Dr.-Ing. P. Dräger (KTG), e-mail: PeDraeger@aol.com München, den 21.01.2002

Zur Widerstandsfähigkeit von Sicherheitsbehältern für Kernkraftwerke gegen Terrorattacken mit großen Verkehrsflugzeugen

Unter dem Eindruck der Attentate auf das *World Trade Center* (WTC) in New York sind in der Bundesrepublik Unsicherheiten entstanden, die einen fruchtbaren Boden für Spekulationen hinsichtlich der Gefahren liefern, die bei einem ähnlichen Attentat auf Kernkraftwerke (KKW) drohen. Ein solches Ereignis ist nicht in den Auslegungsprozess von KKW gegen Einwirkungen von außen (EVA) eingeflossen. Einen Schwerpunkt der Diskussion bildet die Widerstandsfähigkeit – und hier besonders die Festigkeit gegen ein Durchschlagen – des Reaktorgebäudes (RG), in welchem sich der Reaktor und wesentliche Sicherheitseinrichtungen befinden. Dieses besteht bei deutschen KKW aus einer Stahlbetonhülle, die einen stählernen Sicherheitsbehälter (SB) umschließt. Die vorliegenden Überlegungen befassen sich vorrangig mit der Durchschlagsfestigkeit des RG beim Aufschlag großer Verkehrsflugzeuge bzw. Triebwerke. Die genaue Untersuchung dieser Ereignisse ist Aufgabe von Mechanikern und Bauingenieuren und erfordert Methoden, die erstens die räumliche Verteilung der Materialien im Flugzeug, zweitens eine räumliche und zeitliche Auflösung der durch den Aufschlag dieser Materialien verursachten Kräfte und drittens die Reaktion des RG einschließlich seiner Einbauten in allen seinen Einzelheiten erfassen. Dennoch kann mit einfachen Mitteln die Größenordnung der zu erwartenden Belastungen angegeben werden.

1. AUSLEGUNGSGRUNDLAGEN

Die *Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke* /1/ (Phase A, Fachband 4, GRS 1980) widmet ein Kapitel dem zufälligen Absturz eines Kampfflugzeugs vom Typ Phantom (Phantom RF-4E) auf ein Reaktorgebäude. Einige deutsche KKW sind nicht explizit gegen Flugzeugabsturz ausgelegt, einige gegen den Absturz eines F104-G (Starfighter), die Mehrzahl gegen den rechtwinkligen Aufprall eines Kampfflugzeugs vom Typ Phantom mit 20 t Gewicht und einer Geschwindigkeit von 215 m/s bei einer Aufschlagsfläche von 7 m². Bild 1 zeigt für dieses Ereignis den Stoßlastverlauf über der Zeit /1/.

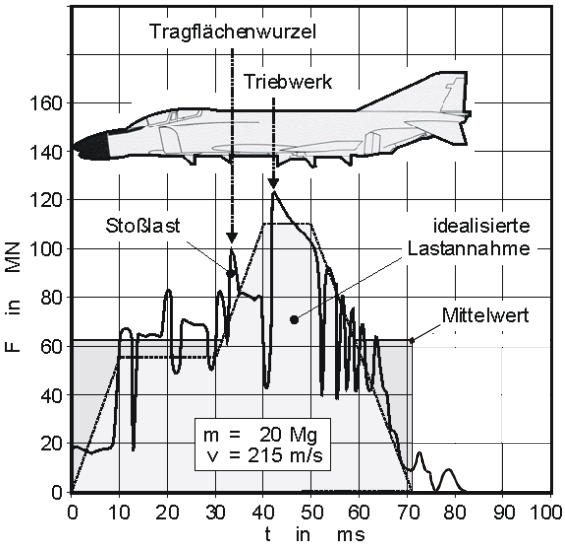

Bild 1: Stoßlastdiagramm für den Aufschlag eines Phantom

Die dabei maximal auftretende Stoßlast (Kraft) beträgt 122 MN, der Aufschlag dauert etwas länger als 80 ms. Aus dem Stoßlastverlauf wurde eine idealisierte Stoßlastkurve gebildet (in Bild 1 über der hellgrauen Fläche dargestellt). Diese weist ein Maximum von 110 MN auf und wird nach 70 ms zu Null. Daraus lässt sich eine mittlere Stoßlast von 61 MN bestimmen (Linie über der mittelgrauen Fläche). Die auftretenden Kräfte überschreiten dieses zeitliche Mittel maximal um den Faktor zwei. Sie repräsentieren dabei ihrerseits räumliche (2D-) Mittelwerte über die Aufschlagsfläche.

Aus mittlerer Stoßlast und Aufschlagsfläche wird die mittlere Flächenlast für das Auslegungsereignis bestimmt, die für die weiteren Analysen als Bezugsfall dient. Durch Vergleich mit der mittleren Flächenlast beim Aufschlag des kritischen Verkehrsflugzeugs wird auf das Widerstandspotenzial des RG gegen Attacken mit großen Verkehrsflugzeugen geschlossen.

In der entsprechenden RSK-Richtlinie (zit. in /1/) wird für den Phantom von 7 m² Aufprallfläche ausgegangen. Der tatsächliche Rumpfquerschnitt beträgt nach Schätzungen (Dreiseitenriss) im Kabinenbereich ca. 2.9 m² und im Bereich der Triebwerkseinläufe ca. 3.7 m². Im Auftrag von Deutschland und Japan wurde 1982 in den USA ein Versuch durchgeführt,

bei dem ein Phantom mit 215 m/s vor eine 3 m starke Betonwand geschossen wurde. Die VDI-Nachrichten /5/ haben dafür das Schadensbild veröffentlicht (Bild 2).

Im Experiment wurde das Flugzeug beim Aufprall vollständig in kleinere Trümmerteile zerlegt. Bild 2 zeigt, dass dabei die Wand nur innerhalb des Rumpfquerschnitts merklich beschädigt wurde. Außerhalb dieser Fläche deuten Schatten auf der Wand darauf hin, dass über den Tragflächen, seitlich der Kabine, sowie im Bereich der Leitwerke Trümmer aufgeschlagen sind, ohne den Beton zu beschädigen. Dies bestätigt die Annahme einer gegenüber dem Flugzeugquerschnitt vergrößerten Aufschlagsfläche.

Die Druckfestigkeit von Beton liegt in der Größenordnung von 30 MN/m² und steigt in 20 Jahren auf ca. 40 MN/m² an. Ihr Überschreiten hat ein Zerbröckeln des Materials zur Folge. Die Durchschlagsfestigkeit einer Stahlbetonwand hängt nicht nur von dieser Größe ab, vielmehr müssen noch weitere statische und dynamische Eigenschaften des Materials und des individuellen Gebäudes berücksichtigt werden. Dennoch liefert die Druckfestigkeit einen wichtigen Anhaltspunkt für die Frage, ob ein Projektil eindringt, oder nicht, insbesondere bei dicken, dicht armierten Stahlbetonwänden.

