

Dynamische Untersuchungen an Rundlaufkränen für Kernkraftwerke unter Erdbebenbelastung

Manfred Engelke, Udo Fischer

Der Bau von Kernkraftwerken in seismisch aktiven Gebieten erfordert unter anderem besondere Vorsorge für den Rundlaufkran im Reaktorgebäude. Mögliche Modelle für das dynamische Verhalten des Krans bei Erdbebenerregung und Berechnungsmethoden werden in diesem Beitrag gegenübergestellt. Dabei erweist sich, daß mit der bekannten Antwortspektren-Methode verhältnismäßig leicht ein Überblick über zu erwartende seismische Belastungen gegeben ist. Jedoch läßt die Anwendung von genaueren Verfahren, speziell die numerische Integration im Zeitbereich auf der Basis von gemessenen oder konstruierten Beschleunigungs-Zeit-Funktionen Reserven erkennen.

0. Einleitung

Für Ausrüstungen und Anlagen von Kernkraftwerken in seismisch gefährdeten Gebieten sind zu den ohnehin hohen sicherheitstechnischen Anforderungen zusätzlich die dynamischen Belastungen infolge Erdbeben zu berücksichtigen. Sicherheitstechnisch bedeutungsvoll ist der im Reaktorsaal eines Kernkraftwerkes befindliche Rundlauf-Brückenkran. Der Kran bewegt sich auf einer kreisförmigen Kranbahn, deren Fundament vom Reaktorgebäude gebildet wird (Bild 1). Er muß in einem Kernkraftwerk unmittelbar nach einem Erdbeben voll einsatzfähig sein, denn bei einer eventuell notwendigen Stilllegung eines Kernkraftwerkes nach einem Erdbeben spielt der Kran eine wesentliche Rolle.

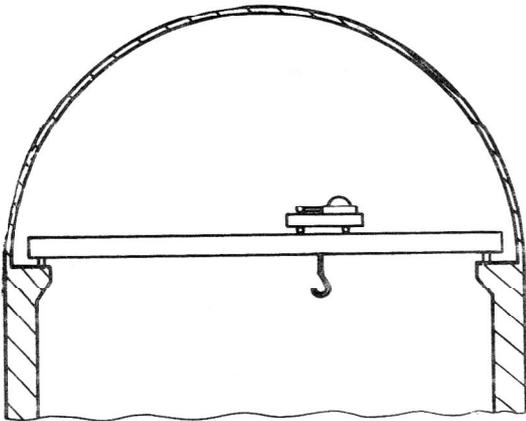


Bild 1
Rundlaufkran im Reaktorgebäude

Schwingungstechnisch gesehen kann der Kran als ein Schwinger mit Stützerregung angesehen werden. Es ist üblich und zweckmäßig, für die Charakterisierung der erdbeben-verursachten Bewegungen des Krans relative Verschiebungen x heranzuziehen, die auf die Verschiebung u der Stützen (die kreisförmige Laufbahn des Krans) bezogen werden. Die entsprechenden Differen-

tialgleichungen der Bewegung lassen sich dann, lineares Verhalten vorausgesetzt, prinzipiell in die Form

$$A \ddot{x} + B \dot{x} + C x = -A \ddot{u} \quad (1)$$

bringen.

In Gl. (1) sind

- x der Spaltenvektor der Relativverschiebungen
- u der Spaltenvektor der Stützenverschiebungen
- A die Massenmatrix
- B die Dämpfungsmatrix
- C die Steifigkeitsmatrix

Die Beschleunigung der Kranbahn, charakterisiert durch die Elemente des Vektors \ddot{u} , ist selbst eine „Antwort“ des Gebäudes auf die erdbebenbedingte Baugrundbewegung, sie wird als einheitlich über die gesamte Kranbahn vorausgesetzt. In der Regel kann man Vertikal- und Horizontalbewegungen des Krans längs der Brückenachse und quer dazu getrennt betrachten; das erlaubt, den Vektor \ddot{u} auf 3 Werte zu reduzieren, und zwar auf die Beschleunigungskomponenten in den entsprechenden Richtungen. Für jede Bewegungsrichtung läßt sich das Dgl.-System prinzipiell ähnlich Gl. (1) in der Form

$$A \ddot{x} + B \dot{x} + C x = f \ddot{u} \equiv - \frac{\partial G}{\partial x} \ddot{u} \quad (2)$$

schreiben. Dabei sind A , B , C die für die jeweilige Bewegungsform geltenden Strukturmatrizen, \ddot{u} ist die entsprechende Beschleunigung, und G ist der Betrag der Impulskomponente der betrachteten Richtung. Bei der hier gewählten Schreibweise können die x_i auch Relativkoordinaten innerhalb des bewegten Systems sein (vgl. z. B. Bild 6).

