PROBLEME UND KENNTNISLÜCKEN BEI DER BEURTEILUNG DES WIDERSTANDES VON STAHLBETONBAUTEILEN GEGENÜBER STOßARTIGER BELASTUNG

PROBLEMS AND GAPS OF KNOWLEDGE IN THE ASSESSMENT OF THE RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER IMPACT LOADING

W. STRUCK, E. LIMBERGER, H. EIFLER

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM),
Fachgruppe 2.2: Tragfähigkeit der Baukonstruktionen, D-1 Berlin 45, Germany

SUMMARY

The potential of danger of special equipments in chemical industry and power reactor plants and the possible serious harms for the employees and for the occupants require that impact loading must be taken into consideration in the dimensioning of building structures, especially in the case of containment structures. From the technical and economical point of view it is often necessary to take advantage of the ultimate load carrying capacity of such structures against impact loading. But in the special field of "impact loading" there are many problems yet to be solved and many gaps in knowledge.

This article only deals with impact loading and impulsive loading especially on structures made of reinforced concrete.

At first, the problem of characterizing such kind of loading is discussed. Only if the load-time history is known one can speak of well defined impact or impulsive loading. The amount of the impact energy or of the pulse is not sufficient for characterizing the load. However, also loads well defined by their load-time histories can not be compared without taking the response of the loaded structures into consideration.

Then, some notes are made on problems which arise in the analysis of stresses and strains in structures loaded by impact or impulse especially in the plastic range. All the very sophisticated methods of analysing structures with elastic behaviour under impact loading are of no use for this purpose. Also the method of finite elements with regard to plastic behaviour of the material is not the best suited for design engineers and authorities in the present state. Therefore simple methods of approximation have to be used.

Such methods of approximation are discussed for four conditions:

1. Only the amount of the impact energy or of the pulse is known, load time history is unknown.
2. The amount of the pulse and of the peak of the load time history and also the pulse duration is known, the shape of the load time history is unknown.
3. Impact loading; impact energy and the behaviour of contact between impacting and impacted body is known.
4. Load time history is known.

For all these methods it is necessary to know the energy absorption capacity respectively the possible maximum of deflection of the structure at the point of impact. But just in the field of reinforced concrete structures and even for static loading there are not enough results of systematic investigations. An example is given on how one can calculate such deformation capacity of structures by means of the rotation capacity of plastic hinges in reinforced concrete structures under bending and of simple approximations about yield line patterns.

1. Einleitung

Das Katastrophenpotential, das durch zunehmende Flugdichte, vermehrten Transport explosiver Güter und besondere industrielle Produktionsverfahren gegeben ist, sowie die steigende Wahrscheinlichkeit von Terror bzw. Sabotageaktionen verlangen bei der Beurteilung von Stahlbetonbauwerken, die den Schutz bestimmter Anlagen (Kraftwerke, Wasserwerke, chemische Industrie) gegenüber stoßartiger Belastung von außen übernehmen, die Berücksichtigung katastrophenwirklicher Belastungen. Technische und wirtschaftliche Zwänge erfordern für diese Schutzbauwerke die Ausnutzung der Tragreserven bis zur Grenztragfähigkeit gegenüber solcherart stoßartiger Belastung.

Damit ergibt sich die Notwendigkeit zur Beurteilung des Widerstandes von Stahlbetonbauteilen gegenüber stoßartiger Belastung bei Berücksichtigung der Grenztragfähigkeit.

2. Zur Charakterisierung einer stoßartigen Belastung

Von der äußeren Erscheinung her kann man stoßartige Belastungen in drei Arten einteilen.

a) Massestoß, d.h. eine sich bewegende Masse stößt gegen ein Bauteil
b) Impulsbelastung, d.h. ein Bauteil wird durch eine(n) sich mit der Zeit schnell verändernde(n) Kraft (Druck) belastet, wobei der Kraft-(Druck)-Zeit-Verlauf im wesentlichen unabhängig von Art und Eigenschaften des Bauteils ist
c) Erschütterungsbelastung, d.h. an einer bestimmten Stelle eines Bauteils werden sich mit der Zeit schnell verändernde Wege (Verformungen) erzwungen.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Fälle a) und b).

Im Gegensatz zur statischen Belastung kann eine stoßartige Belastung nicht durch einfache Belastungskennwerte eindeutig charakterisiert werden. Die Angabe der Größe des Aufprallimpulses oder der Aufprallenergie bzw. des Stoßimpulses allein genügt nicht. Nur wenn der wirkliche Stoßkraft-Zeit-Verlauf an der Stoßstelle bekannt ist, kann hier von einer eindeutigen Charakterisierung gesprochen werden.

Die Charakterisierung einer stoßartigen Belastung durch den Stokraft-Zeit-Verlauf ist zwar eindeutig, aber ein Vergleich verschiedener so definierter stoßartiger Belastungen untereinander ist nicht mehr allgemein auf der Grundlage von Zahlenwerte aus der Belastungsangabe möglich. Er kann vielmehr nur über die verschiedenen Reaktionen des betrachteten Bauteils durchgeführt werden.