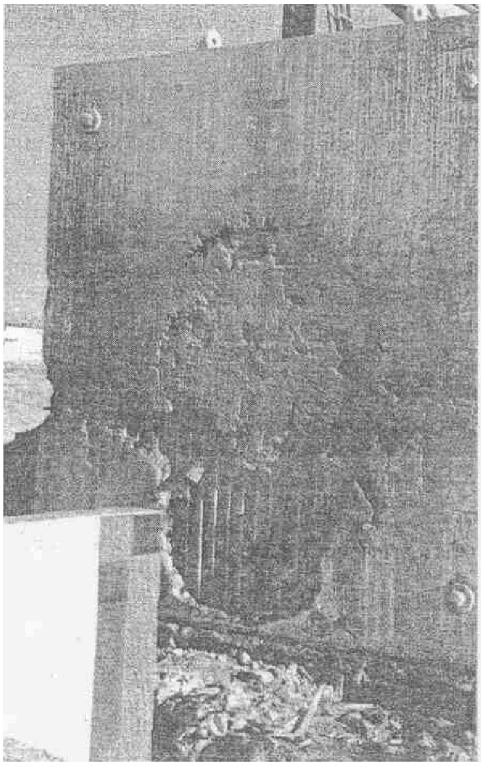

Bild 2: Schadensbild nach dem Aufschlag eines Phantom

Bild 2 zeigt, dass die örtliche Flächenlast an den Rumpfanschlüssen der Tragflächen, im Bereich der Triebwerke und teilweise beim Aufschlag der Zellenwand die Druckfestigkeit überschritten hat. Es wird deutlich, dass beim Aufschlag der Triebwerksblock mit den beiden eng beieinander liegenden Triebwerken als kritisches Bauteil anzusehen ist. Dessen Trümmer sind bis zu 18 cm in die Wand eingedrungen. Dies ist keine Frage der Masse, denn von den 20 Mg des Flugzeugs entfallen nur 3.5 Mg (17.5%) auf die Triebwerke. Vielmehr ist neben der örtlichen Massendichte die Steifigkeit der Strukturen in Aufschlagrichtung entscheidend. Letzteres wird dadurch bestätigt, dass sich über den Tragflächen durch den Aufschlag der in axialer Richtung steifen Beplankungsbleche lediglich die Kontur der Zelle eingeprägt hat. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Bleche zum Schutz des Piloten und der elektronischen Ausrüstung vor Waffenwirkung und zur Gewährleistung der Stabilität bei extremen Flugmanövern bei Kampfflugzeugen relativ stark sein müssen.

Verkehrsflugzeuge sollen die Passagiere mit möglichst geringem Treibstoffverbrauch ans Ziel bringen. Daraus ergibt sich das Verhältnis aus Nutzlast zu Startgewicht als ein wichtiges Optimierungskriterium, wodurch dem Leichtbau eine zentrale Bedeutung zukommt. Die Wandstärken der Zelle von Verkehrsflugzeugen (leichte und feste Spezialwerkstoffe) liegen heute bei 1.2 mm, in verstärkten Bereichen bei 1.5 - 2 mm. Die Stärke der Tragflächenbeplankung beträgt 5 - 6 mm, im Bereich des Rumpfanschlusses ca. 15 mm. Das Verhältnis von Beplankungsstärke zum Rumpfdurchmesser eines Verkehrsflugzeugs ist deutlich kleiner, und das Verformungspotenzial im Rumpfbereich größer, als das eines Kampfflugzeugs. Auch ist zu erwarten, dass die beim Aufschlag auf die Wand einwirkenden Kräfte mit geringerer Amplitude um ihren zeitlichen Mittelwert schwanken, als z.B. in Bild 1. Damit erscheint der Vergleich der Mittelwerte von Kräften und Flächenlasten beim Aufschlag von Verkehrsflugzeugen mit denen beim Kampfflugzeug (Auslegungsereignis) als berechtigtes Mittel zur Ermittlung der Größenordnung für die Durchschlagsfestigkeit eines Reaktorgebäudes.

2. DER AUFSCHLAG GROSSER VERKEHRSFLUGZEUGE

2.1 Auswahl des kritischen Flugzeugtyps

In Tabelle 1 werden die für den Aufschlag relevanten Daten großer Verkehrsflugzeuge zusammengestellt. Folgende Größen wurden aus Dreiseitenrissen abgemessen: **a** - Abstand von der Nase bis zur ersten Triebwerksreihe, **b** - Querabstand der inneren Triebwerke, **c -** Rumpfquerschnitt. Aus **a** ergibt sich mittels Division durch die Geschwindigkeit der Zeitraum **d**, der mindestens zwischen den Aufschlägen der Nase und der ersten Triebwerksreihe verstreicht und aus **b** entsprechend die Mindestdauer **e** des Aufschlagsprozesses.

Tabelle 1: Relevante Daten für den Aufschlag von Flugzeugen auf ein starres Hindernis (Daten aus /2/)

Typ	**max. Reise-geschw.**	**Gewichte**			**Abmessungen**					**Ges.-impuls**	**Zeiten** [3]	
	km/h (m/s)	T			m				m²	MNs	ms	
		Start max.	**Triebwerke** [1]	**Kerosin** [2]	**Länge**	**Spannw.**	**a**	**b**	**c**		**d**	**e**
Airbus A340-600	914 (254)	275	4 × 4.7	97	63.65	60.3	21	18	**25**	70	83	250
Airbus A380-800F [4])	> 910 (253)	583	4 × 6.0	-	70.8	79	22	27	45	168	76	245
Antonov AN-225	850 (236)	600	6 × 4.1	-	84	88.4	-	-	-	142	-	-
Boeing B747/400	**940 (261)**	**396**	4 × 4.1..4.4	**139**	70.66	64.4	24	24	34	**103**	92	270
Boeing B767/300	910 (253)	159	2 × 3.9..4.4	35	54.94	47.57	18	**16**	28	40	**71**	**217**
Boeing B777	923 (256)	247	2 × **5.9**..**8.3**	77	63.73	60.93	20	20	28	63	78	250
Concorde	[2179 (650)]	185	4 × 3.2	96	62.1	25.56	36	10	7	[120]	[55]	[95]
MD MD-11	945 (261)	286	3 × 4.2	104	61.37	51.66	23	16	28	75	88	235
Phantom RF-4E	774 (215)	27 {20}	2 * 1.75	ca. 5	17.76 [5])	11.78	8.6	-	3.7 {7}	5.8 {4.3}	40	83 {70}

[1]) unterstrichene Werte aus /3/, restliche Werte aus /4/, A380 (A380-800F) aus Schub geschätzt (siehe Bild 6)
[2]) Abschätzung: Treibstoffgewicht = Startgewicht - Leergewicht - Nutzlast
[3]) minimale Dauer des Aufschlagsprozesses, Quotient aus Länge und Geschwindigkeit
[4]) In Entwicklung, doppelstöckig, max. 555 Passagiere
[5]) unterschiedliche Angaben: hier aus von Fuß auf Meter umgerechnet (beste Übereinstimmung mit Bild 1)

