die beiden Brückenenden werden bei unsymmetrischer Lastverteilung ungleichmäßig rutschen. Ein Verkeilen auf der Fahrbahn wird nicht erfaßt.

Für den Abschnitt I' der Kranbrücke wird wiederum das Flächenträgheitsmoment des Abschnittes I angenommen (vgl. Bild 2).

2.3. Kopplungen und Koordinaten

Kopplungen zwischen der vertikalen und horizontalen Bewegung treten durch das räumliche Pendeln der Lasten und das Rutschen der Kranbrücke auf der Kran-

bahn auf (die Reibungskraft hängt von der Auflagerkraft ab).

Der Einfluß der vertikalen auf die horizontale Bewegung (umgekehrt liegt kein Einfluß vor) wird berücksichtigt. Es läßt sich zeigen, daß bei typischen Erdbebenbeschleunigungen der Pendelausschlag der Lasten unter $0,2^\circ$ liegt. Das Pendeln der Lasten wird daher vernachlässigt.

Für die numerische Rechnung wird der Balken in m Felder aufgeteilt. Die Bezeichnung der Verschiebungen y_i für die vertikale Richtung wird dann wie folgt vereinbart:

- $i = 1$ Verschiebung der Last m_{L1}
- 2 Verschiebung der Last m_{L2}
- 3 Verschiebung des Hubwerkes m_{H1}
- 4 Verschiebung des Hubwerkes m_{H2}
- 5 Verschiebung des linken Balkenendpunktes
- 6 Verschiebung des zweiten Balkenpunktes
- \dots
- $m+4$ Verschiebung des vorletzten Balkenpunktes
- $m+5$ Verschiebung des rechten Balkenendpunktes

Neben der Verschiebung y_i erfährt jeder Knotenpunkt des Balkens noch eine Drehung ψ_i , so daß der gesamte Verformungsvektor y , in dem die Verschiebungen und Drehungen gegenüber dem unbelasteten und unbewegten Zustand zusammengefaßt werden, $2m+6$ Koordinaten umfaßt:

$$y = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, \psi_5, y_6, \psi_6, \dots, y_{m+5}, \psi_{m+5})^T \quad (1)$$

Im Verformungsvektor x für die horizontale Richtung entfallen die ersten 4 Glieder:

$$x = (x_5, \varphi_5, x_6, \varphi_6, \dots, x_{m+5}, \varphi_{m+5})^T \quad (2)$$

Zur Kennzeichnung der Bewegung der Punkte des Kranbalkens, an denen die Laufkatzen angeordnet sind, werden noch x_{Ki} und y_{Ki} ($i = 1, 2$) verwendet.

Die aus der Erdbebenbewegung resultierende Erregung des Systems wird über die Kranbahn eingeleitet. Es wird angenommen, daß die Verschiebungen der Kranbahn durch die Wirkung des Erdbebens am linken bzw. rechten Auflager gleich sind. Die Verschiebungen aus der Erdbebenbewegung in x bzw. y Richtung werden mit s_x bzw. s_y bezeichnet.

3. Differentialgleichungssystem und Lösung des Problems

3.1. Vertikale Bewegung

Unter den getroffenen Voraussetzungen hat das Dgl-System die Form

$$M_v \ddot{y} + D_v(y) \dot{y} + K_v(y) y = q \quad (3)$$

Dabei bedeuten:

- M_v Massenmatrix
- $D_v(y)$ Dämpfungsmatrix
- $K_v(y)$ Steifigkeitsmatrix
- q Vektor der Belastung
- y Vektor der Verschiebungen und Drehungen

Die Steifigkeitsmatrix K_v und die Dämpfungsmatrix D_v hängen wegen der im Abschnitt 2 beschriebenen Nichtlinearitäten vom Verformungsvektor y ab. Die Massenmatrix ist konstant.

Zunächst wird der Aufbau der Matrizen K_v , M_v und D_v erläutert. Die Steifigkeitsmatrix K_v wird aus der Steifigkeitsmatrix der Brücke K_B , der Steifigkeitsmatrix der Katzen K_K und der Steifigkeitsmatrix der Lagerung K_A zusammengesetzt:

$$K_v(y) = K_B + K_K(y) + K_A(y). \quad (4)$$

Die Steifigkeitsmatrix eines Balkenelementes hat die Form

$$K_i = \frac{EJ_{xxi}}{l_i^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_i & -12 & 6l_i \\ & 4l_i^2 & -6l_i & 2l_i^2 \\ \text{(symm.)} & & 12 & -6l_i \\ & & & 4l_i^2 \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, m \quad (5)$$

unabhängig davon, ob von einer Übertragungsmatrix oder einem Ritz-Ansatz mit kubischen Hermiteschen Interpolationspolynomen für die Formänderungsarbeit ausgegangen wird. K_B wird nun gebildet, indem für $i = 1, 2, \dots, m$ die Matrizen K_{Bi} den Elementen im Schnitt der Zeilen $2i+3, \dots, 2i+6$ mit der Spalte $2i+3, \dots, 2i+6$ überlagert werden, beginnend mit einer Nullmatrix der Ordnung $2m+6$.

