

W

Deutscher Bundestag ■ Wissenschaftliche Dienste

**Raketenabwehr –
technische Aspekte und naturwissenschaftlicher Hintergrund**

- INFO-BRIEF -

**Dr. Daniel Lübbert
OTL i.G. Christian Behme
Felix Faltin**

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages

Verfasser: Dr. Daniel Lübbert (WD 8)
OTL i.G. Christian Behme (WD 2)
Praktikant Felix Faltin (WD 8)

Raketenabwehr – technische Aspekte und naturwissenschaftlicher Hintergrund

INFO-BRIEF WD 8 - 121/07

Abschluss der Arbeit: 10.10.2007

Fachbereich WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung

Fachbereich WD 2: Auswärtiges, Internationales Recht, Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Verteidigung, Menschenrechte und humanitäre Hilfe

Ausarbeitungen und andere Informationsangebote der Wissenschaftlichen Dienste geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Die Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste sind dazu bestimmt, Mitglieder des Deutschen Bundestages bei der Wahrnehmung des Mandats zu unterstützen. Der Deutsche Bundestag behält sich die Rechte der Veröffentlichung und Verbreitung vor. Diese bedürfen der Zustimmung des Direktors beim Deutschen Bundestag.

Zusammenfassung

Pläne zur Abwehr von Interkontinentalraketen existieren bereits seit der Frühphase des Kalten Krieges. In den 1980er Jahren galt der „Strategic Defense Initiative“ (SDI) von US-Präsident Ronald Reagan weltweite Aufmerksamkeit. Während nach dem Fall des Eisernen Vorhangs das Thema Raketenabwehr zunächst etwas in den Hintergrund trat, hat US-Präsident George W. Bush dem Konzept einer „National Missile Defense“ (NMD) bzw. „Global Missile Defense“ (GMD) wieder hohe Priorität eingeräumt. Vor dem Hintergrund der geplanten Stationierung von Komponenten eines Abwehrsystems in Tschechien und Polen werden die US-Pläne derzeit auch in Europa kontrovers debattiert.

Von seinen Gegnern wird das System in vielfacher Hinsicht kritisiert: Es sei technisch unausgereift und könne von Angreifern durch einfache Gegenmaßnahmen umgangen werden. Zudem verfügten die „Schurkenstaaten“ Iran und Nordkorea, gegen die das System offiziell gerichtet ist, noch nicht über die Art von Raketen, die abgewehrt werden könnten. Schließlich störe das System das strategische Gleichgewicht zwischen den USA und Russland, könne zu einer Aufrüstungsspirale führen und erhöhe letztlich die Wahrscheinlichkeit der versehentlichen Auslösung eines Atomkrieges. Die US-Regierung und andere Verfechter einer Raketenabwehr hingegen sehen in dem geplanten System einen erheblichen Beitrag zur nationalen Sicherheit der USA, aber auch der europäischen Staaten. Sie betonen den defensiven Charakter des Systems und verweisen darauf, dass es Leben schütze statt – wie bisherige, auf Abschreckung ausgerichtete Sicherheitskonzepte – Leben zu bedrohen.

Als Orientierungshilfe in dieser Debatte erläutert der vorliegende Text physikalische und technische Hintergründe der derzeit diskutierten Raketenabwehrsysteme. Er leistet damit einen Beitrag zum besseren Verständnis der Funktionsweise der Raketenabwehr und den damit verbundenen Problemen hinsichtlich Machbarkeit und Aufwand.

Abkürzungsverzeichnis

APS	American Physical Society (Physikalische Gesellschaft der USA)
BMDS	Ballistic Missile Defense System
CBO	Congressional Budget Office (USA)
CRS	Congressional Research Service (USA)
GMD	Global Missile Defense (oder auch: Ground-based Midcourse Defense)
ICBM	Intercontinental Ballistic Missile (Interkontinentalrakete, IKR)
NMD	National Missile Defense
SDI	Strategic Defense Initiative
UCS	Union of Concerned Scientists (USA)

Inhalt

Zusammenfassung	2
Abkürzungsverzeichnis	3
1. Einleitung: US-Raketenabwehr	5
2. Die Funktionsweise von Interkontinentalraketen	7
2.1. Funktionsweise von Interkontinentalraketen (ICBMs)	7
2.2. Flugphasen	9
2.3. Stand der Technik – Länderübersicht	11
3. Prinzipien der Raketenabwehr im Überblick	12
3.1. Abwehr in verschiedenen Flugphasen	12
3.2. Kinetische Raketenabwehr und Laserabwehr	12
3.3. Boden-, See-, Luft- und Weltraum-gestützte Abwehrsysteme	14
4. Technik der kinetischen Raketenabwehr	15
4.1. Kinetische Abwehr in der Startphase	15
4.1.1. Erfassung per Satellit und Radar	16
4.1.2. Berechnung einer Abschusslösung	17
4.1.3. Abschuss und Flug der Abwehrrakete	18
4.1.4. Kollisionskörper	19
4.1.5. Startphasenabwehr - Fazit	20
4.2. Kinetische Abwehr in der Freiflugphase	21
4.3. Kinetische Abwehr in der Flugendphase	23
5. Herausforderungen	24
5.1. Zeit- und Distanz-Probleme	24
5.2. Gegenmaßnahmen	26
5.2.1. Gegenmaßnahmen bei Startphasenabwehr	26
5.2.2. Gegenmaßnahmen bei Freiflugphasenabwehr	27
5.3. Kollateralschäden, Auswirkungen auf Umwelt und Drittstaaten	29
5.3.1. Verbleib von Gefechtsköpfen	29
6. Fazit	32
7. Literatur	34

1. Einleitung: US-Raketenabwehr

Das Abfangen von Langstreckenraketen, die mit Gefechtsköpfen bestückt sind, ist in den USA bereits seit den 1960er Jahren unter der Bezeichnung „Missile Defense“ Bestandteil militärischer Forschung und Entwicklung (Neuneck, Rothkirch 2006, S. 19). Das erste amerikanische Raketenabwehrprogramm „Nike-Zeus“ wurde nach mehreren Entwicklungsstufen im Jahr 1976 für einsatzbereit erklärt, um amerikanische Raketenbasen in North Dakota zu verteidigen. Nach dem Abschluss des Anti-Ballistic-Missile-(ABM-)Vertrages zur Begrenzung von Raketenabwehrsystemen zwischen den USA und der damaligen Sowjetunion im Jahr 1972, dem die SALT (Strategic Arms Limitation Talks) Gespräche vorausgegangen waren, war die Stationierung von Raketenabwehrsystemen stark reguliert. Daher waren die weiteren Entwicklungsanstrengungen in dem Bereich der Raketenabwehr bis in die frühen 80er Jahre hinein begrenzt (vgl. CBO 2004).

Im Jahr 1983 propagierte US-Präsident Reagan die Strategic Defense Initiative (SDI), um einem möglichen Angriff der UdSSR entgegenzuwirken. SDI sah die Errichtung eines Abwehrschirmes aus teils boden-, teils satellitengestützten Waffen vor. Es gab Pläne zur Stationierung tausender so genannter „brilliant pebbles“, kleiner Abfangraketen im Weltall, die bei Bedarf russische Raketen noch in der Startphase treffen sollten. Obwohl die Berechnungen der benötigten Raketenanzahl laufend nach unten korrigiert wurden, zeigten Analysen, dass eine effektive und vollständige Abwehr durch solche Technologien unter zumutbaren Kosten nicht erreichbar war (Neuneck, Rothkirch 2006, S. 19; CBO 2004, S. 18).

Unter der Regierung von George Bush sen. (1989-1993) wurde zwar ein ähnliches weltraumgestütztes Raketenabwehrprojekt diskutiert, doch ging man aufgrund des Zerfalls der UdSSR zunehmend von anderen Bedrohungslagen aus, wie etwa von unautorisierten Raketenangriffen oder Angriffen auf amerikanische Truppen im Ausland (vgl. Neuneck, Rothkirch 2006; Garwin 2005). Diese Überlegungen wurden von Präsident Clinton weiter geführt. Die Stationierung vorhandener Technologien zum Schutz kleinerer Gebiete, auch außerhalb der USA, hatte Vorrang, vor allem um dort im Einsatz befindliche Truppen zu verteidigen. Die Entwicklung einer landesweiten Abwehr gegen begrenzte Interkontinentalraketenangriffe wurde als „National Missile Defense“ (NMD)-Programm zwar eingeleitet, aber nicht umgesetzt (vgl. Neuneck, Rothkirch 2006, S. 19; UCS 2004, S. 2).

Präsident George W. Bush forciert dagegen eine Raketenabwehr, die das Territorium der USA, ihrer Verbündeten, sowie ihre im Ausland eingesetzten Truppen vor Angriffen durch ballistische Raketen großflächig schützen soll. Sie soll als „Global Missile

Defense“ (GMD)¹ mehrschichtig („layered“) sein, also die Möglichkeit bieten, angreifende Raketen in verschiedenen Flugphasen abzuwehren (vgl. Neuneck 2001). Diese Mehrschichtigkeit würde die gesamte Wirksamkeit der Abwehrsysteme verbessern (vgl. Neuneck, Rothkirch 2006, S. 19-20; UCS 2004, Kapitel 1; CBO 2004, S. 3). Die amerikanische Missile Defense Agency (MDA)² veranschlagte für den Zeitraum 2004-2009 ein Budget von 50,3 Milliarden US-Dollar für die Entwicklung von Raketenabwehrsystemen (CBO 2004). Für die bisherigen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zu Raketenabwehrsystemen haben die USA seit Mitte der 1980er Jahre insgesamt etwa 100 Milliarden US-Dollar aufgewendet (CRS 2007, S. 7).

Im Frühjahr 2007 erhielten die Raketenabwehrpläne der US-Regierung verstärkte politische und mediale Aufmerksamkeit in Europa, da die Stationierung von Abwehrelementen der GMD in der Tschechischen Republik und in Polen durch die USA geplant ist. Während in Tschechien ein Radarsystem installiert werden soll, wurde Polen als Basis für zehn Abwehrraketen ausgewählt. Die US-Regierung betont, die Abwehrbemühungen richteten sich gegen potenzielle Angriffe aus Iran oder Nordkorea (vgl. Tageschau.de 2007; FAZ 2007).

Insbesondere die US-Pläne zur Abwehr möglicher iranischer Angriffe haben in Europa eine kontroverse Debatte ausgelöst. Zum einen bezweifeln viele Kritiker, dass der Iran überhaupt eine aktuelle Bedrohung darstelle, insofern das Land - auch nach Einschätzung der Bundesregierung³ - bisher nicht über Raketen verfüge, die die USA tatsächlich erreichen könnten. Zum anderen wird eine Destabilisierung des strategischen Gleichgewichts zwischen den USA und Russland befürchtet⁴. Schließlich wird auch die bisher mangelnde Einbeziehung der NATO in die konkreten Planungen kritisiert. Befürworter weisen dagegen darauf hin, dass der Gesamtzusammenhang durchaus schon seit Jahren Thema im NATO-Rat sei - in dem auch Russland vertreten ist. Darüber hinaus führe die Stationierung zu einer Debatte im NATO-Rahmen über die politische Funktion von Raketenabwehrsystemen, und damit zu einer wünschenswerten Wiederbelebung des Bündnisses (Frühling/Sinjen 2007, S. 4ff.). Manche befürworteten eine Stationierung der Abwehr trotz der Unklarheit, ob der Iran tatsächlich in absehbarer Zeit Atomraketen mit

¹ In Fachkreisen wird das Kürzel GMD auch für Ground-based Midcourse Defense, die bodengestützte Freiflugphasenraketenabwehr, verwendet.

² Siehe <http://www.mda.mil>

³ Antwort der Bundesregierung (BT-Drs. 16/4517, 27.03.2007) auf die Kleine Anfrage der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen (BT-Drs. 16/4517, 02.03.2007), S. 5.

⁴ So trafen die US-Pläne auch auf den energischen Widerspruch Russlands. Präsident Putin verwies darauf, dass Iran gar keine Raketen mit entsprechender Reichweite besitze, und äußerte damit indirekt die Befürchtung, das System sei in Wahrheit gegen Russland gerichtet. Das Abwehrsystem verändere laut Putin die gesamte Konstellation der internationalen Sicherheit. Um das strategische Gleichgewicht wieder herzustellen, könnte Russland gezwungen sein, im nuklearen Bereich massiv aufzurüsten, was zu einem neuen Wettrüsten führen könnte. Siehe dazu z.B. <http://www.tagesspiegel.de/politik/art771,2315017>

interkontinentalen Reichweiten herstellen könne. Denn mit einem Iran, der westliche Interventionen mit Verweis auf seine Fähigkeiten, Europa mit Atomraketen anzugreifen, abschrecken könne, würde sich die strategische Lage gerade Europas entscheidend ändern (so z.B. Thränert 2007). Schließlich bedauern einige Stimmen, dass die öffentliche Diskussion sehr schnell auf eine Debatte über den richtigen Umgang mit Russland reduziert worden sei, und dass die technischen Details und die strategischen Hintergründe der Raketenabwehr dabei weitgehend auf der Strecke geblieben seien (Rühle 2007, S. 1).