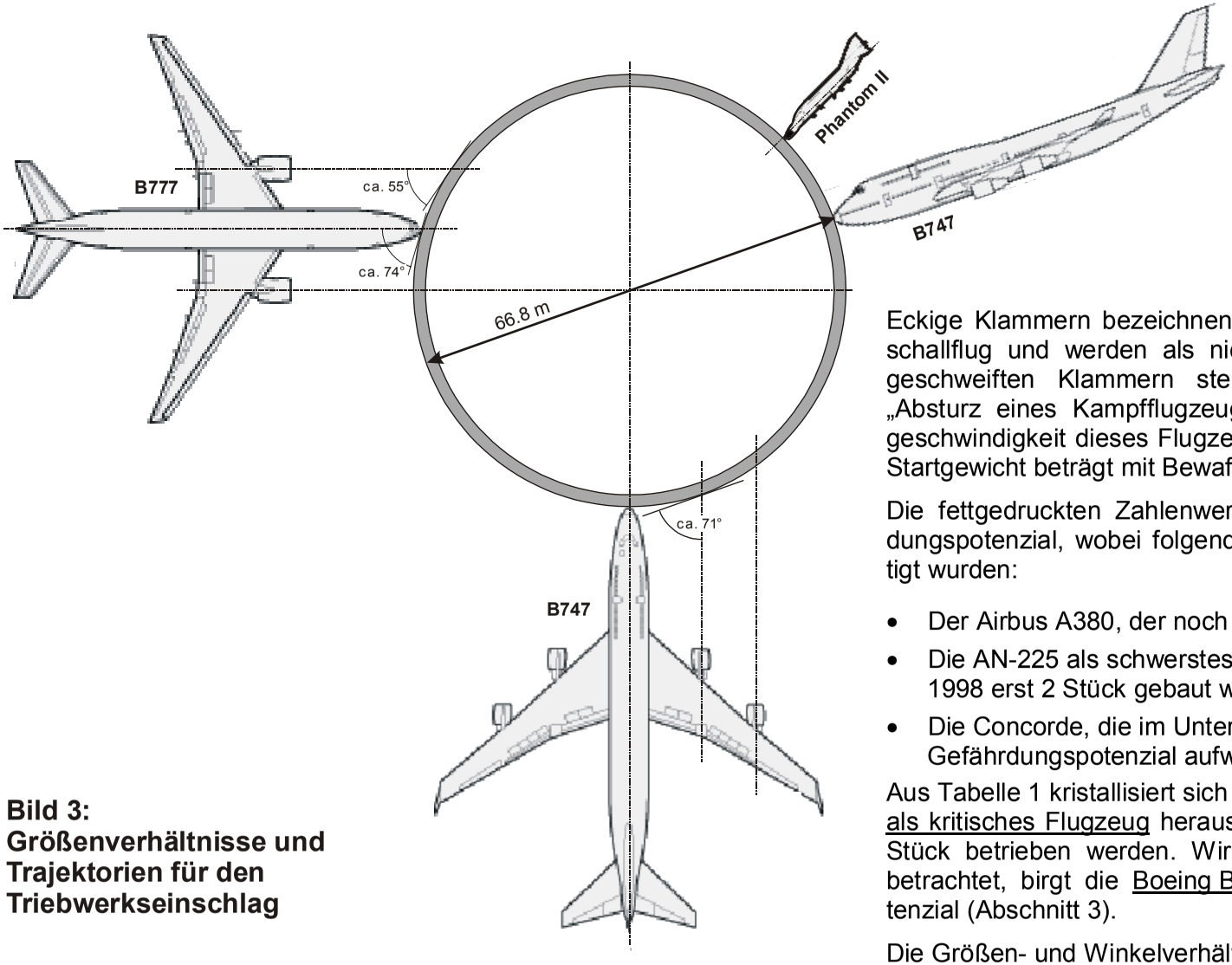

Bild 3: Größenverhältnisse und Trajektorien für den Triebwerkseinschlag

Eckige Klammern bezeichnen in Tabelle 1 Werte für den Überschallflug und werden als nicht relevant angesehen. Werte in geschweiften Klammern stehen für das Auslegungsereignis „Absturz eines Kampfflugzeugs Phantom RF-4E“. Die Höchstgeschwindigkeit dieses Flugzeugs beträgt Mach 2. Das maximale Startgewicht beträgt mit Bewaffnung 27 t.

Die fettgedruckten Zahlenwerte bedeuten das höchste Gefährdungspotenzial, wobei folgende Flugzeugtypen nicht berücksichtigt wurden:

- Der Airbus A380, der noch nicht in Dienst gestellt ist
- Die AN-225 als schwerstes Flugzeug der Welt, von der bis 1998 erst 2 Stück gebaut wurden
- Die Concorde, die im Unterschallbereich geringeres Gefährdungspotenzial aufweist

Aus Tabelle 1 kristallisiert sich erwartungsgemäß die Boeing B747 als kritisches Flugzeug heraus, von der bis heute mehr als 1000 Stück betrieben werden. Wird der Triebwerksaufschlag isoliert betrachtet, birgt die Boeing B777 das höchste Gefährdungspotenzial (Abschnitt 3).

Die Größen- und Winkelverhältnisse für den Aufschlag von Rumpf und Triebwerken beider Flugzeuge auf das RG eines KKW mit Druckwasserreaktor zeigt Bild 3.

2.2 Aufschlag einer Boeing B747 (Punktmodell)

Die Daten aus Tabelle 1 werden im Folgenden hinsichtlich der B747 und des Phantom-II weiter ausgewertet. In den folgenden Tabellen werden hauptsächlich untenstehende Größen und Maßeinheiten benutzt.

Verwendete Maßeinheiten:

Kürzel	Größe	Einheit	Bedeutung
t	Zeitdauer	s, ms	Sekunden , Millisekunden
m	Masse	kg	Kilogramm, Mg = Megagramm
L	Längenmaß	m	Meter
A	Querschnittsfläche	m²	Quadratmeter
v	Geschwindigkeit	m/s	Meter je Sekunde
I	Impuls	Ns	$I = m \times v$, Newton × Sekunde: Ns = kg × m / s
F	Stoßlast (Kraft)	N	$F = dI / dt$, Newton: N = kg × m / s²
F/A	Flächenlast (Druck)	Pa	Pascal: Pa = N / m²
E	kinetische Energie	J	$E = 0.5 \times m \times v^2$, Joule: J = kg × m² / s²

Die Angaben über die kinetische Energie haben dabei untergeordneten Charakter, da die Kräfte mittels Gl. (1) aus dem Impuls berechnet werden:

$$F = \frac{I}{t} \qquad (1)$$

In Tabelle 2 wird die Gesamtmasse **m** der Flugzeuge als Punktmasse angesehen. Die flächenbezogene Größen **I/A** und **E/A** stützen sich über den Querschnitt **A** auf die Betonschale ab (anschaulich wie beim steifen Zylinder). Das Flugzeug bewirkt dann eine lokale Belastung für das Bauwerk, deren Wert die obere Grenze für die jeweilige Größe darstellt. In den Zeilen 1, 2 und 4 steht **A** für den Rumpfquerschnitt. In Zeile 5 entspricht **A** der Aufschlagsfläche, die in /1/ bei der Auslegung des RG gegen EVA angesetzt wurde und etwa doppelt so groß ist, wie der Rumpfquerschnitt des Phantom im Bereich der Triebwerkseinläufe. Bei der B747 wurde in Zeile 3 mit Blick auf die vergrößerte Aufschlagsfläche in Bild 2 ebenfalls eine verdoppelte Aufschlagsfläche benutzt. In Zeile 4 wurde die Masse des unbewaffneten Flugzeugs angesetzt, um dem Experiment Rechnung zu tragen. Bei der maximalen Startmasse von 27 Mg erhöhen sich Impuls und Energie um jeweils 35%. Für eine realitätsnahe Betrachtung sind die Zeilen 3 und 5 zu vergleichen. Die weiteren Zeilen enthalten demgegenüber pessimistische Randbedingungen: höchste Anfluggeschwindigkeit (1), Aufschlagsfläche auf den Rumpfquerschnitt beschränkt (1, 2, 4).

Tabelle 2: Obere Grenzwerte für die Stoßbelastung

Typ	m	A	m/A	v	I	I/A	E	E/A
	Mg	m²	Mg/m²	m/s	MNs	MNs/m²	GJ	GJ/m²
B747[1]	396	34	11.6	261	103	3.0	13.5	0.4
B747[2]	396	34	11.6	130	52	1.5	3.37	0.1
B747[3]	396	68	5.8	130	52	**0.75**	3.37	**0.05**
Phantom[4]	20	3.7	5.4	215	4.3	1.4	0.46	0.13
Phantom[5]	20	7	2.9	215	4.3	**0.6**	0.46	**0.07**

[1]) maximale Reisegeschwindigkeit von 940 km/h
[2]) halbe Reisegeschwindigkeit von 470 km/h (mit Rücksicht auf die Zielgenauigkeit)
[3]) wie [2]), jedoch mit doppelter Aufschlagsfläche von 68 m²
[4]) Abflugmasse aus /1/ und mittlerer Rumpfquerschnitt, 774 km/h
[5]) Bezugsfall: Auslegungsgrößen für neuere deutsche KKW /1/

Die in den Zeilen 2 und 3 gewählte Aufschlaggeschwindigkeit von 130 m/s (470 km/h) liegt in der Größenordnung der Geschwindigkeit mit der am 11. September die Flugzeuge in das WTC gesteuert wurden. Da es jedoch nicht völlig auszuschließen ist, dass ein Anflug mit höherer Geschwindigkeit zu einem hinreichend genauen Treffer führt, wird in Zeile 1 die maximale Reisegeschwindigkeit der B747 von 940 km/h entsprechend 261 m/s ebenfalls betrachtet (Zeile 1).

Da hier auch die Vergrößerung der Aufschlagsfläche nicht berücksichtigt wird, liefert Zeile 1 eine hypothetische Obergrenze für die Belastungen. Der Impuls für die B747 ist dann im Vergleich zum Phantom 24 mal und je Flächeneinheit 5 mal größer. Bei der kinetischen Energie sind, wegen des quadratischen Beitrags der Geschwindigkeit, die Unterschiede größer. Sie ist gegenüber dem Bezugsfall um ca. das 30-fache, je Flächeneinheit noch um das sechsfache erhöht.