Spektraldarstellungen von Stoßkraft-Zeit-Verläufen, z.B. Meier-Dörnberg [1], setzen voraus, daß das Bauteil wenigstens näherungsweise als ein lineares System betrachtet werden kann. Stahlbetonbauteile können aber bis in den Bereich ihrer Grenztragfähigkeit auch nicht mehr näherungsweise als lineares System aufgefaßt werden. Somit ist hier die Möglichkeit dieser geschlossenen Darstellungsweise nicht gegeben.

3. Zur Ermittlung der Beanspruchungen im gestoßenen Bauteil

Die Möglichkeiten für eine Beurteilung von Bauteilen unter stoßartiger Belastung sind heute noch gering und unzureichend. Deshalb wird es immer wieder erforderlich sein, besonders bei Parameterstudien und oft auch bei Projektarbeiten, Bauteile und gegebenenfalls auch Stoßkörper als einfache Ersatzsysteme in die Überlegungen einzuführen.

Zu diesen Vereinfachungen gehört es auch, daß man die Auswirkungen einer stoßartigen Belastung aufteilt in örtliche Zerstörungen an der Stoßstelle und in Beanspruchung der Gesamtkonstruktion. Zu beachten ist dabei, daß bei doppelt gekrümmten Flächentragwerken sich die wesentlichen, Energie umwandelnden Verformungen der Gesamtkonstruktion auf einen verhältnismäßig engen Bereich in der Umgebung der Stoßstelle begrenzen. Dieses ist jedoch nicht mit dem oben benutzten Begriff der örtlichen Zerstörung an der Stoßstelle gemeint.

Unter örtlichen Zerstörungen an der Stoßstelle sollen diejenigen infolge Eindringen und Durchstoßen verstanden werden, die auch auftreten würden, wenn das Bauteil um die Stoßstelle herum direkt unterstützt wäre. Solche örtlichen Zerstörungen, vor allem infolge Massestoßes, werden bei Bauteilen aus Stahlbeton wohl auch für die absehbare Zukunft nur auf empirischem Wege beurteilt werden können. Aus den Bereichen der Ballistik und des Reaktorbaues liegen entsprechende empirische Formeln vor, die aus heutiger Sicht eine hinreichende Abschätzung des Durchstoßverhaltens ermöglichen, zusammenfassende Überblicke in Limberger u. Struck [2], Schardin [3], Gwaltney [4] und Chelapati, Kennedy and Wall [5] .

Bei der Beurteilung, ob infolge einer bestimmten stoßartigen Belastung die Gesamtkonstruktion eines Bauteils bis zur Grenztragfähigkeit beansprucht wird, können diejenigen Verfahren und Erkenntnisse, die sich auf elastisches Verhalten des Bauteils beschränken, z.B. Limberger u. Struck [2], Karas [6], Eringen [7], Goldsmith [8], Rühl, Emschermann, Floßmann u. Jänicke [9], Kämmel [10], Schmidt [11], Schwieger [12], Riera [13], Yang u. Godfrey [14], Bartram [15], keine abschließende Hilfestellung geben. Verfahren, bei denen sowohl das elasto-plastische Verhalten des gestoßenen Bauteils als auch die zeitabhängige, in mehreren Richtungen im Bauteil sich ausbreitenden und reflektierenden Beanspruchungen berücksichtigt werden, z.B. Argyris u. Chan [16], sind unseres Wissens noch nicht soweit ingenieurmäßig aufbereitet und der Allgemeinheit zugänglich, daß sie auch von den planenden und konstruierenden Ingenieuren einerseits und von den für die Sicherheitsbeurteilung zuständigen Gremien oder Behörden andererseits benutzt werden können. Es müssen also vorerst weiterhin Verfahren verwendet werden, denen zahlreiche, mehr oder minder grobe Vereinfachungen zugrunde liegen, z.B. Seiler u. Symonds [17], U.S. Army Corps of Engineers [18], Norris u.a. [19], O'Hara u. Cuniff [20], Limberger u. Struck [21], Mainstone [22] und Chelapati, Kennedy u. Wall [5]. Doch auch bei diesen einfachen mechanischen Gedankenmodellen ist ein hoher Rechen- und Darstellungsaufwand erforderlich, um z.B. den Einfluß von Parameter-

änderungen auf die Maximalbeanspruchung zu zeigen.

4. Beispiele von Verfahren zum Abschätzen der Beanspruchung im gestoßenen Bauteil

Voraussetzung guter Näherungslösungen sind

- ausreichende Kenntnisse über das Verformungsverhalten des gestoßenen Bauteils bis zur Grenztragfähigkeit
- bei Impulsbelastung genaue Kenntnis des Stoßkraft-Zeit-Verlaufes
- bei Massestoß neben der Kenntnis von Aufprallenergie bzw. Aufprallimpuls Kenntnis des Kontaktverhaltens zwischen Masse und Bauteil.

Für die anschließend aufgeführten Schätzverfahren werden folgende Annahmen getroffen:

- das Verhalten des Bauteils sei vereinfachend durch einen Masse-Feder-Schwinger beschreibbar (mitschwingende Masse und Federkennlinie)
- die Kraft-Verformungslinie des Bauteils sei vereinfachend als linear-elastisch/idealplastisch annehmbar
- die Energieabsorptionskapazität bzw. bei weitergehenden Näherungen auch die maximale Verformung des Bauteils bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit seien bekannt.