Im Folgenden werden daher die Funktionsweise eines Raketenabwehrsystems dargestellt, technische Optionen erläutert und einige grundlegende Herausforderungen und Beschränkungen diskutiert. Eine umfangreiche Studie der NATO zu diesem Thema unterliegt der militärischen Geheimhaltung und konnte nicht zu Rate gezogen werden. Die Untersuchung stützt sich daher in erster Linie auf die vorhandene Literatur zu naturwissenschaftlich-technischen Hintergründen der Raketenabwehr. Diese stammt vornehmlich aus dem englischsprachigen Raum - so die umfassende Studie der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft (APS) zur Startphasenabwehr (APS 2004), die Untersuchung des Congressional Budget Office (CBO) der USA zu Alternativen und Kosten der Startphasenabwehr (CBO 2004) und die Darstellung der Union of Concerned Scientists (UCS) zur technischen Machbarkeit, den Erfolgsaussichten und den Trefferraten der bisherigen Abwehrversuche (UCS 2004). In der deutschsprachigen Literatur finden sich zunächst einige Übersetzungen populärwissenschaftlicher Darstellungen aus dem Englischen (Lewis, Pike, Postol 1999; Garwin 2005). Jedoch existiert auch in Deutschland eine Forschergemeinschaft, die sich mit den Hintergründen der Raketenabwehr wissenschaftlich befasst. Auch deren Darstellungen sind in den vorliegenden Text mit eingeflossen (Altmann 1988; Neuneck/Rothkirch 2006; vgl. auch die Presseberichte in Spiegel 2007a, Spiegel 2007b).

2. Die Funktionsweise von Interkontinentalraketen

2.1. Funktionsweise von Interkontinentalraketen (ICBMs)

Eine Interkontinentalrakete (Interkontinentale Langstreckenrakete; engl: Intercontinental Ballistic Missile, ICBM) besteht aus einer meist mehrstufigen Trägerrakete, einem integrierten Lenksystem und einem oder mehreren auf der Rakete montierten Gefechtsköpfen. Sie hat eine Reichweite von mindestens 5.500 Kilometern⁵, meist aber 10.000 Kilometern oder mehr. In der Startphase beschleunigt die Trägerrakete das Ge-

5 So die Definition im SALT-II Vertrag. Diese Distanz entspricht der Mindestentfernung zwischen den kontinentalen Gebieten der USA und der Sowjetunion.

schoss innerhalb weniger Minuten auf hohe Geschwindigkeiten (6-7 Kilometer pro Sekunde oder mehr, entsprechend 20.000–30.000 Stundenkilometer). Ist die Endgeschwindigkeit erreicht, so wird die leergebrannte Trägerrakete abgetrennt und fällt zur Erde zurück oder verglüht in der Atmosphäre. Der Gefechtskopf wird aus der Erdatmosphäre hinausgeschossen und erreicht große Höhen von mehreren Hundert bis über 1.000 Kilometern über dem Erdboden⁶. Er fliegt auf einer parabelförmigen Bahn antriebslos weiter, ähnlich einem Wurfgeschoss oder einer Kanonenkugel. Da er sich im luftleeren Raum befindet, wird sein Flug durch nichts gebremst, bis er schließlich in der Nähe des Ziels wieder in die Erdatmosphäre eintritt. Die Flugbahn nach Brennschluss des Raketentriebwerks ist aus einfachen physikalischen Gesetzen leicht zu berechnen und der Aufschlagpunkt leicht vorherzusagen (vgl. APS 2003; CBO 2004). Aufgrund der hohen Fluggeschwindigkeiten werden in dieser Freiflugphase Distanzen von 10.000 Kilometern und mehr in nur etwa 20-30 Minuten Flugzeit zurückgelegt.

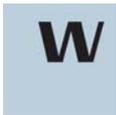
Die Reichweite einer Interkontinentalrakete hängt entscheidend von der am Ende der Startphase erreichten Endgeschwindigkeit⁷ ab. Um diese zu erhöhen, haben ICBMs in der Regel nicht nur eine, sondern **zwei bis drei Antriebsstufen**, die nacheinander gezündet werden. Indem nach Brennschluss jeder einzelnen Stufe Ballast (ein Teil der Tanks und Antriebssysteme) abgeworfen wird, können die verbleibenden Komponenten leichter weiter beschleunigt werden. Allerdings dauert die Startphase einer mehrstufigen Rakete insgesamt länger als im einstufigen Falle.

Der Antrieb kann entweder mit Flüssigtreibstoff oder festem Treibstoff betrieben werden. **Flüssigstoffraketen** verwenden einfachere Technologie und sind in der Konstruktion weniger aufwändig⁸. Dafür sind sie komplizierter zu betanken, was ihren Betrieb und die Wartung erschwert und gefährlicher macht. **Feststoffraketen** hingegen sind in der Herstellung technologisch äußerst aufwändig, ihre Wartung dafür einfach. Beim Start bieten Feststoffraketen den Vorteil einer schnelleren Beschleunigung, so dass sie mit Antriebsphasen von insgesamt 3 Minuten oder kürzer auskommen, wogegen Flüssigstoffraketen Antriebsphasen von mindestens 4 Minuten haben (vgl. APS 2003, CBO 2004).

6 In ähnlicher Höhe kreisen auch manche niedrig fliegende Satelliten um die Erde.

7 Die erreichbare Endgeschwindigkeit einer einstufigen Raketen hängt, neben dem spezifischen Energiegehalt des verwendeten Treibstoffs, allein vom Gewichtsverhältnis zwischen der Gesamtmenge an Treibstoff und der Nutzlast/Eigengewicht der Rakete ab. Dieses Verhältnis lässt sich jedoch nicht beliebig steigern, da ein Minimum an Eigengewicht unvermeidlich ist, wenn die strukturelle Stabilität des Raketenkörpers nicht gefährdet werden soll.

8 Zur genauen Funktionsweise, siehe CBO 2004, Seite 5, linke Spalte unten.



2.2. Flugphasen

Die Flugbahnen von raketenbetriebenen Projektilen lassen sich in drei Phasen teilen (vgl. CBO 2004; APS 2003, Kapitel 15 und Anhang A.2). Die **Startphase** („boost phase“) dauert zwischen 180 und 320 Sekunden, gemessen von der Zündung der ersten Antriebsstufe bis zum Ausbrennen der letzten Antriebsstufe.

Die mittlere **Freiflugphase** („midcourse“) reicht vom Ende der letzten Antriebsstufe, in ungefähr 150 bis 200 Kilometer Höhe, bis zum Wiedereintritt in die Erdatmosphäre. Jener Teil der Freiflugphase, in dem die letzte Antriebsstufe zwar ausgebrannt, aber noch nicht vom Gefechtskopf getrennt ist, wird „Aufstiegsphase“ („ascent phase“) genannt. Sie kann bis zu 60 Sekunden dauern.

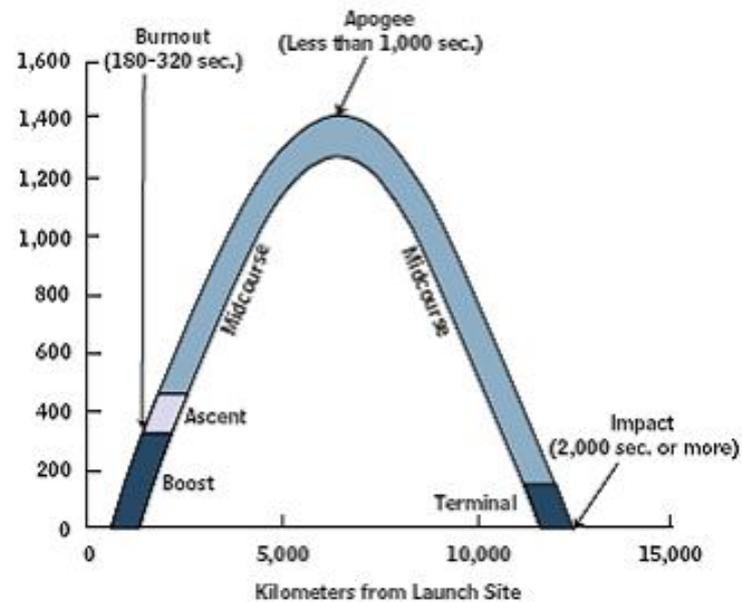
Die letzte Flugphase (**Endphase** oder Anflugphase, engl.: „terminal phase“) dauert vom Wiedereintritt in die Erdatmosphäre bis zum Einschlag des Projek-

tils. In dieser Phase unterliegt der Gefechtskopf wieder der Reibung an den atmosphärischen Luftschichten und wird dadurch abgebremst. Damit er durch die entstehende Reibungswärme nicht beschädigt wird, ist der Gefechtskopf mit einer widerstandsfähigen Schutzschicht bestückt.

Summary Figure 1.

Trajectory of a Notional ICBM

(Altitude in kilometers)



Source: Congressional Budget Office.

Note: ICBM = intercontinental ballistic missile.

Abbildung 1: Einteilung der Flugbahnen einer Interkontinentalrakete (Quelle: CBO 2004, x).

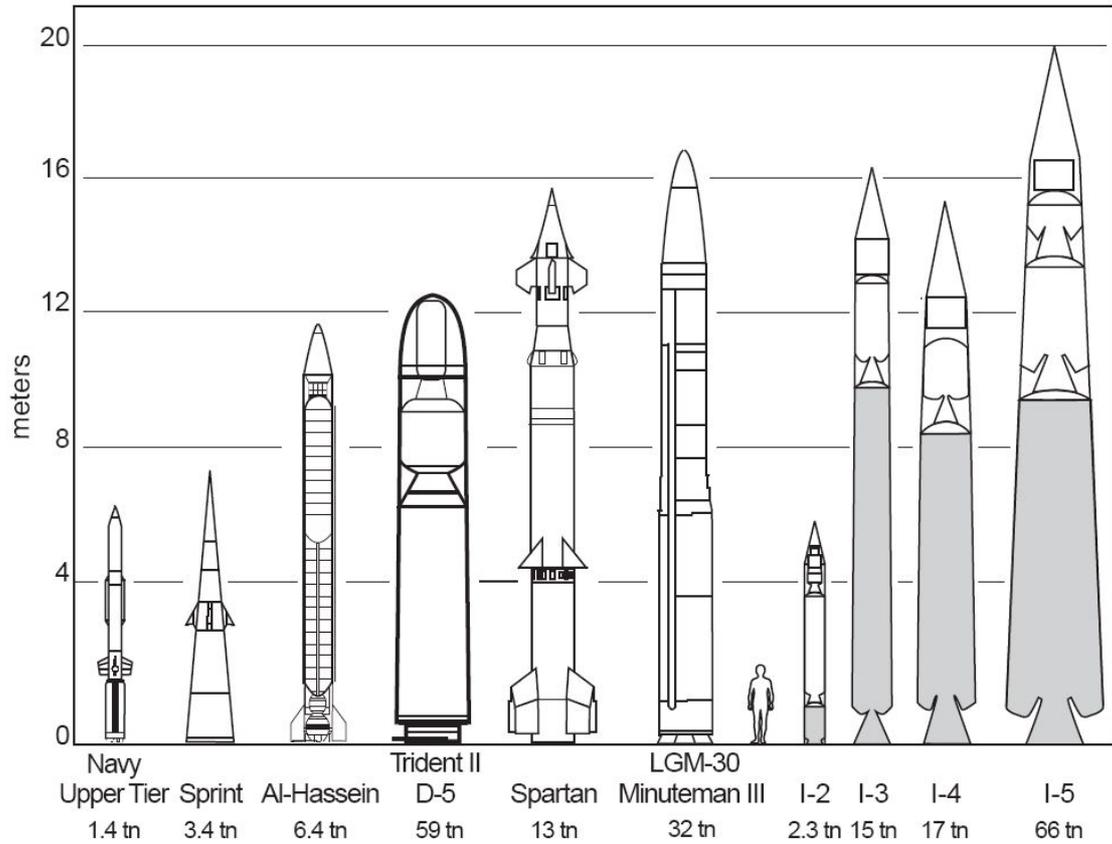


Abbildung 2: Größenvergleich einiger Interkontinentalraketen (links) und Modellentwürfe möglicher Abwehrraketen (rechts) (Quelle: APS 2004, Abb. 16.6).

Interkontinentalraketen trugen bisher stets Nuklearsprengköpfe. Sie könnten theoretisch aber auch mit anderen Massenvernichtungswaffen bestückt werden, etwa mit chemischen oder biologischen Kampfstoffen (Lewis, Pike, Postol 1999).