Trotz der 20-fachen Masse schlägt bei der B747 je Flächeneinheit nur etwa die vierfache (einfacher Rumpfquerschnitt) bzw. die doppelte Masse (zweifacher Rumpfquerschnitt) auf die Wand auf, wie im Bezugsfall. Dies zeigt den erheblichen Einfluss der Fläche auf das Geschehen, der sich auch im Impuls und der kinetischen Energie wiederfindet. Trotz des 12-fachen Impulses bei der B747 (Zeile 3) liegt der Impuls je Flächeneinheit in der gleichen Größenordnung, wie im Bezugsfall. Ähnliches ergibt auch der Vergleich der Zahlenwerte für die kinetische Energie.

Die Nachteile dieses einfachsten denkbaren Modells bestehen zum einen darin, dass die gesamte Masse des Flugzeugs an einem Ort aufschlägt. Zum anderen ordnet es dem Aufschlag keine Zeitdauer zu. Anhand eines Modells, bei dem die Masse homogen im Volumen des Flugzeugs verteilt ist, können dagegen räumlich/zeitliche Mittelwerte angegeben werden.

2.3 Rumpfaufschlag der B747 (homogenes Modell)

Dieses Modell geht davon aus, dass das Flugzeug gleichmäßig mit einem Material angefüllt ist, das die Eigenschaften der im beladenen Flugzeug enthaltenen Stoffe in idealer Durchmischung enthält und über keinerlei Festigkeit verfügt. Dadurch stützen sich weiter hinten liegende (später aufschlagende) Massen nicht auf vorn liegende (früher aufschlagende) ab. Dann trifft das letzte kg an Masse mit der gleichen Geschwindigkeit auf, wie das erste und Gl. (2) für die differentielle Änderung der Stoßkraft

$$dF = \frac{d(mv)}{dt} = m\,\frac{dv}{dt} + v\,\frac{dm}{dt} \qquad (2)$$

kann mit $dv / dt = 0$ zu

$$dF = v\,\frac{dm}{dt} \qquad (3)$$

vereinfacht werden. Wird der Rumpf als Zylinder betrachtet, ist dm / dt konstant und es gilt: $dm / dt = m / t$ bzw. $F = v \times m / t$.

Beim Aufschlag der Tragflächen kommt es zum Anwachsen der Stoßlasten. Durch gleichzeitige Vergrößerung der Aufschlagsfläche wird dieser Effekt mehr als ausgeglichen. Der Aufschlag der Triebwerke (Abschnitt 3) erfolgt zudem in einer solchen radialen Entfernung vom Rumpf, dass er für das RG isolierte Lastspitzen verursacht. Das Ereignis geht beim Aufschlag der ersten Triebwerksreihe auf die Betonschale des RG von einer eher lokalen in eine eher globale Belastung mit lokalen Spitzen an den Triebwerkspositionen über.

Deshalb wird im homogenen Modell für die B747 nur der Aufschlag eines Zylinders mit der Länge der den Triebwerken vorgelagerten Rumpfsektion analysiert, deren Masse anhand geometrischer Betrachtungen (Bild 3) zu 1/3 der Gesamtmasse des Rumpfes abgeschätzt wird. Letztere wurde wiederum anhand der Masse des Treibstoffs und der Triebwerke sowie

einer Schätzung für die Masse der Tragflächenstruktur großzügig angenommen. Der Aufschlag des gesamten Rumpfes würde die zeitabhängigen Ergebnisse nicht verändern.

Beim Phantom dagegen vergrößert sich die Aufschlagsfläche durch die schmalen Tragflächen nicht wesentlich, weshalb die Belastungssituation lokal bleibt und der Aufschlag des gesamten Flugzeugs betrachtet werden muss. Ausgangsdaten und Ergebnisse für das homogene Modell sind in den Tabellen 3 und 4 zusammengefasst. Die kinetische Energie wird für die Bestimmung der Kräfte nicht benötigt und daher nicht explizit ausgewiesen.

Tabelle 3: Ausgangsgrößen für das homogene Modell

Typ	m Mg			L m	A m²	v m/s
	Tragfl.	Rumpf	a)	a)		
B747[1]	156	240	**80**	24	34	261
B747[2]	156	240	**80**	24	34	130
B747[3]	156	240	**80**	24	68	130
Phantom[4]	-	20	**20**	19	3.7	215
Phantom[5]	-	20	**20**	19	7	215

Fußnoten siehe Tabelle 2

Die in Tabelle 3 mit a) gekennzeichneten Spalten bezeichnen im Falle der B747 die Daten für die Rumpfsektion vor der Triebwerksvorderkante. Den Tragflächen wird die gesamte Treibstoffmasse zugeordnet. Die Strukturen werden mit 17 Mg bewusst niedrig geschätzt, um die Rumpfmasse „auf die sichere Seite“ zu bekommen.

Aus den Ausgangsgrößen werden in Tabelle 4 zeitliche Mittelwerte für die lokalen Belastungsgrößen abgeleitet.

Tabelle 4: Mittelwerte für die lokale Stoßbelastung

Typ	t ms	m/L Mg/m	m/t Mg/s	m/(A×t) Mg/(m²s)	I MNs	F MN	F/A MN/m²
B747[1]	92	3.3	870	26	21	227	6.7
B747[2]	185	3.3	432	13	10	56	1.7
B747[3]	185	3.3	432	6.4	10	56	0.83
Phantom[4]	83	1.1	241	65	4.3	52	14
Phantom[5]	70	1.1	286	41	4.3	61	8.8

Die Zeitdauer **t** des Aufschlags wird aus Länge und Geschwindigkeit bestimmt. Der Unterschied beim Phantom erklärt sich daraus, dass Zeile 4 die reale Länge und Zeile 5 die Dauer des idealisierten Stoßlastdiagramms verwendet (Bild 1). Die Spalte **m/L** bedeutet die Masse je Meter Länge, die bei der B747 trotz des 10-fachen Rumpfquerschnitts nur ca. 3 mal größer ist, als beim Phantom. Dies weist auf das größere Verformungspotenzial des Verkehrsflugzeugs hin. Je Sekunde (**m/t**) schlägt bei der B747 etwa die 1.5-fache (*v = 130 m/s*) bzw. die dreifache (*v = 261 m/s*) Masse an Material auf, wie im Auslegungsfall. Bezogen auf die Aufschlagsfläche, **m/(A×t),** ergeben sich jedoch Zahlenwerte, die auch bei maximaler Geschwindigkeit deutlich unter denen für den Phantom liegen.

Der Impuls **I** der betrachteten Rumpfsektion der B747 ist bei *v = 261 m/s* mehr als 5 mal größer, als der des Phantom. Er stellt nach Gl.(2) das zeitliche Integral über eine Kraft dar, so dass die zeitlich gemittelte Stoßlast **F** als Quotient aus dem Impuls und der Zeit erhalten wird (I/t). Diese ist im genannten Fall vier bzw. fünf mal größer, und liegt bei *v = 130 m/s* in der gleichen Größenordnung, wie beim Phantom. Für diesen ergibt sich mit 61 MN exakt die mittlere Stoßlast, die in Bild 1 aus dem idealisierten Stoßlastverlauf berechnet wurde.

Die Flächenlast **F/A** beim Aufschlag der B747 überschreitet in keinem Fall den Wert für den Bezugsfall. Geht man davon aus, dass die Flächenlast beim Verkehrsflugzeug nicht mit größerer Amplitude um den Mittelwert schwankt, als beim Kampfflugzeug, so führt dessen auf die maximale Flächenlast (vgl. Bild 1). Diese beträgt im Bezugsfall 17.6 MN/m² und bewirkt damit eine Sicherheit von ca. 2.3 gegen Überschreiten der Druckfestigkeit 20 Jahre alten Betons (ca. 40 MN/m²). Beim Rumpfaufschlag einer B747 beträgt diese Sicherheit 23, bei maximaler Reisegeschwindigkeit und unvergrößerter Aufschlagsfläche noch ca. 3. Aus

Sicht der Druckfestigkeit ist daher kein Eindringen von Flugzeugteilen in größerem Umfang in die Wand des RG zu erwarten. Ausnahmen sind möglicherweise einzelne steife Baugruppen, welche die Oberfläche des Betons analog Bild 2 beschädigen können.