4.1 Maximalabschätzung der Beanspruchung im gestoßenen Bauteil

Man befindet sich beim Massestoß in jedem Falle auf der sicheren Seite, wenn das Arbeitsvermögen des gestoßenen Bauteils bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit mindestens gleich der Energie der aufprallenden Masse ist, denn nur in dem hypothetischen Sonderfall, daß im Augenblick des Erreichens der Grenztragfähigkeit gleichzeitig

- der Stoßkörper auf die Geschwindigkeit Null abgebremst ist
- im Stoßkörper keine elastische Energie gespeichert ist
- im Stoßkörper während des Stoßvorganges bis zu diesem Zeitpunkt keine irreversiblen Verformungen auftreten
- alle Masseteilchen des gestoßenen Bauteils ebenfalls gerade die Geschwindigkeit Null besitzen

wird die ganze Aufprallenergie in Verformungsenergie des gestoßenen Bauteils umgewandelt. Bei Stoßkörpern mit großem plastischen Verformungsvermögen kann als weitere Maximalabschätzung nach den Gesetzen des freien, unelastischen Stoßes der vom Bauteil aufzunehmende Energiebetrag berechnet werden, z.B. Struck u. Limberger [23], da hierbei die Wirkung der Auflagerkräfte während der Stoßzeit vernachlässigt wird.

Bei Impulsbelastung rechnet man ebenfalls auf der sicheren Seite, wenn man während der Stoßzeit die Wirkung der Auflagerkräfte vernachlässigt. Diese Näherung wird umso genauer, je kürzer die Stoßzeit gegenüber der Eigenschwingungsdauer des gestoßenen Bauteils ist, Bild 3.

Mit diesen Verfahren werden obere Grenzen der möglichen Beanspruchung im gestoßenen Bauteil gegeben. Ist das Bauteil aus anderen Gründen so bemessen, daß es auch bei diesen oberen Grenzwerten nicht seine Tragfähigkeit völlig verliert, kann man sich damit zufriedengeben. Genauere Unter-

suchungen wären Zeitverschwendung.

4.2 Massestoß, Kontaktverhalten bekannt

Unter der Voraussetzung, daß das Kontaktverhalten zwischen den beiden am Stoß beteiligten Körpern durch eine Federkennlinie in Form eines Polygonzuges beschrieben werden kann, ist der Stoßvorgang durch das Verhalten eines Masse-Feder-Masse-Feder-Schwingers darstellbar. Für die Sonderfälle linear elastisches Bauteil, linear elastisches Kontaktverhalten und linear elastisches-ideal plastisches Bauteil, linear elastisches bzw. starr-ideal plastisches Kontaktverhalten sind z.B. in Limberger u. Struck [21] und auf den Bildern 1 und 2 für bestimmte Parameterbereiche Faktoren in Diagrammform gegeben, mit deren Hilfe der maximale Weg der gestoßenen Masse des Masse-Feder-Modells berechnet werden kann.

Wenn beide Federkennlinien des Masse-Feder-Masse-Feder-Gedankenmodells jedoch mehr als je 2 Parameter zu ihrer Beschreibung benötigen, ist die Darstellung einer Parameterstudie in allgemeiner Form kaum noch tragbar.

4.3 Impulsbelastung, Stoßkraft-Zeit-Verlauf bekannt

Für eine sichere und gleichzeitig wirtschaftliche Bemessung eines stoßartig belasteten Bauteils sollte der Stoßkraft-Zeit-Verlauf möglichst wirklichkeitsnah bekannt sein. Es genügt im allgemeinen nicht, einen beliebigen schematisierten Stoßkraft-Zeit-Verlauf zu verwenden und lediglich die Größe des Impulses zu erhalten. Welchen Einfluß nämlich die Form des Stoßkraft-Zeit-Verlaufes hat, zeigt ein Vergleich der maximalen Beanspruchung eines Masse-Feder-Schwingers, der mit verschiedenen Stoßkraft-Zeit-Verläufen, aber gleichem Stoßimpuls belastet wird, Bild 4.

Ein Stoßkraft-Zeit-Verlauf wie er z.B. in Riera [13] als wirklichkeitsnahe Näherung für den Aufprall einer Boeing ermittelt wurde, ergibt die in Bild 5 dargestellte Abhängigkeit der Beanspruchung von den maßgebenden Parametern. Der Vergleich mit den entsprechenden Darstellungen, z.B. in Limberger u. Struck [21] bzw. Bild 4 zeigt:

- Das Zugrundelegen eines wirklichkeitsnahen Stoßkraft-Zeit-Verlaufes kann bei der Beurteilung der Grenztragfähigkeit eines Bauteils gegenüber stoßartiger Belastung gegebenenfalls gegenüber gröberen Näherungen von Vorteil sein, andererseits
- für Schätzverfahren, bei denen mit schematisierten Stoßkraft-Zeit-Verläufen, z.B. in Form von sin-, cos-, Rechteck- oder Dreieckfunktionen gearbeitet wird, ist es eine notwendige Voraussetzung, daß die richtige Größe der maximalen Stoßkraft bekannt ist, wenn man auf der sicheren Seite liegen will.