2.3. Stand der Technik – Länderübersicht

Weltweit sind etwa 35 Länder im Besitz von ballistischen Raketen, wobei nach Darstellung des US-Congressional Budget Office nur 13 Länder Projektilen mit einer Reichweite von mehr als 500 Kilometern besitzen (Stand 2004). Nur vier Länder – China, Russland, die USA und Großbritannien – besitzen Interkontinentalraketen mit über 10.000 Kilometer Reichweite. Großbritannien hat als einziges der vier Länder diese nicht selbst entwickelt. Nach Einschätzung der US-Geheimdienste vom Dezember 2001 könnten bis zum Jahr 2015 auch Nordkorea und Iran die Fähigkeit entwickeln, Interkontinentalraketen herzustellen (vgl. APS 2004, xxxi; CBO 2004).

Table 1-3.

Nations with Long-Range Ballistic Missiles

	Longest Range (Kilometers)	Built or Bought
China	10,000+	Built
France	4,500	Built
India	2,500	Built
Iran	1,200	Built
Israel	3,000	Built
Libya ^a	700	Bought
North Korea	2,000	Built
Pakistan	2,300	Built
Russia	10,000+	Built
Saudi Arabia	2,500	Bought
Syria	700	Built
United Kingdom	10,000+	Bought
United States	10,000+	Built

Source: Congressional Budget Office based on Duncan Lennox, ed., *Jane's Strategic Weapons Systems*, vol. 39 (Coulson, Surrey: Jane's Information Group, July 2003).

Note: The countries listed above all have missiles with ranges greater than 500 kilometers.

a. As part of its recent rapprochement with the United States and the United Kingdom, Libya has indicated that it will give up its missiles that have ranges greater than 300 kilometers.

Auch nach aktueller Darstellung der Bundesregierung⁹ sind heute und voraussichtlich bis mindestens zum Jahr 2010 lediglich die fünf

Abbildung 3: Staaten, die über Mittel- und Langstreckenraketen mit mehr als 500 km Reichweite verfügen (Stand 2004, Quelle: US-Congressional Budget Office, CBO 2004).

UN-Vetomächte im Besitz von Raketen mit mehr als 5.500 Kilometer Reichweite. Und ob sich der Kreis der Staaten, die über die Technologie zum Bau von Interkontinentalraketen verfügen, bis 2020 oder 2030 erweitern wird, ist nach Einschätzung der Bundesregierung zwar nicht auszuschließen, aber von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, „über die heute keine belastbaren Prognosen gemacht werden können. Hingegen lässt sich feststellen, dass es Grund für die Annahme gibt, dass der Erwerb von interkontinentalen ballistischen Raketen durch Staaten, die diese bisher nicht besitzen, in den kommenden Dekaden nicht ausgeschlossen werden kann“ (BT-Drs. 16/4710).

9 Antwort der Bundesregierung (BT-Drs. 16/4710, 19.03.2007) auf die Kleine Anfrage der Fraktion Die Linke (BT-Drs. 16/4469, 26.02.2007).

3. Prinzipien der Raketenabwehr im Überblick

Raketenabwehrsysteme werden anhand mehrerer Kriterien in verschiedene Klassen untergliedert. So kann die Abwehr in verschiedenen Flugphasen der angreifenden Rakete ansetzen. Der Abschuss kann durch Kollision mit einer Abwehrrakete oder aber mit Laserstrahlen erfolgen. Schließlich kann das Abwehrsystem an Land, auf See, in Flugzeugen oder im Weltraum stationiert werden.

3.1. Abwehr in verschiedenen Flugphasen

Eine Raketenabwehr kann prinzipiell in jeder der in Abschnitt 2.2 genannten drei Flugphasen ansetzen. Die Abwehr noch in der Startphase der angreifenden Rakete bietet Vorteile insbesondere bei Mehrfachsprengköpfen. Diese können nur in dieser Phase noch auf einen Schlag ausgeschaltet werden. Die Startphasenabwehr ist jedoch technisch und geographisch besonders schwierig zu realisieren (s. Abschnitt 4.1).

Die Freiflugphase lässt deutlich mehr Zeit für Abwehrversuche. Auch ist der Flug des angreifenden Gefechtskopfs leichter berechenbar. Allerdings ist die Abwehr hier besonders anfällig für Gegenmaßnahmen des Angreifers (s. Abschnitt 4.2).

Eine Endphasenabwehr schließlich bietet andere technische Vorteile (s. Abschnitt 4.3). Jedoch ist in dieser Phase der Schutz nicht mehr einheitlich für ein Land als Ganzes, sondern nur noch durch eine Vielzahl lokaler Systeme für einzelne Städte zu realisieren. Auch wäre der Schaden bei einem möglichen Fehlschlag der Abwehr besonders groß.

3.2. Kinetische Raketenabwehr und Laserabwehr

Während frühe Abwehrkonzepte darauf beruhten, eine angreifende Rakete durch nukleare Explosionen im Weltraum von ihrem Kurs abzubringen, werden heute zwei andere Strategien verfolgt: Einerseits kann eine Rakete bzw. ein Gefechtskopf durch direkte Kollision mit einem Abfangkörper zerstört werden (**kinetische Abwehr** – siehe Kapitel 4). Andererseits kann ein Abwehrsystem versuchen, die angreifenden Raketen durch hochenergetische Laserstrahlung zu beschädigen und zum Absturz zu bringen (**Laserabwehr** – vgl. Stupl 2005).

3.2.1. Laserabwehr – Grundlagen

Lasersysteme werden vor allem für die Startphasenabwehr in Betracht gezogen. In der Diskussion sind luftgestützte Hochenergie-Infrarot-Laser¹⁰ („airborne laser“, ABL), die

10 Im Rahmen der *Strategic Defense Initiative (SDI)* wurde auch über Röntgenlaser diskutiert, die im Weltraum stationiert werden sollten. Röntgenlicht ist erheblich energiereicher als sichtbares oder infrarotes Licht und könnte feindliche Raketen theoretisch leichter beschädigen. Jedoch sind starke Röntgenlaser technisch wesentlich schwerer zu realisieren und in der Praxis bisher nicht demonst-

auf speziell ausgerüsteten Großflugzeugen stationiert wären (vgl. Neuneck/Rothkirch 2006, S. 27). Der wesentliche Vorteil der Laserabwehr liegt darin, dass Laserstrahlen sich mit sehr viel höherer Geschwindigkeit bewegen als Abfangraketen und ihr Ziel so schneller erreichen könnten. Die Abfangkörper eines kinetischen Abwehrsystems erreichen Endgeschwindigkeiten von kaum mehr als 7-10 Kilometer pro Sekunde (km/s). Sie müssen daher sehr früh gestartet werden, schnell beschleunigen und relativ nah am angestrebten Kollisionspunkt stationiert sein, um den Weg zu ihrem Ziel innerhalb des gegebenen Zeitfensters zurücklegen zu können. Laserstrahlen hingegen bewegen sich „von selbst“ mit **Lichtgeschwindigkeit** (ca. 300.000 km/s). Sie könnten vom Abschussort aus theoretisch jeden anderen Punkt der Erdoberfläche in Bruchteilen einer Sekunde erreichen.

Jedoch ist die **Reichweite** eines Lasersystems aus anderen Gründen begrenzt: Der Laserstrahl wird von der Luft schrittweise absorbiert, an Grenzen zwischen Luftschichten abgelenkt oder etwa durch Wolken gestreut. Wenn er nicht „zerfasern“, sondern punktgenau und fokussiert sein Ziel treffen soll, kann deshalb auch ein Laserstrahl nur über Entfernungen von deutlich unter 1.000 Kilometern auf eine angreifende Rakete gelenkt werden.

Wenn der Laserstrahl die angreifende Rakete wie geplant trifft, wird diese nicht – wie bei der kinetischen Abwehr – augenblicklich zertrümmert. Vielmehr käme es darauf an, dass der Laser eine genügende Energiemenge auf der Hülle der Trägerrakete deponiert, um diese lokal zu erhitzen und möglichst zum Schmelzen zu bringen. Dann könnte der Laserstrahl im Extremfall die Hülle des Treibstofftanks der Rakete durchdringen und ihren Flüssigtreibstoff zur Explosion bringen. Wahrscheinlicher aber ist, dass die mechanische Struktur des Raketenkörpers so weit destabilisiert wird, dass diese ihre Festigkeit verliert, bei weiter anhaltendem Schub ihrer Triebwerke abknickt und zerbricht. In beiden Fällen kommt es darauf an, eine möglichst große Energie- bzw. Wärmemenge möglichst punktgenau an einem Ort der Raketenhülle zu deponieren. Der Angreifer könnte dies unterlaufen, indem er die Raketenhülle mit einer Beschichtung versieht, die Laserlicht teilweise reflektiert und dadurch den Erwärmungseffekt reduziert.

riert worden. Zwei aktuelle Projekte von Röntgenlasern für die zivile Forschung in Hamburg und Stanford/Kalifornien benötigen mehrere Kilometer lange unterirdische Beschleunigeranlagen, um Laserstrahlen im Röntgenbereich zu erzeugen. Ein Transport solcher Anlagen in den Weltraum ist kaum vorstellbar. Die im Rahmen von SDI diskutierten Modelle sahen stattdessen andere Typen von Röntgenlasern vor, die durch nukleare Explosionen mit Energie versorgt werden sollten. Diese Konzepte waren jedoch nicht nur in ersten Tests wenig erfolgreich. Sie hätten auch ähnliche Umweltschäden hervorgerufen wie andere Abwehrkonzepte mit Kernwaffenexplosionen im Weltraum. Aus diesen Gründen werden Röntgenlaser für die Raketenabwehr nicht weiter verfolgt (vgl. Nilsen 1994).

Daneben hätte ein Laserabwehrsystem einige weitere Nachteile: Es müsste während des gesamten Abschussvorgangs eine direkte Sichtverbindung zwischen Laser und Rakete geben. Die Sensortechnik des Lasersystems müsste genau genug sein, um den Strahl präzise nachzuführen, so dass derselbe Punkt auf der Oberfläche der (schnell beschleunigenden) Rakete über mehrere Sekunden aufgeheizt wird. Um jederzeit zur Abwehr bereit zu sein, müsste mindestens ein mit der Laserwaffe ausgerüstetes Flugzeug ständig in der Luft sein. Seine Flugroute müsste über Nachbarländern des Angreifers und/oder über internationalen Gewässern liegen. Je nach Fläche des potenziellen Angreiferstaats könnten auch mehrere Flugzeuge erforderlich sein, um alle denkbaren Abschussorte zu jedem beliebigen Zeitpunkt abdecken zu können. Für Wartungspausen müssten Ersatzflugzeuge bereitgehalten werden. Hinzu kämen Tankflugzeuge und eine Begleitflotte von Kampfflugzeugen, um feindliche Luftangriffe abzuwehren. Aus diesen Gründen wäre ein Laserabwehrsystem nicht nur schwer zu bedienen, sondern auch sehr teuer (Garwin 2005).

3.3. Boden-, See-, Luft- und Weltraum-gestützte Abwehrsysteme

Eine Raketenabwehr ist grundsätzlich als boden-, see-, luft- oder weltraumgestütztes System realisierbar. Boden- wie luftgestützte Systeme dürften die Grenzen bzw. den Luftraum des potenziellen Angreiferstaats nicht verletzen. Eine Konstellation welt-raumgestützter Abfangraketen (Space-Based Interceptors, oder SBI) könnte im Prinzip diese politisch-geographisch bedingte Einschränkung aufheben (APS 2004, xxxiv). Die Einschränkungen, die aus der mangelnden Reichweite und Geschwindigkeit von Abwehrsystemen resultieren, bleiben jedoch erhalten.

3.3.1. Weltraumgestützte Abwehrsysteme - Grundlagen

Um ein weltraumgestütztes Abwehrsystems zu realisieren, müssten seine Komponenten zuerst in Erdumlauf gebracht werden. Der Transport größerer Materialmengen in den Weltraum ist sehr teuer. Eine der technischen Herausforderungen liegt daher darin, das Gewicht der benötigten Bauteile so weit wie möglich zu reduzieren (vgl. CBO 2004).

Außer in der Äquatorebene können Satelliten nicht stationär über einem Punkt der Erdoberfläche verweilen. Um vollständige Deckung gegen einen Angriff mit ICBMs in der Startphase zu erreichen, die zwischen dem 25. und 45. Breitengrad¹¹ abgefeuert würden, müsste deshalb eine ganze Flotte von Satelliten (zwischen 70 und mehr als 900) in Erdumlaufbahnen stationiert werden. Nur so könnten Flüssigstoff-ICBMs rechtzeitig abgewehrt werden. Die weltraumgestützte Abwehr auch von schnelleren Feststoffraketen aus denselben Breitengraden würde die Anzahl der notwendigen Satelliten um ein Vielfa-

¹¹ In diesem Breitengrad-Intervall befinden sich u.a. Iran und Nordkorea.

ches vergrößern. Um eine Feststoff-ICBM aus Nordkorea oder Iran 5 Sekunden vor Brennschluss abzufangen, wäre die Stationierung von mindestens 1.600 Abwehrraketen im Weltraum erforderlich (vgl. APS 2004, xxxiv).