Die Funktionen $\ddot{u}(t)$ können für zu erwartende Erdbeben selbstverständlich nicht im einzelnen als gegeben angesehen werden. Sie werden als Realisierungen stochastischer Prozesse betrachtet, wobei vom gewählten Berechnungsverfahren abhängt, ob die Realisierungen als Funktionen der Zeit definiert werden müssen oder ob die statistischen Charakteristika ausreichen. Einige Untersuchungen zur Wahl eines geeigneten Modelles werden im folgenden Abschnitt 1 dargestellt, während auf die Erfassung der Erdbebenerregung und die Berechnungsverfahren in den Abschnitten 2 und 3 eingegangen wird.

1. Wahl des Modelles

1.1. Vertikalbelastung

Eine prinzipielle Darstellung des Rundlaufkrans zeigt Bild 2. Die Kranbrücke kann als schlanker Träger konstanten Querschnittes angesehen werden, die Masse der Katze und der Last werden als Punktmassen idealisiert. Der Abstand z der Katze vom Trägerrand ist veränderlich, ebenso die Federsteifigkeit c_2 der Seile, die von der Höhe der Last abhängig ist. Nicht berücksichtigt werden dabei wegen ihrer verhältnismäßig geringen Masse eine zusätzliche Hilfskatze mit einem Hilfshubwerk sowie eine bei den Rundlaufkranen des VEB Schwermaschinenbau-Kombinates Ernst Thälmann Magdeburg, (SKET Magdeburg), vorgesehene antiseismische Lagerung der Kranbrücke, die durch zusätzliche Federn und schwingungsdämpfende Elemente realisiert wird. Diese Federn werden unter Vorspannung eingebaut und sind erst von einer Belastungskraft an wirksam, die die Betriebsbelastung übertrifft.

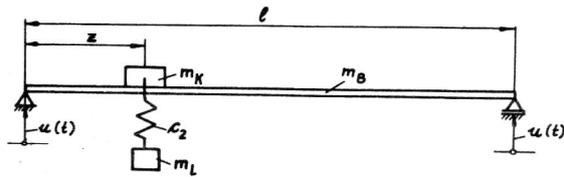


Bild 2
Kranmodell mit m_B = Brückenmasse, m_K = Katze, m_L = Last, c_2 = Seilsteifigkeit

Die Diskretisierung des Kranträgers durch Anwendung finiter Balkenelemente zur Aufstellung eines Differentialgleichungssystems entsprechend Gl. (2) ist verhältnismäßig problemlos, auch kann die durch die antiseismische Lagerung bedingte Nichtlinearität durch stückweise lineare Gln. dargestellt werden.

Es zeigt sich jedoch, daß solche Systeme für orientierende Untersuchungen zur Auslegung von Rundlaufkranen zu viele Parameter besitzen, die variiert werden müßten. Es wurde deshalb untersucht, inwieweit sich das System auf eine einfache Schwingungskette mit 2 Freiheitsgraden (Bild 3) reduzieren läßt, vgl. auch [1]. Dazu ist es nötig, die Masse der Kranbrücke auf die Laststelle zu reduzieren. Nutzt man dazu näherungsweise die statische Biegelinie eines Trägers auf 2 Stützen mit konstantem Querschnitt unter der Wirkung einer Einzellast, so ergeben sich für die Parameter c_1 und m_1 die Beziehungen

$$c_1 = \gamma(z) \cdot \frac{EI}{l^3} \quad (3)$$

$$m_1 = m_k + \mu(z) m_B \quad (4)$$

wofür die Faktoren γ und μ im Bild 4 dargestellt sind, vgl. [2], S. 74. Analytisch lassen sie sich durch

$$\mu = \frac{1}{\xi^2(1-\xi)^2} \left\{ \frac{23}{105} [\xi^5 + (1-\xi)^5] - \frac{8}{15} [\xi^4 + (1-\xi)^4] + \frac{1}{3} [\xi^3 + (1-\xi)^3] \right\} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{3}{\xi^2(1-\xi)^2}; \quad \xi = \frac{z}{l}$$

ausdrücken. Zur Abschätzung der Fehler möge die Eigenfrequenz der Schwingungskette nach Bild 3 mit $c_2 \rightarrow \infty$ herangezogen werden. Der Fehler ist für $(m_k + m_L)/m_B \rightarrow 0$ offensichtlich am größten. Er beträgt für $z = 0,5 l$ weniger als 1 % und übersteigt für $z = 0,05 l$ nicht 22 %, ein Wert, der bei der Unsicherheit der Erregungsannahmen durchaus toleriert werden kann.