5. Zur Grenztragfähigkeit eines gestoßenen Bauteils

Zur Anwendung der groben Näherungsverfahren nach 4.1 muß die Verformungsenergie, die ein Bauteil bis zum Erreichen seiner Grenztragfähigkeit aufnehmen kann (Energieabsorptionskapazität) bekannt sein. Aber selbst nur für einen Stahlbetonbauteilabschnitt mit Rechteckquerschnitt ist die Ener-

gieabsorptionskapazität gegenüber stoßartiger Beanspruchung nach Wissen der Autoren nicht ausreichend systematisch untersucht. Das gleiche gilt für den Wert des maximal möglichen Weges der Stoßstelle am Bauteil bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit, der ja wesentlich ist, wenn man sich der weitergehenden Näherungsverfahren nach 4.2 und 4.3 bedienen will. Es ist müßig, sich über die Form des Stoßkraft-Zeit-Verlaufes und über die Größe der maßgebenden Parameter im Detail zu streiten, wenn dann bei der Gegenüberstellung von den zum Abfangen des Stoßes notwendigen und den bis zur Grenztragfähigkeit möglichen Verformungen des Bauteils die Angaben zu den letzteren u.U. um eine Größenordnung falsch sind. Deswegen ist die Erweiterung der Kenntnisse auf diesem Gebiet besonders dringend.

Bis jetzt muß man sich meist auf die Kenntnisse bei statischer Belastung, eventuell korrigiert mit Faktoren aus Versuchen mit hoher Belastungsgeschwindigkeit, beschränken. Eine Reihe von Untersuchungen sind durchgeführt worden, bei denen Balken oder Platten unter Variation bestimmter Parameter durch Massestoß oder durch Impulsbelastung mit mehr oder minder willkürlicher, von den Versuchsbedingungen abhängiger Form des Stoßkraft-Zeit-Verlaufes beansprucht wurden, z.B. Mavis u. Stewart [24], Trott u. Fox [25], Cernica u. Charignon [26], Perry, Burns u. Thompson [27], Hamilton [28], Kern [29] und Geppert [30]. Sie ermöglichen im wesentlichen vergleichende Betrachtungen unter den seinerzeit vorliegenden Bedingungen. Die veröffentlichten Ergebnisse gestatten aber leider noch nicht eine Extrapolation auf den allgemeinen Stahlbetonquerschnitt für einen vorgegebenen Beanspruchungs-Zeit-Verlauf.

Bei der Ermittlung der bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit maximal möglichen Verformung eines Stahlbetonbauteils ist man selbst bei statischer Belastung noch auf recht grobe Schätzungen angewiesen. Die Frage nach dem Tragverhalten und der Traglast eines Bauteils nach Überschreiten der sog. Fließbeanspruchung in maßgebenden Querschnitten ist durch die Fließgelenk- und Fließlinientheorie für Balken und Platten recht gut beantwortet. Hinsichtlich der Grenzverformungen, also im wesentlichen der maximal möglichen Verdrehungen der als Gelenke angesprochenen, sich bleibend verformenden Rißzonen sind die Kenntnisse vorerst noch sehr lückenhaft. Allgemeine Ansätze, z.B. Bachmann [31], Eifler u. Plauk [32], konnten bisher nur in begrenzten Parameterbereichen durch Versuche verifiziert werden. Die Ergebnisse einer rechnerischen Ermittlung der Drehfähigkeit nach einer in der BAM entwickelten Methode sind im Bild 6 dargestellt. Neben den Abmessungen des Stahlbetonbauteiles liegen hier lediglich das nichtlineare Material- und Verbundverhalten, das Moment-Querkraftverhältnis und das Lastbild zugrunde. Auf die Bernoulli'sche Hypothese von dem Ebenbleiben der Querschnitte wurde, abweichend von sonstigen Formänderungsberechnungen, verzichtet. Das Verbundverhalten ist für gerippten Stahl in Grundsatzversuchen ermittelt worden.

Inwieweit diese Werte für Grenzverdrehungen bei statischer Belastung auch bei stoßartiger Belastung gültig sind, ist noch nicht geklärt. In den

Berichten über die vorstehend erwähnten Versuche mit stoßartiger Belastung wird z.T. von einer Erhöhung der Energieabsorptionskapazität, z.T. aber auch von geringeren dynamischen Grenzlasten mit etwa gleichgroßen bleibenden Durchbiegungen bei stoßartiger Belastung gegenüber statischer Belastung gesprochen. Hier fehlen systematische Versuche, bei denen man direkt die Grenzverdrehung gleicher Stahlbetonbauteile unter statischer und stoßartiger Belastung vergleichen kann.

Setzt man voraus, daß die Grenzverdrehung eines Stahlbetonbauteilabschnittes richtig abgeschätzt werden kann, erhebt sich bei den eingespannten Platten und bei Schalen die Frage, wie im Einzelfall die Fließlinienfigur konkret aussieht.

