BERECHNUNGSMETHODEN ZUR ERMITTLUNG VON BELASTUNGSBEDINGUNGEN UND GRENZTRAGFÄHIGKEITSVERHALTEN VON KERNKRAFTWERKS-BAUWERKSSTRUKTUREN BEI AUSSERGEWÖHNLICHEN AUSSEREN EINWIRKUNGEN WIE FLUGZENGABSTURZ UND GASDRUCKWELLE

(METHODS FOR ANALYZING LOADING CONDITIONS AND LIMIT LOAD STRUCTURAL BEHAVIOUR OF NUCLEAR POWER PLANT BUILDING STRUCTURES IN THE EVENT OF EXCEPTIONAL EXTERNAL INFLUENCES AS AIRCRAFT CRASHES AND GAS PRESSURE WAVES)

R. DIETRICH, W. FÜRSTE

Fried. Krupp GmbH, Krupp Maschinenfabriken, D-43 Essen, Germany

SUMMARY

Should an aircraft crash on the building structures of a nuclear power station, then the walls are subjected to a sudden loading. The loading arising in such a case depends to a great extent on the type of aircraft and the impact speed as well as on the shape and dimensions of the wall in question (flat slabs, spherical or cylindrical shell).

When working out the optimum dimensions of the wall thicknesses for protecting the nuclear plant, sufficient attention has to be paid to the problems resulting from these influences. In order to throw some light on the significance of some of these influences, the impact of a Boeing 707-320 and that of a Starfighter on chosen structures at various impact speeds were investigated. After determining the impact load—time—functions for the various impact speeds, a calculation procedure was applied by carrying out a dynamic analysis with an individual mass simulated system and a dynamic analysis using the Finite Element Method.

In order to assess the loading on a building structure brought about by a gas pressure wave, a pressure—time—function based on the equivalent of TNT was determined. Applying this function together with the Finite Element Method a dynamic analysis was carried out.

The results obtained by these investigations reveal the dynamic behaviour of building structures subjected to such loads as well as the problems involved in dimensioning the wall thicknesses.

1. Einleitung

Die Planungen zum Bau von Kernkraftwerken in der Nähe dichtbesiedelter Wohn- und Industriegebiete lenkten die Aufmerksamkeit verstärkt auf mögliche, zivilisationsbedingte Einwirkungen von außen. Als zivilisationsbedingte äußere Einwirkungen gelten Flugzeugabsturz und Druckwelle.

Selbst beim Auftreten derartiger äußerer Einwirkungen muß die Aufrechterhaltung der Sicherheit der Bevölkerung gewährleistet sein. Um dies zu erreichen, muß die Reaktorabschaltung und die Nachwärmeabfuhr sichergestellt sein und der Sicherheitseinschluß des Reaktors darf nicht beschädigt werden. Der hierzu notwendige Schutz kann durch bereits vorhandene bzw. zusätzliche oder verstärkte Wände der Baustrukturen erreicht werden.

Zur Beurteilung solcher baulichen Schutzmaßnahmen erwies es sich als notwendig, die erforderlichen Wanddicken von Kernkraftwerksgebäuden bei Belastung durch Flugzeugabsturz und Druckwelle zu ermitteln.

Beim Flugzeugabsturz werden der Aufprall einer Boeing 707-320 und der eines Starfighters F-104 für verschiedene Aufprallgeschwindigkeiten untersucht. Ergänzend hierzu werden als Grenzfälle des gesamten Typenspektrums der Flugzeuge der Aufprall eines Kleinflugzeuges (Dornier DO 27) und der eines Großflugzeuges (Boeing 747) für eine Aufprallgeschwindigkeit betrachtet.

Bei der Druckwelle (Luftdruckwelle) werden der Einfluß des maximalen Überdruckes und der Wirkungsdauer der positiven Phase auf die erforderliche Wanddicke untersucht.

Für die Belastung durch einen Flugzeugabsturz und durch eine Druckwelle werden dynamische Berechnungen mittels eines Ein- und Mehr-Massenschwingers (Finite Element Methode) durchgeführt.

Die bei der Durchführung dieser Arbeiten erzielten Ergebnisse werden dargestellt und erläutert.

2. Verwendete Daten

In der vorliegenden Arbeit werden folgende Daten verwendet:

Beton

Güteklasse des Betons		BN 350
Elastizitätsmodul	/1/	$E = 340\,000\ kp/cm^2$
Querdehnzahl	/1/	$\nu = 0{,}2$
Dichte	/1/	$\varrho = 2{,}3\ g/cm^3$
Nenndruckfestigkeit	/1/	$\beta_{WN} = 350\ kp/cm^2$
Druckfestigkeit bei dynamischer Belastung	/2/	$\beta_{WN_{dyn}} = 1{,}3 \cdot \beta_{WN}$

Betonstahl

Betonstahlsorte	/1/	BST 50/55
Streckgrenze	/1/	β_s oder $\beta_{0,2} = 5000 kp/cm^2$
Streckgrenze bei dynamischer Belastung	/2/	$\beta_{s_{dyn}} = 1{,}1 \cdot \beta_s$
Bruchdehnung	/1/	$\delta_{10} = 8\ \%$

Bewehrungsgrad (für eine Richtung)

Betonplatten $\mu = 1{,}0\ \%$

Betonschalen $\mu = 0{,}7\ \%$

3. Flugzeugabsturz

Beim Aufprall eines Flugzeuges auf eine Baustruktur wirkt auf diese eine dynamische Kraft, deren Größe und Verlauf von der Strecken- und Berstlast sowie der Aufprallgeschwindigkeit des Flugzeuges abhängig ist. Bei der Streckenlast handelt es sich um die Last (Gewicht) des Flugzeuges pro Längeneinheit und bei der Berstlast um die Kraft, bei der die Flugzeugkonstruktion zerbricht. Beide Größen ändern sich mit dem Abstand von der Rumpfspitze. Mit den in /5/ und /6/ angegebenen Daten für die Strecken- und Berstlast einer Boeing 707-320 bzw. eines Starfighters F-104 wurden Stoßkraft-Zeit-Funktionen für den Aufprall der Flugzeuge auf eine starre Wand mit Hilfe des Impulssatzes für verschiedene Aufprallgeschwindigkeiten ermittelt. In Bild 1 sind die Stoßkraft-Zeit-Funktionen für den Aufprall einer Boeing 707-320 und eines Starfighters F-104 für verschiedene Aufprallgeschwindigkeiten dargestellt. Die Kurven zeigen deutlich, wie mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit die maximale Stoßkraft ansteigt und die Impulsdauer abnimmt.

Diese durch den Aufprall eines Flugzeuges verursachte Belastung, bei der es sich um eine konzentrierte Flächenlast handelt, hat eine Beanspruchung durch Penetration bzw. Perforation und durch Biegung zur Folge, wobei in den meisten Fällen bei starren Baustrukturen die Beanspruchung durch Penetration bzw. Perforation und bei elastisch reagierenden Baustrukturen die Beanspruchung durch Biegung bestimmend ist für die erforderliche Wanddicke.

3.1 Wanddicke zum Schutz gegen Perforation

Beim Aufprall eines Flugzeuges auf eine Baustruktur tritt eine konzentrierte Flächenlast auf, die örtlich eine Beanspruchung durch Penetration bzw. Perforation verursachen kann. Geht man bei der Ermittlung dieser Beanspruchung davon aus, daß das auftreffende Flugzeug sich wie ein Projektil und die getroffene Baustruktur sich wie eine starre Wand verhält, so ist es möglich, empirisch ermittelte Beziehungen aus der Waffentechnik /7/ für die Ermittlung der Eindringtiefe bzw. der Wanddicke zum Schutz gegen Perforation zu benutzen. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß diese Beziehungen alle für Projektile mit kleinen Querschnittsflächen (im Verhältnis zum Flugzeug) gelten, so daß einige Beziehungen bei großen Querschnittsflächen, wie sie beim Flugzeugabsturz auftreten, zu widersprüchlichen Ergebnissen (große Querschnittsfläche - große Eindringtiefe) führen können. Hierzu gehört z. B. die ACE-Gleichung ("Army Corps of Engineers' formula") /7/

$$X = \frac{1.65 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{\beta_{w_N}}} \cdot \frac{G}{d^{1,965}} \cdot \left(\frac{v_A}{100}\right)^{1.5} + 0.5 \cdot d \qquad (1)$$

In der vorliegenden Arbeit wird daher eine modifizierte BRL-Gleichung ("Ballistic Research Laboratories formula") /7/

$$T = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{\beta_{WN}}} \cdot \frac{G}{d^{1,8}} \cdot \left(\frac{v_A}{100}\right)^{4/3} , \qquad (2)$$

die zu diesen Widersprüchen nicht führt, benutzt. Damit soll aber nicht gesagt werden, daß dieses Verhalten der BRL-Gleichung ein Kriterium für die Genauigkeit bei der Anwendung zur Ermittlung der Schutzdicke gegen Perforation beim Flugzeugabsturz ist.