Die Struktur der Matrix $K_K(y)$ ist abhängig vom Standort der Katzen und weiterhin davon, ob die Seile auf Zug beansprucht werden oder erschlafft sind bzw. ob die Hubwerke auf dem Katzrahmen aufliegen oder abheben. Befinden sich die Katzen z. B. an den Balkenpunkten 2 bzw. $m+3$ und gilt $y_1 > y_3, y_2 > y_4, y_3 > y_6, y_4 > y_{m+3}$, so ergibt sich K_K mit den Federzahlen der Seile c_{L1} bzw. c_{L2} und den Federzahlen der Hubwerke c_{H1} bzw. c_{H2} in der Form

$$K_K = \begin{bmatrix} c_{L1} & 0 & -c_{L1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & c_{L2} & 0 & -c_{L2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{L1} + c_{H1} & 0 & 0 & 0 & -c_{H1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{L2} + c_{H2} & 0 & 0 & 0 & \dots & -c_{H2} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & c_{H1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & & & & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & & & & & & c_{H2} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(symmetrisch)

Zur Matrix K_A gehören nur Terme in der fünften und der vorletzten Zeile des Dgl.-Systems, vorausgesetzt, daß die Enden der Kranbrücke momentenfrei gelagert sind und aufliegen. Mit der aus der Erdbebenwirkung resultierenden Verschiebung $s_y(t)$ der Kranbahn gilt dann $c_A(y_5 - S_y)$ bzw. $c_A(y_{m+5} - s_y)$ für die Federkräfte. Dabei ist die Nichtlinearität der Federkennlinie c_A zu beachten (vgl. Bild 2). Die Matrix K_A enthält außer Nullen nur im fünften und vorletzten Diagonalelement die Federzahlen c_A . Dabei könnten an den beiden Balkenenden auch unterschiedliche Federn wirken.

Die Anteile $c_A s_y(t)$ gehen in den Lastvektor $q(t)$ ein.

Die Massenmatrix M_v wird analog zur Steifigkeitsmatrix K_B aus den entsprechenden Matrizen der Balkenelemente

$$M_i = \frac{\rho_i l_i}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l_i & 54 & -13l_i \\ & 4l_i^2 & 13l_i & -3l_i^2 \\ \text{(symm.)} & & 156 & -22l_i \\ & & & 4l_i^2 \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, m \quad (7)$$

durch Überlagerung aufgebaut. Den Matrizen nach Gl. (7) liegen kubische Polynomansätze zugrunde. Wird die Masse des Balkenelementes auf die Elementendpunkte konzentriert, dann weist M_i die einfache Form

$$M_i = \frac{\rho_i l_i}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 \\ \text{(symm.)} & & & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

auf und M_v wird zur Diagonalmatrix.

Die Massen der Lasten (m_{L1} bzw. m_{L2}) stehen in M_v als 1. bzw. 2. Diagonalelement.

Werden die Katzrahmen als am Kranbalken geklammert angesehen, so bilden die Massen der Hubwerke m_{H1} bzw. m_{H2} das 3. bzw. 4. Diagonalelement von M_v . Die Masse des Katzrahmens m_{K1} bzw. m_{K2} wird dem Knoten zugeschlagen, an dem die Katze steht.

Können die Katzrahmen von der Kranbahn abheben, so bilden die Massen von Hubwerk und Katzrahmen $m_{K1} + m_{H1}$ bzw. $m_{K2} + m_{H2}$ das 3. bzw. 4. Diagonalelement. D. h., für diesen Fall wird angenommen, daß sich Katzrahmen und Hubwerk in gleicher Weise bewegen.

Für die Dämpfungsmatrix D_v wird davon ausgegangen, daß jeder Feder der Steifigkeitsmatrix K_v eine geschwindigkeitsproportionale Dämpfung zugeordnet werden kann. Dabei können sich die Dämpfungswerte für Kranbrücke, Seile, Katzrahmen und Überlastfedern unterscheiden.

Eine Entkopplung des Systems durch modale Analyse kommt wegen der Nichtlinearitäten ohnehin nicht in Frage.

In den Lastvektor gehen die Wirkungen aus der Schwerkraft und aus der Erdbebenbewegung ein.

Die Wirkung aus der Schwerkraft wird erfasst, indem die Massenmatrix M_v mit einem Vektor g multipliziert wird, der in jeder Verschiebungsordinate die Erdbeschleunigung und in jeder Drehungsordinate eine Null enthält. Der statische Verschiebungszustand ergibt sich dann aus dem Gleichungssystem

$$K_v(y(t_0)) y(t_0) = p(t_0) = M_v g \quad (9)$$

Er wird bei der Integration des Dgl.-Systems als Anfangszustand $y_0 = y(t_0)$ verwendet.

Geht man bei der Massenmatrix in einfacher Diagonalform auf diese Weise vor, dann erkennt man die Problematik einer gleichmäßigen Massenaufteilung der Elemente auf die Knotenpunkte. Im Extremfalle, wenn der Kranbalken mit konstantem Querschnitt und konstanter Massenbelegung in der Mitte geteilt wird und an den Enden momentenfrei gelagert ist, ergibt die Berechnung der Stützkkräfte in den Knotenpunkten eine Verteilung

($\frac{3}{16}l$; $\frac{10}{16}l$; $\frac{3}{16}l$), während sich bei einfacher Massenaufteilung ($\frac{4}{16}l$; $\frac{8}{16}l$; $\frac{4}{16}l$) ergeben würde.