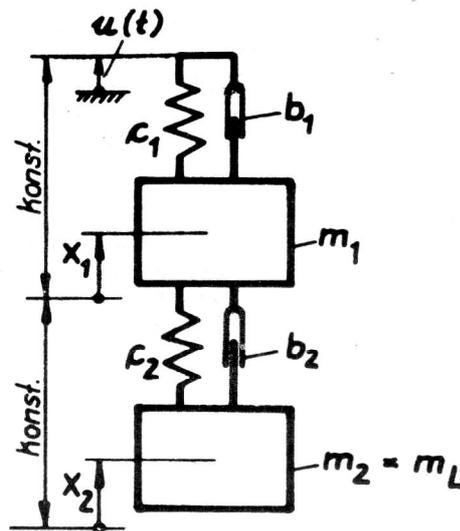


Bild 3
Kranmodell für Vertikalbelastung, starre Stützung

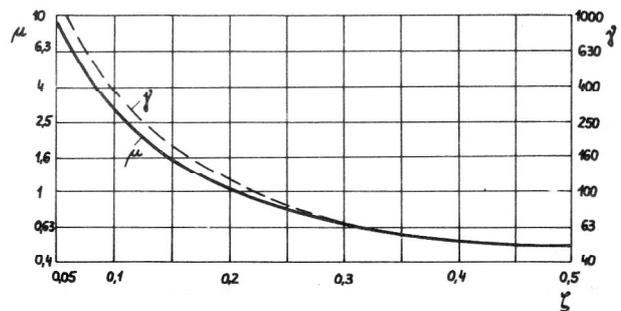


Bild 4
Kennwerte für die Massen- und Steifigkeitsreduktion

Offen sind noch die Dämpfungswerte b_1 und b_2 des Modelles nach Bild 2. Sind solche durch Messungen nicht bekannt, so wird man sich auf Literaturangaben zum Dämpfungsgrad ϑ des Systems stützen müssen. So erlauben die sowjetischen Vorschriften [3], ein logarithmisches Dekrement von 6% zu Grunde zu legen, was etwa $\vartheta = 0,01$ entspricht. Holzweißig und Dresig ([4], S. 49) geben für Stahlbrücken $\vartheta = 0,014$ an. Solange für die Berechnung der Systemantwort auf seismische Erregung lineare Modelle ausreichen, ist es zweckmäßig, sich auf die Berücksichtigung der Hauptdämpfung nach einer Hauptkoordinatentransformation des ungedämpften Systems zu beschränken. Für die Anwendung von Integrationsverfahren im Zeitbereich, z. B. für nur stückweise lineare Systeme, ist die Bestimmung der Konstanten b_1 und b_2 notwendig. Da die Dämpfungswirkung vor allem auf die Werkstoffdämpfung zurückzu-

führen ist, bietet sich an, b_1 und b_2 proportional zu c_1 und c_2 anzusetzen. Der Proportionalitätsfaktor ist dann zu

$$b_1/c_1 = b_2/c_2 = 2\vartheta/\omega_1 \quad (6)$$

anzusetzen, wobei ω_1 die Eigenkreisfrequenz der Grundschwingung ist.

Für die Erfassung des Abhebens der Kranbrücke von der Bahn oder der Wirkung der schon erwähnten antiseismischen Lagerung ist das Modell einer Schwingungskette, vgl. Bild 5, kaum geeignet, vor allem nicht bei unsymmetrischer Katzstellung.

Das ist schon daraus zu ersehen, daß ein Faktor von μ größer 1 für die Brückenmasse ein negatives m_3 bedingt, weil $m_1 + m_3 = m_B + m_K$ gefordert ist. Wesentlich besser geeignet ist das Modell nach Bild 6 mit folgenden Matrizen:

Massenmatrix

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} m_B + \zeta_2^2 (m_K + m_L) & \frac{1}{6} m_B + \zeta_1 \zeta_2 (m_K + m_L) & \mu_{13} m_B + \zeta_2 (m_K + m_L) & \zeta_2 m_L \\ & \frac{1}{3} m_B + \zeta_1^2 (m_K + m_L) & \mu_{23} m_B + \zeta_1 (m_K - m_L) & \zeta_1 m_L \\ & & \mu_{33} m_B + m_K + m_L & m_L \\ & & & m_L \end{bmatrix} \quad (7)$$

(symmetrisch)

Steifigkeitsmatrix $C = \text{diag}(c_1, c_1, \gamma EI/l^3, c_2)$ (8)