In Gl. (1) und Gl. (2) bedeuten:

- x Eindringtiefe in m
- β_{WN} Nenndruckfestigkeit des Betons in kp/cm^2
- G Gewicht des auftreffenden Projektils in kp
- d Durchmesser des Projektils in m
- v_A Aufprallgeschwindigkeit in km/h
- T Schutzdicke gegen Perforation in m

Da ein Flugzeug sich beim Aufprall nicht wie ein Geschoß bzw. eine Bombe verhalten wird, ist davon auszugehen, daß die Anwendung der BRL-Gleichung pessimistische Ergebnisse liefert.

In Bild 2 sind die unter Anwendung der BRL-Gleichung erzielten Wanddicken zum Schutz gegen Perforation in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit dargestellt. Wie sich zeigt, ist der Unterschied zwischen der Wanddicke beim Aufprall einer Boeing 707-320 und eines Starfighters F-104 trotz des großen Gewichtsunterschiedes zwischen diesen beiden Flugzeugtypen (Boeing 707-320 mit 91 Mp, Starfighter F-104 mit 13 Mp) relativ gering, da durch die unterschiedliche Größe der Aufprallfläche (Boeing 707-320 mit 18,4 m^2, Starfighter F-104 mit 3,24 m^2) ein teilweiser Ausgleich erfolgt.

Die Berechnungen haben ferner gezeigt, daß mit der Wanddicke zum Schutz gegen Perforation beim Aufprall der Flugzeuge auch die Wanddicke beim Aufprall der Triebwerke abgedeckt ist (siehe Bild 2). Für die Triebwerke werden hierbei folgende Daten verwendet:

Triebwerk einer Boeing 707-320	
Gewicht	1830 kp
Durchmesser	1,35 m

Triebwerk eines Starfighters F-104	
Gewicht	1685 kp
Durchmesser	1,00 m

3.2 Elastisch reagierende Baustrukturen

Beim Aufprall eines Flugzeuges auf eine elastisch reagierende Baustruktur wird diese in erster Linie auf Biegung beansprucht. Die auftretende Beanspruchung ist

1. vom Gewicht und von der Aufprallgeschwindigkeit des Flugzeuges (Stoßkraft-Zeit-Funktion) sowie

2. von der Form und den Abmessungen der getroffenen Baustruktur (ebene Platte, Kugel- bzw. Kreiszylinderschale)

abhängig. Bei der Bemessung von Wanddicken zum Schutze von Sicherheitseinrichtungen von Kernkraftwerken ist dem Einfluß dieser Faktoren Rechnung zu tragen. Dies ist nur möglich, wenn das dynamische Verhalten der Baustruktur berücksichtigt wird. Hierzu sind recht komplizierte und kostenaufwendige Berechnungen erforderlich, die nur durch Zulassung geeigneter Vereinfachungen durchgeführt werden können. Eine wesentliche Vereinfachung wird dadurch erreicht, daß die gegebene Baustruktur durch einen Ein- bzw. Mehr-Massenschwinger ersetzt wird.

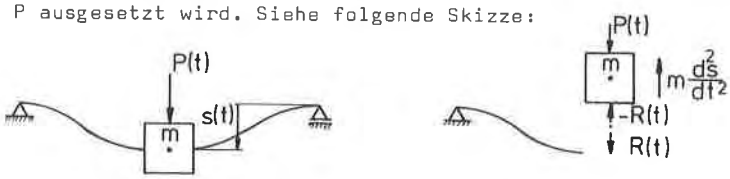
Nachfolgend werden zwei Ersatzsysteme betrachtet, und zwar

1. ein Ein-Massenschwinger mit einem Freiheitsgrad und
2. ein Mehr-Massenschwinger mit mehreren Freiheitsgraden (Finite Element Methode)

Auf die mit diesen Ersatzsystemen erzielten Ergebnisse wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

3.2.1 Ein-Massenschwinger mit einem Freiheitsgrad

Das hier betrachtete dynamische Ersatzsystem besteht aus einer Einzelmasse, die von einer gewichtslosen Feder getragen und der Einwirkung einer Einzelkraft P ausgesetzt wird. Siehe folgende Skizze:



Hierbei bedeuten:

P (t) von außen einwirkende zeitabhängige Stoßkraft

m wirksame schwingende Masse der Baustruktur

R (t) zeitabhängige innere Widerstandskraft der Baustruktur (Rückstellkraft)

s (t) zeitabhängige Verschiebung.

Die Richtungen, in denen die Variablen P (t), R (t) und s (t) als positiv betrachtet werden, sind in der Skizze durch Pfeile gekennzeichnet.

Für das skizzierte Ersatzsystem ergibt sich bei Vernachlässigung der Dämpfung die Newton'sche Bewegungsgleichung zu

$$m \cdot \frac{d^2s}{dt^2} + R(t) = P(t) \qquad (3)$$

Für die innere Widerstandskraft der Baustruktur kann bei einem linear-elastischen Verhalten gesetzt werden:

$$R(t) = c \cdot s(t) \qquad (4)$$

In Gl. (4) bedeutet c die Federkonstante des Ersatzsystems. Sie gibt Aufschluß über den Widerstand der Baustruktur gegenüber einer Zwangsverformung an der Stoßstelle in Richtung der Stoßkraft.

Die Anfangsbedingungen für die Verschiebungen und die Geschwindigkeiten ergeben sich für Baustrukturen unter stoßartiger Belastung, wie sie bei einem Flugzeugabsturz auftritt, zu

$$s(t)\Big|_{t=0} = 0 \quad , \quad v(t)\Big|_{t=0} = 0 \tag{5}$$

Wird in Gl. (3) die Stoßkraft P (t) Null gesetzt, so kann mittels Gl. (4) und Gl. (5) die Eigenschwingungsdauer T_e des Ein-Massenschwingers ermittelt werden. Sie ergibt sich zu

$$T_e = 2\pi\sqrt{\frac{m}{c}} \tag{6}$$

Mit Gl. (4) und Gl. (5) wird die Newton'sche Bewegungsgleichung (s. Gl. (3)) für einen beliebigen Verlauf der Stoßkraft durch numerische Verfahren gelöst. Die Lösung führt zur Bestimmung des dynamischen Lastfaktors und der statischen Ersatzlast.

Der dynamische Lastfaktor ist das Verhältnis von maximaler dynamischer Verschiebung zu maximaler statischer Verschiebung

$$\alpha = \frac{\text{max. dynamische Verschiebung}}{\text{max. statische Verschiebung}} \tag{7}$$

Er ist eine Kenngröße zur Beurteilung der Beanspruchung einer Baustruktur infolge dynamischer Belastung, da er erkennen läßt, ob ein Teil der dynamischen Belastung durch die auftretenden Trägheitskräfte (s. Gl. (3)) aufgefangen wird ($0 \leq \alpha < 1$) oder ob durch sie eine zusätzliche Belastung auftritt ($1 < \alpha \leq 2$).

Der dynamische Lastfaktor ist bei einem Ein-Massenschwinger mit einem Freiheitsgrad von der Eigenschwingungsdauer des Systems und der Stoßkraft-Zeit-Funktion (Verlauf und Impulsdauer) abhängig. Für einen Ein-Massenschwinger ist er in dem Bild 3 für den Aufprall einer Boeing 707-320 (oberes Bild) bzw. eines Starfighter F-104 (unteres Bild) dargestellt. Bild 3 gilt hierbei für eine Eigenschwingungsdauer von 0,250 s bis 0,025 s. Das Bild läßt deutlich den Einfluß

1. der Stoßkraft-Zeit-Funktion (Boeing 707-320 bzw. Starfighter F-104)
2. der Aufprallgeschwindigkeit (Impulsdauer, s. Bild 1) und
3. der Eigenschwingungsdauer

auf den dynamischen Lastfaktor erkennen.

Aufgrund der Abhängigkeit des dynamischen Lastfaktors von der Eigenschwingungsdauer ist es möglich, die in dem Bild 3 angegebenen Kurven für alle Bauteile zu verwenden, die eine Betrachtung als einen Ein-Massenschwinger mit einem Freiheitsgrad gestatten. Hierbei ist jedoch die Eigenschwingungsdauer zu wählen, deren Eigenform einen ähnlichen Verlauf hat, wie die zu erwartende Biegelinie. Hierdurch wird erreicht, daß die für die Beanspruchung kritische Eigenschwingungsdauer gewählt wird. Der Einfluß der Randbedingungen (Einspannverhältnisse) der Bauteile kann bei der Ermittlung der Eigenschwingungsdauer berücksichtigt werden.

Bei Platten hat die erste Eigenform einen ähnlichen Verlauf wie die Biegelinie bei einer mittigen Einzellast. Die zu dieser Eigenform gehörende Eigenschwingungsdauer kann nach analytischen Beziehungen /8/, /9/ oder näherungsweise mittels der statischen Biegelinie ermittelt werden.

