

Zur Ermittlung konkreter Einwirkungen infolge Flugzeugaufprall müssen die möglichen Szenarien betrachtet werden, welche Flugzeuge unter welchen Bedingungen für einen Aufprall relevant sind. Bereits in den frühen 70er Jahren wurden in Deutschland bei der Auslegung von Kernkraftwerken Schutzmaßnahmen gegen den Absturz von Flugzeugen eingeführt. Vor dem 11. Sep. 2001 ging man jedoch davon aus, dass sich im Hinblick auf eine Gefährdung ein Flugzeugabsturz lediglich zufällig ereignen kann. Ein Vorsatz wurde für die Auslegung nicht in Betracht gezogen. Erst nach dem Anschlag auf das World Trade Center wurden auch Szenarien mit vorsätzlich herbeigeführtem Aufprall von größeren Passagierflugzeugen betrachtet und mögliche Folgewirkungen untersucht.

13.1 Zufälliger Flugzeugaufprall

Der zufällige Flugzeugaufprall wird zurückgeführt auf einen Unfall bzw. technischen oder menschlichen Fehler. Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Aufpralls kann als sehr gering angesehen werden und wird bestimmt durch die Anzahl der Flugbewegungen in der Nähe von Kernkraftwerken. Im Hinblick auf die Auswirkungen und Häufigkeit sind hier in erster Linie schnell fliegende Militärmaschinen zu betrachten.

Das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ist gekennzeichnet durch ein dichtes Netz ziviler Flugstecken. Bis zur Wiedervereinigung 1989 bzw. zur Entspannung zwischen Ost und West kam eine sehr hohe Flugdichte deutscher und alliierter Militärflugzeuge hinzu. In den 70er und 80er Jahren waren bei den zahlreichen militärischen Übungsflügen, insbesondere bei Tiefflügen, viele Abstürze zu verzeichnen. In diesem Zeitraum ereigneten sich 15–25 zufällige Abstürze pro Jahr, wobei die Unfälle bei Start- und Landemanövern im Nahbereich von Flughäfen (Radius ca. 5 km) nicht mit betrachtet wurden. Im Rahmen der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke [11, 12] wurden die möglichen Szenarien und Absturzhäufigkeiten ausführlich diskutiert. Schnell fliegende Militärflugzeuge, häufig auf freien Flugrouten und im Tiefflug, wurden als Gefährdungspotenzial angesehen.

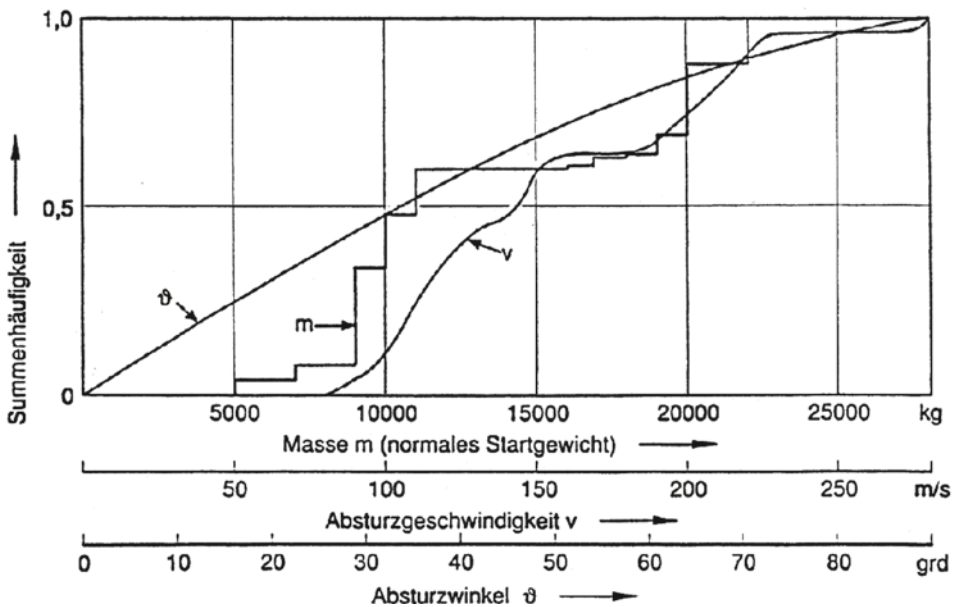


Abb. 13.1 Summenhäufigkeitsverteilung der Massen, der Absturzgeschwindigkeiten und der Absturzwinkel von abgestürzten Militärflugzeugen. (Nach [12])

In den Untersuchungen zur Gefährdung wurden die Anzahl der Abstürze, räumliche Verteilung, Auftreffgeschwindigkeit, Auftreffwinkel sowie die verschiedenen Flugzeugtypen mit den spezifischen Massenbelegungen analysiert und probabilistisch ausgewertet. Eine mögliche Bewaffnung der Militärflugzeuge wurde dabei nicht berücksichtigt. In Abb. 13.1 sind die Summenhäufigkeiten verschiedener Parameter wiedergegeben.