Dämpfungsmatrix $B = \text{diag}(b_1, b_2, 2\vartheta/\omega_1 \cdot \gamma EI/l^3, 2\vartheta/\omega_1 \cdot c_2)$ (9)

rechte Seite des Gleichungssystems

$$f \ddot{u} = - \begin{bmatrix} \frac{1}{2} m_B + \zeta_2 (m_K + m_L) \\ \frac{1}{2} m_B + \zeta_1 (m_K + m_L) \\ (\mu_{13} + \mu_{23}) m_B + m_K + m_L \\ m_4 \end{bmatrix} \ddot{u} \quad (10)$$

Die hier verwendeten Abkürzungen sind

$$\zeta_1 = z/l, \quad \zeta_2 = 1 - z/l$$

$$\mu_{13} = \frac{1}{2\zeta_1 \zeta_2} \frac{1}{5} (\zeta_1^4 - \zeta_2^4) + \frac{1}{3} \zeta_2^3 (1 + \zeta_1) - \frac{1}{3} \zeta_1^3 (1 + \zeta_2) + \frac{1}{2} \zeta_1^2 (1 + \zeta_2) - \frac{1}{4} \zeta_1^3 \quad (11)$$

$$\mu_{23} = \frac{1}{2\zeta_1 \zeta_2} \frac{1}{5} (\zeta_2^4 - \zeta_1^4) + \frac{1}{3} \zeta_1^3 (1 + \zeta_2) - \frac{1}{3} \zeta_2^3 (1 + \zeta_1) + \frac{1}{2} \zeta_2^2 (1 + \zeta_1) - \frac{1}{4} \zeta_2^3$$

$$\mu_{33} = \mu \quad \text{und} \quad \gamma \quad \text{nach Gl. (5)}$$

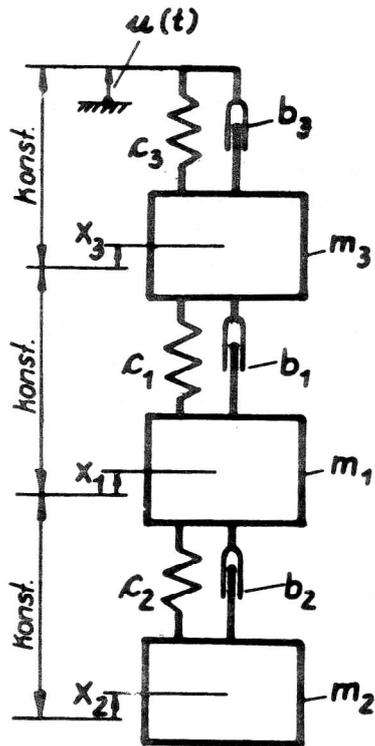


Bild 5
Kranmodell für Vertikalbelastung, elastische Stützung als Schwingerkette

Die gewählten Koordinaten erlauben bei Anwendung einer Integration im Zeitbereich, Unstetigkeiten durch Anschläge in der Stützenlagerung oder Schlaffwerden des Seiles zu berücksichtigen. Zur Einschätzung der Genauigkeitseinbuße durch das gewählte Diskretisierungsverfahren wurde die Eigenfrequenz des Systems mit $c_1 = b_1 = m_K - m_L = 0$ (freier Balken) mit der exakten Lösung verglichen und bei $z = 1/2$ ein Fehler von 0,42 %, bei $z = 1/20$ von knapp 30 % gefunden. Beachtet man, daß dabei ein besonders ungünstiger Extremfall vorliegt, so kann man diese Genauigkeit als durchaus ausreichend ansehen.

1.2. Horizontalbelastung quer zur Brückenachse

Berücksichtigt man, daß die Horizontalkomponente einer Erdbenerregung bis etwa doppelt so groß ist wie die Vertikalkomponente und daß die Brückensteifigkeiten gemeinhin geringer sind, so ergibt sich daraus die Notwendigkeit des Sicherheitsnachweises in horizontaler Richtung. Bild 2 ist auch hierfür brauchbar, wenn man für c_2 den Wert $m_L \cdot g/l_s$ mit der freien Seillänge l_s setzt. In den meisten Fällen ist die Teilfrequenz

$$1/2\pi \cdot \sqrt{g/l_s}$$

jedoch so gering, daß Resonanzerscheinungen durch Lastpendeln nicht zu befürchten sind und m_L unberücksichtigt bleiben kann. Das Ergebnis ist das Modell eines

Ein-Massen-Schwingers mit Stützerregung, dessen Parameter mit Hilfe der Gln. (3), (4) und (6) bestimmbar sind.