Wird z. B. eine allseitig frei drehbar gelagerte Betonplatte betrachtet, so gilt für die erste Eigenschwingungsdauer die Beziehung /8/, /9/

$$T_e = \frac{K}{1+\left(\frac{a}{b}\right)^2} \cdot \frac{a^2}{h} \qquad (8)$$

Hierbei bedeuten:

T_e Eigenschwingungsdauer in s

K Materialkonstante für Beton BN 350 = $5{,}68 \cdot 10^{-4}$ s/m

a Länge der Betonplatte in m

b Breite der Betonplatte in m

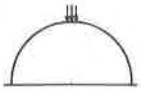
h Wanddicke der Betonplatte in m

Gl. (8) zeigt, daß für eine allseitig frei drehbar gelagerte Platte die Eigenschwingungsdauer

$$T_e \sim \frac{1}{h} \qquad (9)$$

ist. Diese Abhängigkeit führt dazu, daß der dynamische Lastfaktor für eine Betonplatte von der Wanddicke abhängig ist.

Beim senkrechten Aufprall eines Flugzeuges auf eine Halbkugelschale



können die zur Ermittlung der kritischen Eigenschwingungsdauer (s. Gl. (6)) notwendigen Daten für die Federkonstante c und die wirksame schwingende Masse m näherungsweise aus der statischen Biegelinie /10/ bestimmt werden. Für eine Halbkugelschale mit einem Innenradius von 30 m ergibt sich eine Eigenschwingungsdauer T_e von

$$T_e = 0{,}038 \text{ s.}$$

Die Berechnungen zeigen, daß die Eigenschwingungsdauer einer Halbkugelschale von der Wanddicke unabhängig ist, d. h. der dynamische Lastfaktor ist ebenfalls von der Wanddicke unabhängig.

Bei der Ermittlung des dynamischen Lastfaktors für die Kreiszylinderschale wird im Rahmen dieser Arbeit vereinfachend von der Eigenschwingungsdauer für die Halbkugelschale ausgegangen.

Bei einem linear-elastischen Verhalten einer Baustruktur besteht zwischen der maximalen dynamischen Verschiebung und der dynamischen Rückstellkraft sowie der maximalen statischen Verschiebung und der maximalen Stoßkraft über die Federkonstante eine lineare Beziehung, so daß der dynamische Lastfaktor auch

wie folgt geschrieben werden kann:

$$\alpha = \frac{\text{max. dynamische Rückstellkraft}}{\text{max. Stoßkraft}} \tag{10}$$

Für die maximale dynamische Rückstellkraft kann somit geschrieben werden

$$R_{dyn_{max}} = \alpha \cdot P_{dyn_{max}} \tag{11}$$

Die Rückstellkraft ist bestimmend für die wirkliche Beanspruchung der Baustruktur infolge der dynamischen Belastung und bietet die Möglichkeit, das dynamische Problem auf ein statisches Problem mit gleicher Beanspruchung zurückzuführen, wobei sich mit Gl. (11) die statische Belastung P_{stat} ergibt zu

$$P_{stat} = R_{dyn_{max}} = \alpha \cdot P_{dyn_{max}} \tag{12}$$

Mit Hilfe dieser statischen Ersatzlast können die Schnittgrößen (Biegemomente, Membrankräfte), die den Schnittgrößen infolge der dynamischen Belastung gleichwertig sind, ermittelt werden. Die Ermittlung kann nach der Elastizitäts- oder Bruchlinientheorie /11/ erfolgen, wobei z. Zt. eine Bruchlinientheorie jedoch nur für Platten vorliegt.

Um vergleichbare Wanddicken zu bekommen, werden daher in der vorliegenden Arbeit die Schnittgrößen sowohl bei Platten /8/, /9/, /12/ als auch bei der Kugel- und Kreiszylinderschale /10/, /13/ nach der Elastizitätstheorie bestimmt.

Um jedoch abschätzen zu können, welche Sicherheiten bis zum Bruch bei Anwendung der Elastizitätstheorie noch erwartet werden können, werden bei einer Platte die Biegemomente sowohl nach der Elastizitätstheorie als auch nach der Bruchlinientheorie bestimmt und mit diesen Biegemomenten eine Bemessung der Wanddicke durchgeführt.

Bei der Ermittlung der Schnittgrößen infolge der dynamischen Belastung empfiehlt es sich, zuerst die durch eine Einheitslast P_E verursachten Schnittgrößen (M_E, N_E) zu ermitteln und diese dann umzurechnen. Für das Biegemoment und für die Membrankraft infolge der dynamischen Belastung ergeben sich somit:

$$M_B = M_E \cdot \frac{P_{dyn_{max}}}{P_E} \cdot \alpha \tag{13}$$

$$N_B = N_E \cdot \frac{P_{dyn_{max}}}{P_E} \cdot \alpha \qquad \text{(nur bei Schalen)} \tag{14}$$

Hierbei bedeuten:

M_B, N_B maximales Biegemoment bzw. Membrankraft infolge der dynamischen Belastung

M_E, N_E maximales Biegemoment bzw. Membrankraft bei einer statischen Belastung durch eine Einheitslast P_E

$P_{dyn_{max}}$ maximale dynamische Stoßkraft

α dynamischer Lastfaktor

Diese einzelnen Größen hängen wiederum von verschiedenen Faktoren (Bild 4) ab. So sind

1. die maximale dynamische Stoßkraft $P_{dyn_{max}}$ vom Typ des aufprallenden Flugzeuges und von der Aufprallgeschwindigkeit (Stoßkraft-Zeit-Funktion),
2. der dynamische Lastfaktor α vom Typ des aufprallenden Flugzeuges, der Aufprallgeschwindigkeit (Verlauf und Impulsdauer der Stoßkraft-Zeit-Funktion) und den geometrischen Abmessungen des getroffenen Bauteils (Eigenschwingungsdauer) sowie
3. die Schnittgrößen M_E, N_E von der gewählten Einheitslast P_E, den Randbedingungen (Lagerung, Einspannverhältnisse), den geometrischen Abmessungen des betrachteten Bauteils, der Aufprallgeschwindigkeit und von dem verwendeten Berechnungsverfahren (Elastizitäts- bzw. Bruchlinientheorie)

abhängig. Diese Abhängigkeiten der einzelnen Größen müssen bei der Ermittlung des maximalen Biegemomentes infolge der dynamischen Belastung berücksichtigt werden.

Für die Bemessung der Wanddicke ist neben den Schnittgrößen infolge der dynamischen Belastung auch das Tragmoment (Fließmoment) der Betonstruktur erforderlich.

Wird bei der Bemessung der Wanddicken das n-freie Bemessungsverfahren /3/, /4/ angewendet, so kann das Tragmoment (Fließmoment) eines rechteckigen Betonquerschnittes (pro Längeneinheit) analytisch bestimmt werden. Bei einfacher Bewehrung ergeben sich folgende Beziehungen:

<u>Reine Biegung</u>

$$M_F = \beta_s \cdot \mu \left(1 - \frac{\beta_s \cdot \mu}{2 \cdot \beta_{WN}}\right) \cdot h^2 \qquad (15)$$

<u>Biegung mit Normalkraft</u>

$$M_F = \beta_s \cdot \mu \left(1 - \frac{\beta_s \cdot \mu}{2 \cdot \beta_{WN}}\right) \cdot h^2 + \left(\frac{\beta_s \cdot \mu}{\beta_{WN}} - \frac{N_B}{2 \cdot \beta_{WN} \cdot h} - 0.5\right) \cdot N_B \cdot h \qquad (16)$$

Hierbei bedeuten:

M_F Tragmoment pro Längeneinheit
β_s Festigkeit des Bewehrungsstahls an der Streckgrenze
μ Bewehrungsgrad
h Wanddicke (ohne Überdeckung)
β_{WN} Nenndruckfestigkeit des Betons
N_B Normalkraft (Membrankraft) infolge der Belastung (bei Druck negativ, bei Zug positiv)

Gl. (15) zeigt den gleichen Aufbau wie die Gleichung für das Fließmoment in der Fließgelenktheorie (Bruchlinientheorie) /11/.
Gl. (15) und Gl. (16) gelten für die Ermittlung des Tragmomentes (Fließmomentes) bei statischer Beanspruchung. Bei dynamischer Beanspruchung können die Nenndruckfestigkeit des Betons und die Festigkeit des Bewehrungsstahls an der Streckgrenze durch $\beta_{W_{N_{dyn}}}$ bzw. $\beta_{s_{dyn}}$ ersetzt werden (vergl. Abschnitt 2).

Durch Gleichsetzen des Tragmomentes M_F (Gl. (15) bzw. (16)) eines Betonquerschnittes und des Biegemomentes infolge der dynamischen Belastung (Gl. 13)

$$M_F = M_B \qquad (17)$$

wird eine Gleichung erzielt, die eine Ermittlung der erforderlichen Wanddicke gestattet (s. Bild 4). Aufgrund des Einflusses der einzelnen Faktoren muß Gl. (17) iterativ gelöst werden. In Bild 5 sind das Tragmoment einer Betonplatte und das Biegemoment infolge einer Belastung durch den Aufprall einer Boeing 707-320 bzw. eines Starfighter F-104 in Abhängigkeit von der Wanddicke dargestellt. Wie sich zeigt, schneiden sich die zu den einzelnen Momenten gehörenden Kurven. Die zu dem Schnittpunkt gehörende Wanddicke ist mindestens erforderlich, wenn ein Bruch der Betonkonstruktion verhindert werden soll. Bei größeren Wanddicken ist der Abstand zwischen den beiden Kurven ein Maß für die Sicherheit. Durch die Variation der Aufprallgeschwindigkeiten wird deutlich, welchen Einfluß diese Größe auf die erforderliche Wanddicke hat. Der zum Teil wellenförmige Verlauf bei den Kurven für das Biegemoment infolge der äußeren Belastung ist auf den Verlauf des dynamischen Lastfaktors (Bild 3) zurückzuführen.