In den Verteilungsfunktionen erkennt man, dass nur wenige abgestürzte Militärflugzeuge eine Startmasse von über 20 t aufweisen. Einen weiteren Schwerpunkt in der Verteilungskurve bilden die Flugzeuge im Bereich von 10 t. Dies ist zurückzuführen auf die große Anzahl der in den 70er und 80er Jahren eingesetzten Typen Starfighter mit ca. 10 t und Phantom F4 mit ca. 20 t.

Die Summenkurve der Absturzgeschwindigkeiten v zeigt, dass abgestürzte Militärflugzeuge mit einer Geschwindigkeit oberhalb von ca. 225 m/s kaum noch einen Beitrag zur Summe liefern. Die beobachteten Absturzwinkel θ sind nahezu gleich verteilt zwischen 0 und 90°.

Die Gefährdung infolge zufällig abstürzender ziviler Großraumflugzeuge ist deutlich geringer als bei Militärmaschinen. Dies ist darin begründet, dass die Großraumflugzeuge im liniengebundenen und nicht im freien Flugverkehr operieren und zudem keine Tief Flüge durchführen, mit Ausnahme in der Start- und Landephase. Auch sind die Absturzhäufigkeiten viel geringer als bei schnell fliegenden Militärmaschinen. Bei diesen verlassen die Piloten bei einer schweren Störung per Schleudersitz das Flugzeug und überlassen es

Tab. 13.1 Wesentliche Kenndaten der FLAB-Einwirkung Starfighter und Phantom

	Größe	Einheit	Starfighter	Phantom
1	Masse m	t	13	20
2	Geschwindigkeit v	m/s	102	215
3	max. Stoßkraft F_{\max}	MN	17	110
4	Einwirkdauer	ms	~120	70
5	Auftrefffläche	m ²	2,1	7,0
6	Impuls	kg (m/s)	$1,326 \cdot 10^6$	$4,300 \cdot 10^6$
7	kinetische Energie	kg (m ² /s ²)	$67,626 \cdot 10^6$	$462,250 \cdot 10^6$

sich selbst. Bei zivilen Großraumflugzeugen sind im Fall von Störungen aufgrund der üblicherweise großen Flughöhe noch Möglichkeiten gegeben, das Flugzeug zu manövrieren. Pilot und Co-Pilot können das Flugzeug nicht verlassen und werden in der Regel eine gesteuerte Notlandung versuchen. Für die Auslegung von Kernkraftwerken wird der zufällige Absturz ziviler Großraumflugzeuge als sehr unwahrscheinlich angesehen und nicht weiter berücksichtigt.

Zivile Kleinflugzeuge sind wie Militärflugzeuge nicht liniengebunden und fliegen in niedrigen Höhen. Gegenüber den Großraumflugzeugen weisen sie eine deutlich höhere Absturzhäufigkeit auf. Die Massen und Geschwindigkeiten sind jedoch geringer als bei den o. g. Militärmaschinen, so dass die möglichen Einwirkungen durch die Militärflieger abgedeckt sind. Ebenso abgedeckt sind herabstürzende Wrackteile infolge einer möglichen Explosion von zivilen Großraumflugzeugen in der Luft.

Ausgehend von einer Gleichverteilung der Absturzhäufigkeit über die Fläche der Bundesrepublik Deutschland von 10^{-10} Abstürzen pro m² und Jahr ergibt sich auf die Fläche eines Kernkraftwerkes ein Wert von 10^{-6} pro Jahr. Dieser Wert stellt eine konservative Abschätzung dar und bedeutet, dass unabhängig von einer möglichen Schädigung ein Kraftwerk mit einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-6} pro Jahr von einem zufällig abstürzenden Militärflieger getroffen werden kann. Treffer, die zu relevanten Schädigungen von Siwi-Gebäuden führen können, weisen nochmal geringere Auftretenswahrscheinlichkeiten auf.

Im Hinblick auf mögliche Szenarien bei einem zufälligen Flugzeugabsturz wurden Anfang der 70er Jahre zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Als Ergebnis wurde stellvertretend für viele mögliche Ereignisse zunächst der Absturz eines Starfighters, danach der Absturz einer Phantom für die Auslegung von Kernkraftwerken zugrunde gelegt (Tab. 13.1).