Bei eingespannten Platten liefert die Fließlinientheorie als Fließlinienfigur ein Vieleck mit unbekannter Seitenzahl und unbekanntem Radius, z.B. Sawczuk u. Jaeger [33]. Da jedoch die Höhe der Pyramide dieser Vieleck-Verformungsfigur, also der plastische Anteil des Weges der Stoßstelle, diesem Radius proportional ist, liegt in der Festlegung des Radius wieder ein Unsicherheitsfaktor. Überlegungen, z.B. Struck, Limberger u. Brandes [34] zeigen, daß höchstens 6-Eck-Rißfiguren auftreten dürften. Für Schalen, zumindest für flache Kugelschalen, wird entsprechendes gelten. Es wird sich eine Vieleck-Fließfigur einstellen, deren Radius nicht ohne weiteres festgelegt werden kann.

Als Versagen des Bauteils als Gesamtkonstruktion muß man den Zustand ansetzen, bei dem in den Fließgelenken bzw. -linien mit den größeren Verdrehungen, bei Platten und Kugelschalen also die zu den Radialmomenten M_ϑ gehörigen, die Grenzverdrehung erreicht wird. Hierbei ist jedoch noch ungeklärt, wie Membraneffekte die Grenztraglast bzw. das Verformungsvermögen beeinflussen. Aus Experimenten an Stahlbetonplatten, z.B. Sawczuk u. Jaeger [33], geht hervor, daß die Membraneffekte recht bedeutend sein können.

Für eine flache, o,6 m dicke Kugelschale wurde in [34] der maximal mögliche plastische Anteil des Weges der Stoßstelle zu $W_{s\ pl}$ = 13 cm abgeschätzt. Mit

r : Radius des umschreibenden Kreises für das Fließlinien-n-Eck

d : Dicke der Schale

α : Zentriwinkel des Fließlinien-n-Ecks

ϑ : Verdrehung der Fließgelenke, in denen die Radialmomente M_ϑ wirken,

ergibt sich jetzt nach Erkenntnissen aus Bild 6 über

$$W_{s\ pl} \approx r \frac{\vartheta_{pl\ Bruch}}{2\ tg\ (\alpha/2)} \qquad (1)$$

bei n = 6

$$W_{s\ pl} \approx o{,}865 \cdot r \cdot \vartheta_{pl\ Bruch} \qquad (2)$$

Nimmt man für r den Radius desjenigen Breitenkreises an, bei dem nach der Elastizitätstheorie die größten negativen Tangentialmomente M_φ bei einer Belastung durch Einzellast auftreten, also

$$r \approx 2 \cdot R \sqrt[4]{\frac{(h/R)^2}{12\,(1-\nu^2)}} \qquad (3)$$

mit R : Radius der Kugelschale, erhält man für $\nu = 1/6$;

$$W_{s\,pl} \approx 0{,}935 \cdot \vartheta_{pl\,Bruch} \cdot \sqrt{d \cdot R} \qquad (4)$$

und für R = 25 m, h = 0,6 m daraus nach Bild 6 $W_{pl} \approx 7$ bis 21 cm.

Dieses Beispiel macht noch einmal deutlich, wieviele mehr oder minder willkürliche Annahmen z.Zt. noch benutzt werden müssen, um einen Wert für die Grenzverformung eines Stahlbetonbauteils berechnen zu können.

6. Zusammenfassende Folgerung

Industrieanlagen mit großer Schadenserwartung werden in Zukunft immer auf den Katastrophenfall hin untersucht werden müssen. Hierbei muß auch das Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter stoßartiger Belastung beurteilt werden, wobei eine Reihe von Schwierigkeiten auftreten:

- Die Stoßbelastung ist speziell beim Massestoß ungenügend definierbar.
- Das Tragverhalten bzw. das Arbeitsvermögen von Bauteilen unter derartigen dynamischen Belastungen ist weitgehend ungeklärt.

Man ist daher gezwungen, Annahmen bzw. Vereinfachungen zu machen, die dem Ergebnis einen schwer kalkulierbaren Unsicherheitsgrad verleihen. Infolge nicht ausreichender Definierbarkeit der als maßgebend anzusetzenden stoßartigen Belastung beim Massestoß (heute Starfighter, morgen Jumbo, übermorgen?) ist es müßig, das Verhalten des Stoßkörpers beim Aufprall näher zu erforschen, solange die Tragreserven von Stahlbetonbauteilen mangels ausreichender Kenntnisse nicht ausschöpfbar sind. Die Erforschung der wirklichen Grenztragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen gegenüber stoßartiger Belastung ist deshalb besonders aktuell.

Literatur

[1] MEIER-DÖRNBERG, K.-E., "Die Beschreibung von Stoßvorgängen durch ihre Zeitfunktionen, Fourier- und Shockspektren", VDI-Berichte Nr. 135, 1969, VDI-Verlag, Düsseldorf.

[2] LIMBERGER, E. u. STRUCK, W., "Die stoßartige Beanspruchung von Bauteilen", VDI-Z Bd. 113 (1971) Nr. 1o, S. 793/98.

[3] SCHARDIN, K.A., "Wirkung von Spreng- und Atombomben", Ziviler Luftschutz 18 (1954) Nr. 12, S. 283/91.