Die Anteile $\frac{2}{16}l$, die von der Balkenmitte auf die Balkenrandpunkte verlagert werden, gehen nicht nur bei der Verformungsrechnung, sondern auch bei der Schwingungsberechnung verloren. Bei feinerer Unterteilung des Balkens geht diese Differenz jedoch schnell zurück.

Die Erdbebenerrregung geht über die Glieder $c_A s_y(t)$ an der 5. bzw. vorletzten Stelle des Lastvektors in das System ein. Insbesondere wegen der Annahme einer einheitlichen Erdbebenerrregung der gesamten Kranbahn ist es zweckmäßig, durch die Transformation

$$v = y - s_y \quad (10)$$

die Erregung $s_y(t)$ von der Steifigkeits- und Dämpfungsmatrix abzulösen und ihre Beschleunigung $\ddot{s}_y(t)$ mit der Massenmatrix zu verbinden. Dabei ist in Gl. (10) $s_y(t)$ der Vektor

$$s_y(t) = (s_y, s_y, s_y, s_y, s_y, 0, s_y, \dots, s_y, 0)^T \quad (11)$$

Das Dgl.-System lautet dann im mitbewegten Koordinatensystem

$$M_v \ddot{v} + D_v(v) \dot{v} + K_v(v) v = M_v (g - \ddot{v}) \quad (12)$$

Dabei hängen K_v und D_v ebenso von v ab wie von y , da sich diese Abhängigkeit in K_K nur auf Differenzen der Verschiebungen bezieht und nur in K_A die Ungleichungen $v_5 > 0$ bzw. $v_{m+5} > 0$ über das Wegfallen von Auflagerkräften entscheiden.

3.2. Horizontale Bewegung

Das Dgl.-System für die horizontale Bewegung hat analog zur vertikalen Bewegung nach Gl. (3) die Form

$$M_h \ddot{x} + D_h \dot{x} + K_h x = p \quad (13)$$

Steifigkeitsmatrix K_h und Dämpfungsmatrix D_h hängen in diesem Fall jedoch nicht vom Verformungsvektor x

ab. Damit ist dieses Problem gegenüber der vertikalen Bewegung wesentlich einfacher zu behandeln.

Die Massenmatrix M_h sowie die Steifigkeitsmatrix K_h und somit auch die Dämpfungsmatrix D_h setzen sich in diesem Fall nur aus den Steifigkeitsmatrizen der Balkenelemente (K_B) zusammen. Vgl. dazu die Gleichungen (5) und (7). Für J_{xx_i} steht jetzt das Flächenträgheitsmoment J_{yy_i} . Die entsprechenden Matrizen haben die Ordnung $2m+2$, d. h., die ersten 4 Zeilen bzw. Spalten entfallen gegenüber den Matrizen der vertikalen Bewegung.

Wie vorn beschrieben, werden die pendelnden Lasten nicht mit berücksichtigt; die Masse des Hubwerkes wird jeweils zur Masse des Katzrahmens geschlagen und in dem entsprechenden Knotenpunkt des Balkens angeordnet.

Auch für die horizontale Bewegung werden durch die Transformation

$$\mathbf{u} = \mathbf{x} - \mathbf{s}_x, \quad (14)$$

$$\mathbf{s}_x = (s_x, 0, s_x, 0, \dots, s_x, 0)^T \quad (15)$$

relative Verschiebungen eingeführt.

Haften beide Enden der Kranbrücke auf der Kranbahn, so gilt

$$M_h \ddot{\mathbf{u}} + D_h \dot{\mathbf{u}} + K_h \mathbf{u} = M_h \ddot{\mathbf{s}}_x, \quad (16)$$

wobei der Zustandsvektor \mathbf{u} im ersten und vorletzten Glied eine Null aufweist, da sich diese Punkte (x_5 bzw. x_{m+5}) relativ zu s_x nicht bewegen.

$$\mathbf{u} = (0, \varphi_5, u_6, \varphi_6, \dots, u_{m+4}, \varphi_{m+4}, 0, \varphi_{m+5})^T \quad (17)$$

Als Besonderheit ist das Rutschen auf der Kranbahn zu berücksichtigen. Rutschen an einem Ende der Kranbrücke tritt ein, wenn

$$|Q(x_i)| > |F_{Ri}| = |R_H F_{Ni}| \quad (18)$$

gilt (vgl. Bild 3).

In Gl. (18) sind:

F_{Ni}	$= c_A v_i$	Normalkraft auf der Kranbahn
R_H		Haftreibungszahl
$Q(x_i)$		Querkraft am Balkenende
$i = 5$		linkes Balkenende
$= m + 5$		rechtes Balkenende

Ist die Ungleichung (18) erfüllt, dann steht auf der rechten Seite der Gl. (16) zusätzlich noch ein Vektor, der im ersten und/oder vorletzten Glied die Gleitreibungskraft

$$F_{Ri} = R_G F_{Ni} \text{ sign } \dot{u}_i \quad (19)$$

enthält. Alle anderen Glieder dieses Vektors sind Null. Im Vektor \mathbf{u} steht an der entsprechenden Stelle dann keine Null, sondern u_5 bzw. u_{m+5} , da jetzt relative Verschiebungen zwischen der Kranbahn und dem Ende des Kranbalkens vorhanden sind.