Aus diesen Gründen würde der Preis für ein weltraumgestütztes Abwehrprogramm (inklusive Transport in den Weltraum und Betrieb über 20 Jahre) nach Berechnungen des Congressional Budget Office zwischen 27 und 78 Milliarden Dollar liegen (vgl. CBO 2004, S. 41-43).

4. Technik der kinetischen Raketenabwehr

Ein System zur Abwehr von ICBMs muss in der Lage sein, einen Gefechtskopf abzufangen, der weniger als 1 Meter Durchmesser haben kann und sich im luftleeren Raum mit einer Geschwindigkeit von über 20.000 Kilometern pro Stunde bewegt. In den 1960er Jahren konzipierte Abwehrsysteme basierten auf nuklear bestückten Abfangraketen, die nur in der Nähe des Ziels explodieren mussten, um dieses zu zerstören oder von seinem Kurs abzulenken. Solche Systeme hätten durch Kernexplosionen im Weltall erhebliche Kollateralschäden verursacht (vgl. Lewis, Pike, Postol 1999; Garwin 2005; Neuneck, Rothkirch 2006, S. 27). In den letzten Jahrzehnten konnten die Lenksysteme von Abwehrraketen jedoch so weit verbessert werden, dass es prinzipiell möglich wurde, Raketen durch direkten Zusammenprall mit Abfangflugkörpern zu zerstören. So genannte „**hit-to-kill**“ Systeme zerstören ihre Ziele aufgrund der hohen kinetischen Energie (Bewegungsenergie), die in einem direkten Zusammenstoß bei großen Geschwindigkeiten freigesetzt wird (vgl. Lewis, Pike, Postol 1999; Garwin 2005). Sie werden daher auch unter dem Namen „kinetische Raketenabwehr“ zusammengefasst.

4.1. Kinetische Abwehr in der Startphase

Die Abwehr in der Startphase bietet mehrere Vorteile: Eine Rakete kann während des Abhebens vergleichsweise gut entdeckt und erfasst werden, weil die heiße Abgasfahne der Trägerrakete für Infrarotsensoren einfach zu erkennen ist. Auch bietet die Trägerrakete selbst ein größeres und sichtbareres Ziel als später der (kleinere) Gefechtskopf. Außerdem sind Gegenmaßnahmen zum Schutz einer ICBM - wie etwa der Einsatz von Attrappen - während der Antriebsphase schwieriger zu bewerkstelligen (CBO 2004). Schließlich ist die Startphasenabwehr das wirksamste Mittel gegen Raketen, die mehrere nukleare Sprengköpfe oder eine Vielzahl kleiner, biologischer oder chemischer Waffen tragen. Ein auf die mittlere Flugphase ausgerichtetes Abwehrsystem könnte einen solchen Angriff kaum noch stoppen, sobald sich die Ladung als Schwarm um die mittlere Flugbahn ausgebreitet hat (Garwin 2005).

Eine Startphasenraketenabwehr kann den Einschlag von Gefechtsköpfen im Zielgebiet jedoch nur dann verhindern, wenn die angreifende Trägerrakete rechtzeitig gestoppt wird. Hat sie dem Gefechtskopf bereits eine ausreichende Geschwindigkeit verliehen, damit dieser ohne weiteren Antrieb auf einer ballistischen Flugbahn sein Ziel erreichen kann, so kann der Angriff nicht mehr durch Abschuss der Trägerrakete abgewehrt werden (vgl. CBO 2004; APS 2004; Garwin 2005). Das Zeitfenster eines Startphasenabwehrsystems für den Abschuss einer Interkontinentalrakete ist daher eng begrenzt. Eine Startphasenabwehr wäre gezwungen, anfliegende Raketen in maximal etwa 4 Minuten als potenziell bedrohlich zu erkennen und abzufangen (APS 2004).

Die Startphasenabwehr lässt sich konzeptionell in zwei Phasen unterteilen. Die erste ist die **Beschlussphase** (engl: „commit stage“), die vom Start einer ICBM bis zum Start einer Abwehrrakete dauert. Während der Beschlussphase muss ein Startphasenabwehrsystem die ICBM entdecken, ihren Kurs verfolgen und gegebenenfalls die Entscheidung fällen, diese abzufangen. Die zweite Phase ist die **Jagdphase** (engl: „flyout stage“). Diese umfasst den Zeitraum zwischen dem Start der Abwehrrakete und der Kollision. Die Länge der Jagdphase ist bestimmt durch die Flugbahn der ICBM, die maximal erreichbaren Geschwindigkeiten der Abwehrraketen und die Entfernung zwischen dem Standort des Abwehrsystems und dem Kollisionspunkt (vgl. CBO 2004, APS 2004).

4.1.1. Erfassung per Satellit und Radar

Die erste Aufgabe eines Startphasenabwehrsystems liegt darin, den Start einer Interkontinentalrakete durch Infrarot-Frühwarnsatelliten zu entdecken und ihre Bahn anschließend durch große Radarstationen genauer zu verfolgen. Frühwarnradaranlagen arbeiten mit relativ niedrigen Funkfrequenzen um ein Gigahertz und können Objekte nur mit begrenzter Auflösung lokalisieren. Sie können jedoch große Gebiete gleichzeitig abdecken und einige Dutzend Zielobjekte simultan verfolgen. Danach würde ein zweites Radarsystem, ein im höherfrequenten X-Bandbereich (um neun Gigahertz) arbeitendes Bodenradar, aktiviert. Durch Konzentration des Suchfensters auf den Ort der anfliegenden Rakete kann eine solche Anlage über große Entfernungen hinweg ballistische Flugkörper mit höherer Ortsauflösung verfolgen. Eine Gefechtszentrale würde dann anhand der Messdaten die Flugbahn der angreifenden ICBM und mögliche Abfangpunkte berechnen und schließlich den Startbefehl an eine Abfangrakete weiterleiten (Lewis, Pike, Postol 1999).

Erste Hinweise auf den Start einer ICBM kämen also von militärischen Satelliten, die speziell für die Entdeckung der heißen Abgasflamme eines großen Raketentriebwerks entwickelt wurden. Amerikanische Frühwarnsatelliten beobachten fast den gesamten Planeten im infraroten Bereich und wären daher in der Lage, den Start jedes ballistischen Flugkörpers von signifikanter Größe und Reichweite aufzuspüren. Diese Satelli-

ten überstreichen alle zehn Sekunden die Erdoberfläche und könnten mit einer Genauigkeit von etwa einem Kilometer die ungefähre Position der Rakete ermitteln (vgl. Garwin 2005; Kleppner, Lamb, Mosher 2004). Sie erkennen startende Raketen aber üblicherweise erst, wenn diese die Wolkendecke durchstoßen haben. An klaren Tagen könnten Satelliten auch den Erdboden „sehen“. Jedoch sind typische Raketenabschussstellen ausreichend häufig bewölkt, so dass die Sensoren startende Raketen erst ab einer Flughöhe von etwa 7 Kilometern entdecken können. Flüssigstoffraketen erreichen diese Flughöhe in 40 bis 50 Sekunden; Feststoffraketen, die schneller aufsteigen, schon nach 30 Sekunden (APS 2004).

Seit Ende 2005 betreibt die US-amerikanische Missile Defense Agency (MDA) eine Radaranlage auf einer im Pazifik schwimmenden Plattform nahe den Aleuten, die im Sommer 2007 fertig gestellt werden soll (Spiegel Online 2007a). Mit einer Wellenlänge von etwa drei Zentimetern (im „X-Band“) sind diese Wellen kürzer als die konventioneller Radaranlagen. Mit solch kurzen Wellen lässt sich der Radarstrahl im Prinzip genügend fokussieren, um einen Gefechtskopf auch innerhalb einer „Bedrohungswolke“ zu erkennen, in der sich zusätzlich auch die letzte Raketenstufe der ICBM und eventuell eine Vielzahl von Ballonattrappen befinden.

Zusätzlich zu Frühwarnsatelliten und Radaranlagen entwickelt das Pentagon eine Satelliten-Konstellation in niedrigen Erdumlaufbahnen – das „Space Based Infrared Satellite Program“ (SBIRS Low) –, um Raketen mittels Infrarot- und Lichtsensoren auch in ihrer mittleren Flugphase verfolgen zu können. Dieses System sollte ursprünglich bis 2006 betriebsbereit sein, um ab 2010 voll zum Einsatz kommen zu können. Nach erheblichen technischen Verzögerungen ist derzeit unklar, ob dieses System bis zum Ende des Jahrzehnts fertig gestellt werden kann (vgl. Garwin 2005; Kopec 2006).

4.1.2. Berechnung einer Abschusslösung

Die zweite Aufgabe der Beschlussphase ist es, die Flugbahn (Trajektorie) einer ICBM sowie eine so genannte **Abschusslösung** zu berechnen. Diese gibt an, wie die Abwehrrakete von ihrem Stützpunkt die angreifende Rakete zum erwünschten Zeitpunkt erreicht. Dafür wird das zukünftige Verhalten der ICBM während ihrer Schubphase geschätzt und die mögliche Ungenauigkeit der Schätzung in die Berechnung mit einbezogen (APS 2004, S. 22-23). Problematisch ist, dass die Abschusslösung für das Abfangen eines Gefechtskopfes unter Raketenantrieb nicht in jeder Hinsicht berechenbar ist. Diese Unberechenbarkeit resultiert aus:

- a) Statistischen oder systematischen Fehlern in den Messungen und Abschätzungen von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung jener Systemkomponenten, die mit der Entdeckung und Erfassung einer ICBM befasst sind.
- b) Fehlendem Wissen über das Ziel der ICBM.



- c) Beabsichtigten oder unbeabsichtigten Schwankungen in der Dauer der Schubphase einer ICBM.
- d) Variationen der Flugbahn einer ICBM (der Angreifer kann steilere oder flachere Trajektorien zum Erreichen desselben Ziels wählen).
- e) Möglichen Ausweichmanövern einer ICBM.
- f) Unsicherheit bezüglich der Spezifikationen der ICBM (Masse, Größe, Stufenzahl etc.).
- g) Unsicherheit darüber, ob und wie der auf der ICBM montierte Gefechtskopf zerstört werden kann. Folgeschäden müssten eventuell in der Abschusslösung mit einberechnet werden (APS 2004, xxx). Idealerweise würde ein Absturz auf Wohngebiete vermieden.

4.1.3. Abschuss und Flug der Abwehrrakete

Die Jagdphase beginnt nach Abschluss eines etwaigen Entscheidungsverfahrens mit dem Abschuss einer Abwehrrakete – einer mehrstufigen Rakete, die zuerst beschleunigt und dann einen Kollisionskörper aussetzt (APS 2004). Eine Abwehr noch in der Startphase stellt hohe Anforderungen an diese Abwehrrakete: Eine angreifende ICBM steigt nach dem Start bogenförmig mit einer typischen Beschleunigung von 3g – dem Dreifachen der Erdbeschleunigung – aufwärts und erreicht nach etwa 250 Sekunden Geschwindigkeiten um 7 Kilometer pro Sekunde (km/s).

Angenommen, die Abwehrrakete hätte maximal 200 Sekunden, um die ICBM zu erreichen, und hätte 500 Kilometer von ihrem Stationierungsort zur feindlichen Rakete zurückzulegen. Dies kann gelingen, wenn sie weniger als 60 Sekunden nach dem Start der ICBM aufsteigt, danach innerhalb der ersten 100 Sekunden konstant mit 3,5g beschleunigt und in den folgenden 100 Sekunden mit einer Endgeschwindigkeit von 3,33 Kilometer pro Sekunde fliegt. Hätte die Abwehrrakete die doppelte Distanz (1.000 Kilometer) zurückzulegen, so wäre auch die erforderliche Beschleunigung und Endgeschwindigkeit doppelt so hoch¹² (Garwin 2005).

Selbst eine Flugstrecke von „nur“ 500 Kilometern vom Stationierungsort zum Kollisionspunkt wäre in vielen Fällen immer noch kürzer, als die politische Landkarte erlaubt (APS 2004, xxix-xxx, Garwin 2005). Abwehrsysteme werden wohl in keinem Fall auf dem Staatsgebiet des potenziellen Angreifers selbst stationiert sein können; im Übrigen bestimmen die geopolitischen Rahmenbedingungen, welche Nachbarländer für eine Stationierung in Frage kommen. Bodengestützte Startphasenabwehrsysteme hängen daher im Einzelnen stark von der Fläche des Angreiferstaats, der vermutlichen Flugrich-

12 Nach dem Stand der Technik im Jahr 2004 wurden bisher keine Abfangraketen konstruiert, die diesen Spezifikationen gerecht werden (APS 2004, xxxv-xxxvi).

tung der angreifenden Rakete und ihrer Entfernung zum Ziel, sowie der Verfügbarkeit von anliegendem Territorium ab (APS 2004, xxix-xxx; CBO 2004).