Bei der Auslegung der älteren Kernkraftwerke in Deutschland (vgl. Tab. 12.2) wurden der Absturz eines Militärflugzeuges vom Typ Starfighter (Abb. 13.2) mit einer Masse von 13 t und einer Aufprallgeschwindigkeit von 0,30 Mach (= 102 m/s oder 367 km/h) zugrunde gelegt.

Bei den neueren Kernkraftwerken bzw. kerntechnischen Anlagen in Deutschland (vgl. Tab. 12.1 und 12.2) wurde der Absturz eines Militärflugzeuges vom Typ Phantom (Abb. 13.3) mit einer Masse von 20 t und einer Aufprallgeschwindigkeit von 0,65 Mach



Abb. 13.2 Schnell fliegende Militärmaschine vom Typ Starfighter F-104G; bis zur Ausmusterung bei der Bundeswehr 1991 stürzten 292 Flugzeuge dieses Typs ab. (aus [6 und 7])



Abb. 13.3 Schnell fliegende Militärmaschine vom Typ Phantom F-4. (Boeing [3])

(= 215 m/s oder 774 km/h) als abdeckende Einwirkung angenommen. Bereits 1973 wurde hierfür eine Belastungsfunktion entwickelt (vgl. [11]), die schließlich 1981 in den RSK-LL [5] Eingang fand. Die möglichen Auftreffwinkel werden zwischen 0 und 90° angenommen, in der Regel wird die Belastung ungünstigst senkrecht zur getroffenen Fläche angesetzt.

Eine Auswertung zeigt, dass bei über 90 % der zufälligen Abstürze die Lastparameter (Masse, Geschwindigkeit) unter denjenigen liegen, die den Lastannahmen (Phantom) der neueren deutschen Kernkraftwerksauslegung zu Grunde liegen.

13.2 Vorsätzlich herbeigeführter Flugzeugaufprall

Nach den Terroranschlägen in den USA am 11. Sep. 2001 stellte sich die Frage, inwieweit Kernkraftwerke auch dem Aufprall von größeren Passagierflugzeugen standhalten bzw. mit welchen Schadensszenarien ggf. zu rechnen ist. In der Folge wurden national und international zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, bei denen mögliche Szenarien bei einem vorsätzlichen Absturz betrachtet und Belastungsfunktionen für den Absturz von größeren Passagierflugzeugen unter Berücksichtigung der räumlichen Lastverteilung entwickelt wurden. Auch der Verfasser war an einigen dieser Studien beteiligt. Da jedoch die meisten dieser Untersuchungen vertraulich und daher nicht frei zugänglich sind, können hier nur allgemeine Hinweise und Angaben wiedergegeben werden.



Abb. 13.4 Boeing 747–400 mit einem Abfluggewicht von 395 t. (Fotos [3])

13.2.1 Relevante Flugzeugtypen

Sowohl die zivile als auch die militärische Luftfahrt verfügen über eine Vielzahl unterschiedlichster Flugzeugtypen, die für den Fall vorsätzlich herbeigeführter Abstürze auf kerntechnische Anlagen große Unterschiede hinsichtlich der Gefährdung aufweisen. Im Hinblick auf die o. g. Fragestellung mussten zunächst die notwendigen Informationen für die verschiedenen Flugzeugtypen zusammengetragen werden. Der Schwerpunkt wurde auf Flugzeuge in der Passagierluftfahrt gelegt, die gegenwärtig in größeren Stückzahlen im Einsatz sind. Die militärische Luftfahrt bleibt hinsichtlich eines „vorsätzlichen“ Absturzes außer acht.

Obwohl zahlreiche Flugzeugtypen der Passagierluftfahrt im Einsatz sind, kann man sich hinsichtlich des Gefährdungspotenzials auf wenige Typen beschränken, die als relevant angesehen werden können. Aus Gründen der Ähnlichkeit unter den Flugzeugen können sich die Betrachtungen stellvertretend auf die beiden großen Hersteller Boeing und Airbus konzentrieren. Im Folgenden werden exemplarisch einige typische Flugzeugtypen vorgestellt.