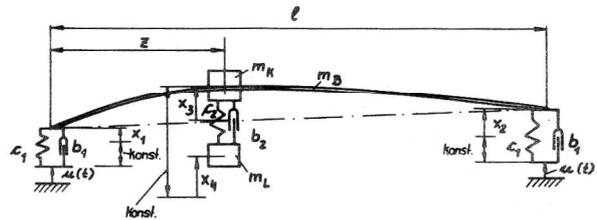


Bild 6
Kranmodell für Vertikalbelastung, elastische Stützung, mit 4 Freiheitsgraden

Die durch die Horizontalbewegung bewirkten Belastungen erweisen sich aus den oben angeführten Gründen als relativ hoch. Eine wesentliche Entlastung tritt ein, wenn ein Gleiten zwischen Rad und Schiene zugelassen wird oder die Fahrwerksbremsen so eingestellt werden, daß nur begrenzte Horizontalkräfte übertragen werden können. Auch hier erweist sich das Modell einer Schwingungskette als ungeeignet. Wie bei der Vertikalbelastung bietet sich das Modell nach Bild 6 an, wobei im allgemeinen auf die Koordinate x_4 und auf die Elemente c_1 und b_1 verzichtet werden kann. Sind statt dessen die Kräfte von der Fahrbahn auf die Stützen mit F_1 und F_2 eingeführt, so gelten die Gln.

$$A \ddot{x} + C x + h \dot{u} = f \quad (12)$$

mit

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} m_B + \zeta_2^2 m_K & \frac{1}{6} m_B + \zeta_1 \zeta_2 m_K & \mu_{13} m_B + \zeta_2 m_K \\ & \frac{1}{3} m_B + \zeta_1^2 m_K & \mu_{23} m_B + \zeta_1 m_K \\ \text{(symm.)} & & \mu_{33} m_B + m_K \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C = \text{diag}(0, 0, \gamma EI/l^3) \quad (14)$$

$$h = \left[\frac{1}{2} m_B + \zeta_2 m_K, \frac{1}{2} m_B + \zeta_1 m_K, (\mu_{13} + \mu_{23}) m_B + m_K \right]^T \quad (15)$$

$$f = [F_1, F_2, 0]^T \quad (16)$$

Es müssen 4 Bewegungsformen unterschieden werden, die mit den gegenseitigen Übergangsbedingungen im

Bild 7 dargestellt sind. Prinzipiell gilt für das Gleiten an der Stütze i ($i = 1, 2$)

$$F_i = -F_{Ri} \operatorname{sign} \dot{x}_i \quad (17)$$

wobei $F_{Ri} > 0$ die Reibkraft an der jeweiligen Stütze darstellt. Im Falle des Haftens ist F_i eine Reaktionskraft, deren Betrag durch die maximale Haftkraft F_{Hi} begrenzt ist:

$$|F_i| \leq F_{Hi} \quad (18)$$

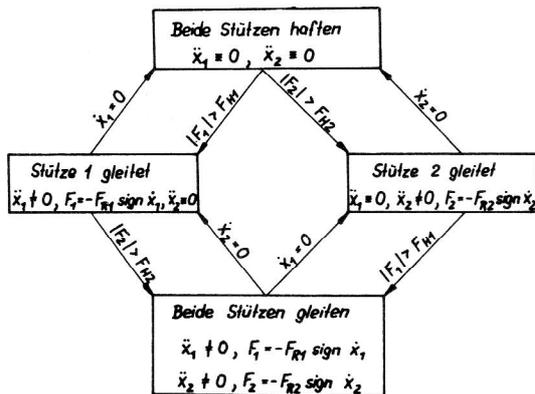


Bild 7
Bewegungsphasen und Übergangsbedingungen bei Horizontalbelastung

Je nach der vorliegenden Bewegungsphase sind die Zeilen der Gl. (12) entweder Bewegungsgleichungen zur Bestimmung der Beschleunigungen \ddot{x}_1 , \ddot{x}_2 , \ddot{x}_3 oder – im Falle des Haftens bei 1 oder 2 – Bestimmungsgleichungen für die jeweilige Reaktionskraft, die zur Entscheidung dienen, ob ein Übergang in eine andere Bewegungsphase erfolgt oder nicht.

1.3. Horizontalbelastung längs zur Brückenachse

Infolge der großen Eigenfrequenzen der Brückenlängsschwingungen, verglichen mit den Erregungsfrequenzen, kann der Brückenträger wie ein starrer Körper behandelt werden. Die von den Rädern des Brückenfahrwerkes zu übertragenden Beschleunigungskräfte lassen sich niedriger halten, wenn die vom Katzfahrwerk übertragenen Kräfte in Richtung der Brückenachse durch Gleiten begrenzt sind.