3.3. Numerische Lösung

Für die vertikale Bewegung sind $2m+6$ Gleichungen, für die horizontale Bewegung $2m+2$ Gleichungen jeweils 2. Ordnung zu lösen. Bei der Forderung, die Katzen an beliebigen Stellen auf der Kranbahn anordnen zu können und unter Berücksichtigung der 3 Abschnitte des

Balkens ist die Unterteilung desselben in 7 Elemente zweckmäßig.

Damit sind insgesamt 36 Gleichungen 2. Ordnung zu integrieren. Dazu wurden ein modifiziertes Newmark-Verfahren und das Runge-Kutta-Verfahren verwendet. Das Newmark-Verfahren hat sich bei der Integration der steifen Systeme als vorteilhaft erwiesen, während durch das Runge-Kutta-Verfahren zustandsabhängige Sprungstellen in den Koeffizienten des Dgl.-Systems genauer erfaßt werden können.

Mit dem Verfahren der statischen Kondensation, das am effektivsten durch das Austauschverfahren von E. Stiefel zu realisieren ist, können die Verdrehungen φ_i bzw. ψ_i aus den Verformungsvektoren \mathbf{u} bzw. \mathbf{v} entfernt werden. Damit liegen in den Steifigkeitsmatrizen des Balkens die Einflußzahlen vor. Dabei muß in Kauf genommen werden, daß die Bandgestalt der Steifigkeitsmatrix verlorengeht.

Eine dynamische Kondensation gibt es nur für stationäre Schwingungen, also für die Matrizeigenwertaufgabe, wobei für die Eigenwertparameter noch Näherungswerte der Eigenwerte einzusetzen sind. Für instationäre Schwingungen gibt es keine Kondensation. Eine Erniedrigung der Ordnung des Dgl.-Systems unter Verwendung von Einflußzahlen wäre mit einer Veränderung der Dynamik des Systems verbunden. Von dieser Möglichkeit wurde daher kein Gebrauch gemacht.

Besondere Aufmerksamkeit erfordern bei der Integration die zahlreichen Fallunterscheidungen, die durch die Nichtlinearitäten des Systems bedingt sind. Sie werden nachfolgend zusammengestellt.

I. Vertikale Bewegung

1. Abheben des Hubwerkes vom Katzrahmen

$$\text{Test: } v_{k1} > v_3 \text{ bzw. } v_{k2} > v_4$$

2. Last im freien Fall

$$\text{Test: } v_3 > v_1 \text{ bzw. } v_4 > v_2$$

Bewegt sich die Schwingungskette Hubwerk-Seil-Last oder Teile derselben im freien Fall, so werden die betreffenden Elemente aus dem Gesamtsystem herausgelöst und als separates System nur unter Wirkung der Schwerkraft mit den Anfangsbedingungen zum Zeitpunkt des AblöSENS berechnet.

Der freie Fall ist beendet, wenn für die korrespondierenden Koordinaten $v_{\text{oben}} \leq v_{\text{unten}}$ gilt.

3. Abheben der Balkenenden von der Kranbahn

$$\text{Test: } v_5 < 0 \text{ bzw. } v_{m+5} < 0$$

Für $v_5 < 0$ und/oder $v_{m+5} < 0$ wirken die linke und/oder rechte Feder nicht. In diesem Fall ist die Querkraft am entsprechenden Balkenende in horizontaler und vertikaler Richtung Null. Wirken beide Federn nicht, so bewegt sich die Kranbrücke im freien Fall (frei schwingender Balken).

Die freie Bewegung des Balkenendes ist für $v_5 \geq 0$ bzw. $v_{m+5} \geq 0$ beendet.

Die horizontale Bewegung kann erst nach Integration des Dgl.-Systems für die vertikale Bewegung ermittelt werden, da $v_5(t)$ und $v_{m+5}(t)$ im horizontalen System als Eingangsgrößen benötigt werden.

II. Horizontale Bewegung

Mit Hilfe der Ungleichung (18) werden für die Enden der Kranbrücke die Fälle

linkes Ende	rechtes Ende
fest	fest
rutscht	fest
fest	rutscht
rutscht	rutscht

unterschieden.

Während des Abhebens von der Kranbahn gilt für das Balkenende der Zustand Gleiten mit der Gleitreibungszahl $R_G = 0$. Das Rutschen ist beendet für

$$|Q(x_1)| \leq |R_G F_{Ni}|. \quad (20)$$

Innerhalb eines Integrationsintervalls (0,002 s in den durchgerechneten Beispielen) läßt die Schrittweitensteuerung des Runge-Kutta-Verfahrens nur eine Zustandsänderung Haften-Gleiten oder Gleiten-Haften zu, allerdings in einem beliebigen Zeitpunkt t mit $t_0 \leq t < t_0 + 0,002$. Bei Richtungsumkehr der Horizontalbewegung muß der entsprechende Brückenendpunkt durch den Zustand Haften hindurchgehen. Eine Richtungsänderung für das Gleiten erfordert im ungünstigsten Fall 0,002 s, d. h. die Länge eines Integrationsintervalls.