Boeing 747 Die Boeing 747, auch bekannt als „Jumbo-Jet“, war viele Jahre die größte Passagiermaschine, die in der kommerziellen Luftfahrt eingesetzt wurde (vgl. Abb. 13.4). Seit ihrem ersten Flug 1969 sind über 1400 Flugzeuge gebaut worden, wovon ein Großteil noch heute weltweit im Einsatz ist. Sie ist mit einer Passagieranzahl von 300 bis 500 Passagieren als mögliches Mittel terroristischer Aktivitäten zu berücksichtigen. Die B747 existiert in verschiedenen Ausbaubauvarianten. Das maximale Abfluggewicht beträgt in der Version B747–400 ca. 395 t. Die Länge beträgt ca. 71 m und die Spannweite der Flügel 64,5 m. Beim Start hat die Boeing 747 ca. 170 t Treibstoff an Bord, der sich zu je einem Drittel in den beiden Flügeltanks und im Center-Tank befindet. Dies entspricht einem Volumen von etwa 220 000 l. Aufgrund der Verbreitung und ihrer die obere Grenze markierenden Abmessungen und Gewichte ist die Boeing 747 ein hinsichtlich des Gefährdungspotenzials relevanter Flugzeugtyp.

Abb. 13.5 Airbus A380 mit maximal ca. 560 t Abfluggewicht, ab 2007 im Einsatz. (Foto [8])



Boeing 777 Die Boeing 777 ist ein Langstreckenflugzeug mit einer Länge von 64 bis 74 m und einer Flügelspannweite von 61 bis 65 m. Das maximale Startgewicht beträgt 250 bis 340 t. Der Massenanteil an Kerosin beträgt maximal knapp 150 t. 1995 in Dienst genommen, wurde die Boeing 777 entwickelt, um dem Wunsch nach einem Flugzeug mit einer Kapazität zwischen der Boeing 767 und der Boeing 747 Rechnung zu tragen. Sie verfügt über eine Sitzplatzkapazität zwischen 300 und 550 Passagieren.

Die Boeing 777 ist als Flugzeug mit nur zwei Triebwerken konstruiert. Um für transatlantische Flüge zugelassen zu werden, musste sie erhöhte Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen. So muss auch bei Ausfall eines der beiden Triebwerke ein dreistündiger Weiterflug gewährleistet sein. Die verwendeten Triebwerke gehören daher zu den stärksten, die je bei Flugzeugen eingesetzt wurden. Zum Vergleich entspricht der Außendurchmesser der Triebwerke nahezu dem Durchmesser des Rumpfes einer Boeing 737. Wenngleich die Unterschiede zur Boeing 747 hinsichtlich Masse und Abmessungen nicht als relevant für die Gefährdung erachtet werden, sind jedoch die Triebwerke aufgrund ihrer Größe und Abmessungen für eine gesonderte Betrachtung interessant.

Airbus A380 Der Airbus A380 ist das derzeit größte zivile Verkehrsflugzeug, das bisher in Serienfertigung produziert wurde. Es ist ein vierstrahliges Großraumflugzeug mit zwei durchgängigen Passagierdecks für ca. 525 Passagiere und seit 2007 im Einsatz. Bisher wurden ca. 70 Exemplare in Dienst gestellt. Die Länge des Flugzeuges beträgt 72,30 m, die Flügelspannweite 79,80 m. Es weist einen elliptischen Rumpfquerschnitt von 7,15 m Breite und 8,40 m Höhe auf. Das maximale Abfluggewicht liegt bei 560 t einschl. 320.000 l (= 256 t) Treibstoff.

In den Untersuchungen unmittelbar nach dem 11. Sep. 2001 wurde dieser Flugzeugtyp noch nicht detailliert mit einbezogen, da er zu dem damaligen Zeitpunkt noch nicht im Einsatz war und keine konkreten Angaben vom Hersteller bzw. den Luftfahrtgesellschaften vorlagen. Erst ab 2007 wurden die ersten Flugzeuge dieses Typs eingesetzt (Abb. 13.5).

Abb. 13.6 Airbus A340–600 mit einem maximalen Abfluggewicht von 370 t. (Foto [9])



Abb. 13.7 Airbus A320 mit einem maximalen Abfluggewicht von 75 t. (Foto [9])



Airbus A340 Das von der Fa. Airbus gebaute Flugzeug A340 hat eine Kapazität von 260 bis 340 Passagieren. Die Länge des Flugzeuges liegt bei 60–64 m, die Spannweite bei ca. 60 m und das maximale Abfluggewicht bei 270 t inklusive 120 t Treibstoff. Eine vergrößerte Variante mit einen um 25 Spanten verlängerten Rumpf besitzt eine Kapazität von 420 Passagieren. Das maximale Abfluggewicht für diesen vergrößerten Typ erhöht sich auf ca. 380 t, wovon ca. 150 t auf Treibstoff entfallen (Abb. 13.6).