Die Wanddicken, die zum Schutze von Sicherheitseinrichtungen durch bauliche Maßnahmen erforderlich sind, sind in den Bildern 6 und 7 für den Aufprall einer Boeing 707-320 und den eines Starfighter F-104 in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit dargestellt. Hierbei gibt Bild 6 die Wanddicke für kastenförmige und Bild 7 für schalenförmige Gebäude wieder. Für die Platten bzw. Schalen wurden die im Kernkraftwerksbau üblichen Abmessungen gewählt.

Die folgende Tabelle zeigt die Grenzwerte der erforderlichen Wanddicken für die untersuchten Geschwindigkeitsbereiche:

Bezeichnung	Boeing 707-320		Starfighter F-104	
	300 km/h	800 km/h	300 km/h	1000 km/h
Platte	1,5 m	4,5 m	0,5 m	3,0 m
Kugel- bzw. Kreiszylinderschale	1,0 m	3,5 m	0,75 m	3,5 m

Ergänzend zu den beim Aufprall einer Boeing 707-320 bzw. eines Starfighters F-104 ermittelten Wanddicken ist durch eine Abschätzung versucht worden festzustellen, welche Wanddicke beim Aufprall eines Kleinflugzeuges (Dornier DO 27) mit einem Gewicht von 2 Mp bzw. bei dem eines Großflugzeuges (Boeing 747) bei einem Gewicht von 350 Mp beim Aufprall auf eine Halbkugelschale erforderlich ist. Die hierbei gewählten Aufprallgeschwindigkeiten betragen bei der Dornier DO 27 144 km/h und bei der Boeing 747 360 km/h. Die bei dieser Belastung erforderlichen Wanddicken betragen bei der Dornier DO 27 ungefähr 0,25 m und bei der Boeing 747 ungefähr 2,00 m. Die beim Aufprall einer Boeing 747 erforderliche Wanddicke erscheint im Vergleich zu der beim Aufprall einer

Boeing 707-320 bei gleicher Aufprallgeschwindigkeit (ungefähr 1,10 m) gering. Hierbei muß jedoch berücksichtigt werden, daß die Aufprallfläche bei der Boeing 747 um den Faktor 2,3 größer ist als bei der Boeing 707-320, was sich auf die Bemessung der Wanddicke günstig auswirkt.

Wird bei diesen Flugzeugtypen eine ähnliche Geschwindigkeit-Wanddicken-Abhängigkeit wie bei der Boeing 707-320 vorausgesetzt - das Abhängigkeitsverhältnis beim Starfighter ist günstiger, d. h. die Geschwindigkeit hat auf die erforderliche Wanddicke einen geringeren Einfluß - so ist bei Kleinflugzeugen eine erforderliche Wanddicke von ca. 0,4 m (bei 200 km/h) und bei einer Boeing 747 eine von ca. 5 m (bei 800 km/h) als Maximalwert zu erwarten.

Bei der Ermittlung der oben angegebenen und diskutierten Wanddicken wurden die Biegemomente infolge der äußeren Belastung unter Anwendung der Elastizitätstheorie bestimmt. Um jedoch abschätzen zu können, welche Sicherheiten bis zum Bruch bei Anwendung dieser Theorie erwartet werden können, werden bei einer Platte die Biegemomente infolge der äußeren Belastung sowohl nach der Elastizitätstheorie als auch nach der Bruchlinientheorie bestimmt und mit diesen Biegemomenten eine Bemessung der Wanddicke durchgeführt. Das Ergebnis der Berechnungen ist in Bild 8 dargestellt. Es zeigt sich, daß bei der Ermittlung des Biegemomentes nach der Elastizitätstheorie die erforderlichen Wanddicken um ungefähr 20 % höher liegen als bei der Bestimmung des Biegemomentes nach der Bruchlinientheorie.

In Bild 8 ist ferner die Wanddicke zum Schutz gegen Perforation in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit dargestellt. Ein Vergleich mit den anderen Kurven zeigt, daß die erforderliche Wanddicke aufgrund der Belastung durch Biegung größer ist als die Wanddicke zum Schutze gegen Perforation.

3.2.2 Mehr-Massenschwinger mit mehreren Freiheitsgraden (Finite Element Methode)

Ergänzend zu den in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen dynamischen Berechnungen mittels eines Ein-Massenschwingers wird das dynamische Verhalten eines gesamten Gebäudes mittels eines Mehr-Massenschwingers ermittelt. Zur Durchführung der numerischen Berechnungen wird das Rechenprogramm ASKA-DYNAN /14/, das nach der Finite Element Methode arbeitet, verwendet. Die verwendete ASKA-DYNAN Version gestattet, das linear-elastische Verhalten einer Baustruktur zu erfassen. Bei der betrachteten Baustruktur handelt es sich um das Reaktorgebäude eines Druckwasserreaktors. Es besteht aus einer senkrecht stehenden Kreiszylinderschale, die an der Gründung verankert ist und oben von einer Halbkugelschale abgeschlossen wird. Der Innenradius und die Höhe der Kreiszylinderschale betragen 30 m und die Wanddicke 2 m. Zur Vereinfachung des Problems werden etwaige Versteifungsringe nicht berücksichtigt.

Es wird der waagerechte Aufprall einer Boeing 707-320 mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 500 km/h (s. Bild 1) bei halber Höhe der Halbkugelschale betrachtet.

Bei der Idealisierung der Baustruktur werden Plattenelemente (TRIB3) gewählt. Im einzelnen sei auf /14/ verwiesen.

Bild 9 zeigt die Verschiebungen und die Beschleunigungen an der Aufprallstelle in Abhängigkeit von der Zeit. Hierbei zeigt sich, daß die Masse des Gebäudes an der Aufprallstelle eine Schwingung um die Nullinie ausführt. Die maximalen Verschiebungen betragen:

positive x-Richtung	6,7 mm
negative x-Richtung	4,3 mm

Die maximalen Verschiebungen in Richtung der positiven x-Achse treten hierbei ungefähr zum gleichen Zeitpunkt auf wie die maximale Stoßkraft (s. Bild 1).

Die maximalen Beschleunigungen betragen

positive x-Richtung	12 m/s^2
negative x-Richtung	15 m/s^2

Das Bild 10 zeigt die Verschiebungen des Reaktorgebäudes in der x, z-Schnittebene zur Zeit t = 0,160 s nach dem Aufprall. Das Nebeneinander der Konturen der unverformten und der verformten Struktur läßt deutlich werden, wie die gesamte Struktur sich in Abhängigkeit von der Zeit verformt.

In Bild 11 ist der Verlauf des maximalen Biegemomentes und der dazu gehörenden Membrankraft dargestellt. Der Verlauf der Kurven zeigt, daß das maximale Biegemoment an der Aufprallstelle auftritt und bis zur Gründung auf ungefähr 30 % abklingt. Die Schnittgrößen sind hierbei auf die Biegemomente bzw. Membrankräfte an der Aufprallstelle bezogen.

3.3 Vergleich der mittels eines Ein- bzw. Mehr-Massenschwingers ermittelten dynamischen Verschiebungen

In den vorhergehenden Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 wurde das dynamische Verhalten einer Baustruktur beim Aufprall eines Flugzeuges mittels eines Ein- bzw. Mehr-Massenschwingers untersucht. Bei der Behandlung des Ein-Massenschwingers zeigte sich, daß die dynamische Verschiebung eine wesentliche Größe ist, um die infolge der dynamischen Belastung auftretenden Beanspruchungen (Schnittgrößen) zu ermitteln (s. Abschnitt 3.2.1). Um festzustellen, welche Abweichungen auftreten, wenn bei der Bestimmung der dynamischen Verschiebungen nicht ein Ein- sondern ein Mehr-Massenschwinger verwendet wird, wurde eine Vergleichsrechnung durchgeführt. Hierbei wurde der senkrechte Aufprall einer Boeing 707-320 auf eine Halbkugelschale betrachtet. Die Ergebnisse sind in Bild 12 dargestellt. Hierbei zeigt sich, daß die maximalen dynamischen Verschiebungen, die für die auftretenden Beanspruchungen maßgebend sind, für einen Ein- bzw. Mehr-Massenschwinger gut übereinstimmen. Die Kurve für den Mehr-Massenschwinger zeigt jedoch einen gleichmäßigeren Verlauf als die Kurve für den Ein-Massenschwinger, was auf den Einfluß der verschiedenen Eigenformen und der Dämpfung beim Mehr-Massenschwinger zurückzuführen ist.