Die Einhaltung der Druckfestigkeit besagt jedoch nicht, dass die Stahlbetonschale des RG nicht beschädigt wird. Beim Aufprall breitet sich in der Wand eine Stoßwelle aus, die den Beton nicht nur auf Druck beansprucht, sondern auch gleichgroße Zugbeanspruchungen mit sich bringt. Die Zugfestigkeit von Beton liegt jedoch nur in der Größenordnung von 1/10 der Druckfestigkeit. Beim Aufschlag mit weniger als 500 km/h wird auch diese nicht verletzt (im Gegensatz zum Phantom beim Auslegungsereignis). Bei hohen Geschwindigkeiten ist jedoch zu erwarten, dass der Beton in den Zwischenräumen der Armierung unter der Zugbeanspruchung reißt. Dabei ist die Rissdichte in der Umgebung des Aufschlagpunktes am größten und nimmt in alle Richtungen ab. Ein Durchbruch ist dennoch kaum zu erwarten, da die Armierung des Stahlbetons die Kräfte in ausreichendem Maße aufnehmen kann (Bild 2).

Darüber hinaus führt der Aufschlag im Material zu Schub- und Zugkräften, die zum örtlichen Versagen auch ohne Überschreitung der Druckfestigkeit führen können. Sie werden im Wesentlichen durch die Armierung (Zug- und Schubarmierung) beherrscht. Die hohen Sicherheiten gegenüber der Druckfestigkeit sollten dadurch nicht aufgebraucht werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Durchschlagen eines Reaktorgebäudes neuerer Bauart durch den Rumpf einer B747 auch bei maximaler Reisegeschwindigkeit unwahrscheinlich ist, da die bestimmenden flächenbezogenen Belastungen diejenigen beim Auslegungsereignis nicht überschreiten. Die hohen Sicherheiten gegenüber Festigkeitsgrenzen messen auch älteren Anlagen ein nicht zu vernachlässigendes Sicherheitspotential zu, was besonders für realistische Anfluggeschwindigkeiten gilt.

2 TRIEBWERKSAUFSCHLAG

3.1 Flugtriebwerke für den Phantom und die Boeing B777

Bild 4 zeigt den Einblick in das Triebwerk J79-GE10 von *General-Electric*. Zur Baureihe J79 gehören alle in den verschiedenen Versionen des Phantom installierten Triebwerke. Auch der F104-G *Starfighter*, gegen dessen Absturz einige ältere deutsche RG ausgelegt sind, verfügt über ein solches Triebwerk. Das J79 ist ein Turbinen-Luftstrahltriebwerk (TL bzw. Turbojet). Verdichter und Turbine sitzen auf einer gemeinsamen Welle. Diese stellt einen rotierenden, durch Spanten versteiften Hohlkörper dar. Durch seine Kegelform wird der abnehmende Querschnitt des Luftkanals im Verdichter realisiert. An den Enden befinden sich Wellenstümpfe. Eine klassische Welle aus geschmiedetem Stahl, die der Literatur zufolge als schwerstes Bauteil den Triebwerksaufschlag dominiert, ist nicht erkennbar.

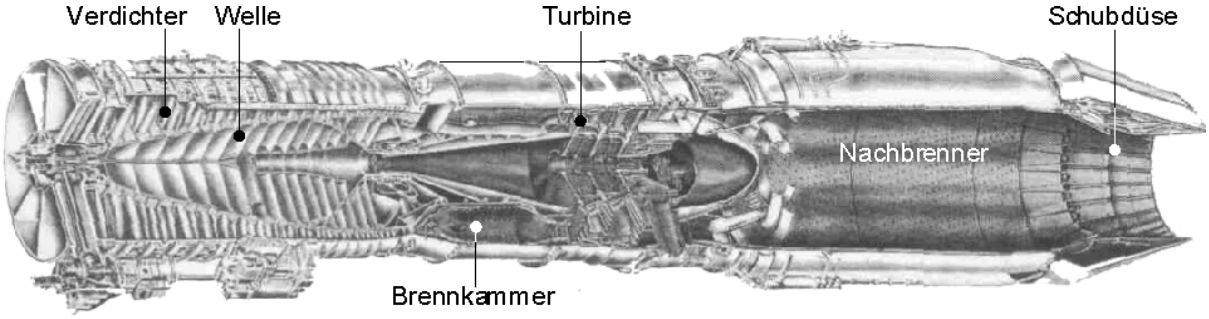

Bild 4: Turbojet-Triebwerk J79-GE10 für den Phantom II

Dennoch sind die Strukturen in axialer Richtung steif genug, um die Druckfestigkeit von ca. 30 MN/m² bei der nicht gealterten Betonwand im Experiment überwinden zu können. Die praktisch unzerstörten Armierungseisen in Bild 2 zeigen jedoch, dass dies nur durch kleine Fragmente geschehen sein kann.

Verkehrsflugzeuge benutzen Zweikreis-Turbinenluftstrahltriebwerke (ZTL), die mittels eines Bläsers am Einlauf einen Nebenstrom um das Kerntriebwerk herum erzeugen. Wegen des Bläsers (Fan) werden sie auch als Turbofan-Triebwerke bezeichnet. Großraumflugzeuge bedienen sich sog. Hoch-Bypass-Triebwerke (HB-Triebwerke), deren extrem große Bläser einen Nebenstrom erzeugen, der mindestens 5 mal größer ist, als der Hauptstrom (Nebenstromverhältnis > 5:1). Ein Beispiel hierfür ist das PW4084 von Pratt&Whitney für die B777, mit einem Schub von 374 kN das leistungsstärkste und auch schwerste derzeit zugelassene Triebwerk der Welt (Bild 5).

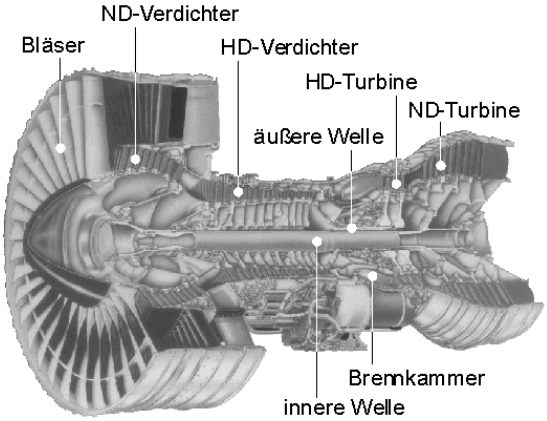

Bild 5: Turbofan PW4084 für die B777

Der Bläser wird gemeinsam mit dem Niederdruckverdichter von der Niederdruckturbine mit geringerer Drehzahl angetrieben und erzeugt den Nebenstrom. Die Hochdruckturbine treibt mit höherer Drehzahl den Hochdruckverdichter. Ein ZTL besitzt deshalb zwei konzentrisch verlaufende Hohlwellen. Die innere Welle muss von der ND-Turbine zum Bläser ein relativ hohes Drehmoment übertragen. Deshalb stellt nur diese Welle ein klassisches Stahlrohr, mithin bei ausreichender Wandstärke eine Struktur mit größerer axialer Steifigkeit dar.

Der Durchmesser der inneren Welle beträgt ca. 18 cm. Die Wandstärke ist unterschiedlich. Wird deren Mittelwert auf 2 cm geschätzt, ergibt sich mit einer Länge von 4.5 m und der Dichte des Edelstahls von ca. 7900 kg/m³ die Masse zu ca. 360 kg. Mit gut 5% trägt die Welle zur Gesamtmasse des Triebwerks nur unwesentlich bei. Wegen des kleinen Querschnitts hat sie jedoch ein erhebliches Durchdringungsvermögen. Deshalb wird der Aufschlag der inneren Welle eines großen HB-Triebwerks unter 3.3 gesondert behandelt.

Die schnell rotierenden Komponenten, HD-Turbine und -Verdichter, sitzen auf einer Welle in Gestalt eines rotierenden Hohlkörpers, ähnlich dem TL-Triebwerk des Phantom. Dieser bringt durch sein großes Volumen in Verbindung mit kleinen Wandstärken keine deutlich erhöhte Steifigkeit mit.