2. Erfassung der Erdbebenerregung

Die bei der Bemessung von Rundlaufkränen für Kernkraftwerke zu berücksichtigenden Belastungen durch seismische Beanspruchung ergeben sich aus den für das jeweilige Gebiet zu erwartenden Erdbebenstärken und aus den dadurch bedingten Reaktionen des Reaktorgebäudes. Folgende Möglichkeiten der Vorgabe und Darstellung von Erdbebenerregungen für den konkreten Standpunkt eines Kranes sind denkbar:

1. Kranbahnbeschleunigungen oder Bodenbeschleunigungen als Funktionen der Zeit,
2. Statistische Charakteristika der Kranbahn- oder Bodenbeschleunigungen,
3. Antwortspektrum der Kranbahnbeschleunigung.

Da es infolge des zufälligen Charakters von Erdbebenvorgängen nicht möglich ist, den Zeitablauf von Bodenschwingungen vorherzusagen, stützt man sich auf aufgezeichnete Abläufe vergangener Beben (sogenannte Bemessungsbeben), die für das betreffende Gebiet charakteristisch sind. Solche Aufzeichnungen können dazu dienen, mit Hilfe numerischer Integration der Dgl. die Kranbewegung und -belastung zu simulieren. Eine gewisse Sicherheit über zu erwartende seismische Höchstbelastungen ist allerdings nur dann zu erreichen, wenn mehrere Bemessungsbeben zur Verfügung stehen. In den seltensten Fällen wird es möglich sein, solche Zeitabläufe für die seismische Kranbahnbewegung zu erhalten, so daß die dynamischen Eigenschaften des Gebäudes in die Berechnung mit einbezogen werden müssen. Gewöhnlich geschieht das so, daß die Rückwirkung des Kranes auf das Gebäude nicht oder nur vereinfacht berücksichtigt wird.

Die zur statistischen Charakterisierung seismischer Erregungen im Rahmen der Korrelationstheorie benötigte Kovarianzfunktion für den instationären Prozeß (vgl. z. B. [2], S. 43) ist ebenfalls kaum erhältlich, sie kann berechnet werden, wenn ausreichend viele Beschleunigungs-Zeit-Funktionen vergleichbarer Erdbeben vorliegen, die dann als Realisierungen eines nichtstationären Prozesses aufzufassen sind. Im allgemeinen wird man sich damit zufrieden geben, das Beben als einen zwar zeitlich begrenzten, sonst aber stationären Prozeß aufzufassen, dessen Kovarianzfunktion bzw. die damit in Zusammenhang stehende Spektraldichtefunktion durch eine einzige „Realisierung“ zu gewinnen sind.

Am verbreitetsten ist die Methode der Antwortspektren. Unter einem Antwortspektrum versteht man die eigenfrequenzabhängigen maximalen Antworten (Beschleunigungen, Geschwindigkeiten oder Verschiebungen) eines linearen Einmassenschwingers bestimmter Dämpfung bei einem gegebenen Erdbeben. Das Antwortspektrum kann aus Beschleunigungs-Zeit-Funktionen als geglättete Hüllkurve über der Eigenfrequenz eines Einmassenschwingers berechnet werden. Wenn das Antwortspektrum nicht vom Auftraggeber vorgegeben wird, können auch Abschätzungen, die aus der Mittelung von Meßwerten herrühren, aus der Literatur entnommen werden. So lassen z. B. die von Kos [5] angegebenen Kurven zu, näherungsweise folgende Abhängigkeiten zu formulieren:

$$\ddot{y}_h^* = \ddot{y}_{mh}^* \left[1 - 2,25 \left(\lg \frac{f}{4 \text{ Hz}} \right)^2 \right] \cdot g; \quad 1 \text{ Hz} < f < 16 \text{ Hz}$$

$$\ddot{y}_v^* = \ddot{y}_{mv}^* \left[1 - 2,5 \left(\lg \frac{f}{7 \text{ Hz}} \right)^2 \right] \cdot g; \quad 2 \text{ Hz} < f < 20 \text{ Hz}$$

$$\ddot{y}_{mh} = \frac{0,108 \alpha \cdot 10^{(i-4)/3} + 0,02813 \cdot 2^{i-4} \text{ h/m}}{\sqrt{1+200 \vartheta}} \quad (19)$$

$0 \leq \vartheta \leq 0,1$

$$\ddot{y}_{mv} = \inf (0,32 \alpha \cdot 10^{(i-4)/3} g; 0,45 \ddot{y}_{mh})$$

$\alpha = 0,45 \dots 2,24$ für sehr gute bis schlechte Fundamentierung

Hierin sind

- \ddot{y}_h, \ddot{y}_v die absoluten maximalen Beschleunigungen in horizontaler bzw. vertikaler Richtung während eines Erdbebens,
- f, ϑ die Eigenfrequenz und der Dämpfungsgrad des Einmassenschwingers,
- g die Erdbeschleunigung,
- h die Höhe der Kranbahn über dem Boden,
- i Intensität des Bebens nach der „modifizierten Mercalli-Skala“ (MMI)