4.1.4. Kollisionskörper

Nach dem Ausbrennen ihrer Antriebsstufen setzt die Abwehrrakete einen Kollisionskörper (engl.: „kill vehicle“) frei. Wegen der Unberechenbarkeit der Flugbahn einer ICBM während ihrer Schubphase müsste der Kollisionskörper in der Lage sein, die startende ICBM, die ja noch immer angetrieben wird, selbständig anzupeilen, um eine Kollision herbeizuführen. Grundbedingung dafür ist, dass die Abwehrrakete den Kollisionskörper auf eine Flugbahn befördern kann, die innerhalb der Reichweite der eigenen Lenksysteme des Kollisionskörpers liegt.

Beim „kill vehicle“ handelt es sich deshalb um eine Art kleine Rakete mit eigenem Düsenantrieb, die über sensible Sensoren und ein ausgefeiltes Lenksystem verfügt, um die Zielrakete anzusteuern. Die Sensoren beinhalten Infrarot- und Ultraviolett-detektoren, welche die Hitzestrahlung der Abgasfahne einer Rakete erfassen, ebenso wie LIDAR (ein Radar-ähnliches, auf Laserstrahlung beruhendes System), das dem Kollisionskörper das Anpeilen der Zielrakete ermöglicht. Mittels der eigenen Sensoren und der vom Kontrollzentrum am Boden übermittelten Daten muss der Abfangkörper den angreifenden Gefechtskopf auch innerhalb einer Wolke von Täuschzielen oder Resten der unteren Raketenstufen ausfindig machen können (Lewis, Pike, Postol 1999). Der Kollisionskörper müsste daneben zusätzliche Leistungsmerkmale aufweisen:

- a) Die Fähigkeit, zum geeigneten Zeitpunkt vom Anpeilen des Abgasstrahls der Trägerrakete auf das Anpeilen des kleineren und kühleren Raketenkörpers überzugehen.
- b) Eine ausreichende Beschleunigung. Am Anfang wäre das sieben- bis achtfache der Erdbeschleunigung (7-8g) erforderlich, zum Abschluss des Manövers bis zu 15g.
- c) Die hinreichende Fähigkeit – auch nach Trennung von der Abfangrakete – seine eigene Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung zu ändern, um seinen Kurs im Anflug auf das Ziel korrigieren zu können.
Dies stellt hohe Anforderungen an den Düsenantrieb des Kollisionskörpers. Laut den Verfassern des APS Berichts besitzt kein bisher entwickelter Kollisionskörper (Stand 2004) die erforderliche Beschleunigung oder Manövrierfähigkeit (APS 2004, xxxv-xxxvi).
- d) Eine ausreichend schnelle Reaktionszeit des Lenksystems von weniger als 100 Millisekunden (vgl. APS 2004, xxxii; Kleppner, Lamb, Mosher 2004).

Tritt eine Kollision schließlich wie geplant ein, so werden dank der hohen Kollisionsgeschwindigkeit im Idealfall sowohl der Gefechtskopf als auch die Abfangrakete völlig zerstört (Lewis, Pike, Postol 1999).

4.1.5. Startphasenabwehr - Fazit

Die Wirksamkeit der Startphasenabwehr ist durch die kurze Schubphase von Interkontinentalraketen sowie der praktisch begrenzten Geschwindigkeit von Abfangraketen beschränkt. Daraus folgt, dass in der Startphasenabwehr ausreichend Zeit nur für einen einzigen Defensivschuss bleibt, mit dem entweder eine einzelne Abwehrrakete oder eine Salve gleichzeitig gestarteter Abwehrraketen abgefeuert werden kann. Es bliebe keine Zeit, um einen Fehlschlag der Abwehraktion zu korrigieren (APS 2004, xxix-xxx). Die Treffwahrscheinlichkeit ließe sich erhöhen, wenn mehrere Abfangraketen auf ein Ziel abgeschossen würden. Nach manchen Berechnungen sollten deshalb an jedem Stationierungsort bis zu hundert Abwehrraketen gleichzeitig einsatzbereit sein (Lewis, Pike, Postol 1999).

Die Startphasenabwehr von langsam brennenden Flüssigstoff-ICBMs ist, solange nicht von Gegenmaßnahmen ausgegangen wird, unter bestimmten geographischen Bedingungen denkbar. Die wesentlich kürzeren Schubphasen von Feststoff-ICBMs hingegen stellen die Möglichkeit einer Startphasenabwehr grundsätzlich in Frage – unabhängig davon, wie oder wo die Abfangsysteme stationiert sind (APS 2004, xxxi). Auf welchen von beiden Fällen ein effektives Startphasenabwehrsystem ausgerichtet sein sollte, ist umstritten. Manche Experten argumentieren, dass die mögliche Verbreitung von fortschrittlicheren ICBMs mit einer kürzeren Brenndauer auch ein technisch und finanziell aufwändiges Abwehrsystem notwendig mache, das beide Raketentypen abwehren könne (APS 2004). Andere argumentieren, dass solche Feststoffraketen für alle technologisch nicht hoch entwickelten Staaten in ferner Zukunft lägen. Demnach wären auch bereits weniger aufwändige Abwehrsysteme, die nur Flüssigstoff-ICBMs abwehren könnten, geeignet, die Sicherheit der USA zu erhöhen (CBO 2004).

Im Jahr 2004 befanden die Verfasser des APS-Berichts, dass nur wenige der Komponenten, die für die Erreichung der Einsatzbereitschaft einer Startphasenabwehr benötigt werden, bereits verfügbar seien. Sie betrachteten es als unmöglich, innerhalb von zehn Jahren eine wirksame Startphasenabwehr einsatzbereit zu machen (APS 2004, xxxv-xxxvi). Das Congressional Budget Office schätzt die Entwicklungs-, Produktions- und Betriebskosten für 20 Jahre eines Startphasenabwehrsystems mit bodengestützten Abwehrraketen, welches gegen aus Nordkorea oder dem Iran abgefeuerte Flüssigtreibstoffraketen wirksam wäre, auf 16 bis 37 Milliarden US-Dollar (Preisniveau von 2004). Ein Abwehrsystem mit weltraumstationierten Abwehrraketen würde – so das CBO – sogar deutlich mehr kosten: 27 bis 78 Milliarden US-Dollar (CBO 2004).

4.2. Kinetische Abwehr in der Freiflugphase

Die Raketenabwehr in der Freiflugphase funktioniert wie die Startphasenabwehr nach dem „hit-to-kill“ Prinzip, also dem Abfangen von angreifenden Raketen durch direkte Kollisionen. Der Unterschied zur Startphasenabwehr liegt darin, dass nur der Gefechtskopf – nachdem er sich von der letzten Antriebsstufe seiner Trägerrakete gelöst hat – in seiner ballistischen Flugbahn im luftleeren Weltraum außerhalb der Atmosphäre abgefangen wird.

Zwei **Vorteile** der Freiflugphasenabwehr gegenüber der Startphasenabwehr sind hervorzuheben: Erstens bleiben Freiflugphasenabwehrsystemen bis zu 25 Minuten, um bedrohliche Gefechtsköpfe zu beobachten und abzufangen – so viel Zeit benötigt eine angreifende ICBM, um interkontinentale Distanzen von 10.000 Kilometern oder mehr zu überwinden. Zweitens ist die Bewegung eines Gefechtskopfs, der sich außerhalb der Atmosphäre in einer ballistischen Flugbahn befindet, berechenbarer als in der Startphase. Da er keinen Antrieb durch die Trägerrakete mehr erfährt und auch nicht durch Luftreibung gebremst wird, folgt seine Bahn einfachen physikalischen Gesetzen (Ballistik). Sein weiterer Flug ist daher leicht vorhersehbar. Damit ist das Abfangen von Raketen in der mittleren Flugphase wesentlich einfacher als das Abfangen in der Schubphase (APS 2004, xxix).

Die **Schwäche** der Freiflugphasenabwehr ist ihre starke Anfälligkeit gegenüber Gegenmaßnahmen der Angreifer. Der finanzielle und technologische Aufwand für die Umsetzung von wirkungsvollen Täuschungsmanövern – verglichen mit dem für die Konstruktion einer ICBM oder eines Abwehrsystems – ist sehr gering (Garwin 2005). Die Problematik abstürzender Gefechtsköpfe, die auf dem Territorium unbeteiligter Drittstaaten niedergehen könnten, ist ebenso unzureichend geklärt wie auch bei der Startphasenabwehr (s. Abschnitt 5.3.1).

Die USA planen, mit dem Ground-based Midcourse Defense (GMD) System anfliegende Sprengköpfe in der Freiflugphase abzufangen. Die zugehörigen Satelliten-Frühwarnsysteme sollen zu einem späteren Zeitpunkt im Weltraum stationiert werden. Tests des geplanten Systems fanden nach Einschätzung vieler Experten bisher jedoch nur unter idealisierten Bedingungen statt. Von 13 in den Jahren 1997 bis 2004 durchgeführten Tests war etwa die Hälfte erfolgreich (vgl. UCS 2004, S. 11-24; Neuneck, Rothkirch 2006, S. 20; Spiegel Online 2007a). Anlässlich des Tests am 28. September 2007 bilanzierte das US-Militär sechs von neun jüngeren Tests als erfolgreich¹³.

13 Vgl. <http://www.defensenews.com/story.php?F=3087167&C=america>. Gen. Henry Obering kündigte an, im Jahr 2008 erstmalig auch Tests durchzuführen, die Gegenmaßnahmen (Täuschmanöver) des Angreifers einschließen. So soll etwa die Fähigkeit des Abwehrsystems überprüft werden, zwischen Gefechtsköpfen und Attrappen zu unterscheiden.

Ein Bericht¹⁴ des Congressional Research Service für den US-Kongress äußert sich hingegen überwiegend kritisch zu Methodik, Ergebnissen und Effizienz der bisher durchgeführten Tests (CRS 2007).

Abbildung 4 verdeutlicht die Flugbahnen, die iranische Raketen einschlagen müssten, um verschiedene Ziele in den USA zu erreichen. Die kürzesten Bahnen zu vielen Zielen (z.B. Chicago) führen über russisches Territorium. Eine etwa in Polen gestartete US-Abfangrakete müsste daher zu Abwehrzwecken ebenfalls russisches Gebiet überfliegen. Für die russische Verteidigung wäre sie nur sehr schwer von einer angreifenden US-Rakete zu unterscheiden, und könnte entsprechende Reaktionen auslösen.



Abbildung 4: Flugbahnen von Raketen aus dem Iran zu ausgewählten Zielen in den USA. Die kürzesten Entfernungen ergeben sich auf Kreisen um den Erdmittelpunkt (Großkreisen). Daher führen die idealen Flugbahnen über die Arktis oder den Nordatlantik. Für Ziele an der US-Ostküste (New York, Washington) führt der Weg der angreifenden Raketen über Osteuropa, in allen anderen Fällen über russisches Territorium (Quelle: APS 2004, Abb. 2.1).

14 „The data on the U.S. flight test effort (...) remains mixed and ambiguous. There is no recognizable pattern to explain this record nor is there conclusive evidence of a learning curve over more than two decades of developmental testing. In addition, the test scenarios are considered by some not to be operational tests and could be more realistic in nature; they see these tests as more of a laboratory or developmental effort” (CRS 2007, S. 2). „ (...) a comprehensive and independent review of the entire record to date has not been undertaken and is warranted” (CRS 2007, S. 7).

4.3. Kinetische Abwehr in der Flugendphase

Bei der Abwehr in der Endphase soll der sich nähernde Gefechtskopf auf dem letzten Stück seiner Bahnkurve gestoppt werden – weniger als eine Minute vor Erreichen des Ziels. Da die angreifende Rakete hier bereits wieder in die Erdatmosphäre eingetreten ist, wäre ein Abwehrsystem weniger leicht durch Täuschkörper zu irritieren als in der Freiflugphase. Ballons und Attrappen würden aufgrund des Luftwiderstands schnell hinter dem Gefechtskopf zurückbleiben und wären so leicht zu identifizieren. Ein weiterer, politischer Vorteil liegt darin, dass das Abfangsystem im zu schützenden Land selbst stationiert wäre.

Die Endphasenabwehr weist jedoch auch vielfältige Beschränkungen auf. Es steht in dieser Phase nur noch sehr wenig Zeit zur Verfügung; daher müsste der Abfangkörper sehr schnell beschleunigt werden. Der Abfangpunkt sollte noch so weit vom Ziel entfernt sein, dass der Gefechtskopf im Zielgebiet keinen Schaden mehr anrichten kann – weder durch Absturz noch durch frühzeitige Detonation. So müsste ein Gefechtskopf in einer Höhe von mindestens 10 Kilometern abgefangen werden, sonst könnte allein die Hitze einer möglichen Detonation eine darunter liegende Stadt in Brand setzen (Garwin 2005). Gleichzeitig könnten die Abwehrraketen jedoch nicht weiter als etwa 50 Kilometer von der zu schützenden Stadt entfernt stationiert sein, da ein Endphasenverteidigungssystem erst nach Wiedereintritt des Gefechtskörpers in die Erdatmosphäre zwischen dem Gefechtskopf und eventuell mitgeführten Attrappen unterscheiden kann. Ein Endphasenabwehrsystem kann daher immer nur lokal wirken und müsste spezifisch zum Schutz einer Stadt oder einer kleinen Region ausgelegt sein (Garwin 2005).