[4] GWALTNEY, R.C., "Missile generation and protection in lightwater cooled power reactor plants", Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-NSIC-22, Oak Ridge Sept. 1968.

[5] CHELAPATI, C.V., KENNEDY, R.P. and WALL, I.B., "Probabilistic Assessment of Aircraft Hazard for Nuclear Power Plants, Nuclear Engineering and Design 19 (1972) S. 333/364.

[6] KARAS, H., "Platten unter seitlichem Stoß", Ing.-Arch. 1o (1939) Nr. 3, S. 238/5o.

[7] ERINGEN, A.C., "Transverse impact on beams and plates", J. appl. Mech. 2o (1953) Nr. 4, S. 461/68.

[8] GOLDSMITH, W., "Impact", London: Edward Arnold Ltd. 196o.

[9] RÜHL, K., EMSCHERMANN, H.H., FLOßMANN, R. und JÄNICKE, G., "Untersuchungen über den Spannungsverlauf in stoßartig beanspruchten Stäben und Trägern". Materialprüfung 4 (1962) S. 234/242.

[1o] KÄMMEL, G., "Der Einfluß kurzzeitiger Belastungen", Bauingenieur 38 (1963) Nr. 2, S. 54/57.

[11] SCHMIDT, B., "Kontaktkraft und Biegespannungen im quergestoßenen Balken", Diss. Techn. Hochschule Darmstadt 1966.

[12] SCHWIEGER, H., "Maximale Beanspruchung schlagartig belasteter Platten", Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, DLR Forschungsbericht 66-33, München 1966.

[13] RIERA, J.D., "On the stress analysis of structures subjected to aircraft forces", Nuclear Engng. and Design 8 (1968) Nr. 3, S. 415/26.

[14] YANG, H.T.Y. and GODFREY, D.A., "Structural analysis of aircraft impact", Nuclear Engng. Design 11 (1969) Nr. 2, S. 295/3o7.

[15] BARTRAM, R., "Näherungsweise Berechnung der Verformung und Beanspruchung von impulsförmig belasteten Balken und Rahmen unter Berücksichtigung der endlichen Ausbreitgeschwindigkeit von Stoßwellen", Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 1, Nr. 31, 1971, 142 Seiten, VDI-Verlag, Düsseldorf

[16] ARGYRIS, J.H. and CHAN, A.S.L., "Applications of Finite Elements in Space and Time", Ingenieur-Archiv 41 (1972) S. 235/257.

[17] SEILER, J.A. and SYMONDS, P.S., "Plastic Deformation in Beams under Distributed Dynamic Loads", Journal of Applied Physics 25 (1954), S. 556/563.

[18] "Design of structures to resist the effects of atomic weapons", U.S. Army Corps of Engineers, Bericht EM-1110-345-415 u. EM-1110-345-416, Bonn: deutsche Bearbeitung des BMWo 1957.

[19] NORRIS, C.H. u.a., "Structural design for dynamic loads", New York: McGraw-Hill, Book Company 1959.

[2o] O'HARA, G.J. and CUNIFF, P.F., "Numerical method for structural shock response", J. Engng. Mech. Division, Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. 9o (1964) Nr. EM 2, S. 51/82

[21] LIMBERGER, E. und STRUCK, W., "Stoßartige Beanspruchung von Bauteilen und ihre rechnerische Simulation an mechanischen Modellen", Bautechnik 49 (1972), S. 384/388.

[22] MAINSTONE, R.J., "The effects of Explosions on Buildings", bre-Symposium "Buildings and the Hazard of Explosion" Ref. No. 352/72, Copyright Building Research Station.

[23] STRUCK, W. und LIMBERGER, E., "Näherungslösung für das Verhalten eines elastischen Systems unter einem unelastischen Stoß", Nuclear Engineering and Design 12 (197o), S. 452/456.

[24] MAVIS, F.T. and STEWART, J.J., "Further tests of Dynamically Loaded Beams", Journal of the American Concrete Institute 3o (1959), S. 1215/1223.

[25] TROTT, J.J. and FOX, E.N., "Comparison of the Behaviour of Concrete Beams under Static and Dynamic Loading", Magazine of Concrete Research 11 (1959) S. 15/24.

[26] CERNICA, J.N. and CHARIGNON, M.J., "Ultimate Static and Impulse Loading of Reinforced Concrete Beams", Journal of the American Concrete Institute 6o (1963) S. 1219/1228.

[27] PERRY, E.S., BURNS, N.H. and THOMPSON, J.N., "Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Steel Plates Subjected to Dynamic Loads", Journal of the American Concrete Institute 64 (1967) S. 662/668.

[28] HAMILTON, W.A., "Dynamic Response of Pretensioned Prestressed Concrete Beams", Journal of the American Concrete Institute 65 (1968), S. 851/855.

[29] KERN, G., "Verhalten von Stahlbetonplatten bei Beanspruchung durch Luftstoßwellen", Zivilschutz 1964, S. 252/264 und 418/429.

[3o] GEPPERT, R., "Druckstoßversuche an zwei- und vierseitig gelagerten Betonplatten", EMI-Berichte 5/71 und 7/71, Ernst Mach Institut, Freiburg 1971.