Daß auch für den dämpfungsfreien Fall nur endliche Werte der „Antwortbeschleunigungen“ erhalten werden, liegt an der Berücksichtigung der endlichen Dauer der Erdbeben. Die hier angegebenen Formeln sind allerdings nur brauchbar, wenn mindestens eine Eigenschwingung im angegebenen Frequenzbereich ist. Andere Eigenfrequenzen können dann unberücksichtigt bleiben.

In der Literatur (vgl. [6] und darin angegebene Quellen) sind Algorithmen und Programme zur Konstruktion von Beschleunigungs-Zeit-Abläufen simulierter Erdbeben aus Antwortspektren beschrieben. Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden.

3. Berechnungsmethoden

3.1. Integration der Bewegungsgln. im Zeitbereich

Dieses Verfahren gestattet, ohne größeren analytischen Aufwand das Verhalten des Kranes zu simulieren. Nacheilend ist, daß sichere Schlüsse auf Höchstbelastungen nur möglich sind, wenn mehrere Realisierungen der Erregung (real gemessene oder künstlich erzeugte) herangezogen werden. Nichtlineare Erscheinungen (Seilerschlaffung, Abheben, Rutschen und Haften) können verhältnismäßig leicht berücksichtigt werden.

Als Integrationsmethode kommt z. B. das Runge-Kutta-Verfahren in Frage. Die Nutzung eines Übertragungsverfahrens von Nigam und Jennings [7], [6], bei dem die Erregung durch Geradenzüge angenähert wird, kann jedoch Rechenzeit sparen.

3.2. Stochastische Methode

Mit dieser Kurzbezeichnung soll die Berechnung der statistischen Charakteristika der Kranbewegung und -beanspruchung unter der Wirkung einer stochastischen Erregung verstanden werden. Hierzu ist das Vorliegen der statistischen Kenngrößen für den Erregungsprozeß Bedingung. Das Verfahren ist im wesentlichen an lineare

Systeme oder Systeme mit analytischen Nichtlinearitäten gebunden. Nach Ausführung der Rechnung können Überschreitungswahrscheinlichkeiten für Verschiebungs- oder Beanspruchungswerte abgeschätzt werden. Der Leser findet eine Einführung in die Berechnung stochastischer Schwingungen in [8], aber auch in [2] und [9].

3.3. Antwortspektren-Methode

Die Antwortspektren-Methode ist auf lineare Systeme begrenzt. Zu ihrer Anwendung ist die Dgl. (2) näherungsweise) auf die eines Schwingers mit einem Freiheitsgrad

$$\ddot{x} + 2 \vartheta \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = -\ddot{u} \quad (20)$$

zu reduzieren. Das erfolgt durch die Entwicklung nach den Eigenschwingungsformen z_k mit der Eigenkreisfrequenz ω_k . Der Spaltenvektor z_k ist so zu normieren, daß gilt

$$z_k^T A z_k = 1, \quad z_k^T C z_k = \omega_k^2 \quad (21)$$

Ist nun $x = \alpha_k z_k$, und gilt als größte Beschleunigung des Einmassenschwingers \dot{y} (\dot{y}_h oder \dot{y}_v nach Gl. (19)), so findet man durch Vergleich

$$\ddot{\alpha}_k = z_k^T f \dot{y} \quad (22)$$

Da für schwach gedämpfte Schwinger die Ausschläge in der Regel wesentlich größer sind als der Stützenschlag, wird gewöhnlich davon abgesehen, daß die Koordinaten x_j Relativkoordinaten sind. Die damit ermittelten zur k-ten Eigenschwingungsform gehörigen maximalen Beschleunigungen (die Elemente des Vektors $\ddot{\alpha}_k z_k$), die maximalen Verschiebungen (die Elemente des Vektors $\ddot{\alpha}_k z_k / \omega_k^2$) oder die davon abgeleiteten Beanspruchungen werden wie folgt zusammengefaßt:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^n \sigma_k^2} \quad (23)$$

Hierbei steht σ_k für den aus der k-ten Eigenschwingungsform herrührenden Maximalwert. Selbstverständlich ist die so definierte Zusammenfassungsregel recht willkürlich, dafür zeichnet sich die Methode durch Einfachheit in der Anwendung aus. Es ist üblich, nur die Eigenfrequenzen zu berücksichtigen, die den größten Beitrag liefern.