4. Druckwelle

Unter einer Druckwelle sei hier eine Luftdruckwelle, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet, verstanden. Sie kann als mögliche Folge einer Tankschiff- bzw. Tankzugkollision angesehen werden.

Bei der Belastung eines Einzelbauteils (z. B. einer ebenen Betonplatte), das von einer normal zur Oberfläche wirkenden Druckwelle direkt getroffen wird, kann mit einer gleichmäßig verteilten Flächenlast gerechnet werden.

Dagegen handelt es sich beim Aufprall einer Druckwelle auf ein Gebäude um eine ungleichmäßig verteilte Flächenlast, deren Verteilung sich aufgrund der Fortbewegung der Druckwelle mit der Zeit ändert /15/. In Bild 13 ist der Verlauf der Druckwelle beim Aufprall auf ein Reaktorgebäude (Druckwasserreaktor), bestehend aus einer Halbkugel- und einer Kreiszylinderschale, dargestellt.

Der bei dieser Druck-Zeit-Funktion relativ hohe maximale Überdruck von 2,0 kp/cm^2 wurde gewählt, um festzustellen, welchen Einfluß derartig hohe Drücke auf die baulichen Schutzmaßnahmen haben.

Es zeigt sich, daß zu Beginn des Stoßvorganges die Belastung an der der Druckwelle zugewandten Fläche des Reaktorgebäudes (Stirnfläche) am größten ist. Dagegen sind die Seitenflächen und die Rückfläche noch unbelastet. Während des Stoßvorganges breitet sich die Druckwelle weiter mit Schallgeschwindigkeit aus und umströmt das Reaktorgebäude. Hierbei ändern sich die Belastungsverhältnisse, und zwar derartig, daß zuerst die Belastung an den Seitenflächen und danach die an der Rückfläche ansteigt, wobei gleichzeitig die Belastung an der Stirnfläche abnimmt, d. h. an der Stirnfläche erfolgt eine Entlastung und an den Seitenflächen und der Rückfläche eine zunehmende Belastung des Reaktorgebäudes. An den Seitenflächen und der Rückfläche steigt die Belastung jedoch nicht bis auf den maximalen Wert, wie er an der Stirnfläche aufgrund des Aufpralls normal zur Oberfläche auftritt, an. Nach Erreichen der für die Seitenflächen und der Rückfläche spezifischen maximalen Belastung sinkt auch diese wieder auf Null ab. Beim Aufprall einer Druckwelle auf eine Baustruktur handelt es sich somit um eine dynamische Belastung durch eine gleichmäßig bzw. ungleichmäßig verteilte Flächenlast.

Die hierdurch auftretende Beanspruchung ist

1. von der Druckverteilung und der Wirkungsdauer der Druckwelle sowie
2. von der Form und den Abmessungen der getroffenen Baustruktur (ebene Platte, Kugel- bzw. Kreiszylinderschale)

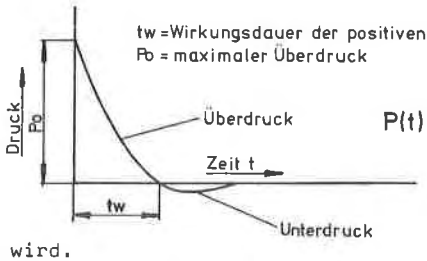
abhängig. Zur Ermittlung der Beanspruchung wird der gleiche Weg beschritten wie beim Flugzeugabstürz (Abschnitt 3.2.), d. h. es werden zwei Ersatzsysteme betrachtet, und zwar

1. ein Ein-Massenschwinger mit einem Freiheitsgrad und
2. ein Mehr-Massenschwinger mit mehreren Freiheitsgraden (Finite Element Methode).

Auf die mit diesen Ersatzsystemen erzielten Ergebnisse wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

4.1 Ein-Massenschwinger mit einem Freiheitsgrad

Das hier betrachtete dynamische Ersatzsystem besteht aus einer Einzelmasse, die von einer gewichtslosen Feder getragen und der Einwirkung einer Kraft mit einem Verlauf nach folgender Skizze und Gleichung



$$P(t) = Po \cdot \left(1 - \frac{t}{tw}\right) e^{-\frac{t}{tw}} \qquad (18)$$

ausgesetzt wird.

Die Betrachtung eines solchen Systems /16/ führt zur Ermittlung des dynamischen Lastfaktors und der statischen Ersatzlast (vergl. Abschnitt 3.2.1). Zur genauen Definition dieser Größen sei auf Gl. (7) und Gl. (12) verwiesen.

In Bild 14 ist der dynamische Lastfaktor eines Ein-Massenschwingers bei Belastung durch eine Druckwelle in Abhängigkeit von der Eigenschwingungsdauer (Eigenfrequenz) und der Wirkungsdauer der positiven Phase dargestellt. Es zeigt sich, daß

1. bei kleiner werdender Eigenschwingungsdauer (größer werdender Eigenfrequenz) der dynamische Lastfaktor ansteigt und als Grenzwert 2 erreicht.
2. mit zunehmender Wirkungsdauer der positiven Phase der dynamische Lastfaktor ansteigt.

Die für die Ermittlung des dynamischen Lastfaktors notwendige Eigenschwingungsdauer des betrachteten Systems kann nach analytischen Beziehungen /8/, /9/ oder näherungsweise mittels der statischen Biegelinie bestimmt werden.

Die Ermittlung der Schnittgrößen und die Bemessung der Wanddicken erfolgt auf dem gleichen Wege wie beim Flugzeugabsturz.

Um aufzuzeigen, welchen Einfluß der maximale Überdruck und die Wirkungsdauer der positiven Phase auf die erforderliche Wanddicke haben, werden diese Größen bei der Bemessung einer ebenen Platte (Seitenwand Notschaltanlage 30 m x 20 m) variiert. Die hierbei erzielten Ergebnisse sind im Bild 15 dargestellt. Wie sich zeigt, steigt die erforderliche Wanddicke mit zunehmender Wirkungsdauer an, wobei der Anstieg bei kleiner Wirkungsdauer stärker ist als bei größerer. Werden z. B. in Anlehnung an Bild 13 eine Wirkungsdauer von 0,2 s und ein maximaler Überdruck von 2,0 kp/cm^2 gewählt, so ergibt sich eine erforderliche Wanddicke von ungefähr 1,25 m. Bei einem maximalen Überdruck von 0,45 kp/cm^2, wie er z. B. von der RSK für die Auslegung des Kern-

kraftwerkes Philippsburg -2 gegen Druckwellen empfohlen wird /17/, ergibt sich in diesem Fall eine erforderliche Wanddicke von ungefähr 0,5 m. Mit dieser Wanddicke dürfte man in die Nähe der Wanddicken bei normaler Bemessung kommen.

4.2 Mehr-Massenschwinger mit mehreren Freiheitsgraden

Neben den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Berechnungen für die Auslegung gegen Druckwellen mittels eines Ein-Massenschwingers wird das dynamische Verhalten eines gesamten Gebäudes mittels eines Mehr-Massenschwingers ermittelt. Zur Durchführung der numerischen Berechnungen wird das Rechenprogramm ASKA-DYNAN /14/ verwendet.

Bei dieser Untersuchung wird die gleiche Baustruktur wie beim Flugzeugabsturz betrachtet. In bezug auf die Beschreibung des mathematischen Modells sei auf /14/ verwiesen.

Die bei dieser Rechnung verwendete Druck-Zeit-Funktion ist in Bild 13 dargestellt. Hierbei betragen der maximale Überdruck 2,0 kp/cm^2 und die Wirkungsdauer 0,5 s.

Bild 16 zeigt die maximalen Verschiebungen und Beschleunigungen an der Stirnfläche des Reaktorgebäudes im Bereich der Kreiszylinderschale. Wie sich zeigt, schwingt die Gebäudewand um die Nullinie in die positive und negative x-Richtung. Die maximalen Verschiebungen in diese Richtungen betragen:

positive x-Richtung 8 mm
negative x-Richtung 5,6 mm

Die maximalen Beschleunigungen liegen für
die positive x-Richtung bei 36 m/s^2 und
die negative x-Richtung bei 31,5 m/s^2.

In dem Bild 17 sind die dynamischen Verschiebungen des Reaktorgebäudes in der x, z-Schnittebene für den Zeitpunkt t = 0,030 s nach dem Aufprall dargestellt. Aus dieser Darstellung ist zu ersehen, daß bei einer Belastung des Reaktorgebäudes durch eine Druckwelle die gesamte Struktur starke Verschiebungen erleidet. Außerdem ist erkennbar, daß die Verschiebungen im Bereich der Kreiszylinderschale lokal wesentlich größer sind als die der Halbkugelschale.