Für einen möglichen Einsatz in der Endphasenabwehr wird oft das amerikanische Patriot-System genannt. Obwohl diese Systeme heute als einsatzfähig gelten und in Tests erfolgreich waren, sind seinerzeit Einsätze in echten Gefechtssituationen häufig fehlgeschlagen. So konnten beispielsweise die während des Golfkriegs 1991 eingesetzten Patriot-Raketen viele irakische Kurzstreckenraketen nicht abfangen, da diese im Anflug unerwartet zerbrachen und in Spiralenbewegungen abstürzten, so dass sie für die Abwehr nicht erfassbar waren (CBO 2004, S. 45). Allerdings muss selbst bei einem erfolgreichen Abschuss der ankommenden Rakete mit dem Herabfallen eines intakten oder zerstörten Gefechtskopfes oder mit seiner Detonation beim Abfangen gerechnet werden.

5. Herausforderungen

5.1. Zeit- und Distanz-Probleme

Eine grundlegende Schwierigkeit aller Raketenabwehrsysteme liegt darin, dass Abwehrraketen in den meisten Fällen nicht wesentlich höhere Geschwindigkeiten erreichen als die angreifenden Raketen. ICBMs mit Gefechtsköpfen fliegen – je nachdem wie technologisch fortgeschritten der Angreifer ist – mit Geschwindigkeiten von mindestens 5-6, möglicherweise aber auch 7 oder 8 Kilometern pro Sekunde¹⁵ (km/s). Abfangraketen können relativ leicht auf 6-7, mit einigem Aufwand auch auf 10 km/s beschleunigt werden, jedoch kaum mehr¹⁶. Hohe Endgeschwindigkeiten sind generell nur mit mehrstufigen Raketensystemen erreichbar, die unterwegs Ballast abwerfen. Diese haben jedoch tendenziell eine längere Startphase, wodurch wiederum für die Abwehr wertvolle Zeit verloren geht.

Die zu erwartenden Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Angreifer und Abwehrrakete sind demnach gering. Aufholjagden sind daher wenig erfolgversprechend. Vielmehr müssten Abwehrsysteme die angreifende Rakete von vorne (idealerweise frontal, oder zumindest in einem spitzen Winkel) treffen, um maximale Zerstörungskraft der Kollision zu erzielen¹⁷. Sie wären dafür möglichst entlang der (vorher nicht bekannten) Flugbahn der ICBM zu stationieren. Soll die Abwehr in der Startphase einsetzen, so müssen die Abwehrraketen außerdem nah am Abschussort des Angreifers stationiert sein, um die verbleibende Distanz überhaupt innerhalb weniger Minuten zurücklegen zu können; die APS-Studie nennt maximale Entfernungen von 300-1.000 Kilometern (APS 2004, S.88).

Um die sehr kurze zur Verfügung stehende Flugzeit auszunutzen, muss zuvor die Zeit für Berechnungs- und Entscheidungsprozesse auf ein Minimum beschränkt werden. Die verbleibende „Entscheidungszeit“ dürfte sich dennoch in der Größenordnung von nur weniger als einer Minute bewegen. Um nun das System nicht auf vollständig automatisierte Entscheidungsprozesse auslegen und damit praktisch auf alle verdächtigen Raketen feuern zu müssen, wären Möglichkeiten zu finden, militärische oder politische Ent-

15 Zum Vergleich: Große Verkehrsflugzeuge bewegen sich mit wesentlich geringeren Geschwindigkeiten von typischerweise etwa 900 km/h, entsprechend 0,25 Kilometer pro Sekunde.

16 Wiederum zum Vergleich: Die sog. „erste kosmische Geschwindigkeit“ liegt bei 7,9 km/s. Ab dieser Geschwindigkeit können Satelliten auf niedrigen Bahnen die Erde umkreisen, ohne wieder zu Boden zu fallen. Die „zweite kosmische Geschwindigkeit“ liegt bei 11,2 km/s. Objekte, die bis zu dieser Geschwindigkeit beschleunigt werden, haben genug Energie, um das Schwerefeld der Erde vollständig zu verlassen und z.B. zum Mond zu fliegen.

17 Hinzu kommt, dass das Herbeiführen der Kollision bei Frontal-Kurs einfacher ist. Sollen sich die beiden Raketen hingegen von der Seite (im rechten Winkel) treffen, dann würde wegen der hohen Geschwindigkeiten schon eine Zeitverzögerung von wenigen Tausendstel einer Sekunde dazu führen, dass sie aneinander vorbei fliegen.

scheidungsträger vor einem Abschuss zu konsultieren. Auch müssten zivile Raketenstarts vorher angemeldet und als ungefährlich in das Steuerungssystem der Raketenabwehr eingespeist werden.

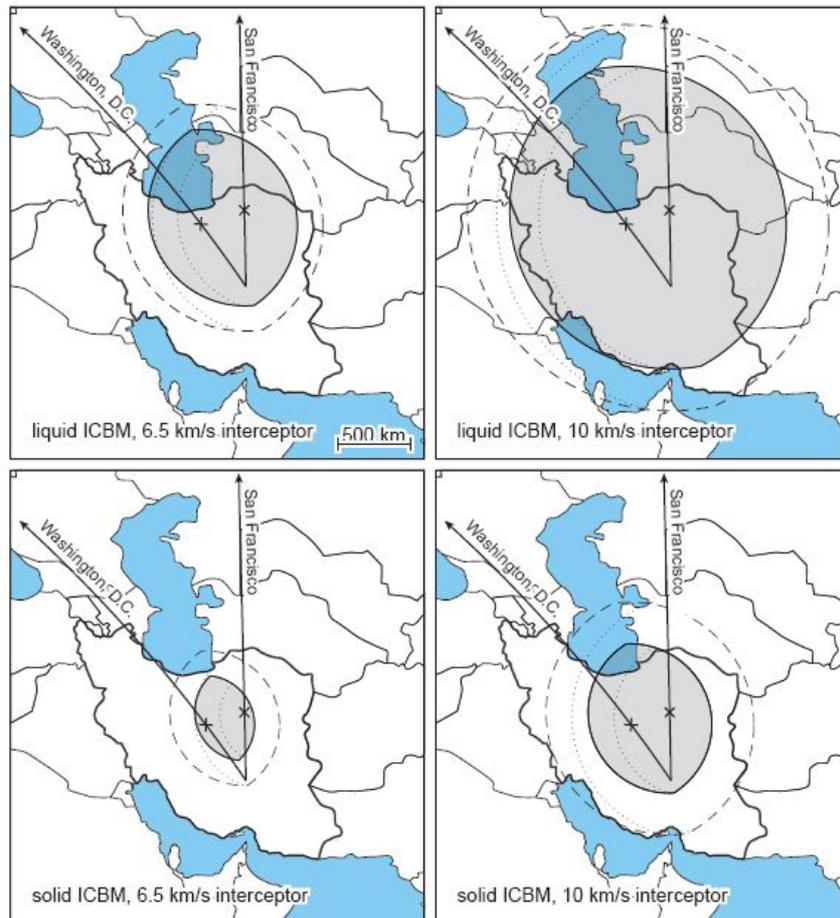


Abbildung 5: Darstellung der Zonen, innerhalb derer Abwehrraketen stationiert werden müssten, damit sie iranische Interkontinentalraketen in der Startphase rechtzeitig erreichen können. Das Kreuz auf den Flugbahnen bezeichnet den letzten möglichen Kollisionspunkt. Die beiden oberen Bilder gelten für angreifende Flüssigtreibstoff-Raketen, die unteren für schneller beschleunigende Feststoff-Raketen. Die beiden linken Bilder gelten für Abwehrraketen mit relativ geringer Endgeschwindigkeit (6,5 km/sec), die rechten für fortgeschrittene Abwehrraketen mit sehr hoher Endgeschwindigkeit (10 km/sec). Die grau bzw. gestrichelt angedeuteten möglichen Stationierungsflächen sind für jeweils einen einzelnen Abschussort, jedoch für alle denkbaren Ziele innerhalb der USA (ohne Alaska und Hawaii) berechnet. Soll das Abwehrsystem noch 30 Sekunden Entscheidungszeit ermöglichen, so sind die möglichen Stationierungsorte enger begrenzt (grau) als beim Verzicht auf jegliche Entscheidungszeit (gestrichelt). Je südlicher der Abschussort im Iran, desto schwieriger ist die Abwehr (Quelle: APS 2004, Abb. 5.16).

Die Beschränkungen der maximal zulässigen Entfernung insbesondere bei der Startphasenabwehr bedeuten, dass ein Abwehrsystem möglichst nah an einem potenziellen Angreiferstaat stationiert werden müsste – entweder in Nachbarländern (soweit die politi-

sche Landkarte dies erlaubt), oder küstennah auf See. Dabei ist die vermutete Schussrichtung zu berücksichtigen.

Während ein seegestütztes Abwehrsystem im Fall von Nordkorea möglich sein könnte, da ICBMs von Nordkorea in Richtung USA über den Pazifik fliegen würden, scheint ein seegestütztes Abwehrsystem im Fall von Iran aus geographischen Gründen wenig praktikabel¹⁸. Berücksichtigt man zusätzlich, dass der Abschussort innerhalb eines potenziellen Angreiferstaats vorher nicht immer bekannt sein wird, so ist ein Abwehrsystem nur dann effektiv, wenn es alle Teile des Landes gleichzeitig abdecken kann. Dies dürfte im Fall von kleinen Ländern (Nordkorea) möglich sein, wird jedoch bei mittelgroßen Ländern wie Iran problematisch (s. Abbildung 5).

5.2. Gegenmaßnahmen

5.2.1. Gegenmaßnahmen bei Startphasenabwehr

Ein Vorteil der Startphasenabwehr liegt darin, dass sie durch einige einfache Gegenmaßnahmen des Angreifers nicht gestört werden kann. So könnte das einfache Aussetzen von ballonartigen Gefechtskopfattrappen („decoys“) in der Startphase ein Abwehrsystem nicht irritieren, da diese schnell zurückbleiben würden, während das Triebwerk der Trägerrakete noch arbeitet.

Dennoch sind auch gegen die Startphasenabwehr wirksame Gegenmaßnahmen denkbar (APS 2004, xxxiv):

- a) Die Verwendung von Trägerraketen mit hoher Beschleunigung und dementsprechend kürzerer Schubphase, wodurch das Zeitfenster zur Zielerkennung und -erfassung verkürzt würde. Feststoffraketen mit kürzesten Schubphasen von nur 130 Sekunden wären in der Startphase praktisch nicht abzufangen.
- b) Manövrieren (d.h. unvorhergesehene und nicht berechenbare Änderungen der Flugbahn einer angreifenden Rakete).
- c) Die Aufteilung der Nutzlast, z.B. in mehrere Gefechtsköpfe, während der letzten Schubphase (vgl. Abbildung 6).
- d) Der Einsatz kleiner Attrappen und Tauschkörper mit eigenem Raketenantrieb, um Radar und Satelliten des Abwehrsystems abzulenken.
- e) Das Abschießen mehrerer angreifender Raketen in kurzem zeitlichem Abstand. Insbesondere der Abschuss von taktischen Raketen kurz vor dem Start der ICBM könnte die Kapazität des Abwehrsystems (Zahl der Abfangraketen) erschöpfen.

18 Da der Persische Golf im Süden des Landes liegt, wäre wohl allenfalls das Kaspische Meer für eine seegestützte Abwehr von Interesse. Der Zugang müsste jedoch mit den Anrainerstaaten abgestimmt werden.