4. Seismische Erregung

Zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens des komplexen Modells des Rundlaufkranes werden Meßschriebe des Erdbebenverlaufs benötigt. Statistische Charakteristiken oder Antwortspektren sind wegen der Nichtlinearitäten des Modells nicht ausreichend.

Aus meßtechnischen Gründen ist es üblich, Erdbeben durch ihre zeitlichen Beschleunigungsverläufe zu charakterisieren. Dabei muß davon ausgegangen werden, daß für den konkreten Standort des Kernkraftwerkes keine Messungen von Erdbebenbeschleunigungen vorliegen, zumindest aber die evtl. vorhandenen Messungen für statistische Auswertungen nicht ausreichend sind.

Dieser Mangel an seismischen Daten, insbesondere für Gebiete mittlerer oder geringer seismischer Aktivität hat zur Entwicklung von stochastischen Erdbebenmodellen geführt. Friedrich und Lange [2] haben die verschiedenen in der Literatur vorhandenen stochastischen Modellprozesse für Erdbeben mit dem Ziel einer wirklichkeitsnäheren Beschreibung hinsichtlich des Typs des Erdbebens klassifiziert und zahlreiche numerische Simulationsverfahren zur Erzeugung künstlicher Seismogramme erprobt. Basierend auf mittels gleichverteilter Zufallszahlen erzeugter stochastischer Prozesse und mittels normalverteilter Zufallszahlen erzeugter stationärer Gaußscher Prozesse und Gaußschen weißen Rauschens einschließlich daraus durch Filtern erhaltener Prozesse lassen sich unter Hinzunahme einer deterministischen Intensitätsfunktion, welche die (praktisch erwiesene) Instationarität der Erregung (Aufklingphase, Mittelteil, Abklingphase) garantiert, künstliche Seismogramme erzeugen.

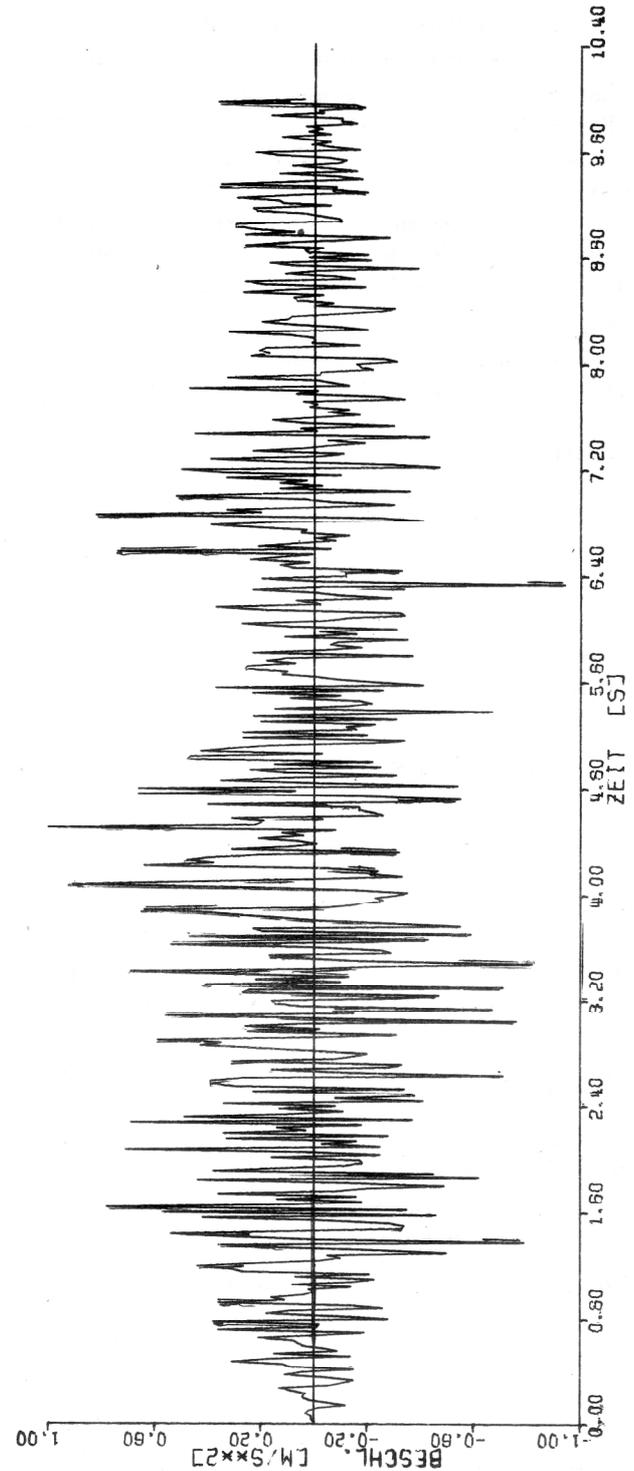


Bild 4
Simulierte Erdbebenbeschleunigung nach Gl. (22)

Für die numerische Simulation der Erdbebenbeschleunigung $\ddot{Z}_g(t)$ haben sich für unterschiedliche Bodenklassen drei verschiedene Ansätze als zweckmäßig erwiesen:

1. Felsiger Untergrund

$$\ddot{Z}_g(t) = I(t) \dot{w}(t) \quad (21)$$

mit $\dot{w}(t)$ Gaußsches weißes Rauschen

$I(t)$ deterministische Intensitätsfunktion

z. B. $I(t) = e^{-at} - e^{-bt}$, $0 < a < b$

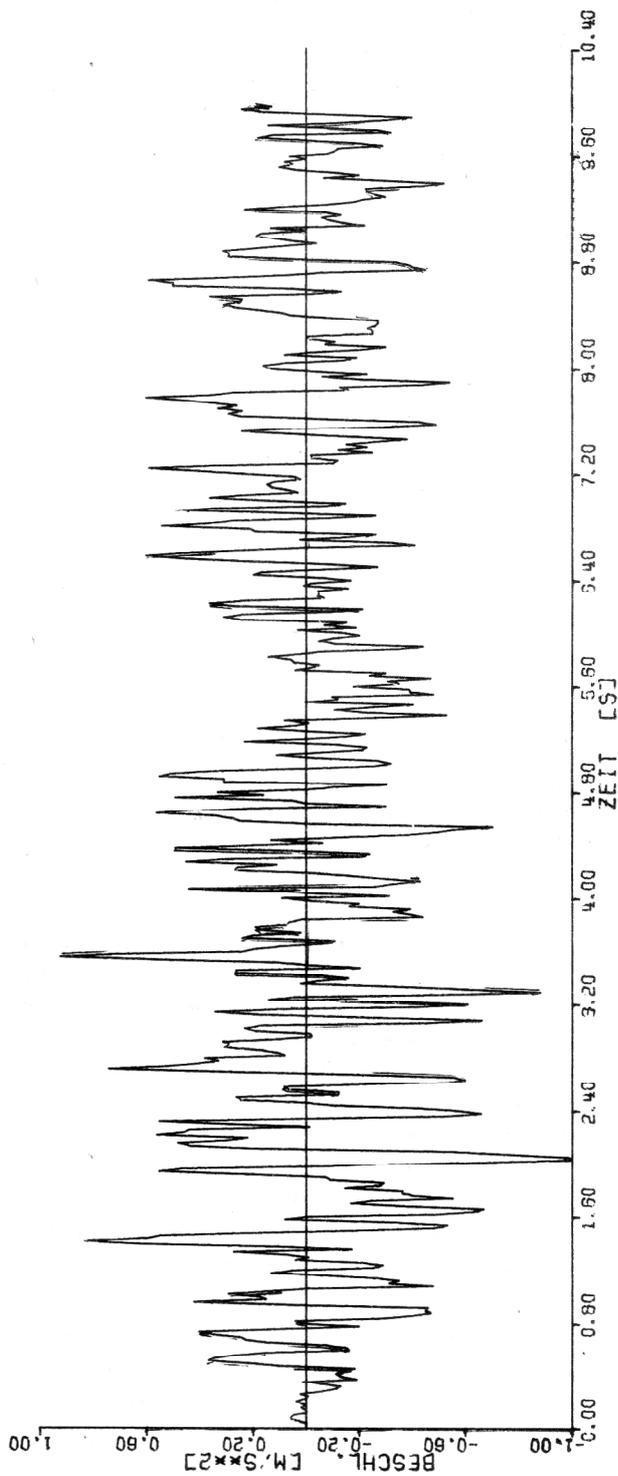


Bild 5
Simulierte Erdbebenbeschleunigung nach Gl. (23)

2. Lockere Bodenschichten

$$\ddot{Z}_g(t) = Y(t) \cos[(a + X(t))] \quad (22)$$

mit $EX(t) \equiv 0$, $EY(t) \equiv 0$, $a > 0$

3. Verschiedene Bodentypen bei Vorliegen entsprechend aussagekräftiger geologischer Gutachten

$$a_1(t) \ddot{x}(t) + a_2(t) \dot{x}(t) + a_3(t) x(t) = a_4(t) \dot{w}(t) \quad (23)$$

mit $\ddot{Z}_g(t) = x(t)$

$a_i(t)$ deterministische Funktionen ($i = 1, 2, 3, 4$)

Beispiele für simulierte Erdbebenbeschleunigungen sind in den Bildern 4 und 5 dargestellt.

Durch die Simulation von Erdbeben sind Angaben zur Bodenbeschleunigung $\ddot{Z}_g(t)$ vorhanden. Diese Bodenbeschleunigung wird sowohl in horizontaler $\ddot{Z}_h(t)$ als auch in vertikaler Richtung $\ddot{Z}_v(t)$ in Ansatz gebracht. Damit liegt man auf der sicheren Seite, da die maximale vertikale Bodenbeschleunigung a_v i. a. kleiner ist als die maximale horizontale Bodenbeschleunigung a_h . Aus der Literatur ist ersichtlich, daß teilweise a_v mit 50 % von a_h bei gleichzeitiger Wirkung von a_h und a_v angenommen wird.