Bild 18 zeigt den Verlauf des Biegemomentes und der Membrankraft für den gleichen Zeitpunkt, wobei es sich um normierte Größen handelt. Als Bezugsgröße dient das zum betrachteten Zeitpunkt auftretende maximale Biegemoment an der Vorderseite. Es zeigt sich, daß zu diesem Zeitpunkt das Biegemoment und die Membrankraft an der Vorderseite wesentlich größer sind als an der Rückseite. Das maximale Biegemoment tritt hierbei an der Gründung und die maximale Membrankraft in der Nähe der Übergangsstelle Halbkugelschale - Kreiszylinderschale auf.

5. Vergleich zwischen Flugzeugabsturz und Druckwelle

Um festzustellen, welche Bedeutung einer Belastung durch einen Flugzeugabsturz bzw. durch eine Druckwelle beizumessen ist, werden die in beiden Fällen

für eine ebene Betonplatte ermittelten Wanddicken verglichen (Bild 19).

Der Vergleich zeigt, daß z. B. bei einer Wanddicke von 1 m der Aufprall eines Starfighters F-104 bis zu einer Aufprallgeschwindigkeit von 350 km/h und der einer Druckwelle bis zu einem maximalen Überdruck von 1,2 kp/cm^2 bei einer Wirkungsdauer von 0,4 s bzw. bis 2,1 kp/cm^2 bei einer Wirkungsdauer von 0,1 s abgedeckt sind. Der Aufprall einer Boeing 707-320 ist in diesem Falle selbst bei 300 km/h noch nicht abgedeckt.

Bei einem Schutz gegen den Aufprall einer Boeing 707-320 mit einer Aufprallgeschwindigkeit bis zu 300 km/h ist der Schutz gegen den Aufprall eines Starfighters bis zu einer Aufprallgeschwindigkeit von ungefähr 500 km/h und gegen eine Belastung durch eine Druckwelle bis zu einem maximalen Überdruck von ungefähr 2,5 kp/cm^2 bei einer Wirkungsdauer von 0,4 s bzw. einem maximalen Überdruck von ungefähr 4,0 kp/cm^2 bei einer Wirkungsdauer von 0,1 s abgedeckt.

Diese Ergebnisse lassen somit erkennen, daß die Beanspruchung einer Baustruktur durch eine Druckwelle geringer ist als durch einen Flugzeugabsturz, wenn es sich bei der Druckwelle um maximale Überdrücke handelt, die in der hier diskutierten Größenordnung liegen.

6. Schlußbetrachtung

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, die bei der Bemessung von Kernkraftwerksgebäuden zum Schutze gegen Flugzeugabsturz und Druckwelle auftretenden Probleme zu analysieren und Wege zu deren Lösung zu finden.

Das Ergebnis der Untersuchung kann wie folgt spezifiziert werden:

1. Bei der Betrachtung des dynamischen Verhaltens mittels eines Ein-Massenschwingers stellt der dynamische Lastfaktor eine wesentliche Größe dar und hat auf die erforderliche Wanddicke einen großen Einfluß.
2. Die zum Schutz gegen Flugzeugabsturz erforderliche Wanddicke wird bei elastisch reagierenden Bauteilen von der Biegebeanspruchung bestimmt, d. h. die Schutzdicke gegen Perforation ist wesentlich kleiner als die erforderliche Wanddicke infolge der Biegebeanspruchung.
3. Wird bei der Bestimmung des Biegemomentes infolge äußerer Belastung die Elastizitätstheorie angewendet, so kann die erforderliche Wanddicke um 20 % höher liegen als bei einer Bestimmung des Biegemomentes nach der Bruchlinientheorie.
4. Beim Aufprall eines Flugzeuges auf ein Gebäude tritt die maximale Beanspruchung nicht immer an der Aufprallstelle auf. Sie kann auch an der Gründung auftreten.
5. Bei der Belastung einer Baustruktur durch einen Flugzeugabsturz treten lokal wesentlich größere Beanspruchungen auf als bei einer Belastung durch eine Druckwelle.
6. Der Schutz gegen den Aufprall einer Boeing 707-320 mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 300 km/h schließt den Schutz gegen den Aufprall eines Starfighters bis zu einer Aufprallgeschwindigkeit von 500 km/h und eine

Belastung durch eine Druckwelle bis zu einem maximalen Überdruck von 2,5 kp/cm^2 bei einer Wirkungsdauer von 0,4 s ein.

7. Quellenverzeichnis

/1/ Beton und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung, DIN 1045, Jan. 1972

/2/ Materialfestigkeiten und Konstruktionselemente, Schriftenreihe des Bundesministeriums für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung, EM 1110 - 345 - 414

/3/ Rüsch, H., Bruchlast und Bruchsicherheitsnachweis bei Biegungsbeanspruchung von Stahlbeton unter besonderer Berücksichtigung der Vorspannung, Beton- und Stahlbetonbau 15, Nr.9, 1950, S. 215-220

/4/ Lüdecke, E., Das Für und Wider der n-freien Bemessung, Beton- und Stahlbetonbau 51 (1956) 11, S. 255-259

/5/ Riera, J.D., On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact Forces, Nuclear Engineering and Design 8 (1968) S. 415-425

/6/ Entwicklungsprogramm zur Untersuchung wirksamen Gebäudeschutzes, AEG-Bericht Nr. 1920, Mai 1970

/7/ Chelapati, C.V., and Kennedy, R.P., Probabilistic Assessment of Aircraft, Hazard For Nuclear Power Plants, Nuclear Engineering and Design 19 (1972) S. 333-364

/8/ Bares, R., Berechnungstafeln für Platten und Wandscheiben, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin

/9/ Szabo, I., Höhere Technische Mechanik, Springer-Verlag

/10/ Bijlaard, P.P., Computation of the Stresses From Local Loads in Spherical Pressure Vessels or Pressure Vessel Heads, The Welding Journal 34, 1957, S. 591-598

/11/ Sawczuk und Jaeger, Grenztragfähigkeits-Theorie der Platten Springer-Verlag

/12/ Girkmann, K., Flächentragwerke, Springer-Verlag

/13/ Bijlaard, P.P., Stresses from Local Loadings in Cylindrical Pressure Vessels, Trans. ASME, 77, 1955, S. 805-816

/14/ ASKA, User's Reference Manuel ISD-Report No. 73, Stuttgart 1971, DYNAN, User's Reference Manual, Revision A ISD-Report No. 97, Stuttgart 1971, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, University of Stuttgart, Direktor Prof. J. H. Argyris

/15/ Waffenwirkungen, Schriftenreihe des Bundesministeriums für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung, EM 1110 - 345 - 413

/16/ Prinzipien der dynamischen Berechnungen und Konstruktion, Schriftenreihe des Bundesministeriums für Wohnungswesen, Städtbau und Raumordnung, EM 1110 - 345 - 415

/17/ Brennstoff-Wärme-Kraft, 25 (1973), Nr. 2, Seite 64

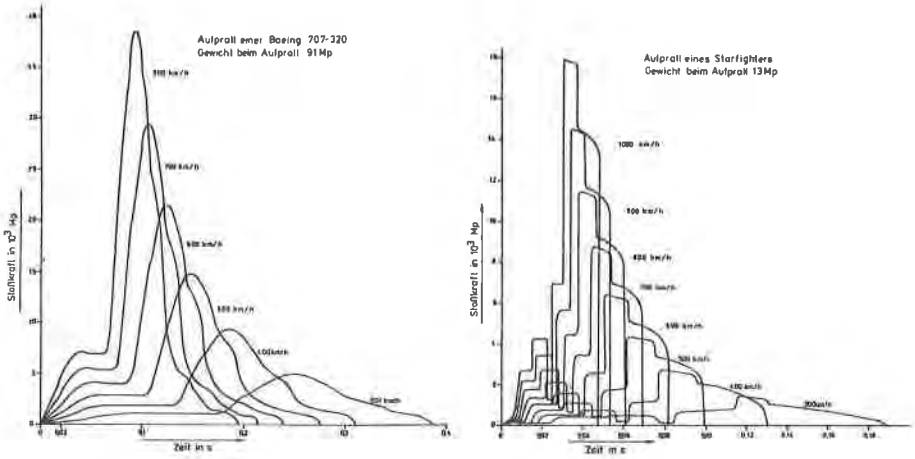
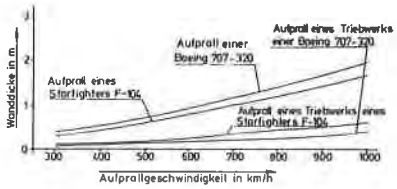