[31] BACHMANN, H., "Zur plastizitätstheoretischen Berechnung statisch unbestimmter Stahlbetonbalken", Diss. ETH Zürich 1967.

[32] EIFLER, H. und PLAUK, G., "Zwei Verfahren zur Berechnung der Drehfähigkeit plastischer Gelenke in biegebeanspruchten Stahlbetonkonstruktionen", Materialprüfung 14 (1972), S. 256/259.

[33] SAWCZUK, A. und JAEGER, Th., "Grenztragfähigkeitstheorie der Platten", Springer-Verlag, Berlin, 1963.

[34] STRUCK, W., LIMBERGER, E. und BRANDES, K., "Zur Abschätzung der Beanspruchung in Flächentragwerken bei örtlicher Stoßbelastung mit Parameterstudie am Beispiel einer Stahlbetonschale", Wiss. Sammelband der BAM 1973.

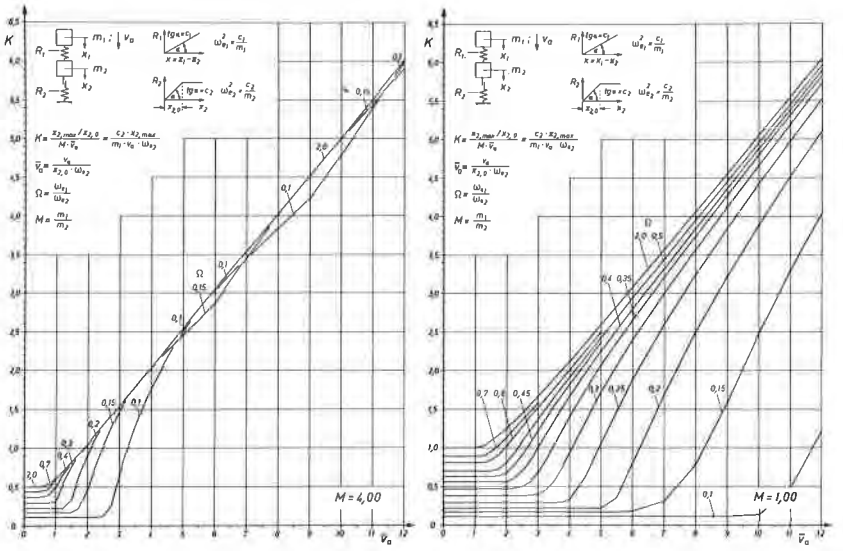


Bild 1: Masse-Feder-Masse-Feder-Schwinger, Federkennlinien linearelastisch und linearelastisch/idealplastisch

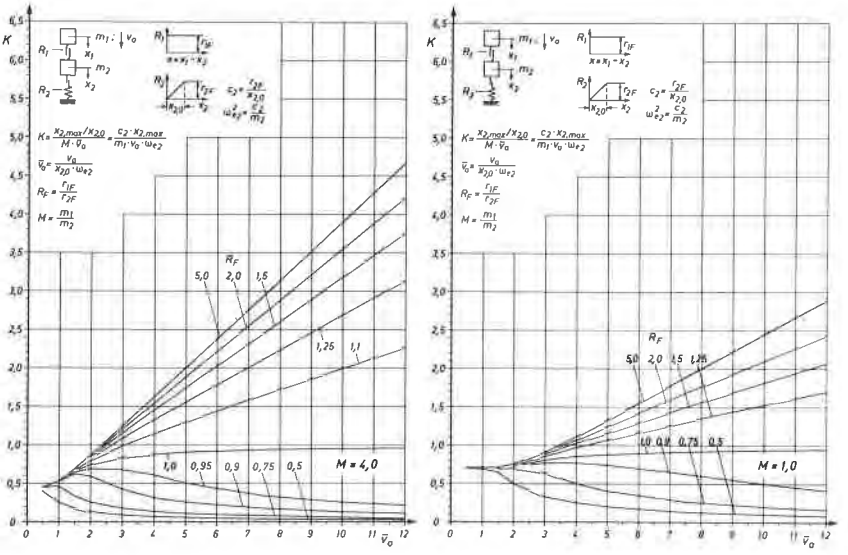


Bild 2: Masse-Feder-Masse-Feder-Schwinger, Federkennlinien starr/idealplastisch und linearelastisch/idealplastisch

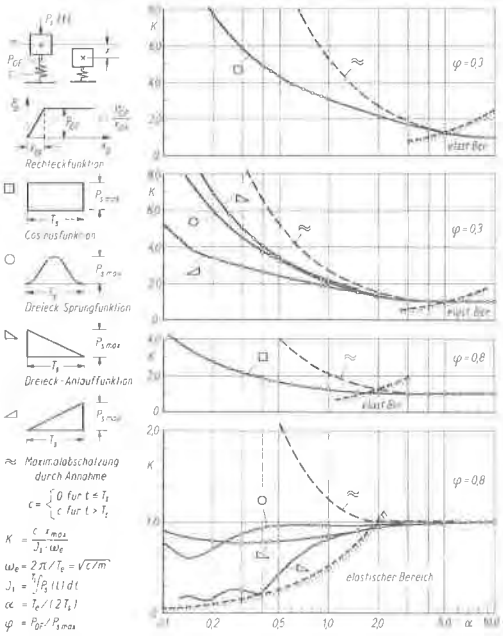


Bild 3: Vergleich der Maximalabschätzungen mit den Lösungen ohne Vernachlässigung der Auflagerkräfte bei Impulsbelastung am Masse-Feder-Schwinger