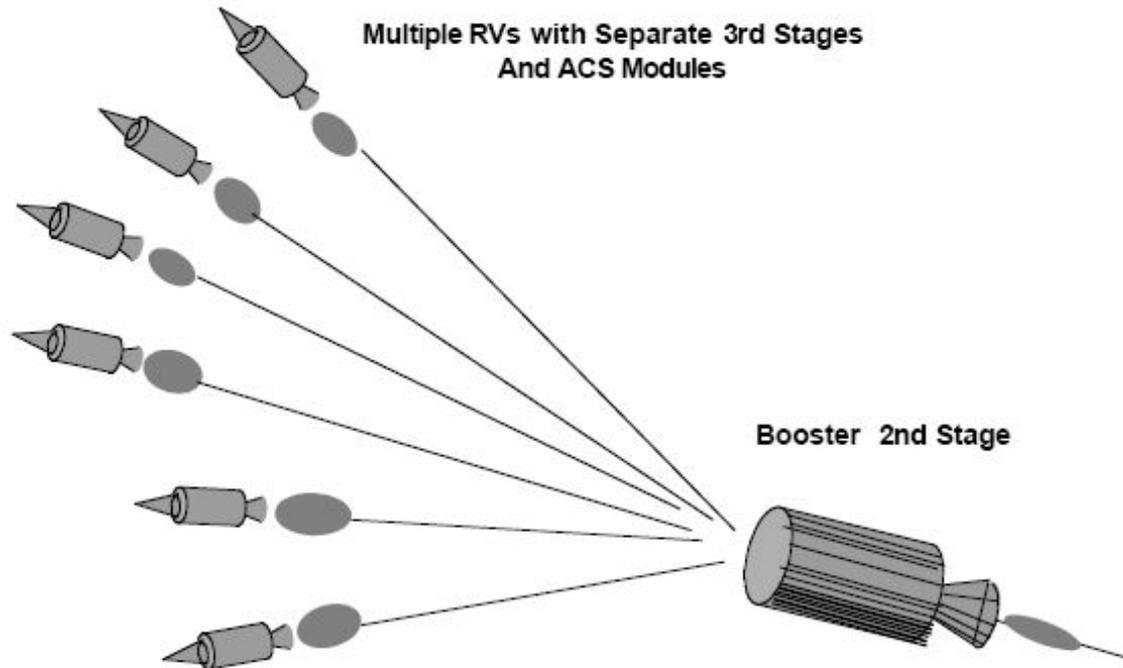


Abbildung 6: Konzept der Mehrfachsprengköpfe in der Startphase („multiple third stages“) (Quelle: APS 2004, Abb. 9.1 und 9.2).

5.2.2. Gegenmaßnahmen bei Freiflugphasenabwehr

Bei einem Abwehrsystem, das in der Freiflugphase ansetzt, ist das Spektrum der möglichen Gegenmaßnahmen des Angreifers deutlich größer. Allgemein existieren vier Gruppen von möglichen Gegenmaßnahmen (vgl. Lewis et al. 1999; UCS 2004; Garwin 2005):

1. Die Abwehr überfordern:

- Es werden mehr Raketen stationiert, als das Verteidigungssystem abfangen kann.
- Jede Rakete trägt mehr als einen Sprengkopf. Chemische oder biologische Kampfstoffe können auf viele kleine Submunitionsträger verteilt werden. Diese breiten sich dann entlang der ballistischen Flugbahn aus und können nicht mehr rechtzeitig einzeln abgeschossen werden.

2. Die Zielerkennung des Abwehrsystems stören oder täuschen:

- Stören des Radars.
- Gestaltung der Geometrie des Gefechtskopfs oder seiner Hülle, so dass sie weniger Radarwellen reflektieren.
Beschichten des Gefechtskopfes mit Materialien, die Radarwellen absorbieren (ähnlich der „stealth“ Technologie, bekannt von US-Bombern).
- Vorheriges Zerstören der gegnerischen Radaranlagen.
- Abschießen von Überwachungssatelliten.

3. Die Identifizierung von Gefechtsköpfen verhindern:
 - Einsatz von Attrappen und falschen Zielen, die etwa geheizt werden können, um einen Gefechtskörper zu simulieren.
 - Verstecken des Gefechtskopfes in einer von vielen metallbeschichteten Ballonattrappen („decoys“).
 - Verstecken des Gefechtskopfes hinter Schutzschirmen oder großen Ballons.
 - Ausstreuen von Düppeln (Metallstreifen, die Radarstrahlen reflektieren).
 - Verbergen des Gefechtskopfes in der Trümmerwolke der explodierten Trägerrakete. Das kann auch unbeabsichtigt passieren, die Trümmerwolke ist dann sehr schwer abzufangen.
4. Die Abwehrrakete und den Kollisionskörper in die Irre führen:
 - Unvorhersehbare Variationen der Flugbahn: Einbau von kleinen Korrekturtriebwerken zur Steuerung des Gefechtskopfes, um die Flugbahn unberechenbar zu gestalten („Haken schlagen“).

5.3. Kollateralschäden, Auswirkungen auf Umwelt und Drittstaaten

5.3.1. Verbleib von Gefechtsköpfen

Die **Startphasenabwehr** zielt darauf, die Trägerrakete vorzeitig zu zerstören und so eine Beschleunigung des Gefechtskopfes auf die nötige Endgeschwindigkeit zu verhindern. Ist sie erfolgreich, so wird auf diese Weise der Sprengsatz daran gehindert, sein eigentliches Ziel zu erreichen. Der Gefechtskopf ist jedoch nur locker mit der Endstufe der Trägerrakete verbunden. Wird sie zerstört, so kann der Gefechtskopf u. U. unbeschädigt bleiben. Er würde zwar nicht die ursprünglich geplante Flugbahn erreichen, könnte aber auf verkürzten ballistischen Bahnen noch erhebliche Strecken zurücklegen, bevor auch er auf den Erdboden zurückfällt. Dies geht aus zahlreichen Versuchen hervor (APS 2004, xxxiii). Es besteht daher die Möglichkeit, dass der Gefechtskopf oder auch einzelne Trümmerteile vorzeitig - auch auf dicht bevölkerte Gebiete - abstürzen. Dies würde in den meisten Fällen wohl nicht das Angreiferland selbst betreffen, sondern das Territorium anderer Staaten¹⁹. Soll ein solcher Absturz auf Drittstaaten verhindert werden, dann würde sich nach Berechnungen der APS das Abfangzeitfenster für die Startphasenabwehr auf fünf bis zehn Sekunden verkürzen. Das ohnehin komplizierte Abfangmanöver wäre damit noch einmal erheblich erschwert. Die Gefahr frühzeitig abstürzenden Materials könnte allerdings vermieden werden, wenn die Startphasenabwehr in der Lage wäre, zusätzlich zur Trägerrakete auch die transportierten Gefechtsköpfe zu zerstören. Die bisher bekannten Tests haben dies jedoch noch nicht als tatsächlich machbar nachgewiesen (APS 2004, xxxiii).

Darüber hinaus ist nicht ausgeschlossen, dass eine Kernwaffe auch nach Abschuss ihrer Trägerrakete noch detonieren kann. Die Frage, ob Kernwaffen durch eine Kollision in der Startphase unschädlich gemacht würden, etwa weil sie durch die Wucht des Zusammenstoßes pulverisiert werden, ist nach derzeitigem Wissensstand offen. Obwohl moderne Atombomben aufgrund hochkomplexer Zündmechanismen (vgl. Bröcker 1997, S. 230) bei einem Zusammenstoß theoretisch nicht detonieren sollten, sind aufgrund des hohen Risikos bisher keine Versuche zur praktischen Überprüfung unternommen worden (vgl. Die ZEIT 2007). Bei technologisch weniger fortgeschrittenen Atombomben sind die Auslöseprozesse weniger komplex. Ein einfacher barometrischer Auslöser, der ab einem gewissen Luftdruck zündet – wie er etwa in der Hiroshima-Bombe verwendet wurde –, könnte bei einem intakten Gefechtskopf weiterhin eine De-

19 Für den Absturz von Kernwaffen aus der Luft gibt es nur wenige historische Präzedenzfälle, aus denen die möglichen Folgen abgeschätzt werden könnten. Im Januar 1966 kollidierte über dem spanischen Küstenort Palomares ein US-Bomber mit einem Tankflugzeug, was zum Absturz von vier Plutoniumbomben in der Nähe der Ortschaft führte. Zwei der Bomben wurden intakt gefunden, eine dritte später im Mittelmeer geborgen. Die vierte hingegen zerbarst und verteilte giftiges Plutonium über anliegende Ländereien. Trotz aufwändiger Säuberungsmaßnahmen des US-Militärs ist bis heute umstritten, ob die Umgebung als saniert gelten kann (vgl. Lewis 1967; SZ 2006).

tonation auslösen. Wenn bei der Startphasenabwehr nur die Trägerrakete getroffen wird und nicht der Gefechtskopf, könnte also eine detonationsfähige Atombombe noch tausende Kilometer weit fliegen (vgl. Spiegel Online 2007b).

Abbildung 7 zeigt, wie weit – nach Berechnungen amerikanischer Physiker (APS 2004) – die Gefechtsköpfe iranischer Raketen fliegen können, wenn ihre Trägerraketen zu gegebener Zeit noch in der Startphase (2 bis 4 Minuten nach dem Abheben) zerstört werden.

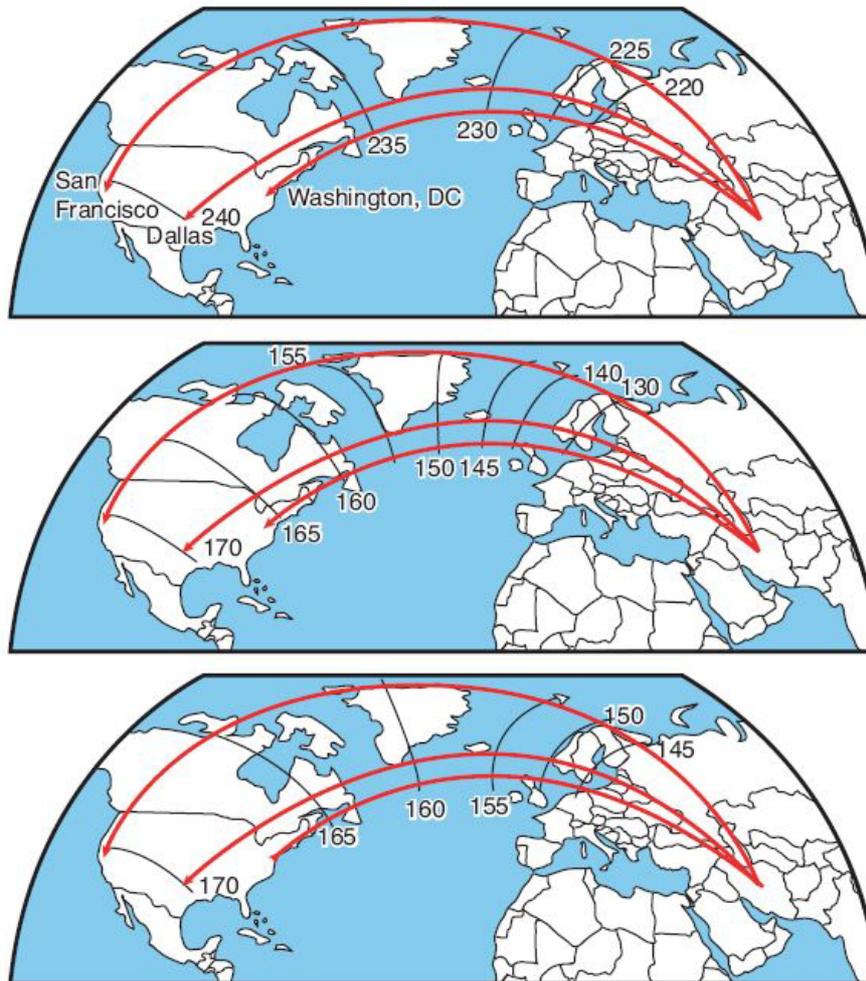


Figure 5.13. Ground tracks of illustrative trajectories of the liquid-propellant ICBM model L (top) and the solid-propellant ICBM models S1 (middle) and S2 (bottom) from Iraq to San Francisco, Dallas, and Washington, D.C. These trajectories were computed neglecting Earth's rotation. The effect of Earth rotation would shift their mid sections slightly further south. The contours that cross the ground tracks show where the munitions of the missiles would fall if their final stages burned normally until the time in seconds after launch that their thrust was terminated, as indicated by the numbers. For comparison, the full burn times of the liquid- and solid-propellant ICBMs would be 240 and 170 s, respectively.

Abbildung 7: Flugbahnen von Raketen aus dem Iran in die USA. Die Zahlen an den Kurven geben an, bis wohin ein Gefechtskopf fliegen würde, wenn seine Trägerrakete zur angegebenen Zeit (in Sekunden) nach dem Start abgeschossen würde. Oberes Bild: Flüssigtreibstoff-Raketen, untere Bilder: zwei Typen von Feststoff-Raketen (Quelle: APS 2004, Abb. 5.13).

Wie bei der Startphasenabwehr besteht auch bei einem erfolgreichen Abfangmanöver in der **Freiflugphase** prinzipiell die Gefahr, dass Bestandteile radioaktiver, chemischer oder biologischer Waffen auf bevölkerte Gebiete abstürzen. Durch die Wucht eines frontalen Zusammenstoßes zweier mit jeweils 20.000-30.000 km/h fliegender Raketen würde ein nuklearer Sprengkopf voraussichtlich in kleine Teile zertrümmert. Dies setzt allerdings voraus, dass der Kollisionskörper den Gefechtskopf selbst und nicht bloß eine mitgeführte Raketenstufe trifft (APS 2004, xxxiii). Das amerikanische Militär geht davon aus, dass die dann pulverisierten Teile beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre bis zur Unschädlichkeit verglühen werden. Öffentliche Informationen darüber, dass dies experimentell erforscht oder sogar in Tests nachgewiesen wurde, liegen allerdings derzeit nicht vor (Die ZEIT 2007). Zudem ist zu beachten, dass sich beim Verglühen – d.h. Erhitzen bis zum Verdampfen und teilweiser chemischer Oxidation – die kernphysikalischen Eigenschaften des Materials nicht ändern. Uran, Plutonium oder andere im Gefechtskopf enthaltene Isotope würden also radioaktiv bleiben. Für die Umwelt weitgehend unschädlich könnten sie jedoch dadurch werden, dass sie auf große Luftmengen verteilt werden und später in sehr geringer Konzentration auf weite Gebiete verstreut niedergehen.