Bild 1: Stoßkraft-Zeit-Funktion



Gewicht der Boeing 707-320 beim Aufprall 91,0 Mp
Aufprallfläche 18,4 m²

Gewicht des Starfighters F-104 beim Aufprall 13,0 Mp
Aufprallfläche 3,24 m²

Bild 2 : Schutzdicken gegen Perforation

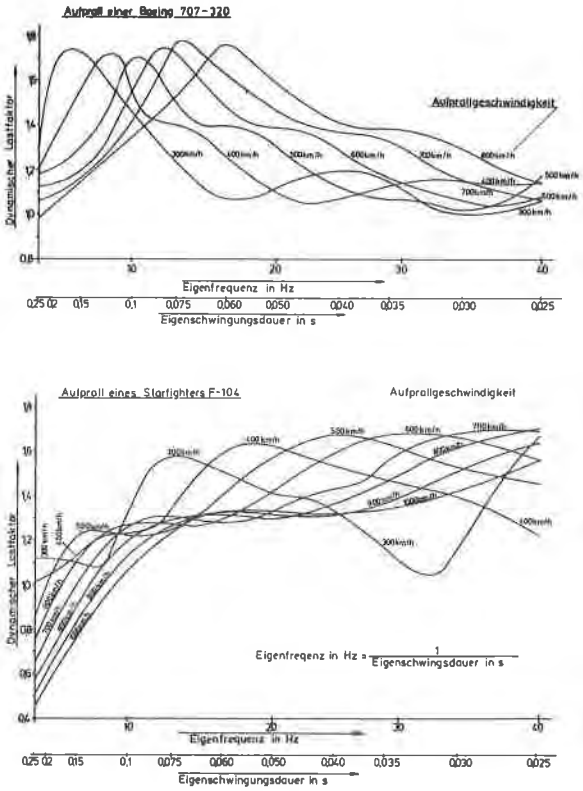
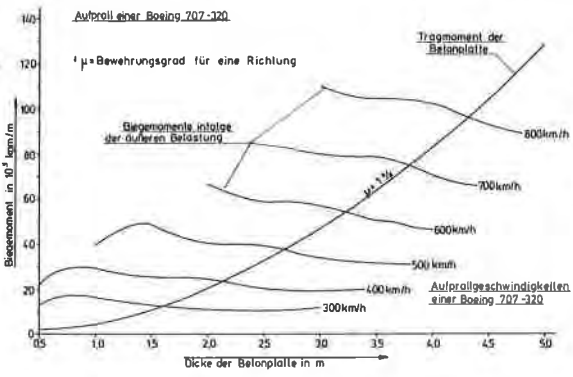


Bild 3: Dynamischer Lastfaktor beim Aufprall eines Flugzeuges
Ein-Massenschwinger mit einem Freiheitsgrad

Bezeichnung		Platte	Kugelschale		Verwendete Größen	
Stoßkraft-Zeit-Funktion	P_{dyn}	$P_{dyn}(F_T, v_A, t)$			FT v_A t	Flugzeugtyp Aufprallgeschwindigkeit Zeit
Aufprallfläche	F_A	$F_A(F_T, t) \xrightarrow[\text{Annahme}]{\text{Durch}} \overline{F_A}(F_T)$			—	—
Eigenschwingungsdauer des Ein-Massenschwingers	T_e	$T_e(a, b, h)$ Wanddicke h geschätzt	$T_e(R)$		a b h R	Länge der Betonplatte Breite der Betonplatte Wanddicke der Betonplatte (geschätzt) Interradius der Kugelschale
Dynamischer Lastfaktor	α	$\alpha(F_T, v_A, T_e, h)$	$\alpha(F_T, v_A, T_e)$		—	—
Statische Ersatzlast	P_{stat}	$P_{stat}(F_T, v_A, T_e(h)) = P_{dyn_{max}} \cdot \alpha(F_T, v_A, T_e(h))$	$P_{stat}(F_T, v_A, T_e) = P_{dyn_{max}} \cdot \alpha(F_T, v_A, T_e)$		—	—
Schnittmomente und Schnittkräfte bei einer Einheitslast P_E	M_E N_E	$M_E(P_E, F_A, a, b)$ $N_E = 0$	$M_E(P_E, F_A, R, h)$ Wanddicke h geschätzt $N_E(P_E, F_A, R, h)$		P_E h	Einheitslast Wanddicke der Kugelschale (geschätzt)
Biegemomente und Normalkräfte (Membranlasten) infolge der äußeren Belastung	M_B N_B	$M_B(F_T, M_E, v_A, T_e(h)) = M_E \frac{P_{dyn_{max}}}{P_E} \alpha(h)$ $N_B = 0$	$M_B(F_T, M_E(h), v_A, T_e) = M_E(h) \cdot \frac{P_{dyn_{max}}}{P_E} \alpha$ $N_B(F_T, N_E(h), v_A, T_e) = N_E(h) \frac{P_{dyn_{max}}}{P_E} \alpha$			
Tragmoment des Betonquerschnittes	M_{Tr}	$M_{Tr}(\mu, \beta_{w_N}, \beta_s, h) = F_o(\mu, \beta_{w_N}, \beta_s) \cdot h^2$	$M_{Tr}(\mu, \beta_{w_N}, \beta_s, N_B(h), h) = F_o(\mu, \beta_{w_N}, \beta_s, \frac{N_B(h)}{h}) \cdot h^2 = M_T(h)$		μ β_{w_N} β_s	Bewehrungsgrad Normdruckfestigkeit des Betons Fließgrenze des Betonstahls an der Streckgrenze
Erforderliche Wanddicke	h_h	$h(M_B(h), M_{Tr}(h))$	$h(M_B(h), M_{Tr}(h), M_B(h), h)$			
Vergleich der geschätzten Wanddicke h mit der berechneten h_h		$(h - h_h) \leq \varepsilon h_h$				

Bild 4 : Darstellung des Rechenablaufes



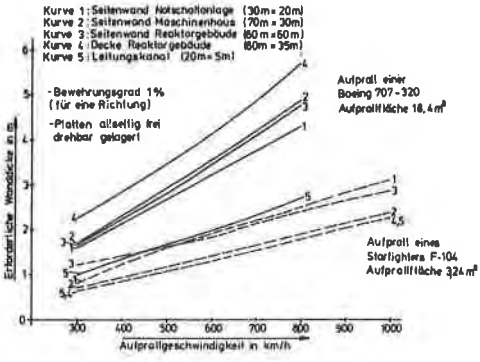


Bild 6: Erforderliche Wanddicken von Betonplatten beim Aufprall einer Boeing 707-320 bzw. eines Starfighters F-104

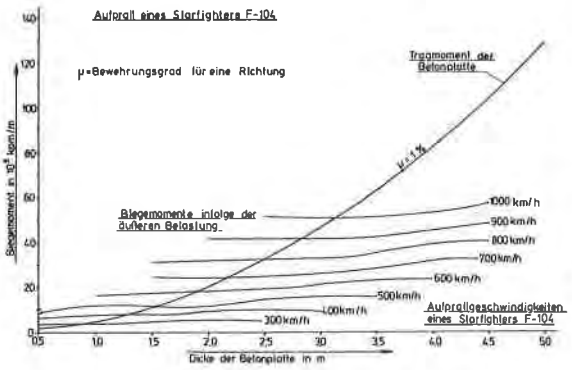


Bild 5 : Tragmoment (Fließmoment) einer Betonplatte und Biegemoment infolge einer Belastung durch den Aufprall eines Flugzeuges
Abmessung der Betonplatte 30m × 20m

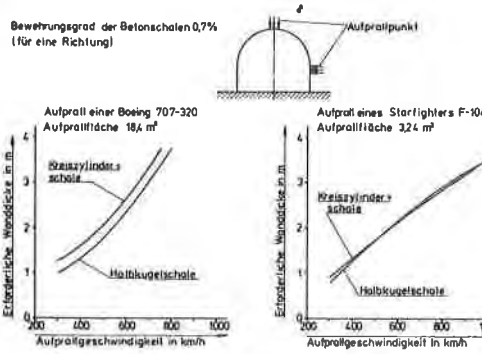


Bild 7 : Erforderliche Wanddicke einer Halbkugelschale und einer Kreiszylinderschale

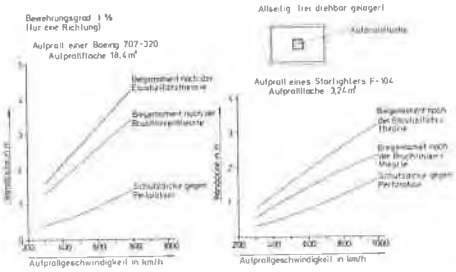


Bild 8 Wanddicken einer Betonplatte bei Bemessung unter Anwendung verschiedener Verfahren
Seitenwand Notschattenanlage (30m×20m)

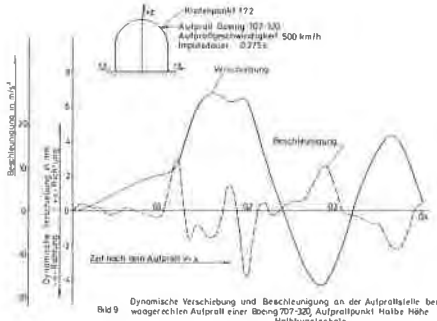
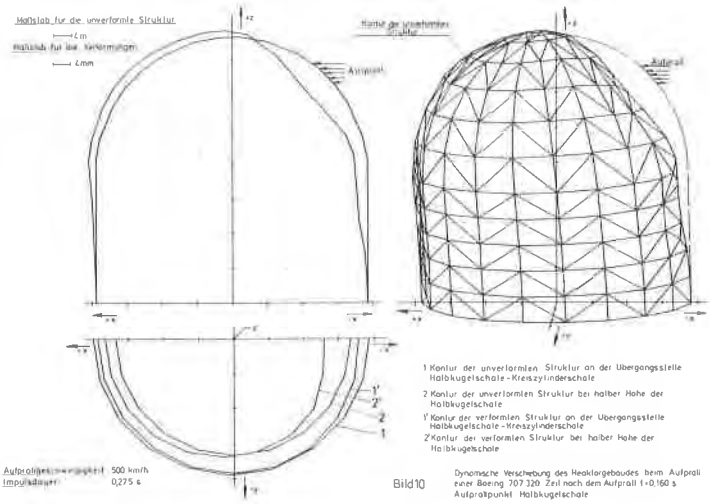