3.4. Abschätzung der Horizontalbewegung

Wie bereits oben bemerkt, wirkt sich die Anwendung des Modells nach Bild 2 so aus, daß die Erdbebenbelastung wesentlich überschätzt wird, weil ein mögliches Rutschen der Fahrwerksräder oder -bremsen unberücksichtigt bleibt. Geht man jedoch von der Überlegung aus, daß beim Auftreten von Schlupf (ausgedrückt durch $\dot{x}_1 \neq 0$ oder $\dot{x}_2 \neq 0$ in Gl. (12)) durch die Energiedissipation keine weitere Energieaufnahme im Schwingungs-

system mehr möglich ist, so läßt sich das Maximum der Beschleunigung \ddot{x}_3 für $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = 0$ und $|\dot{x}_3| \gg |\ddot{u}|$ aus Gl. (12) und (13) abschätzen:

$$|\ddot{x}_3| \leq \frac{F_{R1}}{\mu_{13} m_B + \zeta_2 m_K}; \quad |\dot{x}_3| \leq \frac{F_{R2}}{\mu_{23} m_R + \zeta_1 m_v} \quad (24)$$

4. Ergebnisse

Numerische Ergebnisse von auf seismische Beanspruchung durchgerechneten Rundlaufkranen können hier nicht mitgeteilt werden. Folgende qualitative Feststellungen bei der Durchrechnung von Entwurfsvarianten für einen Rundlaufkran einer Stützweite von 43 m für eine Last von 320 t aus dem Produktionsprogramm des VEB Schwermaschinenbau-Kombinat Ernst Thälmann seien jedoch wiedergegeben:

Durch das Modell nach Bild 3 für die Vertikalbelastung und die unter Verwendung der statischen Biegelinie für die Brücke berechneten Massen- und Federwerte werden die ersten beiden Eigenfrequenzen des Kranes mit starr gelagerten Stützen genügend genau wiedergegeben. Diese liegen in Abhängigkeit von der Stellung der Katze (im Bereich zwischen der Mittenstellung bis 1/14 der Stützweite vom Brückenende entfernt) und von der Seillänge zwischen 1,8 und 12 Hz und damit im Resonanzbereich möglicher Erdbeben. Die dritte, bei diesem Modell nicht erfassbare Eigenfrequenz mit einem Schwingungsknoten in der Brücke ist größer als 13 Hz. Sie wird wegen der Unsymmetrie der Schwingungsform nur geringfügig erregt. Die Integration im Zeitbereich offenbart bei Berücksichtigung der Seilerschlaffung Belastungsreserven gegenüber der Antwortspektrenmethode. Das gleiche Ergebnis wird bei der Berücksichtigung des Fahrwerkgleitens bei Horizontalbelastung erhalten. Die Nachrechnung der Rutschlänge zeigt, daß ein Klemmen des Fahrwerkes wegen der verminderten Sehnenlänge gegenüber dem Durchmesser nicht befürchtet werden muß.

LITERATUR

- [1] Kos, M.: Seismische Beanspruchung der Krane. Konstruktion 32 (1980) 3, 105 – 109.
- [2] Fischer, U., Stephan, W.: Mechanische Schwingungen. Leipzig, VEB Fachbuchverlag, 1981.
- [3] Zeitweilige Normen für die Projektierung von Kernenergieanlagen in Erdbebengebieten, WSN-15-78 MINERGO, Moskau 1979 (russ.).
- [4] Holzweißig, F., Dresig, H.: Lehrbuch der Maschinendynamik. Leipzig, VEB Fachbuchverlag, 1979.
- [5] Kos, M.: Seismische Berechnung von Laufkranen. fördern und heben 30 (1980) S. 458 – 463.
- [6] Klement, H.-D.: Berechnung spektrumkompatibler Erdbebenverläufe. Diss. TH Darmstadt 1979.
- [7] Nigan, N. C., Jennings, P. C.: Digital Calculation of Response Spectra from Strong-Motion Earthquake Records. DYNRE 5 Programm Analytics, California Institute of Technology, 1968.
- [8] Heinrich, W., Hennig, K.: Zufallsschwingungen mechanischer Systeme. Berlin: Akademie-Verlag 1977.
- [9] Fischer, U., Stephan, W.: Prinzipien und Methoden der Dynamik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1972.

Anschrift der Verfasser:
Dr.-Ing. Manfred Engelke,
VEB Schwermaschinenbau-Kombinat
Ernst Thälmann, Stammwerk,
3010 Magdeburg

Prof. Dr. sc. techn. U. Fischer,
Technische Hochschule Otto von Guericke
Magdeburg
3010 Magdeburg, PSF 124