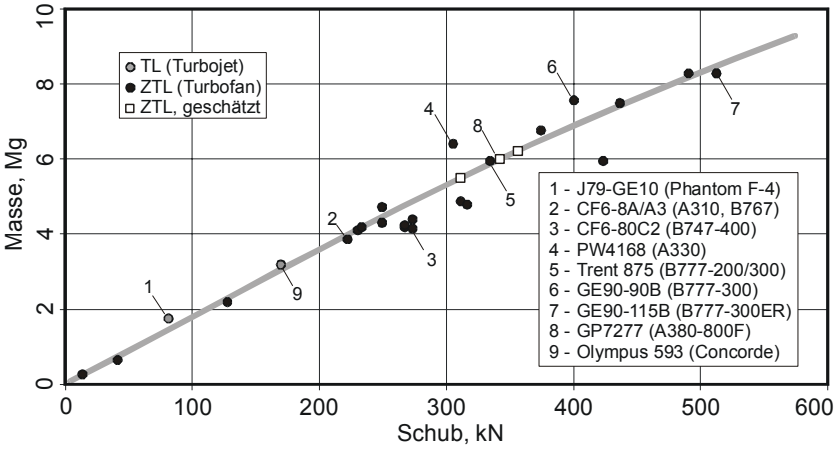

Bild 6: Trockenmasse über dem Schub

In Bild 6 ist für eine Reihe von Triebwerken die Trockenmasse über dem Schub dargestellt. Aus der Kurve wurde die Masse der Triebwerke für den A380 geschätzt. Mit dem GE90-115B ist bei General Electric für die geplante B777-300ER das größte Turbofan-Triebwerk in Entwicklung, das in naher Zukunft zu erwarten ist. Seine Masse beträgt bei einem Schub von 512 kN 8272 kg /4/.

3.2: Aufschlag von Triebwerken der B777 (Punktmodell)

Zur Betrachtung des Aufschlags eines einzelnen Triebwerks auf ein RG wird ähnlich vorgegangen wie unter 2.2. In Tabelle 6 sind allgemeine Daten verschiedener Triebwerke für den Airbus A330, die Boeing B777 sowie den Phantom aufgeführt. *Pratt&Whitney* fertigt das PW4084 und das PW4168 und entwickelt das PW4098, *General Electric* entwickelt das GE90-115B und fertigte das J79-GE10 für den Phantom. Die Angaben dazu beziehen sich auf den Doppelblock aus beiden Triebwerken, die nach Bild 2 als Einheit aufschlagen. Ein weiterer Hersteller von HB-Triebwerken ist *Rolls Royce*, dessen Dreiwellen-Triebwerke jedoch auf die Leistung bezogen leichter sind und daher nicht näher betrachtet werden.

Tabelle 6: Triebwerke der B777 und des Phantom

Typ	**Verwendung**	**Schub** kN	**m** kg	**D** m	**A** m²	**L** m	**m/A** kg/m²
PW4168	A330	305	6396	2.53	5.03	4.14	1272
PW4084	B777	374	6759	2.84	6.33	4.87	1067
PW4098	B777-300	436	7484	2.84	6.33	4.94	1181
GE90-115B	B777-300ER	512	8272	3.25	8.30	ca. 5	997
J79-GE10	Phantom	2×81.2	3500	0.99	1.54	3.20*	2273

*) ohne Nachbrenner, der keinen nennenswerten Beitrag zur Masse bringt (mit NB: L = 5.3 m)

Bestimmend für die mittlere Flächenlast ist das Verhältnis aus Masse und Aufschlagsfläche **m/A**, welches beim PW4168 unter allen betrachteten Triebwerken am größten ist. Als Aufschlagsfläche soll hier der Frontquerschnitt angesehen werden. Das Verhältnis **m/A** ist beim Phantom etwa doppelt so groß, wie bei den HB-Triebwerken. Alle Größen werden in den folgenden Tabellen für die Geschwindigkeit von 130 m/s (470 km/h) bzw. von 260 m/s (936 km/h, gestrichene Größen) angegeben. Letztere liegt etwas über der maximalen Reisegeschwindigkeit der B777. Beim J79-GE10 (Phantom, Bezugsfall) beträgt die Geschwindigkeit wiederum 215 m/s (774 km/h). Tabelle 7 zeigt zunächst die entsprechenden Zahlenwerte für Impuls und Impuls je Fläche.

Tabelle 7: Impulsgrößen

Typ	**I** MNs	**I'** MNs	**I/A** MNs/m²	**I'/A** MNs/m²
PW4168	0.831	1.66	0.165	0.331
PW4084	0.879	1.76	0.139	0.277
PW4098	0.973	1.95	0.154	0.307
GE90-115B	1.08	2.15	0.130	0.259
J79-GE10	0.753		0.489	

Der Impuls der derzeitigen HB-Triebwerke ist bei *v = 130 m/s* geringfügig gegenüber dem Bezugsfall erhöht und bei *v = 260 m/s* gut doppelt so groß. Das GE90-115B wird einen ca. 1.4- bzw. 2.9-fach größeren Impuls bewirken. Der flächenbezogene Impuls ist beim PW4168 wegen des vergleichsweise kleinen Bläsers am größten. Er beträgt bei *130 m/s* ca. 1/3 des Vergleichswertes und ca. 2/3 bei 260 m/s. Die größten Belastungen gehen nicht vom schwersten Triebwerk aus, sondern von demjenigen mit dem größten Verhältnis **m/A**.

3.3 Aufschlag von Triebwerken der B777 (homogenes Modell)

Tabelle 8 enthält die Zeitdauer des Aufschlagsprozesses, die sich aus Baulänge und Aufschlagsgeschwindigkeit der Triebwerke ergibt, die Masse, die durchschnittlich je Zeiteinheit auf das Bauwerk aufschlägt sowie die Mittelwerte für Stoß- und Flächenlast. Dabei steht die Zeit **t** wiederum für *v = 130 m/s* und **t'** für den hypothetischen Fall bei *v = 260 m/s*.

Tabelle 8: Zeit- und flächenabhänge Größen

Typ	t ms	t‘ ms	m/t Mg/s	m/t‘ Mg/s	F MN	F‘ MN	F/A MPa	F‘/A MPa
PW4168	31.8	15.9	201	402	26.1	105	5.20	20.8
PW4084	37.5	18.7	180	360	23.4	93.8	3.70	14.8
PW4098	38.0	19.0	197	394	25.6	102	4.04	16.2
GE90-115B	38.5	19.2	215	430	28.1	112	3.37	13.5
J79-GE10	14.9		235		50.5		32.8	

Ohne Berücksichtigung der Fläche (die Masse schlägt auf einem Punkt auf) unterschreiten die HB-Triebwerke bei *v = 130 m/s* die Vergleichswerte für den Bezugsfall hinsichtlich der mittleren Stoßlast deutlich. Bei *v = 260 m/s* überwiegt die Stoßlast dagegen die Vergleichswerte um etwa das Doppelte. Im ersten Fall betragen die Mittelwerte der Flächenlast zwischen maximal 16% derjenigen für den Bezugsfall, im zweiten bis zu 63%. Die größten Belastungen gehen vom kleinsten der aufgeführten Triebwerke, dem PW4168 aus, weil die Masse hier nicht nur über eine kleinere Aufschlagsfläche auf das RG einwirkt sondern auch auf eine kleinere Baulänge verteilt ist.

Der Sicherheitsfaktor gegenüber dem Bezugsfall lässt noch Spielraum für Abweichungen der örtliche Flächenlast von den gezeigten Mittelwerten. Die Sicherheit gegen Überschreiten der Druckfestigkeit des Betons von 40 MPa ist beim Phantom am geringsten (1.2) und beträgt beim PW4168 ca. 2. Dass die realen Flächenlasten den Mittelwert dennoch örtlich überschreiten, ist in Bild 2 an der Zerstörung des Betons zu erkennen (Druckfestigkeit hier 30 MPa). Beim Aufschlag großer HB-Triebwerke ist besonders bei hohen Geschwindigkeiten daher ebenfalls mit dem Eindringen von Trümmern in die Oberfläche des RG zu rechnen.