Zur Berechnung des Rundlaufkranes werden die Beschleunigungsverläufe in Höhe der Kranbahn benötigt. Es hat sich als ausreichend erwiesen, das Übertragungsverhalten des Containments in horizontaler Richtung durch einen Einmassenschwinger zu realisieren, da die Erdbebenbeschleunigung in Höhe der Kranbahn im wesentlichen durch die 1. Eigenfrequenz der Schale bestimmt wird. Dabei wurden die Eigenfrequenz des Einmassenschwingers und die Grundeigenfrequenz des Containments sowie die Dämpfungsmaße gleichgesetzt. Damit ist die Beschleunigung $\ddot{s}_x(t)$ in horizontaler Richtung in Höhe der Kranbahn auf der Grundlage der Bodenbeschleunigung $\ddot{Z}_h(t) = \ddot{Z}_g(t)$ bekannt. Die Beschleunigung in vertikaler Richtung in Höhe der Kranbahn wird mit der Bodenbeschleunigung gleichgesetzt ($\ddot{s}_y(t) = \ddot{Z}_g(t)$), was etwa dem Übertragungsverhalten des Containments in vertikaler Richtung entspricht.

Mit diesen Annahmen werden gegenüber den großen Unsicherheiten, die in den simulierten Erdbeben stecken, überschaubare Vernachlässigungen gemacht.

5. Ergebnisse

Die Dgl.-Systeme (12) und (16) wurden für gemessene und simulierte Erdbebenbeschleunigungs-Zeit-Verläufe $\ddot{s}_x(t)$ und $\ddot{s}_y(t)$ durch Integration im Zeitbereich gelöst.

Da die ersten 6 Eigenfrequenzen des mechanischen Modells des Rundlaufkranes im möglichen Frequenzspektrum eines Erdbebens (1 Hz bis 20 Hz) liegen, ist die genaue Kenntnis der Dämpfungsparameter des Systems von besonderer Bedeutung. Dazu sind spezielle experimentelle Untersuchungen vorgesehen.

Es zeigt sich, daß bei maximalen Beschleunigungen in horizontaler und vertikaler Richtung in Höhe der Kranbahn, die der Intensität VII entsprechen ($a_{\max} = 1 \text{ m/s}^2$), keine Nichtlinearitäten im mechanischen System auftreten. In diesem Fall ist der Vergleich und die Auslegung verschiedener Kranvarianten mit Hilfe der Antwortspektren-Methode möglich und zweckmäßig. Durchgeführte Vergleichsrechnungen haben dies bestätigt.

Im Bild 6 sind ausgewählte Verschiebungen des Kranmodells bei einer maximalen Beschleunigung in Höhe der Kranbahn in vertikaler Richtung von 5 m/s^2 und in horizontaler Richtung von 15 m/s^2 dargestellt. Berechnet wurde ein Rundlaufkran mit einer Stützweite von ca. 43 m, dessen Hilfskatze mit Last ca. 3 m entfernt vom linken Balkenende steht; die Hauptkatze befindet sich in der Mitte der Brücke. Dadurch tritt insbesondere am rechten Balkenende ein ausgeprägtes Rutschen auf.