Bild 9 Dynamische Verschiebung und Beschleunigung an der Aufprallstelle beim waagerechten Aufprall einer Boeing 707-320, Aufprallpunkt Halbe Höhe Halbkugelschale



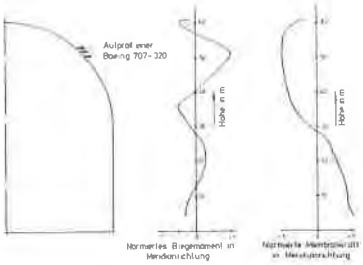
1 Kontur der unverformten Struktur an der Übergangsstelle Halbkugelschale - Kreszylinderschale

2 Kontur der unverformten Struktur bei halber Höhe der Halbkugelschale

1' Kontur der verformten Struktur an der Übergangsstelle Halbkugelschale - Kreszylinderschale

2' Kontur der verformten Struktur bei halber Höhe der Halbkugelschale

Bild 10 Dynamische Verschiebung des Hexklorgebäudes beim Aufprall einer Boeing 707-320 Zeit nach dem Aufprall t = 0,160 s
Aufprallpunkt Halbkugelschale



Verlauf des maximalen Biegemomentes und der dazugehörenden Membrankraft
Bild 11 (normierte Größen), Aufprallpunkt Halbe Höhe Halbkugelschale
Zeit nach dem Aufprall t = 0,160 s

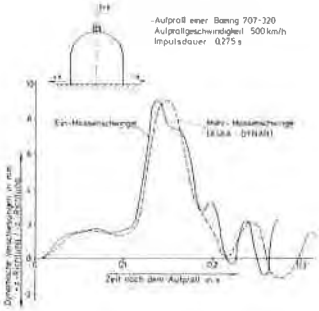


Bild 12 Vergleich der dynamischen Verschiebungen bei einem Ein- bzw. Mehrmassenschwinger

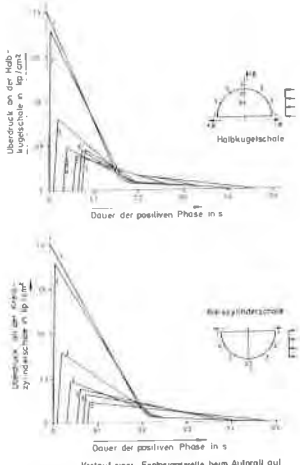


Bild 13: Verlauf einer Explosionswelle beim Aufprall auf eine Halbkugel- und Kreiszylinderschale (maximaler Überdruck 2,0 kp/cm²)

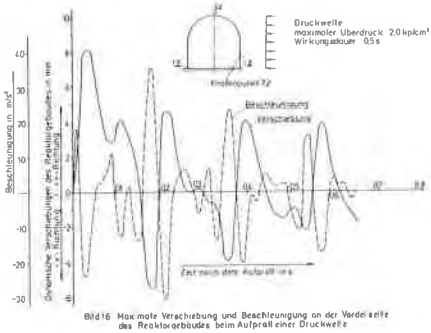


Bild 16 Maximale Verschiebung und Beschleunigung an der Vorderseite des Reaktorgebäudes beim Aufprall einer Druckwelle

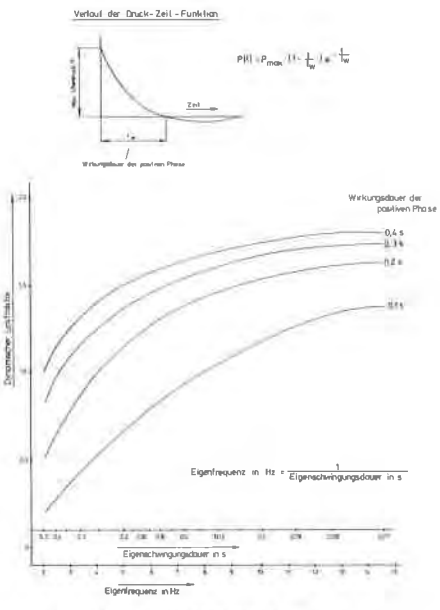


Bild 14 : Dynamischer Lastfaktor beim Aufprall einer Druckwelle
Ein-Massenschwinger mit einem Freiheitsgrad

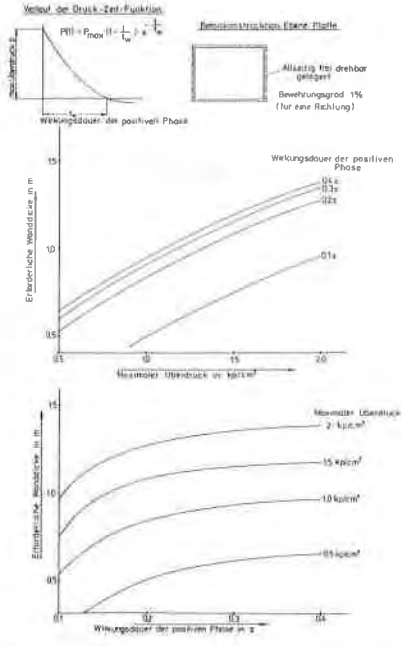


Bild 15 : Erforderliche Wanddicke einer Betonplatte bei Belastung durch eine Druckwelle
Abmessungen der Betonplatte 30m×20m z.B. Seitenwand Notschaltanlage

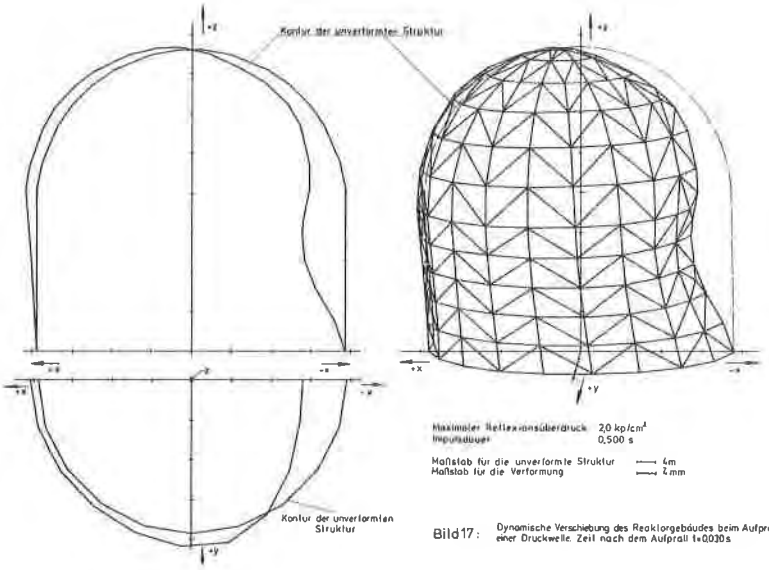


Bild 17: Dynamische Verschiebung des Reaktorgebäudes beim Aufprall einer Druckwelle. Zeit nach dem Aufprall t=0,030 s

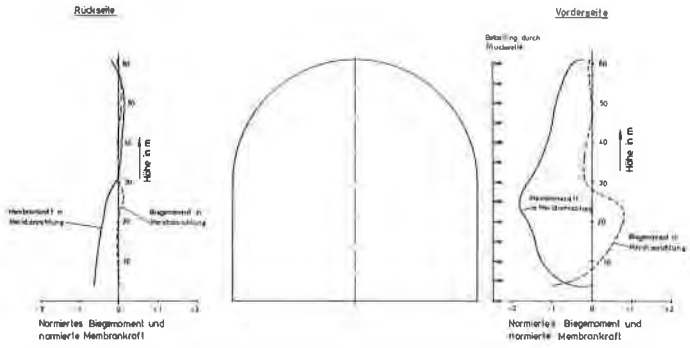


Bild 18: Verteilung des Biegemomentes und der Membrankraft (normierte Größen) nach t = 0,030 s bei Belastung durch eine Druckwelle

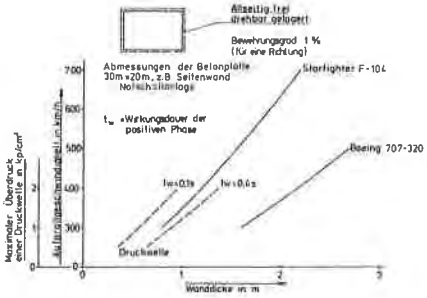


Bild 19: Vergleich der erforderlichen Wanddicken bei Belastung einer Betonplatte durch Flugzeugabsturz bzw. Druckwelle