Sollte die Pulverisierung bei der Kollision der beiden Raketen jedoch nicht gelingen, könnten Trümmerteile abstürzen und möglicherweise Schäden am Boden anrichten (vgl. Spiegel Online 2007a). Dies müsste nicht genau am Ort des Zusammenpralls geschehen. Abhängig von den Geschwindigkeiten der angreifenden und der abfangenden Rakete sowie deren Massen und dem Winkel des Zusammentreffens könnten Trümmerteile noch erhebliche Strecken weiterfliegen und dann entlang oder in der Nähe der ursprünglichen Flugbahn niedergehen.

Überdies könnten, da angreifende ICBMs ebenso wie die Abwehrraketen auf ähnlicher Höhe und mit vergleichbaren Geschwindigkeiten fliegen wie niedrig fliegende Satelliten, Trümmerteile auf deren Bahnen geschleudert werden. Diese Trümmer könnten die Erde noch mehrfach umrunden und dabei potenziell zu einer Gefahr für Kommunikations-, Wetter-, Umwelt- und Aufklärungssatelliten wie auch für die bemannte Raumfahrt werden.

6. Fazit

Die naturwissenschaftliche Literatur bewertet überwiegend die Chancen auf technische Realisierbarkeit eines zuverlässigen Schutzes gegen Interkontinentalraketen zurückhaltend bis skeptisch. In einer oft zitierten Analogie wird das Prinzip der Raketenabwehr mit dem Versuch verglichen, eine Gewehrkugel mit einer zweiten abzuschießen. Dieser Vergleich scheint durchaus geeignet, das Ausmaß der Schwierigkeiten bei der Realisierung eines Raketenabwehrsystems zu verdeutlichen. So haben die Kollisionskörper eines Raketenabwehrsystems zwar eigene Zielerkennungs- und Steuerungssysteme, so dass sie im Gegensatz zu Gewehrkugeln noch während des Anflugs ihren Kurs korrigieren und das Ziel selbständig ansteuern können. Allerdings fliegen Interkontinentalraketen mit erheblich höheren Geschwindigkeiten als Gewehrkugeln, was den Abschuss erschwert.

Die Realisierung von Raketenabwehrsystemen könnte durch zukünftige technische Fortschritte teilweise erleichtert werden. Dies gilt z.B. für verbesserte Sensoren oder schnellere Elektronik, die bei Entdeckung, Kommunikation, Flugbahnberechnungen, dem Kommando- und Kontrollsystem, der Zielerkennung und der Steuerung der Abfangrakete hilfreich sein können. Bisherige Tests wurden fast immer unter idealen Bedingungen (Wetter, Tageszeit, vorher bekannte Flugbahnen – vgl. UCS 2004) durchgeführt und waren dennoch nur teilweise erfolgreich. Dies deutet – auch wenn der militärischen Geheimhaltung unterliegende aktuelle technische Stand inzwischen weiter fortgeschritten sein dürfte – darauf hin, dass noch erhebliche technische Verbesserungspotenziale existieren.

Für ein System, das auch unter realistischen Bedingungen funktionieren soll, dürften grundlegende Schwierigkeiten bleiben, die in physikalischen Naturgesetzen (Weg-Zeit-Relationen, Beschleunigungsgesetze) begründet sind. Diese Herausforderungen liegen bei der **Startphasenabwehr** insbesondere in dem sehr kurzen Zeitfenster, das für den Start der Abwehrrakete bleibt. So können Abfangraketen in der verbleibenden Zeit kaum höhere Geschwindigkeiten erreichen als die angreifende Rakete. Daher müssen die Stationierungsorte des Abwehrsystems relativ nahe an den vermuteten Abschussorten der Angreifer liegen – meist im Bereich von wenigen 100 bis maximal 1.000 Kilometern. Dies ist in vielen Fällen näher, als die politische Landkarte erlaubt. In jedem Fall müsste ein Startphasensystem spezifisch gegen ein einzelnes Land ausgerichtet sein. Während ein seegestütztes System im Fall von kleinen Ländern möglicherweise funktionieren könnte, wird dies bereits bei mittelgroßen Ländern problematisch. Bei großen Ländern ist eine Startphasenabwehr (zumindest mit der derzeitigen Technik) grundsätzlich nicht aussichtsreich (APS 2004). Darüber hinaus ergibt sich aus der Kürze

der verfügbaren Zeit nur ein äußerst kleines Fenster für korrigierendes menschliches Handeln sowie für das Einholen einer Abschussgenehmigung auf politischer Ebene.

Bei einer **Abwehr in der Freiflugphase** stellen sich einige der zeitlichen und räumlichen Probleme in weniger scharfer Form. Allerdings müsste auch hier der Stationierungsort der Abwehrraketen in nicht allzu großer geographischer Entfernung von der (vorher nicht bekannten) Flugbahn der angreifenden Rakete liegen. Die Trefferwahrscheinlichkeit hängt dann noch von der Genauigkeit der Flugbahnmessung per Satellit und Radar sowie von der Zuverlässigkeit der Zielerkennungs- und Steuerungssysteme des Kollisionskörpers ab. Im Falle eines Fehlschlags ist ein zweiter Abwehrversuch meist nur dann noch möglich, wenn entlang der vermuteten Flugbahn mehrere Abwehrraketensysteme in größeren Abständen hintereinander stationiert sind. Unabhängig von diesen Einschränkungen liegt die grundlegende Herausforderung bei Freiflugphasen-Abwehrsystemen in ihrer Empfindlichkeit gegenüber Gegenmaßnahmen des Angreifers. Bereits einfache Methoden wie das Aussetzen von Täuschkörpern oder von mehreren Gefechtsköpfen könnten die Kapazitäten eines Abwehrsystems schnell überfordern. Technologisch fortgeschrittenere Angreifer könnten ihre Gefechtsköpfe so gestalten, dass sie per Radar sehr schwer zu detektieren wären. Schließlich könnte jeder Angreifer versuchen, vor Abschuss seiner Interkontinentalrakete die Radar- und Satellitensysteme des Abwehrsystems auszuschalten. Gegen die meisten dieser Gegenmaßnahmen ist bisher kein verlässlicher Schutz bekannt.

Ein umfassender „Schutzschild“ gegen eine größere Zahl von Interkontinentalraketen aus unterschiedlichen Ländern scheint daher schwer realisierbar. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass ein Abwehrsystem gegen einzelne Interkontinentalraketen aus bestimmten (kleineren) Staaten eines Tages mit hinreichender Trefferwahrscheinlichkeit funktionieren kann. Auf dem Weg dahin sind jedoch noch große technische Herausforderungen zu bewältigen. Auch bei weiter hohem Ressourceneinsatz für Forschung, Entwicklung und die Stationierung kann nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass ein Raketenabwehrsystem zukünftig verlässlichen Schutz vor Raketenangriffen bieten wird. Sollte das System sich jedoch als funktionsfähig erweisen, wird es zur Abwehr ballistischer Interkontinentalraketen geeignet sein - allerdings nicht zur Abwehr von Marschflugkörpern oder von Kurzstreckenraketen, die z.B. von küstennahen Schiffen abgefeuert werden könnten (APS 2004, xxxvi).

7. Literatur

- Altmann, Jürgen (1988). SDI for Europe? Technical Aspects of Anti-Tactical Ballistic Missile Defenses. Frankfurt: Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung, Forschungsbericht Nr. 3 / 1988.
- APS - American Physical Society (2004). Report of the American Physical Society Study Group on Boost-Phase Intercept Systems for National Missile Defense: Scientific and Technical Issues. Review of Modern Physics, Bd. 76, S1 (Oktober 2004). http://www.aps.org/about/pressreleases/upload/BPI_Executive_Summary_and_Findings.pdf.
- Bröcker, Bernhard (1997). dtv-Atlas Atomphysik. München: DTV.
- CBO - Congressional Budget Office (2004). Alternatives for Boost-phase Missile Defense. Im Internet: <http://www.cbo.gov/ftpdocs/56xx/doc5679/07-22-MissileDefense.pdf>.
- CRS – Congressional Research Service (2007). Kinetic Energy Kill for Ballistic Missile Defense: A Status Overview. Autor: Steven A. Hildreth. „Report for Congress“ des Wissenschaftlichen Dienstes (CRS) des US-Kongress. Im Internet: <http://www.fas.org/sgp/crs/weapons/RL33240.pdf>
- CSS – Center for Security Studies, ETH Zürich (2007). US-Raketenabwehr: Eine strategische Herausforderung für Europa. Im Internet: http://www.ssn.ethz.ch/forschung/css_analysen/details.cfm?id=29853
- Die ZEIT (2007). Auf Putins Leim. In: Die Zeit vom 29.03.2007. Im Internet: <http://www.zeit.de/2007/14/Raketenabwehr>.
- FAZ - Frankfurter Allgemeine Zeitung (2007). Amerika beharrt auf Raketenabwehr. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 5. April 2007, S. 7.
- Frühling, Stephan; Sinjen, Svenja (2007). Raketenabwehr, NATO und die Verteidigung Europas. Analysen & Argumente Nr. 40. Berlin: Konrad-Adenauer-Stiftung. Im Internet: http://www.kas.de/db_files/dokumente/analysen_und_argumente/7_dokument_dok_pdf_10599_1.pdf
- Garwin, Richard (2005). Löcher im Raketenschild. In: Spektrum der Wissenschaft, Januar 2005, S. 66-74.
- Kleppner, David; Lamb, Frederik K.; Mosher, David E. (2004). Boost-Phase Defense Against Intercontinental Ballistic Missiles. In Physics Today, Bd. 57 (1), S. 30-35 (Januar 2004). Im Internet: <http://www.aip.org/pt/vol-57/iss-1/p30.html>.
- Kopec, Grant (2006). Technical Obstacles and Limitations to the Implementation of Effective Midcourse Ground-based Missile Defense. In: Defense & Security Analysis, Bd. 22 (1), S. 89-94 (März 2006).
- Lewis, Flora (1967). H-Bombe vermißt – Dokumentarbericht über den Atomunfall von Palomares. Gütersloh, C. Bertelsmann Verlag, 1967.
- Lewis, George N.; Pike, John; Postol, Theodore, A. (1999). Warum eine landesweite Raketenabwehr nicht funktioniert. In: Spektrum der Wissenschaft, November 1999, S. 66-68.
- Neuneck, Götz (2001). Von National Missile Defense zu Global Missile Defense? Technische Machbarkeit und Ansätze der Bush-Administration. In: Journal of International Peace and Organization, Bd. 76, S. 391-434.
- Neuneck, Götz; Rothkirch, André (2006). Weltraumbewaffnung und Optionen für präventive Rüstungskontrolle. Osnabrück: Deutsche Stiftung Friedensforschung (DSF).
- Nilsen, Joseph (1994). Legacy of the X-ray Laser Program. Lawrence Livermore National Laboratory. Im Internet: http://www.llnl.gov/etr/pdfs/11_94.2.pdf.

- Rühle, Michael (2007). Raketen, Russland, Rücksichtnahmen. Im Internet: http://www.dgap.org/midcom-serveattachmentguid-e87e5760612911dca00907e156174a3b4a3b/2007-09-12_erw_ruehle_www.pdf
- Spiegel Online (2007a). Experten streiten über Gefahr abstürzender Trümmer. Im Internet: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,474932,00.html>.
- Spiegel Online (2007b). Experten warnen vor Bushs löchrigem Raketenschild. Im Internet: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,475495,00.html>.
- Stupl, Jan; Neuneck, Götz (2005). Laser als Waffensysteme? Hamburg: ISFH Working Paper Nr. 9/2005. Im Internet: <http://www.ifsh.de/IFAR/pdf/wp9.pdf>
- SZ - Süddeutsche Zeitung (2006). Das Geheimnis von Palomares. In: Süddeutsche Zeitung vom 14.01. 2006, S. 3.
- Tagesschau.de (2007). Europa ist doch auch bedroht. Im Internet: http://www.tagesschau.de/aktuell/meldungen/0,,OID6528082_,00.html.
- Thränert, Oliver (2007). Eine Raketenabwehr hilft Europa weiter. In: Die Welt vom 22.03.2007.
- UCS – Union of Concerned Scientists (2004). Technical Realities: An Analysis of the 2004 Deployment of a U.S. National Missile Defense System. http://www.ucsusa.org/global_security/missile_defense/technical-realities-national-missile-defense-deployment-in-2004.html.