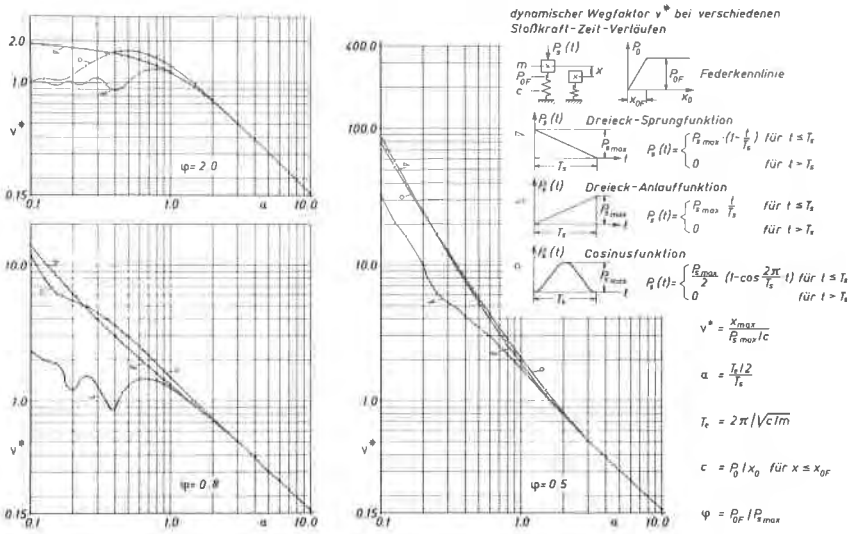
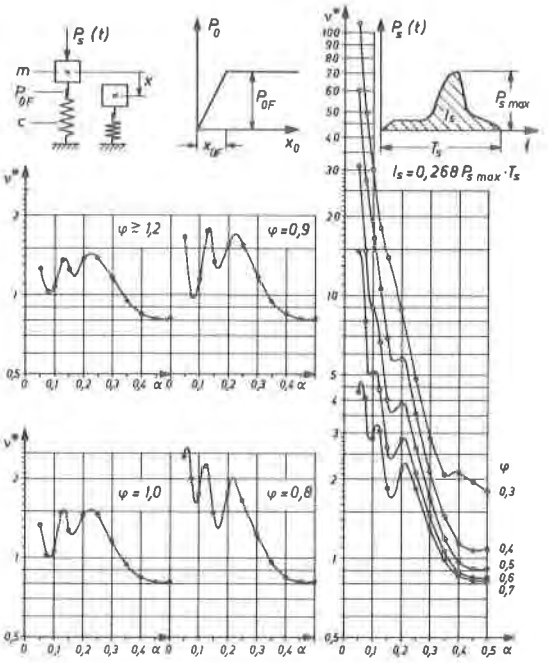


Bild 4: Masse-Feder-Schwinger, maximale Beanspruchung bei verschiedenen Formen, aber gleicher Größe des Stoßimpulses



$$v^* = \frac{x_{max}}{P_{s\,max}/c} \qquad \alpha = \frac{T_e/2}{T_s} \qquad \varphi = \frac{P_{0F}}{P_{s\,max}} \qquad c = \frac{P_0}{x_0} \text{ für } x \leq x_{0F} \qquad T_e = \frac{2\pi}{\sqrt{c/m}}$$

Bild 5: Masse-Feder-Schwinger unter wirklichkeitsnahem Stoßkraft-Zeit-Verlauf (Flugzeugaufprall)

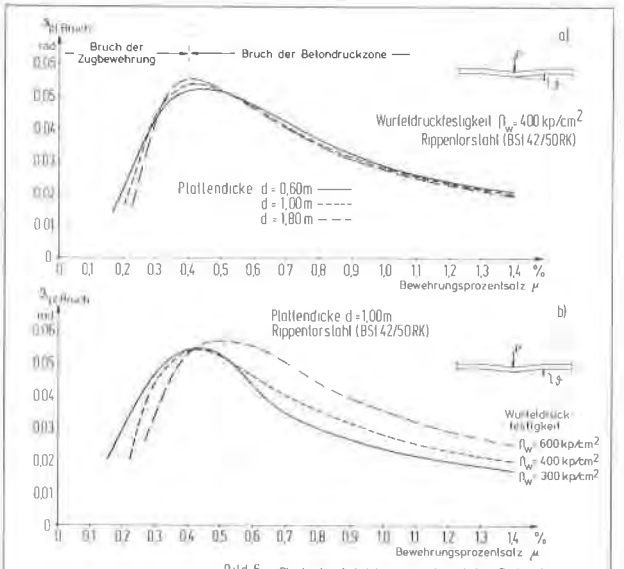


Bild 6 Plastischer Anteil des maximal möglichen Drehwinkels eines plastischen Stahlbetongelenkes in Abhängigkeit von μ und d/a bzw μ und β_w (b)