Der A340–600 entspricht in seinem Gesamtgewicht und seinen Abmessungen in etwa der Boeing 747. Die größere Flügelspreizung und das etwas geringere Eigengewicht führen zu einer größeren Massenkonzentration im mittleren Flugzeugbereich, in dem die Flügel und damit auch die Treibstofftanks angeordnet sind. Erhöhte Beanspruchungen auf der Zielstruktur sind daher bei diesem Flugzeugtyp zu erwarten.

Airbus A320 Der Airbus A320 ist ein typischer Vertreter zweimotoriger Kurz- bis Mittelstreckenflugzeuge mit einer verkauften Anzahl von über 1000 Exemplaren. Er befördert 150 bis 180 Passagiere. Die Länge beträgt 37,57 m, die Spannweite 34,10 m. Das maximale Startgewicht beträgt 78 t incl. ca. 19 t Treibstoff. Vergleichbar ist dieser Flugzeugtyp mit der Boeing 737 oder der McDonnell Douglas MD-80. Dieser Flugzeugtyp kann ebenfalls als repräsentativ angesehen werden für diese zahlenmäßig am weitesten verbreitete Kategorie (Abb. 13.7).

Tab. 13.2 Kenndaten einiger relevanter Passagierflugzeuge

	Größe	Einheit	A 380	B 747	A 340–600	A 320
1	max. Startgewicht	t	560	395	380	78
2	Treibstoffgewicht	t	256	170	150	19
3	Länge	m	72,30	70,60	75,30	37,57
4	Spannweite	m	79,80	64,50	63,45	34,10
5	Rumpfhöhe	m	8,40	7,85	5,64	3,96
6	Triebwerke	Anzahl	4	4	4	2

In der Tab. 13.2 sind einige Kenndaten der relevanten Passagierflugzeuge zusammengestellt.

13.2.2 Anflugwinkel und Anfluggeschwindigkeiten

Für die Ermittlung der maßgebenden Beanspruchung einer Baustruktur wie das äußere Containment eines Reaktorgebäudes ist entscheidend, unter welchen Winkeln und mit welchen Geschwindigkeiten ein möglicher Angreifer ein Ziel erreichen kann.

Zur Festlegung möglicher und realistischer Anflugszenarien wurden nach den Anschlägen in den USA vom 11. September intensive Diskussionen und Studien durchgeführt (vgl. z. B. [1]). Hierbei wurden unterschiedliche Institutionen der Luftfahrt, Fluggesellschaften und erfahrene Piloten mit einbezogen. Darüber hinaus wurden in Flugsimulatoren mögliche Anflugszenarien durchgespielt. Eine Zusammenfassung der ersten Untersuchungsergebnisse ist in [2] wiedergegeben, die Grundlagenberichte sind jedoch als VS-Vertraulich eingestuft und nicht frei zugänglich.

Zur Bestimmung der flugtechnischen Parameter wurden unter verschiedenen Anflugwinkeln Zielanflüge auf vergleichbare Objekte unter Variation verschiedener Randbedingungen wie Höhe, Wind- und Sichtverhältnisse durchgeführt. Wie allgemein bekannt, beträgt bei einer planmäßigen Landung der Anflugwinkel üblicherweise ca. 3° gegen die Horizontale. Unter diesen Idealbedingungen bereitet es einem einigermaßen erfahrenen Piloten kein Problem, ein Ziel mit der Größe eines Reaktorgebäudes sehr genau zu treffen. Bei ansteigenden Neigungswinkeln reduziert sich die Treffsicherheit zunächst allmählich, bei höheren Winkeln sogar drastisch. Bei Winkeln über ca. 10° sinkt die Trefferwahrscheinlichkeit merklich. Ein wesentlicher Aspekt im Hinblick auf die Trefferwahrscheinlichkeit ist, dass im Unterschied zum nahezu horizontalen Anflug bei optimaler Manövrierfähigkeit auf das über 400 m hohe World Trade Center in New York das Reaktorgebäude als Ziel sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung punktgenau getroffen werden muss, ggf. bei reduzierter Manövrierfähigkeit infolge Sinkflug. Ein zu tiefer Anflug trifft gegebenenfalls auf den Boden vor dem Reaktorgebäude bzw. auf ein umgebendes Gebäude mit ggf. deutlich geringerem Schadenspotenzial. Ein zu hoch angesetzter Anflug würde das Reaktorgebäude im Kuppelbereich streifen und ggf. abgelenkt, was zu einer deutlichen Reduktion der resultierenden Beanspruchung und damit zur Reduktion der Gefährdung

Sicherheit von Leichtwasserreaktoren

Risiken der Nukleartechnologie

Kessler, G.; Vesper, A.; Schlüter, F.-H.; Raskob, W.;

Landman, C.; Päsler-Sauer, J.

2012, XVI, 273 S. 158 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-642-28380-2