Die mittleren Flächenlasten beim Triebwerksaufschlag sind wesentlich größer, als beim Rumpfaufschlag, da die Masse ist in den Triebwerken dichter gepackt ist. Deshalb werden die maximal auftretenden Stoß- und Flächenlasten örtlich (!) mit kleinerer Amplitude um den Mittelwert schwanken, als beim Rumpfaufschlag (Bild 1).

Im Gegensatz zum Rumpfaufschlag weist jedoch das homogene Modell beim Aufschlag der Triebwerke Schwächen auf, weil es in zweierlei Hinsicht optimistische Ergebnisse liefert. Erstens ist der Durchmesser bei HB-Triebwerken nicht konstant. Außerdem kann die Steifigkeit der Konstruktion nicht mehr vernachlässigt werden. Letzteres führt zu einem Überschreiten der mittleren Stoß- und Flächenlast zu Beginn des Aufschlag und am Ende zu ihrem Unterschreiten. Bild 1 verdeutlicht diesen charakteristischen Verlauf für den Aufschlag des Phantom-Triebwerks.

Die unterschiedlichen Durchmesser der Triebwerkskomponenten sind aus Bild 5 ersichtlich. Der Mittelteil, der sich ca. über die halbe Baulänge erstreckt, hat z.B. beim PW4084 nur etwa ein Viertel der Querschnittsfläche des Bläsers. Die mittlere Flächenlast wird daher vervierfacht und weist bei *v = 260 m/s* über die Hälfte der Aufschlagsdauer einen Wert von 64.5 MPa auf. Damit kann das Kerntriebwerk tiefer in den Beton eindringen, als vom homogenen Modell vorhergesagt. Allerdings besteht ein großer Teil der Masse eines HB-Triebwerks aus den Lauf- und Leitschaufeln von Bläser, Verdichtern und Turbinen. Diese sind auf Scheiben montiert und schlagen deshalb nur in äußeren Regionen der betreffenden Fläche mit ihrer flachen Seite auf, was sich abmildernd auswirkt.

Der beim Einschlag entstehende Hohlraum wird schnell mit Trümmerfragmenten aufgefüllt, die im Gegensatz zum Aufschlag nicht seitlich ausweichen können. Auf diese Trümmer schlägt der Rest des Kerntriebwerks auf. Über die Trümmerfragmente und die erodierten Betonpartikel werden die Kräfte im Hohlraum nach allen Seiten in die Stahlbetonstruktur eingeleitet. Es ist zu erwarten, dass dadurch die Bremskraft schnell anwächst, das Kerntriebwerk progressiv verzögert wird und nach einer Eindringtiefe zum Stehen kommt, die nicht signifikant größer ist, als im Phantom-Experiment.

Da der Gesamtimpuls der HB-Triebwerke nur wenig größer ist, als der des Phantom-Triebwerks (bei kleineren Triebwerken noch weit geringer), ist ihr Aufprall aus Sicht der Schwächung der Stahlbetonstruktur durch Rissbildung durch die Auslegung des RG abgedeckt.

Die integrale Belastung für das RG ist bei isolierter Betrachtung der Triebwerke vernachlässigbar, da der Gesamtimpuls zweier gleichzeitig aufschlagender Triebwerke mindestens (GE90-115B) um den Faktor 2 gegenüber dem Auslegungsereignis vermindert ist. Die integrale Belastung wird vom Rumpfaufschlag dominiert.

3.3 Einschlag der inneren Welle eines Hochbypass-Triebwerks

Im Gegensatz zum Triebwerk des Phantom verfügen HB-Triebwerke in Gestalt der inneren Welle über ein in axialer Richtung sehr steifes Bauteil. Durch diesen qualitativen Unterschied ist ein Vergleich mit dem Auslegungsfall nicht möglich. Ob die Welle nach dem Aufschlag in die Wand eindringt oder nicht, entscheidet u.a. die Flächenlast. Überschreitet sie die Druckfestigkeit des Betons, dringt das Bauteil ein. Auch wenn es nicht eindringt, wird der Beton inwendig durch Rissbildung beschädigt, wenn die Zugfestigkeit überschritten wird, die nur etwa 10% der Druckfestigkeit beträgt. Mit solchen Rissen muss in allen hier behandelten Fällen gerechnet werden. Aus Druckfestigkeit und Wellenquerschnitt lässt sich eine Kraft bestimmen. Es sei angenommen, dass die Struktur während der gesamten Einschlagdauer der eindringenden Welle zunächst genau diese Kraft entgegensetzt, weshalb sie als konstante Bremskraft bezeichnet werden soll. Das ist ein stark vereinfachtes Modell für den reibungsfreien Einschlag der Welle in eine nicht armierte Betonwand.

Unter der Wirkung dieser Kraft würde ein Projektil von seiner Aufschlaggeschwindigkeit linear auf Null abgebremst. Entlang des Weges stellt sich im Mittel die halbe Geschwindigkeit ein. Daraus bestimmt sich mit der Eindringtiefe die Einschlagdauer. Soll eine Welle bei einer Aufschlagsgeschwindigkeit von *260 m/s* nach 1.5 m zum Stillstand kommen, dauert dies 11.5 ms. Dem entspricht eine Verzögerung von 22600 m/s².

Die geschätzte Masse der Welle des PW4084 von ca. 360 kg führt dann auf eine notwendige mittlere Bremskraft von 8.14 MN. Aus dem Außendurchmesser von 0.18 m (der Hohlraum soll schnell durch komprimierte Beton- und Armierungstrümmer verstopft werden) ergibt sich eine Querschnittsfläche von ca. 0.025 m² und eine Flächenlast von 325 MPa. Diese übersteigt die angenommene konstante Bremskraft um etwas mehr als das 8-fache.

Der überwiegende Anteil der Abbremsung muss deshalb durch eine zusätzliche Bremskraft aufgebracht werden, die vielfältige Ursachen haben kann (z.B Zerstörung/Verformung der Armierung oder Reibung). Vereinfachend sei angenommen, dass diese proportional zur Eindringtiefe der Welle sei und damit eine progressive Verzögerung bewirkt:

$$F = F_0 (1 + a \times L) \tag{4}$$

F - Bremskraft
F_0 - konstante Bremskraft
a - Koeffizient
L - Eindringtiefe

Der Koeffizienten ***a*** drückt das Verhältnis der zusätzlichen Bremskraft je Meter Eindringtiefe zur konstanten Bremskraft aus. Bei $a = 0$ wird die Bremskraft nur von F_0 bestimmt, bei $a = 1$ hat sich die Bremskraft nach einem Meter verdoppelt.

Dieses Modell soll auf zwei unterschiedliche Wellen von je 4.5 m Länge angewendet werden. Die erste Welle hat eine Masse von 400 kg (Durchmesser 20 cm, Wandstärke 2 cm), die zweite von 280 kg (Durchmesser 18 cm, Wandstärke 1.5 cm). Bild 7 zeigt die Geschwindigkeitsverläufe (a) und die Eindringtiefen (b) der schwereren Welle bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 130 m/s für verschiedene Werte des Koeffizienten a.

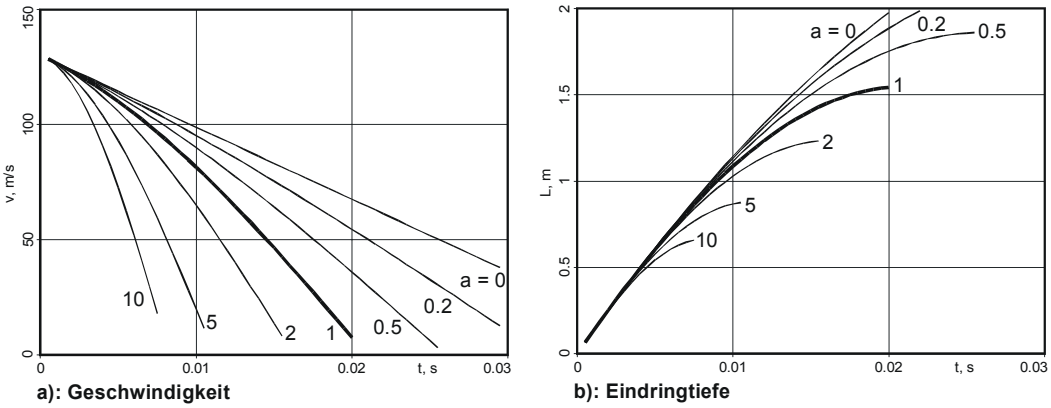

Bild 7: Welleneinschlag nach Gl. (4), m = 400 kg, v = 130 m/s

Bei *a = 0* nimmt die Geschwindigkeit linear ab, während sie mit zunehmendem a besonders in der Anfangsphase immer stärker gekrümmten Kurven folgt (a). Das Projektil wird im Material progressiv bis es zum Stillstand abgebremst (b).