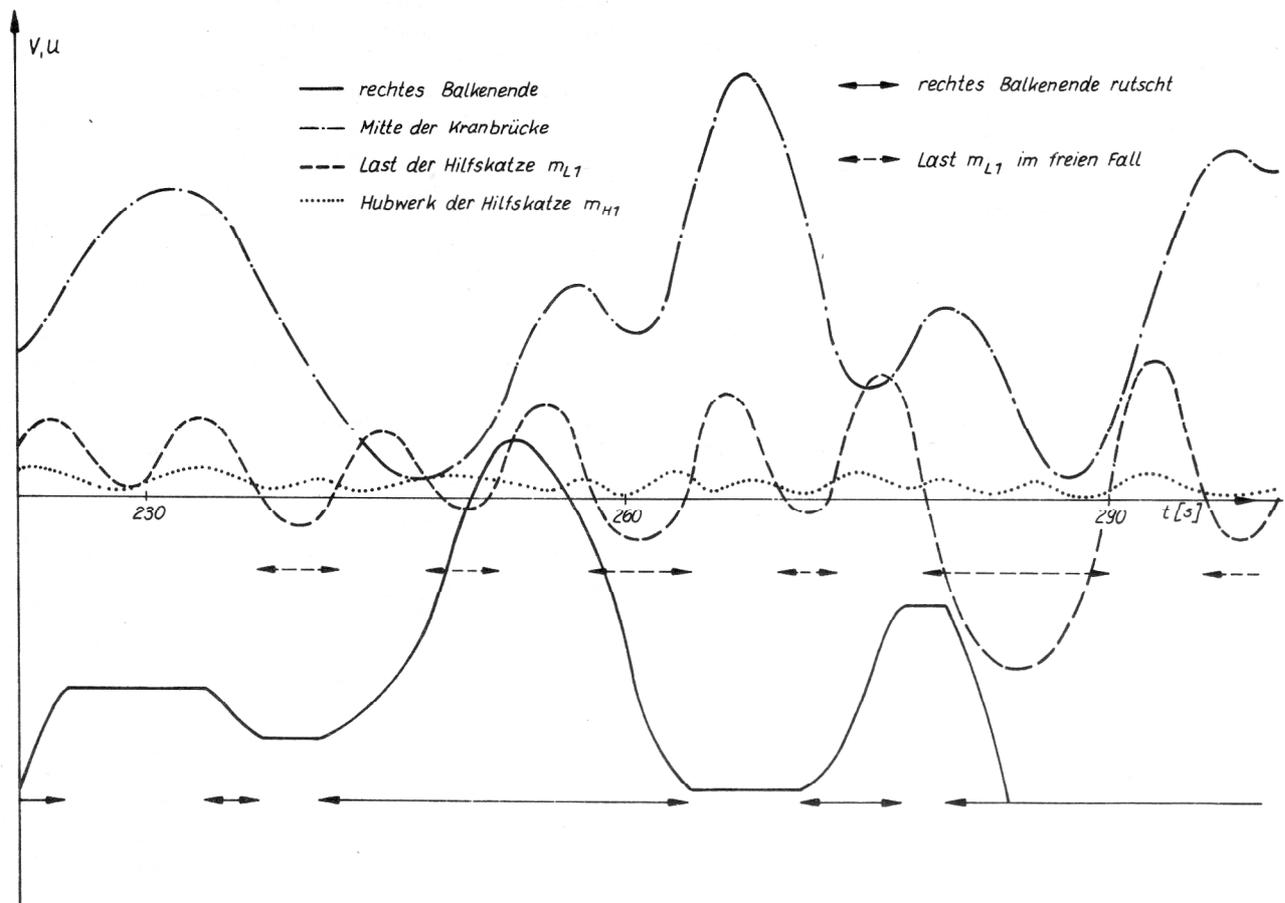


Bild 6
 Verschiebungen ausgewählter Punkte des Rundlaufkranes für $a_{v \max} = 5 \text{ m/s}^2$ und $a_{h \max} = 15 \text{ m/s}^2$

Die Lasten (im Bild m_{L1}) bewegen sich bei diesen Erdbebenbeschleunigungen ebenfalls in zahlreichen Phasen im freien Flug.

Die Rechnungen zeigen, daß der horizontalen Balkenbiegung für die Überwindung der Haftreibung neben der Kranbahnbeschleunigung die entscheidende Rolle zufällt. Durch das Rutschen verringert sich die Biegung des Balkens, was einer Abnahme der Spannungen entspricht. Auch bei diesen extremen Beschleunigungen übersteigt die maximale vertikale Verschiebung in der Mitte der Kranbrücke nicht das 4fache der statischen Auslenkung.

Auf der Grundlage der ermittelten Verschiebungen und Verdrehungen werden in besonders gefährdeten Abschnitten des Kranbalkens Schnittkräfte und Schnittmomente ermittelt.

Aussagen zur Zuverlässigkeit des Rundlaufkranes werden auf der Grundlage einer repräsentativen Anzahl durchgerechneter Zeitverläufe (ca. 25) ermittelt. Dabei geht es um die Aussage, wann in einem bestimmten Querschnitt des Rundlaufkranes die ertragbare oder zulässige Spannung erstmalig überschritten wird. Zur Abschätzung dieser Niveauüberschreitungswahrscheinlichkeit wird der zeitliche Verlauf der Spannung als differenzierbarer stochastischer Prozeß $x(t)$, $t \in T$ aufgefaßt, und es wird die Wahrscheinlichkeit $P(x(t) < c \text{ für alle } t \in S)$ bestimmt, daß der stochastische Prozeß für jeden Zeitpunkt eines vorgegebenen Nutzungszeitraumes S unter-

halb des Niveaus c bleibt. Im Falle des Rundlaufkranes wurde für die zulässigen Spannungen mit einem konstanten Niveau gerechnet; die Niveaus können aber auch zeitabhängig oder zufällig sein. Die gesuchte Wahrscheinlichkeit wurde dadurch abgeschätzt, daß die diskrete Zufallsgröße „Anzahl von Überschreitungen des betrachteten Niveaus im Zeitintervall S durch $x(t)$ “ den Wert Null annimmt.

Für die Berechnung, Approximation bzw. Abschätzung der Niveauüberschreitungswahrscheinlichkeiten wurden von Lange [3] entwickelte und aufbereitete Verfahren benutzt.

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wurde für den VEB Schwermaschinenbau-Kombinat „Ernst Thälmann“ Magdeburg eine Berechnungsvorschrift für seismisch beanspruchte Tragwerke erarbeitet.

LITERATUR

- [1] Engelke, M., Fischer, H.: Dynamische Untersuchungen an Rundlaufkränen für Kernkraftwerke unter Erdbebenbelastung. Z. Technische Mechanik 2 (1981) H. 2, S. 17 – 23.
- [2] Friedrich, H., Lange, C.: Zur Zuverlässigkeit seismisch beanspruchter Tragwerke. Report R-Mech-01/83, Berlin 1983.
- [3] Lange, C.: Niveauüberschreitungswahrscheinlichkeiten stochastischer Prozesse und zufälliger Felder zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsaussagen für stochastisch beeinflusste mechanische Systeme. Diss. A. Technische Hochschule Magdeburg 1980.

Anschrift der Verfasser:

Dr. sc. nat. H. Friedrich
Dr. rer. nat. W. Kaiser
Akademie der Wissenschaften der DDR
Institut für Mechanik
Institutsteil Karl-Marx-Stadt
DDR 9010 Karl-Marx-Stadt, PSF 408

Dr. rer. nat. habil. L. Knöfel
Akademie der Wissenschaften der DDR
Institut für Informatik
und Rechentchnik
DDR 1199 Berlin, Rudower Chaussee 5