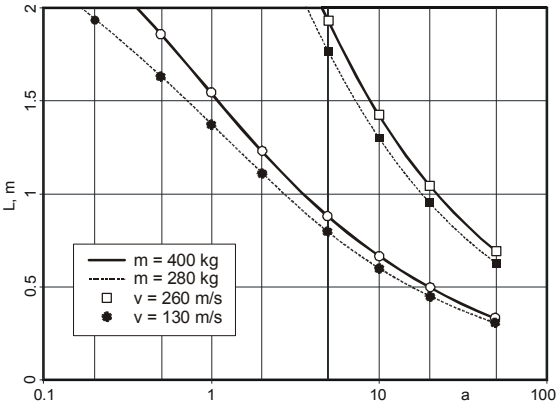

Bild 8: Eindringtiefe von Turbinenwellen

Bild 8 zeigt die Eindringtiefe beider Wellen für die Aufschlagsgeschwindigkeiten 130 m/s und 260 m/s als Funktion von a. Um die schwerere Welle innerhalb von 1.5 m vollständig abzubremsen, muss die zusätzliche Bremskraft je Meter Eindringtiefe bei *v = 130 m/s* nur etwa den einfachen Wert der konstanten Bremskraft erreichen (vgl. Bild 7), bei *v = 260 m/s* das Zehnfache. Die leichtere Welle dringt nicht signifikant weniger ein, weil die geringere Masse durch den kleineren Querschnitt zum Teil kompensiert wird.

Wie groß die Kräfte sind, welche die Stahlbetonwand eines RG der eindringenden Welle entgegensetzt, ist nur durch detaillierte Untersuchungen zu klären. Es ist bekannt, dass die Festigkeit von Stahlbeton darauf beruht, dass die Armierung große Zugkräfte und Schubkräfte aufnimmt. Der lichte Abstand zwischen den Armierungseisen ist wesentlich schmaler, als der Durchmesser auch kleinerer Wellen. Daher muss die eindringende Welle diese durchtrennen. Zusätzlich kann das im Einschlagskanal befindliche Material weder seitlich ausweichen noch nennenswert komprimiert werden. Daher sind erhebliche zusätzliche Bremskräfte zu erwarten, was sich in dem einfachen Modell in Werten für den Koeffizienten a ausdrückt, die deutlich größer als eins sind. Es ist daher wahrscheinlich, dass die Welle eines großen HB-Triebwerks bei Geschwindigkeiten um 500 km/h die Stahlbetonwand eines neueren RG nicht durchbricht.

Mit höheren Geschwindigkeiten wird ein Durchstanzen der Wand immer wahrscheinlicher. Die Welle würde dann auf den Sicherheitsbehälter aus Stahl mit ca. 40 mm Wandstärke prallen. Dieser kann, je nach Restimpuls der Welle elastisch oder plastisch verformt, ggf. durchbrochen werden.

Die Wellen großer Hoch-Bypass-Triebwerke stellen das kritische Bauteil hinsichtlich des Durchschlagens des RG dar. Nach deren zentralem Einschlag mit hoher Geschwindigkeit kann ein Durchschlagen nicht ausgeschlossen werden. Dabei werden ein bis zwei Öffnungen mit im Verhältnis zur Wandstärke kleinem Durchmesser in das RG gestanzt und ggf. der Sicherheitsbehälter beschädigt. Größere Schäden am Reaktorgebäudes sind auch in diesem Fall nicht zu erwarten. Beim Einschlag mit der aus Sicht der Zielsicherheit gewählten Geschwindigkeit von ca. 500 km/h kommt es wahrscheinlich nicht zum Durchschlagen.

Wegen des stark vereinfachten Modells sind zur endgültigen Klarheit detaillierte Untersuchungen notwenig. Aufgrund der relativ einfachen Gestalt des Projektils erscheint eine Absicherung mit Experimenten möglich.

4. Integrale Belastungen des RG

Das betriebsfertige Reaktorgebäude eines KKW mit 1300-MWe-Druckwasserreaktor hat eine Masse von ca. 180000 Mg, die B747 von ca. 400 Mg. Aus der Aufprallgeschwindigkeit des Flugzeugs von *260 m/s* ergibt sich unter Annahme linearer Verzögerung eine mittlere Geschwindigkeit während des Stoßprozesses von *130 m/s*. Aus der Impulserhaltung folgt die mittlere Geschwindigkeit, mit der das RG ausweicht, wenn es gedanklich an einem Faden aufgehängt wird. Diese ergibt sich zu $v^* = 0.289$ *m/s* (1.04 km/h). Während des Stoßprozesses ($t = 0.27$ *s*, Tabelle 1) verschiebt es sich um 7.8 cm bzw. gut ein tausendstel seines Durchmessers. Daher müsste die Verankerung des Gebäudes im Erdreich Kräfte aus verhinderter Verschiebung um 7.8 cm abtragen.

Damit liegen die potentiellen Gefahren eher im Bereich der Schwingungen von Einbauten. In der deutschen Reaktorsicherheitsforschung wurden solche Schwingungen u.a. in Großversuchen am stillgelegten Heißdampfreaktor (HDR) in Großwelzheim experimentell überprüft. Diese Versuche sowie die zugehörigen Rechnungen haben das für deutsche KKW typische Auslegungskonzept mit flexibler Anordnung des Rohrleitungssystems unter Verzicht auf Stoßbremsen bestätigt und darüber hinaus erhebliche Sicherheitsreserven nachgewiesen.

5. Zusammenfassung

Die grundsätzlichen Überlegungen zum Aufschlag großer Verkehrsflugzeuge und ihrer Triebwerke sollen zeigen, dass neuere Reaktorgebäude ein großes Potenzial aufweisen, den mechanischen Belastungen aus entsprechenden Ereignissen standzuhalten. Für die lokale Beschädigung der Betonschale gilt dies mit einer Ausnahme: Das Durchschlagen des RG durch die innere Welle eines großen HB-Triebwerks bei hoher Anfluggeschwindigkeit kann mit den hier benutzten stark vereinfachten Methoden nicht ausgeschlossen werden. Dabei würden ein bis zwei Öffnungen mit kleinem Querschnitt aus der Stahlbetonhülle gestanzt und ggf. der Sicherheitsbehälter beschädigt. Bei moderaten Geschwindigkeiten, die unter dem Aspekt der Zielsicherheit gewählt werden müssten, ist dieses Szenario eher unwahrscheinlich. Sicherheit bieten an dieser Stelle nur tiefer gehende Analysen bzw. Experimente.

Literatur:

/1/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH: „Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 4“, Verlag TÜV Rheinland 1980

/2/ Endres, G. et. Al.: „Das große Buch der Passagierflugzeuge“, Motorbuchverlag, Stuttgart 1998

/3/ Hünecke, K.: „Flugtriebwerke, ihre Technik und Funktion“, Motorbuchverlag, Stuttgart 1987, ISBN 3-87943-407-7

/4/ Hoeveler, P.: „Giganten – die stärksten zivilen Turbofans der Welt“ in Flugrevue 11/01, pp 95-99

/5/ „Flugzeugattentate auf Kernkraftwerke bieten Terroristen nur geringe Erfolgschancen“, VDI Nachrichten Nr. 42, 19.10.2001

Internet: www.boeing.com → Military Aircraft
www.airliners.ch → Flugzeuge → Boeing Company u.a.